

Analisis Energi Dan Ekonomi Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik (SPKL) Berbasis Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Brainvendra Widi Dionova^{1*}, Imammudin¹, Mauludi Manfaluthy¹, Hamzah¹, Arief Jaenul¹, Legenda Prameswono Pratama¹, Dwiana Hendrawati², Muhammad Irsyad Abdullah³

¹Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik & Ilmu Komputer, Universitas Global Jakarta

²Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Semarang, Jl. Prof H, Sudarto, SH., Tembalang, Kotak Pos 6199/SMS, Semarang 50275

³ Faculty of Information Sciences & Engineering, Management & Sciences University, Shah Alam, Malaysia
email: ¹brainvendra@jgu.ac.id

Abstract — Energy and sustainability are priorities in developing electric vehicle charging infrastructure, particularly to reduce carbon emissions and save operational costs. Solar Power Plants (PLTS) offer a potential renewable energy solution, although they still face challenges such as fluctuating efficiency due to weather changes and high initial investment costs. This study aims to analyze the efficiency and performance of Solar-Powered Electric Vehicle Charging Stations (SPKL). Measurements were taken on the voltage, current, and electrical power generated by the solar panels, which are transmitted to the Maximum Power Point Tracking (MPPT) system to charge electric vehicle batteries. Economic analysis was conducted using the Payback Period (PBP), Net Present Value (NPV), and Internal Rate of Return (IRR) methods. The results showed that the MPPT efficiency was 61.47%, with fluctuations due to variations in sunlight intensity. Nevertheless, the PLTS system was able to generate sufficient power to charge electric vehicle batteries, although its performance slightly decreased during cloudy weather. Additionally, the use of PLTS provided annual operational cost savings of Rp 87,357.21 compared to conventional electricity from PLN. However, in terms of economic feasibility, the PBP calculation indicated a 20-year payback period. Furthermore, the NPV calculated at -Rp 4,118,596.8 and an IRR of -0.47% indicated that the project is not yet financially viable within a 20-year period. Despite this, PLTS still offers significant environmental benefits, and system optimization and the development of more efficient battery technology are needed to improve long-term performance and the economic viability of this project.

Abstrak --- Energi dan keberlanjutan menjadi prioritas utama dalam pengembangan infrastruktur pengisian kendaraan listrik, terutama untuk mengurangi emisi karbon dan menghemat biaya operasional. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah solusi energi terbarukan yang potensial, meskipun masih menghadapi tantangan seperti fluktuasi efisiensi akibat perubahan cuaca dan tingginya biaya investasi awal. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efisiensi dan kinerja Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik (SPKL) berbasis PLTS. Pengukuran dilakukan pada tegangan, arus, dan daya listrik yang dihasilkan oleh panel surya, yang diteruskan ke sistem Maximum Power Point Tracking (MPPT) untuk mengisi baterai kendaraan listrik. Analisis ekonomi dilakukan dengan menggunakan metode Payback Period (PBP), Net Present Value (NPV), dan Internal Rate of Return (IRR). Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi rata-rata MPPT sebesar 61,47%, dengan fluktuasi yang disebabkan oleh variasi intensitas sinar matahari. Meskipun demikian, sistem PLTS mampu menghasilkan daya yang cukup untuk mengisi baterai kendaraan listrik, meskipun kinerjanya sedikit menurun saat cuaca mendung. Penggunaan PLTS juga memberikan penghematan biaya operasional tahunan sebesar Rp 87.357,21 dibandingkan

penggunaan listrik konvensional dari PLN. Namun, dari segi kelayakan ekonomi, perhitungan PBP menunjukkan waktu pengembalian investasi selama 20 tahun. Selain itu, NPV yang dihitung sebesar -Rp 4.118.596,8 dan IRR -0,47% mengindikasikan bahwa proyek ini belum layak secara finansial dalam jangka waktu 20 tahun. Meskipun demikian, PLTS tetap menawarkan manfaat lingkungan yang besar, dan optimalisasi sistem serta pengembangan teknologi baterai yang lebih efisien diperlukan untuk meningkatkan performa dan kelayakan ekonomi jangka panjang proyek ini.

Kata Kunci – Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik (SPKL), Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), efisiensi, biaya operasional, kelayakan investasi.

***) penulis korespondensi:** Brainvendra WD

Email: brainvendra@jgu.ac.id

I. PENDAHULUAN

Perubahan iklim telah menjadi isu global yang mendesak dalam beberapa dekade terakhir, dengan emisi gas rumah kaca dari penggunaan bahan bakar fosil sebagai kontributor utama pemanasan global[1]. Di Indonesia, sektor transportasi menjadi salah satu penyumbang emisi karbon terbesar karena konsumsi bahan bakar fosil yang meningkat seiring pertumbuhan kendaraan bermotor. Untuk mengatasi masalah ini, pemerintah Indonesia telah meluncurkan berbagai program, termasuk penggunaan energi terbarukan dan pengembangan kendaraan listrik [2]. Dalam mendukung pertumbuhan kendaraan listrik, ketersediaan Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU) menjadi penting. Menurut proyeksi, jumlah Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai (KBLBB) akan mencapai 254.181 unit pada tahun 2030, sementara jumlah SPKLU diproyeksikan mencapai 24.720 unit[3]. Oleh karena itu, pengembangan SPKLU yang efisien dan memanfaatkan energi terbarukan, seperti Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), sangat dibutuhkan untuk mendukung transisi ke energi bersih[3], [4], [5].

Pemerintah Indonesia melalui Keputusan Menteri ESDM No. 182.K/TL.04/MEM.S/2023 telah menetapkan tarif pengisian listrik sebagai insentif bagi badan usaha untuk memperbanyak SPKLU[6]. Langkah ini diambil untuk mempercepat transisi Indonesia menuju energi yang lebih bersih, mengingat infrastruktur yang mendesak seiring peningkatan adopsi kendaraan listrik. Pemanfaatan energi

terbarukan untuk SPKLU, seperti PLTS, dapat mengurangi ketergantungan pada energi fosil dan mengurangi emisi karbon. Penelitian menunjukkan bahwa dengan desain yang tepat, SPKLU berbasis PLTS dapat mencapai efisiensi energi yang lebih tinggi dibandingkan metode konvensional [7]. Pauzi juga membahas pengembangan prototipe SPKLU dengan teknologi Boost Converter untuk mempercepat waktu pengisian dan menjaga kestabilan tegangan, yang penting untuk efisiensi pengisian daya [8].

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan salah satu solusi energi terbarukan yang menjanjikan. Sukmawati menunjukkan bahwa PLTS berkapasitas besar, seperti yang dirancang untuk menghasilkan 10 MW di Yogyakarta, dapat mengurangi biaya operasional jangka panjang[9]. Selain itu, Windarta menekankan pentingnya integrasi PLTS dalam lingkungan pendidikan untuk mendukung program hemat energi dan meningkatkan kesadaran akan pentingnya energi terbarukan[10]. Perkembangan kendaraan listrik terus meningkat didorong oleh kebijakan pemerintah, seperti Peraturan Presiden No. 55 tahun 2019 yang mengatur program percepatan distribusi kendaraan listrik berbasis baterai. Kendaraan listrik memiliki keunggulan signifikan, yaitu ramah lingkungan dan efisien secara energi [11],[12]. Meskipun kendaraan listrik tidak menghasilkan emisi CO₂ langsung, jika energi yang digunakan masih berasal dari bahan bakar fosil, emisi gas rumah kaca tetap menjadi masalah. Oleh karena itu, PLTS menjadi solusi penting dalam pengisian kendaraan listrik untuk mengurangi emisi dan menjaga ketersediaan bahan bakar fosil[13].

Dari segi ekonomi, PLTS menawarkan keunggulan signifikan dalam jangka panjang. Penelitian tentang sistem PLTS di ITN Malang menemukan bahwa biaya operasional dan pemeliharaan PLTS lebih rendah dibandingkan pembangkit listrik konvensional, meskipun investasi awalnya relatif tinggi [7]. Mahesa juga menunjukkan bahwa insentif pemerintah dan penurunan biaya teknologi dapat mempercepat pengembalian investasi PLTS, menjadikannya solusi energi yang layak untuk masa depan[13].

Berdasarkan latar belakang tersebut, pengembangan SPKLU yang ramah lingkungan dan efisien sangat penting untuk mendukung pertumbuhan kendaraan listrik di Indonesia. Pemanfaatan PLTS sebagai sumber energi utama bagi SPKLU menawarkan solusi inovatif dan berkelanjutan dalam menghadapi tantangan lingkungan dan efisiensi energi. Oleh karena itu, penelitian ini akan fokus pada analisis energi dan ekonomi dalam implementasi SPKLU berbasis PLTS di Jakarta Global University. Dengan demikian, diharapkan penelitian ini dapat mengidentifikasi potensi efisiensi energi dan kelayakan ekonomi dari penerapan teknologi ini, serta memberikan kontribusi nyata terhadap pengembangan infrastruktur energi terbarukan di Indonesia.

II. PENELITIAN YANG TERKAIT

Penelitian yang terkait dengan pengembangan Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU) berbasis Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) telah banyak dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Penelitian-penelitian ini

memberikan dasar yang kuat untuk mengembangkan solusi yang lebih efisien dan berkelanjutan, serta menawarkan wawasan yang relevan bagi pengembangan SPKLU di lingkungan urban. Salah satu penelitian yang relevan adalah studi tentang Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya di Rumah Kebun Desa Ammat Kabupaten Kepulauan Talaud, yang menunjukkan bahwa PLTS stand-alone dapat menghasilkan total energi harian sebesar 3.143 kW. Namun, penelitian ini juga mengungkapkan kelemahan dari sistem yang bergantung sepenuhnya pada energi matahari, terutama ketika cuaca buruk atau mendung[13]. Berbeda dengan penelitian ini, penelitian saat ini akan memanfaatkan sistem hybrid, yang menggabungkan PLTS dengan jaringan listrik PLN untuk memastikan kontinuitas daya.

Penelitian lainnya yang dilakukan di Fakultas Teknik UHAMKA mengembangkan PLTS hybrid dengan total daya yang dihasilkan mencapai 56.723 kWp, menggunakan 92 panel surya[7]. Meskipun efisien, penelitian ini terbatas pada aplikasi yang membutuhkan kapasitas daya lebih rendah daripada SPKLU, yang membutuhkan lebih banyak energi untuk mendukung pengisian cepat kendaraan listrik. Penelitian Perancangan dan Analisis Pembangkit Listrik Tenaga Surya Kapasitas 10 MW On-Grid di Yogyakarta oleh Sukmajati dan Hafidz juga memberikan wawasan penting. Dengan kapasitas besar, yakni 10 MW, PLTS ini mampu menghasilkan 14.237 MWh listrik per tahun, tetapi membutuhkan lahan yang sangat luas, yakni 6,4 hektar, dan biaya perancangan yang tinggi. Penelitian ini memberikan referensi untuk pengembangan PLTS skala besar, meskipun dalam penelitian SPKLU yang dilakukan saat ini, fokus utama adalah mengoptimalkan ruang dan biaya untuk aplikasi perkotaan yang lebih terbatas[9].

Selain itu, Penelitian Windarta di SMA Negeri 6 Surakarta menunjukkan bahwa PLTS skala kecil dapat diimplementasikan di sekolah dengan biaya investasi yang rendah, meskipun waktu balik modalnya cukup lama, yakni 12 tahun. Penelitian ini menunjukkan pentingnya efisiensi dalam pengembangan PLTS, yang relevan dengan fokus penelitian saat ini untuk mempercepat pengembalian investasi dalam implementasi SPKLU berbasis PLTS[10]. Selanjutnya, penelitian Studi Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Sistem Hybrid Sebagai Sumber Energi Alternatif oleh Mahesa menunjukkan bahwa sistem hybrid menghasilkan daya 707,4121 Wh per hari dengan 11 panel surya, meskipun biayanya cukup tinggi. Dalam konteks SPKLU, penggunaan sistem hybrid juga relevan untuk meminimalkan ketergantungan pada jaringan listrik PLN[13].

Penelitian oleh Imammudin (2022) berfokus pada pengembangan SPKLU berbasis PLTS untuk sepeda motor listrik, yang berhasil menghasilkan energi yang cukup besar dengan biaya investasi yang terjangkau. Namun, penelitian tersebut terbatas pada sepeda motor listrik. Dalam penelitian ini, skala aplikasi diperluas untuk mendukung berbagai jenis kendaraan listrik, termasuk mobil listrik, dengan memperhatikan efisiensi energi dan analisis kelayakan ekonomi yang lebih komprehensif. Perbedaan signifikan antara penelitian-penelitian sebelumnya dan penelitian ini adalah penggunaan teknologi terbaru seperti Maximum Power Point

Tracking (MPPT) untuk mengoptimalkan efisiensi PLTS, serta fokus pada penerapan di lingkungan perkotaan dengan tingkat mobilitas tinggi. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk memberikan solusi energi berkelanjutan yang lebih efisien bagi pengembangan SPKLU berbasis PLTS, yang berperan penting dalam mendukung transisi menuju energi bersih di Indonesia.

III.METODE PENELITIAN

A. Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan jenis penelitian eksperimen dengan pendekatan kuantitatif. Penelitian eksperimen dipilih untuk mengukur pengaruh variabel independen (PLTS) terhadap variabel dependen (kinerja SPKL) dalam kondisi terkontrol. Pendekatan kuantitatif digunakan karena penelitian ini fokus pada pengumpulan dan analisis data numerik terkait tegangan, arus, daya, dan efisiensi sistem pengisian. Data tersebut akan dianalisis secara statistik untuk mengevaluasi kinerja sistem di lingkungan penempatan panel surya.

B. Fokus Penelitian

Fokus utama penelitian ini adalah:

1. Perancangan Sistem PLTS: Pemilihan komponen seperti panel surya, inverter, dan baterai.
2. Pengukuran Kinerja Sistem: Mengukur tegangan, arus, daya, efisiensi pengisian, dan State of Charge (SOC) baterai.
3. Analisis Kelayakan Ekonomi: Menghitung kelayakan investasi menggunakan Payback Period (PBP), Net Present Value (NPV), dan Internal Rate of Return (IRR).
4. Evaluasi Efisiensi Sistem: Mengevaluasi konversi energi surya menjadi listrik dan faktor-faktor yang memengaruhi efisiensinya.

C. Peralatan dan Bahan

Berikut ini adalah tabel peralatan dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini:

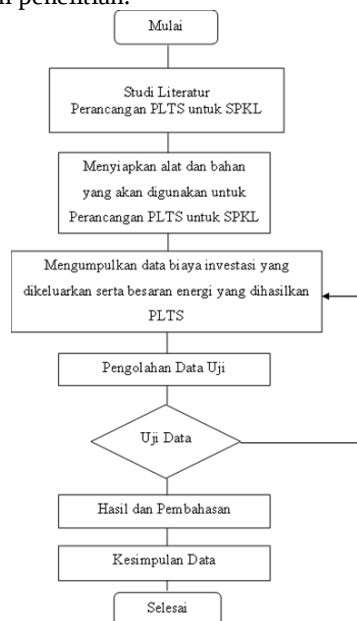
Tabel 1 Alat dan Bahan

No	Peralatan/Bahan	Spesifikasi	Fungsi
1	Panel Surya (Monocrystalline)	150 WP, 18.3V (Vmp), 8.13A (Imp)	Menghasilkan listrik dari cahaya matahari
2	Baterai (Lead Acid)	12V, 50Ah, 3 buah	Menyimpan energi listrik
3	Inverter (Pure Sine Wave)	12V input, 220V output, 1000W	Mengubah arus DC menjadi AC
4	MPPT	Mengoptimalkan daya dari panel surya	Meningkatkan efisiensi energi
5	Amperemeter & Voltmeter	Alat pengukur arus dan tegangan	Monitoring performa sistem
6	Kabel dan Konektor	Kabel tembaga dengan isolasi PVC	Menghubungkan komponen-komponen sistem

7	Struktur Penyangga Panel	Aluminium/ besi	Menopang panel surya agar stabil
8	Perangkat Pengukur	Multimeter, Data Logger	Mengukur dan mencatat data performa sistem
9	Software Analisis Data	Microsoft Excel	Menganalisis data hasil pengukuran

D. Alur Penelitian

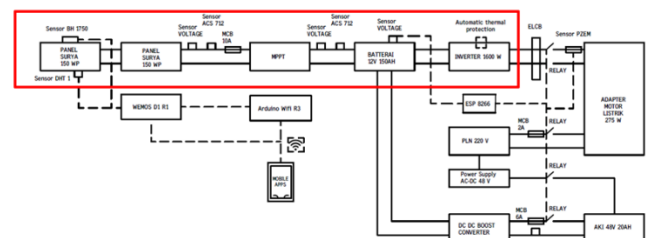
Berikut ini adalah flowchart yang menunjukkan tahapan dalam penelitian:



Gambar 1 Diagram Alur

1. Mulai: Perencanaan awal dan penetapan tujuan penelitian.
2. Studi Literatur: Mengkaji literatur terkait PLTS dan teknologi pengisian kendaraan listrik.
3. Persiapan Alat dan Bahan: Pemilihan dan persiapan komponen utama untuk PLTS.
4. Pengumpulan Data: Mengumpulkan data teknis dari sistem PLTS.
5. Pengolahan dan Uji Data: Analisis data dan pengujian hasil eksperimen.
6. Hasil dan Pembahasan: Analisis dan interpretasi hasil uji.
7. Kesimpulan: Menyusun kesimpulan dari penelitian.

E. Perancangan Alat Sistem Pengisian Kendaraan Listrik (SPKL) Tenaga Surya



Gambar 2 Blok Perancangan SPKL

Gambar diatas menggambarkan konfigurasi sistem Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik (SPKL) berbasis Pembangkit Listrik

Tenaga Surya (PLTS), yang terdiri dari panel surya, MPPT, baterai, inverter, serta sistem kontrol dan monitoring. Energi dari panel surya dioptimalkan oleh MPPT, disimpan dalam baterai, dan dikonversi dari arus DC ke AC oleh inverter untuk pengisian daya kendaraan listrik. Sistem kontrol dan monitoring memastikan operasi berjalan efisien dan aman, sehingga seluruh proses pengisian daya dapat dilakukan secara optimal dengan memanfaatkan energi terbarukan.

1. Panel Surya

Panel surya yang digunakan adalah *Solar Panel Monocrystalline* 150 WP, dengan dua panel yang dipasang paralel menghasilkan daya total 300 Watt. Spesifikasi panel surya dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2 Spesifikasi Panel Surya

Spesifikasi	Nilai
Rated Maximum Power (Pmax)	150 Wp
Tolerance	±3%
Voltage at Pmax (Vmp)	18.3 V
Current at Pmax (Imp)	8.13 A
Open-Circuit Voltage (Voc)	22 V
Short-Circuit Current (Isc)	8.94 A
Maximum System Voltage	1000 V
Cell Technology	Mono-crystal
Dimension (mm)	1480x680x35

2. Baterai

Baterai yang digunakan adalah *Lead Acid Battery (accu)* dengan spesifikasi 12V, 50Ah per baterai, dan tiga buah baterai dipasang sehingga menghasilkan kapasitas total 150Ah. Kapasitas baterai dihitung menggunakan rumus:

$$(Ah = I \times t) \dots \dots \dots 1$$

3. Inverter

Inverter yang digunakan adalah *Power Inverter Pure Sine Wave* 12V DC to 220V AC, dengan daya maksimum 1000W dan 1600W. Inverter ini dilengkapi dengan *Automatic Thermal Protection* untuk mencegah overheating dan overload. Spesifikasinya adalah sebagai berikut:

- Input voltage: 12V DC
- Output voltage: 220V AC
- Frequency: 50Hz
- Max Output Power: 1000W
- Continuous Power: 500W

4. Prototype

Prototype sistem ini meliputi pengukuran data seperti arus listrik, voltase, daya (power), dan State of Charge (SOC) dari baterai. Spesifikasi sistem akuisisi data ditampilkan pada tabel berikut:

Tabel 3 Spesifikasi Akhir Sistem Akuisisi Data

Spesifikasi	Keterangan
Sampling Rate	120 Hz
Massa	±100 kg
Ukuran Luar	1.5m x 1.4m x 2.2m
Pengencang	Screw
Konsumsi Tegangan	220 V

5. Gambar Prototype

Prototype sistem pengisian kendaraan listrik berbasis Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dapat dilihat pada Gambar berikut.



Gambar 3 Prototype SPKL berbasis Pembangkit Listrik Tenaga Surya

F. Teknik Pengumpulan Data

Data dikumpulkan melalui dua sumber utama:

1. Data Primer: Pengukuran langsung (tegangan, arus, daya) dengan voltmeter, amperemeter, dan wattmeter. Pengukuran dilakukan setiap 30 menit selama operasional.
2. Data Sekunder: Studi literatur dan dokumentasi dari sumber-sumber terpercaya terkait PLTS dan SPKL.

G. Teknik Analisis Data

Data dianalisis untuk mengevaluasi efisiensi sistem PLTS, membandingkan biaya penggunaan energi dari PLTS dengan listrik PLN, dan melakukan analisis kelayakan ekonomi. Beberapa rumus utama yang digunakan adalah:

1. Efisiensi Sistem PLTS: Menghitung rasio antara daya yang dihasilkan oleh panel surya dan daya yang diterima oleh baterai.

$$\text{Efisiensi MPPT}(\%) = \left(\frac{\text{Daya yang Disalurkan ke Baterai}}{\text{Daya yang Dihasilkan oleh Panel Surya}} \right) \times 100\% \dots 2$$

2. Biaya Operasional Bulanan

$$\text{Harga per kWh} = \frac{\text{Biaya Operasional Bulanan}}{\text{Total Energi yang Dihasilkan dalam Sebulan}} \dots \dots \dots 3$$

3. Analisis Kelayakan Ekonomi: Menggunakan metode PBP, NPV, dan IRR untuk mengevaluasi investasi PLTS.

Payback Period (PBP):

Payback Period dihitung untuk menentukan berapa lama waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan investasi awal melalui penghematan biaya yang diperoleh dari penggunaan PLTS. Rumus untuk menghitung PBP adalah:

$$\text{PBP} = \frac{\text{Nilai Investasi}}{\text{Cash Flow}} \times 1 \text{ tahun} \dots \dots \dots 4$$

Net Present Value (NPV):

$$\text{NPV} = \sum \frac{CF_t}{(1+r)^t} - \text{Nilai Investasi}$$

Internal Rate of Return (IRR):

$$\text{IRR} = r_1 + \frac{\text{NPV}(1)}{\text{NPV}(2) + \text{NPV}(2)} \times r_2 - r_1 \dots \dots \dots 5$$

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Energi yang Dihasilkan oleh SPKL Berbasis Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Penelitian ini menganalisis energi yang dihasilkan oleh Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik (SPKL) berbasis Pembangkit

Listrik Tenaga Surya (PLTS) dengan mengukur tegangan, arus, serta daya listrik yang dihasilkan oleh panel surya dan diteruskan ke sistem Maximum Power Point Tracking (MPPT). Pengukuran dilakukan setiap 30 menit dari pukul 09.00 hingga 16.00 selama tiga hari percobaan, dengan kondisi cuaca bervariasi. Hasil menunjukkan adanya fluktuasi tegangan dan arus yang disebabkan oleh intensitas sinar matahari, yang berdampak pada kinerja MPPT.

1. Data Tegangan dari Panel Surya

Pengukuran tegangan menunjukkan fluktuasi dengan rata-rata error harian sekitar 12%, dengan tegangan rata-rata 16,45 V pada voltmeter dan 14,51 V pada MPPT pada hari pertama. Hasil yang mirip ditemukan pada hari kedua dan ketiga, dengan tegangan yang sedikit menurun pada siang hari akibat pengurangan intensitas cahaya. Berikut adalah tabel yang merangkum data tegangan dari panel surya:

Tabel 4 Rata-rata Tegangan Panel Surya dan MPPT

Hari	Tegangan Panel Surya (V)	Tegangan pada MPPT (V)	Rata-rata Persentase Error (%)
1	16,45	14,51	12,03
2	14,56	12,94	11,14
3	15,88	13,96	12,00

2. Data Arus dari Panel Surya

Arus listrik yang dihasilkan oleh panel surya juga mengalami fluktuasi, dengan rata-rata arus sebesar 7,11 A pada hari pertama dan persentase error rata-rata sebesar 37,23%. Pada hari kedua dan ketiga, terjadi perbedaan yang lebih besar antara arus pada voltmeter dan arus yang diterima oleh MPPT, yang dipengaruhi oleh perubahan intensitas sinar matahari dan kondisi cuaca.

Tabel 5 Rata-rata Arus Panel Surya dan MPPT

Hari	Arus Panel Surya (A)	Arus pada MPPT (A)	Rata-rata Persentase Error (%)
1	7,11	7,09	37,23
2	3,77	3,12	14,61
3	8,78	5,37	39,45

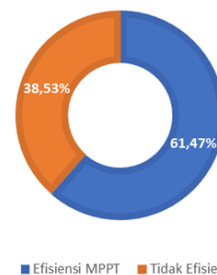
3. Efisiensi MPPT

Efisiensi MPPT sangat penting dalam memastikan daya yang dihasilkan oleh panel surya dapat dimanfaatkan secara optimal. Berdasarkan perhitungan, rata-rata efisiensi MPPT selama tiga hari pengujian adalah 61,47%, dengan efisiensi tertinggi pada hari kedua sebesar 74,15%. Hari ketiga mencatat efisiensi yang lebih rendah akibat penurunan intensitas cahaya di sore hari.

Tabel 6 Rata-rata Efisiensi MPPT

Hari	Energi dari Panel Surya (Wh)	Energi ke Baterai (Wh)	Efisiensi MPPT (%)
1	2871,88	1584,86	55,19
2	827,02	613,23	74,15
3	2118,86	1141,58	53,88
Rata-rata			61,47

EFISIENSI MPPT SELAMA 3 HARI



Gambar 4. Grafik Efisiensi MPPT Selama 3 Hari

Selama tiga hari pengujian, sistem SPKL berbasis PLTS menunjukkan efisiensi rata-rata 61,47%. Kinerja MPPT berfluktuasi, dengan efisiensi yang lebih rendah pada sore hari karena penurunan intensitas sinar matahari. Meskipun ada beberapa kehilangan energi, sistem ini masih cukup efektif dalam mengonversi energi surya untuk pengisian baterai kendaraan listrik.

B. Perhitungan Total Daya yang Dihasilkan oleh SPKL Berbasis PLTS

Pada penelitian ini, dilakukan perhitungan total daya yang dihasilkan oleh Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik (SPKL) berbasis Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Perhitungan total daya ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar energi yang dapat dihasilkan oleh sistem PLTS dan apakah cukup untuk memenuhi kebutuhan pengisian ulang baterai kendaraan listrik. Pengukuran daya dilakukan setiap 30 menit selama tiga hari berturut-turut, mulai pukul 09.00 hingga 16.00, dalam kondisi cuaca yang bervariasi.

1. Perhitungan Total Daya Harian

Perhitungan energi dilakukan dengan menjumlahkan daya yang dihasilkan pada setiap interval waktu (0,5 jam) dan mengalikan daya dengan durasi interval untuk mendapatkan energi dalam satuan watt-hour (Wh). Berikut adalah hasil perhitungan total daya harian selama tiga hari pengujian:

Tabel 7 Perhitungan Energi Harian SPKL Berbasis PLTS

Hari	Total Energi Harian (Wh)
Hari ke-1	792,43
Hari ke-2	306,62
Hari ke-3	570,79
Rata-rata	556,61 Wh

Rata-rata energi harian yang dihasilkan oleh sistem PLTS adalah 556,61 Wh. Nilai ini menunjukkan bahwa dalam kondisi cuaca bervariasi, SPKL berbasis PLTS mampu menghasilkan daya yang konsisten untuk memenuhi kebutuhan pengisian kendaraan listrik.

2. Perhitungan Total Daya Bulanan

Dengan asumsi sistem PLTS beroperasi selama 30 hari penuh dalam satu bulan, total energi bulanan yang dihasilkan adalah:

$$\text{Energi Total Bulanan} = 556,61 \times 30 = 16.698 \text{ Wh} = 16,69 \text{ kWh} \dots\dots 6$$

Ini berarti bahwa sistem PLTS dapat menghasilkan 16,69 kWh dalam satu bulan operasi penuh.

C. Perbandingan Biaya Operasional PLTS dan Listrik Konvensional

Perbandingan biaya operasional antara SPKL berbasis PLTS dan SPKLU yang menggunakan listrik konvensional dari PLN menunjukkan adanya penghematan signifikan pada penggunaan

PLTS. Berdasarkan tarif PLN sebesar Rp 2.466 per kWh, biaya operasional tahunan untuk SPKLU berbasis listrik konvensional adalah Rp 494.127,21. Sementara itu, biaya operasional tahunan PLTS hanya mencakup biaya pemeliharaan sebesar Rp 406.770 per tahun.

Tabel 8 Perbandingan Biaya Operasional PLTS dan PLN

Sistem Operasi	Biaya Operasional Tahunan (Rp)
PLN (SPKLU)	Rp 494.127,21
PLTS	Rp 406.770,00

Penghematan biaya operasional tahunan yang diperoleh dengan menggunakan PLTS adalah Rp 87.357,21. Hal ini menunjukkan bahwa sistem PLTS lebih ekonomis dibandingkan penggunaan listrik konvensional dari PLN, terutama dalam jangka panjang.

D. Perhitungan Harga per kWh PLTS

Untuk menghitung biaya per kWh yang dihasilkan oleh PLTS, digunakan rumus berikut:

$$\text{Harga per kWh} = \frac{33.897,50}{16,698} = \text{Rp } 2.030,03 \text{ per kWh} \dots\dots\dots 7$$

Harga per kWh yang dihasilkan oleh PLTS lebih rendah daripada tarif listrik PLN sebesar Rp 2.466 per kWh, menjadikan PLTS pilihan yang lebih hemat biaya. Penggunaan PLTS untuk Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik (SPKL) menunjukkan potensi penghematan biaya operasional yang signifikan dibandingkan dengan penggunaan listrik konvensional dari PLN. Dengan rata-rata produksi energi harian sebesar 556,61 Wh dan total biaya operasional tahunan yang lebih rendah, PLTS tidak hanya ramah lingkungan tetapi juga menawarkan solusi yang lebih ekonomis dalam jangka panjang.

E. Analisis Kelayakan Investasi

1. Analisis Kelayakan Investasi SPKL

Tujuan dari analisis ini adalah untuk menentukan apakah investasi tersebut layak dilakukan dari perspektif ekonomi. Modal awal yang dibutuhkan untuk membangun SPKL berbasis PLTS dihitung berdasarkan harga komponen yang digunakan, seperti panel surya, aki, inverter, MPPT, dan berbagai sensor dan perangkat lainnya. Total modal yang diperlukan adalah Rp 8.135.400, yang mencakup seluruh biaya pengadaan komponen utama dan material pendukung sistem.

2. Perhitungan Payback Period (PBP)

Payback Period (PBP) adalah metode yang digunakan untuk menghitung berapa lama waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan investasi awal. Dalam kasus SPKL berbasis PLTS, penghematan biaya tahunan yang dihasilkan dari penggunaan PLTS adalah Rp 406.568,4. Dengan modal awal sebesar Rp 8.135.400, PBP dihitung sebagai berikut:

$$PP = \frac{\text{Investasi Awal}}{\text{Arus Kas Tahunan}} = \frac{8.135.400}{406.568,4} = 20,01 \text{ Tahun} \dots\dots\dots 8$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa diperlukan waktu sekitar 20 tahun untuk mengembalikan investasi awal. PBP ini tergolong panjang, yang menunjukkan bahwa proyek ini kurang efisien secara finansial jika hanya dilihat dari sudut pandang waktu pengembalian modal.

3. Perhitungan Net Present Value (NPV)

NPV mengukur perbedaan antara nilai sekarang dari arus kas masuk yang diharapkan dengan nilai sekarang dari arus kas keluar (investasi). Untuk menghitung NPV, digunakan tingkat diskonto 10%, sesuai dengan risiko proyek dan tingkat pengembalian yang diharapkan. Arus kas tahunan yang dihasilkan dari penghematan adalah Rp 406.568,4, dan perhitungan dilakukan selama 20 tahun.

Setelah menghitung arus kas yang didiskon selama 20 tahun, total arus kas yang didiskon adalah Rp 4.016.803,2. Mengurangkan investasi awal sebesar Rp 8.135.400 menghasilkan NPV sebesar:

$$NPV = \sum_{t=1}^{20} \frac{406.568,4}{(1+0,1)^t} - 8.135.400 \dots\dots\dots 9$$

Dimana:

- CF_t adalah arus kas tahunan sebesar Rp 406.568,4
- r adalah tingkat diskonto sebesar 10%
- I adalah investasi awal sebesar Rp 8.135.400
- t adalah periode investasi (20 tahun)

NPV negatif sebesar Rp 4.118.596,8 menunjukkan bahwa proyek ini tidak layak secara finansial karena arus kas yang dihasilkan tidak cukup untuk menutupi investasi awal dalam jangka waktu yang ditetapkan.

4. Perhitungan Internal Rate of Return (IRR)

IRR adalah tingkat pengembalian yang membuat NPV proyek menjadi nol. Untuk proyek ini, IRR dihitung dengan mencoba berbagai tingkat diskonto hingga NPV mendekati nol. Berdasarkan hasil iterasi, ditemukan bahwa IRR untuk proyek ini adalah -0,47%. Nilai IRR negatif menunjukkan bahwa proyek ini tidak menghasilkan tingkat pengembalian yang cukup untuk menutupi investasi awal. Hal ini berarti proyek ini tidak menguntungkan secara finansial dalam periode 20 tahun.

Hasil dari analisis kelayakan investasi untuk SPKL berbasis PLTS menunjukkan bahwa meskipun proyek ini dapat menghasilkan penghematan biaya energi, waktu pengembalian modal yang diperlukan cukup panjang (20 tahun). Selain itu, NPV negatif dan IRR yang rendah (di bawah 0%) menunjukkan bahwa proyek ini tidak layak secara finansial jika hanya dilihat dari sudut pandang pengembalian investasi. Oleh karena itu, meskipun penggunaan PLTS memiliki manfaat lingkungan yang signifikan, secara finansial proyek ini tidak memberikan keuntungan yang memadai dalam jangka panjang.

F. Pembahasan

1. Efisiensi Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik (SPKL) Berbasis Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Penelitian ini menunjukkan bahwa efisiensi rata-rata Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik (SPKL) berbasis Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) mencapai 61,47%, dengan efisiensi tertinggi tercatat sebesar 74,15% dan efisiensi terendah sebesar 53,88%. Meskipun sistem ini diuji dalam kondisi cuaca yang bervariasi, efisiensi tersebut dapat dianggap cukup baik, terutama mengingat pengaruh faktor-faktor eksternal seperti intensitas sinar matahari dan sudut penyinaran. Hasil ini menunjukkan bahwa teknologi Maximum Power Point Tracking (MPPT) berfungsi dengan baik dalam mengoptimalkan daya yang dihasilkan dari panel surya, namun masih berada di bawah potensi maksimal yang bisa dicapai oleh teknologi MPPT modern, yang dapat mencapai efisiensi di atas 90% dalam kondisi ideal [14]. Oleh karena itu, ada peluang untuk meningkatkan performa sistem dengan optimalisasi lebih lanjut, terutama dalam hal algoritma dan teknologi MPPT yang digunakan.

Faktor-faktor teknis dan lingkungan sangat memengaruhi hasil efisiensi ini. Fluktuasi intensitas sinar matahari dan sudut penyinaran, terutama pada sore hari, memberikan dampak signifikan terhadap daya yang dihasilkan oleh panel surya [12]. Selain itu, suhu operasional yang lebih tinggi dari batas optimal juga mengurangi efisiensi sistem, karena peningkatan suhu dapat meningkatkan resistansi

internal pada panel surya[14]. Meskipun MPPT berfungsi dengan baik untuk menjaga sistem tetap efisien dalam kondisi bervariasi, teknologi yang lebih canggih seperti Incremental Conductance (IncCond) dapat memberikan respons yang lebih cepat dan akurat terhadap perubahan kondisi cuaca, sehingga meningkatkan efisiensi secara keseluruhan.

2. Perbandingan Biaya Operasional Penggunaan Energi PLTS dengan Energi dari Listrik Konvensional

Dari segi biaya operasional, hasil penelitian menunjukkan bahwa PLTS memberikan penghematan yang signifikan dibandingkan dengan penggunaan listrik konvensional dari PLN. Biaya operasional tahunan untuk sistem PLTS tercatat sebesar Rp 406.770, sedangkan biaya operasional tahunan untuk SPKL berbasis listrik konvensional mencapai Rp 494.127,21. Penghematan sebesar Rp 87.357,21 per tahun ini menunjukkan bahwa penggunaan PLTS untuk pengisian kendaraan listrik dapat menghasilkan keuntungan ekonomi yang nyata dalam jangka panjang. Hal ini juga didukung oleh fakta bahwa PLTS tidak memerlukan biaya pembelian listrik rutin karena memanfaatkan sinar matahari, yang merupakan sumber energi yang gratis dan melimpah.

Perbedaan signifikan dalam biaya operasional ini mencerminkan keuntungan jangka panjang dari penggunaan energi terbarukan, yang tidak terpengaruh oleh fluktuasi harga energi bahan bakar fosil yang menjadi faktor dalam penentuan tarif listrik PLN[15]. Meskipun biaya pemasangan awal untuk sistem PLTS relatif lebih tinggi dibandingkan dengan SPKL berbasis listrik PLN, biaya operasional yang jauh lebih rendah serta stabilitas jangka panjang yang ditawarkan oleh PLTS menjadikannya pilihan yang lebih ekonomis. Selain itu, dengan semakin meningkatnya harga bahan bakar fosil di pasar internasional, biaya listrik dari PLN diproyeksikan akan terus naik, yang membuat PLTS semakin kompetitif dalam hal penghematan biaya operasional di masa depan.

3. Kelayakan Ekonomi Investasi dalam Pembangunan SPKL Berbasis PLTS

Analisis kelayakan ekonomi menunjukkan bahwa investasi awal sebesar Rp 8.135.400 untuk pembangunan SPKL berbasis PLTS membutuhkan waktu pengembalian modal (*Payback Period*) sekitar 20 tahun. Meskipun PLTS menawarkan penghematan biaya operasional tahunan, waktu pengembalian yang panjang ini menunjukkan bahwa proyek ini kurang efisien secara finansial dalam jangka pendek. *Net Present Value (NPV)* yang diperoleh sebesar -Rp 4.118.596,8 dan *Internal Rate of Return (IRR)* sebesar -0,47% juga menunjukkan bahwa investasi ini tidak menguntungkan dari sudut pandang keuangan konvensional. Dengan hasil NPV negatif dan IRR yang rendah, proyek ini tidak mampu memberikan arus kas yang cukup untuk menutupi investasi awal dan tidak memenuhi tingkat pengembalian yang diharapkan.

Meskipun demikian, PLTS tetap memberikan keuntungan dari perspektif keberlanjutan lingkungan dan pengurangan emisi karbon. Seiring dengan meningkatnya kesadaran global akan pentingnya mengurangi ketergantungan pada energi fosil dan transisi menuju energi terbarukan,

investasi dalam PLTS dapat memberikan manfaat jangka panjang yang tidak tercermin dalam analisis finansial jangka pendek. Selain itu, perkembangan teknologi PLTS yang terus meningkat dan penurunan harga komponen seperti panel surya dan baterai penyimpanan di masa depan, dapat mempercepat waktu pengembalian modal dan meningkatkan kelayakan ekonomi proyek serupa di masa mendatang[14]. Dengan demikian, meskipun kurang menguntungkan secara finansial saat ini, proyek PLTS tetap memiliki potensi besar sebagai investasi berkelanjutan dalam jangka panjang.

V.KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan mengenai Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik (SPKL) berbasis Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), dapat disimpulkan bahwa efisiensi rata-rata sistem PLTS mencapai 61,47%. Meskipun efisiensi ini sudah cukup baik, fluktuasi kinerja dipengaruhi oleh kondisi cuaca dan intensitas sinar matahari yang tidak selalu stabil. Sistem ini masih memiliki potensi peningkatan, terutama dengan penggunaan teknologi yang lebih canggih seperti Maximum Power Point Tracking (MPPT) yang lebih optimal. Dari segi biaya operasional, PLTS terbukti lebih ekonomis dibandingkan listrik konvensional dari PLN. Biaya tahunan PLTS sebesar Rp 406.770 lebih rendah daripada biaya listrik PLN yang mencapai Rp 494.127,21, dengan penghematan tahunan sebesar Rp 87.357,21. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan PLTS menawarkan solusi jangka panjang yang lebih hemat karena memanfaatkan energi matahari yang gratis.

Namun, dari segi investasi, proyek ini menghadapi tantangan. Investasi awal sebesar Rp 8.135.400 membutuhkan waktu pengembalian modal selama 20 tahun, yang relatif panjang dibandingkan dengan umur pakai sistem PLTS. Perhitungan *Net Present Value (NPV)* yang menunjukkan nilai negatif sebesar -Rp 4.118.596,8, dan *Internal Rate of Return (IRR)* sebesar -0,47%, mengindikasikan bahwa proyek ini belum menguntungkan secara finansial dalam jangka pendek. Meskipun demikian, manfaat lingkungan yang ditawarkan oleh PLTS, seperti pengurangan emisi karbon, menjadi nilai tambah yang signifikan dalam mendukung keberlanjutan lingkungan dan transisi menuju energi terbarukan.

Kelebihan sistem PLTS terletak pada penggunaan energi yang bersih, berkelanjutan, dan biaya operasional yang rendah, tanpa terpengaruh oleh fluktuasi harga bahan bakar fosil. Di sisi lain, kekurangannya adalah investasi awal yang tinggi dan waktu pengembalian modal yang cukup lama, serta dipengaruhi oleh kondisi cuaca dan kualitas komponen. Saran untuk penelitian selanjutnya adalah meningkatkan efisiensi sistem dengan menggunakan teknologi yang lebih canggih, seperti panel surya berteknologi tinggi dan MPPT yang lebih optimal. Penelitian selanjutnya juga disarankan untuk memanfaatkan insentif pemerintah guna mendukung kelayakan ekonomi proyek ini, serta memperbesar skala proyek untuk memenuhi kebutuhan energi yang lebih besar. Edukasi dan peningkatan kesadaran akan pentingnya energi

terbarukan juga perlu terus didorong untuk mendukung keberlanjutan lingkungan di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Pratama, "Efek rumah kaca terhadap bumi," *Bul. Utama Tek.*, vol. 14, no. 2, hlm. 120–126, 2019.
- [2] A. Yulimauidia, Y. Pujiraharjo, dan M. Nurhidayat, "Pengaplikasian Tenaga Surya Pada Perancangan Charger Station Di Kawasan Bandung," *EProceedings Art Des.*, vol. 5, no. 3, 2018, Diakses: 14 September 2024. [Daring]. Tersedia pada: <https://openlibrarypublications.telkomuniversity.ac.id/index.php/artdesign/article/view/8320>
- [3] (Persero). PT PLN, "Proyeksi Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai di Indonesia 2021-2030," PLN, Jakarta, Indonesia, 2021.
- [4] Badan Pusat Statistik, "Laporan Tahunan Badan Pusat Statistik 2021," BPS, Jakarta, Indonesia, 2021.
- [5] Ecadin, "Inovasi Pengembangan Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU)." [Daring]. Tersedia pada: <https://www.ecadin.org/inovasi-pengembangan-stasiun-pengisian-kendaraan-listrik-umum-spklul/>
- [6] Tri Susilo, "Sah! Biaya Layanan Isi Listrik Pada SPKLU Rp57.000," CNBC Indonesia, 2021. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.cnbcindonesia.com/news/20230731164536-4-459574/sah-biaya-layanan-isi-listrik-pada-spklul-rp25000-rp57000>
- [7] R. Herdian, "Analisis Manajemen Energi Charging Station dengan Pemanfaatan PLTS 0.5 MWp On Grid di ITN Malang," PhD Thesis, Institut Teknologi Nasional Malang, 2022. Diakses: 14 September 2024. [Daring]. Tersedia pada: <http://eprints.itn.ac.id/9218/>
- [8] M. A. A. Pauzi, D. R. Diana Rahma, S. W. Suciwati, dan A. S. Arif Surtono, "Rancang Bangun Prototipe Pengoptimal Charging Baterai pada Mobil Listrik dari Pembangkit Tenaga Surya dengan Menggunakan Sistem Boost Converter," *J. Energy Mater. Instrum. Technol.*, vol. 1, no. 2, hlm. 40–46, 2020.
- [9] S. Sukmajati dan M. Hafidz, "Perancangan dan analisis pembangkit listrik tenaga surya kapasitas 10 MW on grid di Yogyakarta," *Energi Kelistrikan*, vol. 7, no. 1, hlm. 49–63, 2015.
- [10] J. Windarta, E. W. Sinuraya, A. Z. Abidin, A. E. Setyawan, dan A. Angghika, "Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (Plts) Berbasis Homer Di Sma Negeri 6 Surakarta Sebagai Sekolah Hemat Energi Dan Ramah Lingkungan," dalam *Prosiding Seminar Nasional MIPA Kolaborasi*, 2020, hlm. 21–36. Diakses: 14 September 2024. [Daring]. Tersedia pada: <https://proceeding.unnes.ac.id/SNMIPA/article/download/430/279>
- [11] S. Wisnugroho, S. W. Widyanto, dan M. Agus, "Desain Pembangkit Listrik Tenaga Surya untuk stasiun radar pantai di bukit tindoi, Kabupaten Wakatobi," *Pros. Semnastek*, 2018, Diakses: 14 September 2024. [Daring]. Tersedia pada: <https://jurnal.umj.ac.id/index.php/semnastek/article/view/3424>
- [12] E. Roza dan M. Mujirudin, "Perancangan Pembangkit Tenaga Surya Fakultas Teknik UHAMKA," *J. Kaji. Tek. Elektro*, vol. 4, no. 1, hlm. 16–30, 2019.
- [13] A. G. Mahesa dan K. H. Khwee, "Studi Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Sistem Hybrid Sebagai Sumber Energi Alternatif," *J. Electr. Eng. Energy Inf. Technol. J3EIT*, vol. 9, no. 2, 2021, Diakses: 14 September 2024. [Daring]. Tersedia pada: <https://jurnal.untan.ac.id/index.php/j3eituntan/article/view/49873>
- [14] F. Islam, "Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya pada Perahu Nelayan," PhD Thesis, Universitas Hasanuddin, 2020.
- [15] G. Boyle, "Renewable Energy: power for a sustainable future," *J. ENERGY Lit.*, vol. 2, hlm. 106–107, 2005.