

DESIGN OF A MONITORING SYSTEM FOR SOLAR-POWERED PUBLIC STREET LIGHTING

PERANCANGAN SISTEM PEMANTAU LUMINER PENERANGAN JALAN UMUM TENAGA SURYA

Kelvin¹, Endah Setyaningsih^{2*}, Hadian Satria Utama³

¹Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Tarumanagara, Indonesia
Email: kelvin.525210001@stu.untar.ac.id

²Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Tarumanagara, Indonesia
Email: endahs@ft.untar.co.id

³Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Tarumanagara, Indonesia
Email: hadians@ft.untar.ac.id

Received: November 21, 2024 Revised: December 5, 2024 Published: January 31, 2025

DOI: <https://doi.org/10.24912/tesla.v26i2.32951>.

Abstract

Street lighting is an essential facility that ensures the comfort and safety of road users at night. PJU can utilize resources from PLN electricity, solar energy, or a combination of both (hybrid). Solar-Powered Street Lighting fully utilizes solar energy (off-grid) or partially (hybrid) for its energy needs. However, the efficiency of solar panels tends to decrease during operational periods due to negative temperature coefficients, mechanical loads, and weather conditions. Additionally, the lithium-ion batteries used in PJUTS degrade over time. Therefore, a monitoring system is needed to measure the performance of PJUTS, ensure timely maintenance for solar panels and batteries, and maintain the performance of the Solar Charge Controller during the battery charging and discharging cycles. The INA219 sensor is used to simultaneously read current and voltage. Data from this sensor (current and voltage of the solar panels, battery during charging, and battery during discharging) is sent to a web server via WiFi using the ESP32 microcontroller with the HTTP GET method. The data received by the web server is stored in a MySQL database. A web page then displays the real-time PJUTS data retrieved from the database, processed into graphs and tables that can be accessed based on specific dates. Testing shows that the INA219 sensor has a small deviation compared to the Fluke multimeter, with an average voltage deviation of 0.046V and an average current deviation of 0.93 mA.

Keywords: INA219, Luminaire, Current, Voltage, Solar Street Light

Abstrak

Penerangan jalan umum merupakan fasilitas penting yang memastikan kenyamanan dan keselamatan pengguna jalan pada malam hari. PJU dapat menggunakan sumber daya dari listrik PLN, energi matahari, atau kombinasi keduanya (hybrid). Penerangan Jalan Umum Tenaga Surya sepenuhnya memanfaatkan energi matahari (off-grid) atau sebagian (hybrid) untuk kebutuhan energinya. Namun, efisiensi panel surya cenderung menurun selama masa operasional akibat koefisien suhu negatif, beban mekanis, dan kondisi cuaca. Selain itu, baterai lithium-ion yang digunakan dalam PJUTS mengalami degradasi seiring waktu. Oleh karena itu, diperlukan sistem pemantauan untuk mengukur kinerja PJUTS, memastikan perawatan tepat waktu untuk panel surya dan baterai, serta menjaga kinerja Solar Charge Controller dalam siklus pengisian dan pemakaian baterai. Sensor INA219 digunakan untuk membaca arus dan tegangan secara bersamaan. Data dari sensor ini (arus dan tegangan panel surya, baterai saat pengisian, dan baterai saat pemakaian) dikirim ke server web melalui WiFi menggunakan mikrokontroler ESP32 dengan protokol HTTP metode GET. Data yang diterima server web disimpan dalam basis data MySQL. Halaman web kemudian menampilkan data real-time PJUTS yang diambil dari basis data, diolah menjadi grafik dan tabel yang dapat diakses berdasarkan tanggal tertentu. Pengujian menunjukkan bahwa sensor INA219 memiliki deviasi kecil terhadap multimeter Fluke, dengan rata-rata deviasi tegangan sebesar 0,046V dan rata-rata deviasi arus sebesar 0,93 mA.



<https://doi.org/10.24912/tesla>

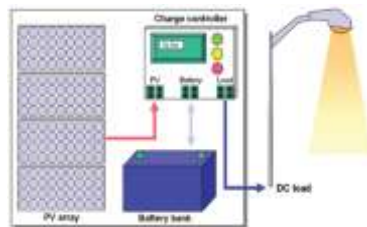


PERANCANGAN SISTEM PEMANTAU LUMINER PENERANGAN JALAN UMUM TENAGA SURYA

Kata Kunci: INA219, Luminer, Arus, Tegangan, Penerangan jalan umum tenaga surya

PENDAHULUAN

Penerangan jalan umum (PJU) merupakan fasilitas umum untuk menerangi jalan pada malam hari demi menghadirkan rasa nyaman bagi pengguna jalan [1]. Sumber daya PJU dapat berasal dari listrik PLN, energi matahari, atau kombinasi listrik PLN dan tenaga matahari (*hybrid*). PJUTS memanfaatkan energi surya (matahari) untuk seluruh (*off-grid*) maupun sebagian (*hybrid*) kebutuhan energi listriknya [2]. Penerangan Jalan PJU-TS terdiri atas panel tenaga surya (modul surya fotovoltaik), baterai penyimpanan energi, elemen optik, elemen elektrik, dan struktur tiang penopang serta fondasi tiang. Gambar 1 menunjukkan konfigurasi sistem fotovoltaik beban DC *off-grid*.

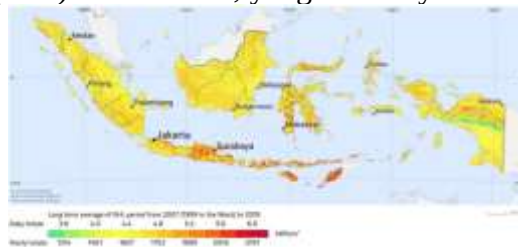


Gambar 1. Konfigurasi Sistem Fotovoltaik Beban DC *Off-grid* [2]

Panel surya mengubah energi matahari menjadi energi listrik [3]. Efisiensi panel surya menentukan besarnya insiden radiasi matahari yang jatuh pada area permukaan panel surya yang dapat dikonversi menjadi energi listrik [4]. Panel surya harus dipasang dengan sudut, arah, dan lokasi yang tepat untuk mendapatkan efisiensinya secara maksimum [5]. Sudut dan arah pemasangan panel surya tergantung pada garis lintang suatu wilayah. Semakin tinggi garis lintang suatu wilayah, semakin besar sudut kemiringan panel surya.

Dalam kasus panel surya dipasang di wilayah Indonesia yang terletak di sekitar garis khatulistiwa, panel surya cenderung dipasang dengan sudut datar [6]. Namun, panel surya yang dipasang datar cenderung menjadi lebih kotor oleh air hujan dan debu. Oleh karena itu, panel surya dipasang sedikit miring dengan sudut 10o – 15o. Pemasangan panel surya juga harus bebas dari bayangan objek di sekitarnya .

Letak geografis suatu wilayah menentukan besar radiasi matahari yang diterimanya [5]. Meskipun Indonesia merupakan negara tropis yang menerima radiasi matahari yang relatif tinggi sepanjang tahunnya, setiap wilayah di Indonesia memiliki potensi energi surya yang berbeda-beda [7]. Gambar 2 menunjukkan distribusi rata-rata tahunan *global horizontal irradiation* (GHI) di Indonesia, yang umumnya memiliki nilai tinggi.

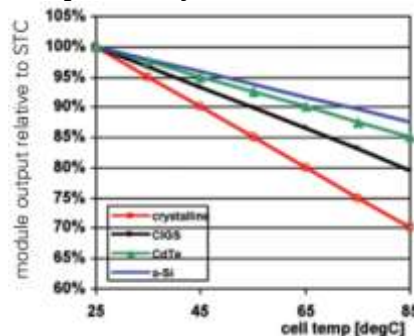


Gambar 2. Peta Distribusi Global Horizontal Irradiation di Indonesia [7]

Selama masa operasional panel surya, kinerja efisiensi dari panel surya dapat berkurang [8]. Berbagai faktor mempengaruhi berkurangnya kinerja efisiensi dari panel surya, yaitu:

1. Negative Temperature Coefficient [9]

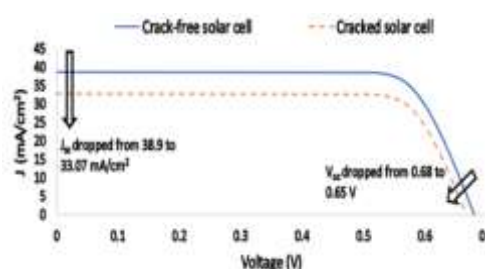
Sel surya mempunyai *negative temperature coefficient*. Performa panel surya berkurang seiring dengan naiknya suhu pada sel surya. Indonesia sebagai negara tropis cenderung mempunyai suhu udara yang tinggi. Suhu udara yang tinggi dapat menaikkan suhu pada sel surya. Gambar 3 memperlihatkan pengaruh koefisien suhu negatif terhadap efisiensi berbagai jenis material panel surya.



Gambar 3. Efek *Negative Temperature coefficient* [9]

2. Beban Mekanis [10]

Modul panel surya mendapatkan beban mekanis selama proses manufaktur dan masa pakainya. Beban mekanis dapat melibatkan proses pengangkutan dari tempat produksi ke lokasi instalasi, salju atau debu, angin berkecepatan tinggi, dan variasi suhu lingkungan dari siang ke malam dan dari musim dingin ke musim panas. Khusus untuk modul PV berbasis silikon kristal, beban ini dapat memutus interkoneksi sel dan rangkaian listrik sistem, menghalangi sinar matahari, dan menurunkan daya keluarannya, sehingga menyebabkan retakan dan titik panas. Gambar 4 menunjukkan perbandingan densitas arus antara panel surya bebas retakan dan dengan retakan.



Gambar 4. Perbandingan Densitas Arus Antara Panel Surya Bebas Retakan dan Dengan Retakan

3. Cuaca [11]

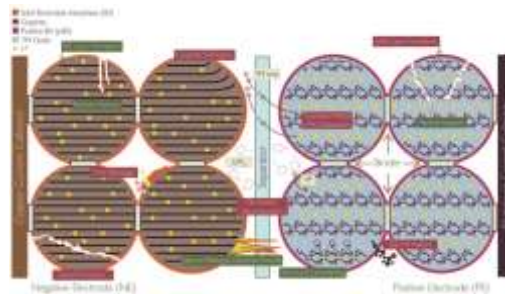
Kinerja sel surya dipengaruhi oleh berbagai parameter cuaca seperti penyinaran matahari, suhu, kecepatan angin, hujan, kelembaban, polusi udara, dan tekanan atmosfer. Keluaran modul fotovoltaik (PV) bergantung pada radiasi matahari yang jatuh ke permukaan. Panel surya pada wilayah tropis cenderung menghasilkan daya keluaran yang lebih banyak pada musim kemarau dan daya keluaran yang lebih sedikit pada musim

PERANCANGAN SISTEM PEMANTAU LUMINER PENERANGAN JALAN UMUM TENAGA SURYA

hujan. Musim hujan dan kelembapan udara yang tinggi menyebabkan akumulasi air pada permukaan panel surya dan berpotensi menyebabkan korosi.

Kualitas udara yang buruk dapat menghalangi sinar matahari dan menyebabkan pengendapan partikel polutan pada permukaan panel surya. Sementara itu, arah dan kecepatan angin memberikan pengaruh terhadap daya keluaran panel surya. Angin dapat berfungsi sebagai pendingin alami bagi panel surya. Selain itu, angin dapat mengurangi partikel debu pada panel surya.

Baterai yang digunakan pada PJUTS biasanya berupa baterai lithium-ion [6]. Baterai lithium-ion terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu katoda (elektroda positif), anoda (elektroda negatif), elektrolit, dan separator [12]. Katoda biasanya terbuat dari oksida logam seperti litium kobalt oksida, sementara anoda menggunakan grafit atau bahan karbon lainnya. Elektrolit berfungsi sebagai medium konduktif antara katoda dan anoda, sedangkan separator mencegah kontak langsung antara dua elektroda yang dapat menyebabkan korsleting. Gambar 5 mengilustrasikan komponen dasar penyusun baterai Lithium-Ion.



Gambar 5. Komponen Dasar Penyusun Baterai Lithium-Ion

Saat baterai digunakan, ion litium bergerak dari katoda ke anoda melalui elektrolit, melepaskan energi yang dapat digunakan untuk daya listrik [12]. Saat diisi ulang, proses ini terbalik dengan ion litium bergerak dari anoda ke katoda. Baterai lithium ion selama masa operasionalnya juga mengalami degradasi berupa :

1. Pertumbuhan Lapisan SEI

Pertumbuhan Solid Electrolyte Interphase (SEI) adalah suatu proses kompleks yang terjadi di permukaan elektroda pada baterai ion litium. Pertumbuhan ini diinisiasi selama beberapa siklus pengisian dan pengosongan pertama dari baterai. Lapisan SEI terbentuk sebagai hasil dari reaksi kimia antara elektrolit (biasanya garam litium yang larut dalam pelarut) dan bahan elektroda (seperti grafit pada anoda). Lapisan SEI berfungsi sebagai lapisan yang mencegah elektron mengalir melalui lapisan elektrolit. Meskipun pertumbuhan SEI penting untuk menstabilkan antarmuka elektroda-elektrolit, pertumbuhan yang tidak terkendali atau berlebihan dapat menyebabkan penurunan kapasitas, kinerja, dan umur baterai seiring waktu. Faktor-faktor tambahan yang dapat mempengaruhi pertumbuhan SEI melibatkan adanya air, suhu yang tinggi, arus yang terlalu tinggi, dan ketidakmurnian dalam sistem.

2. Lithium Plating

Lithium plating adalah penumpukan lithium logam pada anoda baterai yang diakibatkan oleh suhu yang rendah, SoC yang tinggi, arus pengisian yang tinggi, tegangan

sel yang tinggi, massa anoda yang tidak mencukupi, dan luas permukaan yang aktif secara elektrokimia. Fenomena ini terjadi ketika ion litium tidak dapat terinterkalasi ke dalam anoda grafit dengan cepat, menyebabkan terbentuknya metallic lithium pada permukaan anoda. Lithium plating dapat memicu pertumbuhan SEI, mengancam integritas struktural anoda, dan mengakibatkan pembentukan dendrit (struktur bercabang yang dapat menembus pemisah dan menyebabkan korsleting).

3. Dekomposisi dan Perubahan Struktur Katoda

Katoda pada baterai ion litium mengalami perubahan struktural dan dekomposisi selama berbagai tahap siklus pengisian dan pengosongan. Saat baterai diisi, ion litium diekstraksi dari katoda, menyebabkan perubahan struktural dan pelepasan oksigen. Selama pemakaian baterai, ion litium terinterkalasi kembali ke dalam struktur katoda. Seiring berulangnya siklus pengisian dan pengosongan, perubahan struktural ini dapat menyebabkan deteriorasi material katoda, mengakibatkan kapasitas dan kinerja baterai secara keseluruhan menjadi berkurang. Katoda dapat mengalami reaksi dekomposisi kimia dengan elektrolit dan berkontribusi pada pembentukan lapisan SEI.

4. Particle Fracture

Fraktur partikel dapat terjadi selama siklus pengisian dan pemakaian yang berulang. Fenomena ini terkait dengan perluasan dan kontraksi bahan elektroda seiring dengan penyisipan dan ekstraksi ion litium. Stres yang dihasilkan selama perubahan volume ini dapat menyebabkan kegagalan mekanis partikel individual, yang mengakibatkan fraktur pada material tersebut. Fraktur partikel dapat menyebabkan hilangnya konektivitas listrik, kapasitas yang berkurang, dan penurunan stabilitasi siklus keseluruhan baterai seiring waktu.

Proses degradasi lain yang diketahui meliputi: pengendapan garam, korosi pada pengumpul arus, dekomposisi pengikat, penyumbatan pori separator, delaminasi pengumpul arus, dan penguapan elektrolit. Penyebab degradasi juga termasuk faktor stres mekanis, suhu, paparan kondisi lingkungan yang keras, reaksi elektrokimia dengan elektrolit, perubahan volume pada bahan elektroda, pengisian berlebih, atau penggunaan yang berkepanjangan, dan cacat dalam proses manufaktur.

Baterai lithium-ion memiliki siklus pengisian dan pemakaian. Siklus pengisian dan pemakaian harus dijaga agar tidak terjadi pengisian berlebih (overcharging) maupun pemakaian berlebih (overdischarging) [13], [14]. Solar charge controller (SCC) kemudian digunakan untuk menjaga siklus pengisian dan pemakaian ini. SCC dapat memutus koneksi panel surya pada saat baterai terisi penuh dan memutus koneksi baterai pada saat kapasitas baterai rendah.

Berdasarkan kajian terhadap performa panel surya dan baterai di atas, diperlukan alat pemantau untuk mengukur kinerja sistem PJUTS. Panel surya yang mengalami degradasi akibat beban mekanis maupun faktor cuaca bisa mendapatkan perawatan dan perbaikan secara tepat waktu. Selain itu, evaluasi terhadap lokasi, arah, dan kemiringan pemasangan panel surya juga dapat dievaluasi kembali agar mendapatkan efisiensi yang maksimum. Baterai yang mengalami degradasi akibat berbagai faktor juga dapat diketahui sehingga perawatan dan perbaikan dapat dilakukan tepat waktu. Kinerja SCC dalam menjaga siklus pengisian dan pemakaian baterai dapat dilakukan dengan adanya alat pemantau. Hal tersebut untuk memastikan SCC dapat memutus koneksi panel surya pada saat baterai terisi penuh dan memutus koneksi baterai ke beban ketika kapasitas baterai rendah.

PERANCANGAN SISTEM PEMANTAU LUMINER PENERANGAN JALAN UMUM TENAGA SURYA

Sejumlah rancangan pada artikel jurnal membahas mengenai rancangan alat pemantau arus dan tegangan PJUTS untuk tujuan maintenance dan fault detection. Mulyana (2019) [15] menggunakan ACS712 sebagai sensor arus dan voltage divider untuk membaca nilai tegangan. Data sensor dikirimkan ke mikrokontroler Atmega328 yang didukung dengan komponen tambahan berupa timer, EEPROM, dan regulator DC. Data yang diperoleh kemudian disimpan pada kartu SD. Sementara itu, Bentabet (2019) [16] mengirimkan data ke server web dan ditampilkan di halaman web menggunakan modul GSM SIM800L.

Penelitian ini terinspirasi dari kedua artikel jurnal tersebut untuk membuat alat pemantau arus dan tegangan terhadap PJUTS daya kecil dengan sensor yang berbeda. Sensor yang digunakan adalah sensor INA219 yang dapat digunakan untuk membaca arus dan tegangan secara bersamaan. Penggunaan INA219 terinspirasi dari Setiawan (2023) [17] yang menggunakan INA219 untuk memantau arus dan tegangan pada baterai isi ulang. Data arus dan tegangan yang dibaca oleh INA219 (panel surya, baterai saat pengisian, dan baterai saat pemakaian) kemudian akan dikirimkan ke server web menggunakan Wi-Fi pada mikrokontroler ESP32. Pengiriman data ke server web menggunakan protokol HTTP dengan metode GET. Server web kemudian akan memasukkan data sensor ke perangkat lunak MySQL. Sebuah halaman web kemudian akan digunakan untuk menampilkan data realtime dari PJUTS yang diambil dari basis data MySQL. Data tersebut kemudian diolah menjadi grafik dan tabel yang dapat dilihat berdasarkan tanggal yang dipilih.

METODOLOGI PENELITIAN

Analisis Kebutuhan Sistem

PJUTS yang digunakan memiliki spesifikasi seperti pada Tabel 1. Sementara itu, INA219 memiliki spesifikasi yang ditunjukkan pada Tabel 2 [18].

Tabel 1. Spesifikasi PJUTS Pada Label Produk

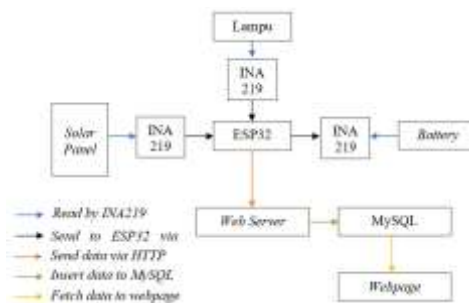
No.	Parameter	Nilai
1	<i>Solar Panel Open circuit voltage (V_{oc})</i>	7,2 V
2	<i>Solar Panel Short circuit current (I_{sc})</i>	1,28 A
3	<i>Solar Panel Maximum Power Voltage (V_{mp})</i>	6 V
4	<i>Solar Panel Maximum Power Current (I_{mp})</i>	1,17 A
5	<i>Battery Nominal Voltage</i>	3,2 V
6	<i>Battery Capacity</i>	12 Ah

Tabel 2. Spesifikasi INA219

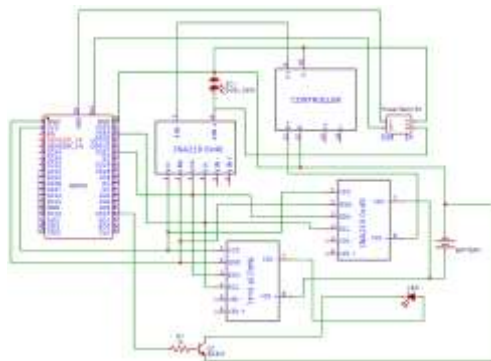
No.	Parameter	Nilai
1	<i>Maximum Common-Mode Voltage</i>	26 V
2	<i>Minimum Common-Mode Voltage</i>	-0,3 V
3	<i>Current Sensing Range</i>	$\pm 3,2$ A
4	<i>Current Resolution</i>	$\pm 0,8$ mA
5	<i>Supply voltage</i>	3 – 5,5 V
6	<i>Operating Temperature Range ($^{\circ}\text{C}$)</i>	-25 – 85
7	<i>Maximum Measurement Accuracy</i>	$\pm 1\%$
8	<i>Shunt Voltage, Bus Voltage Step Size</i>	10 μV , 4 mV

Perancangan Sistem

Data yang dibaca terdiri atas data panel surya, pengisian baterai, dan pemakaian baterai. Data panel surya dan pengisian baterai dipantau pada saat tegangan panel surya di atas 1 V (terdapat sinar matahari). Sementara itu, data pemakaian baterai dipantau pada saat tegangan panel surya di bawah 1 V (malam hari). Dengan demikian, baterai dan lampu akan dikoneksikan dengan transistor BC547 dengan kaki base di-trigger oleh pin GPIO 15 pada ESP32. Sistem ini menggunakan 3 buah modul INA219. Masing-masing modul dihubungkan secara seri dengan terminal positif panel surya, baterai, dan lampu dengan alamat yang berbeda (0x40, 0x45, 0x41). INA219 kemudian akan berkomunikasi dengan protokol I2C dengan mikrokontroler ESP32 dengan menghubungkan pin SDA ke pin 22 dan pin SCL ke pin 21. Selain itu, agar ESP32 mendapatkan tegangan 5V dari power supply, maka digunakanlah modul step up CKCS BS01. Gambar 6 menunjukkan diagram blok sistem yang dirancang. Sementara itu, Gambar 7 menunjukkan skematik perangkat keras sistem yang dirancang.



Gambar 6. Diagram Blok Sistem



Gambar 7. Skematik Perangkat Keras Sistem

Server web PHP kemudian dibuat sebagai tujuan pengiriman data ESP32. Program ESP32 akan mengirimkan data menggunakan protokol HTTPS dengan port 443. Protokol HTTPS yang digunakan menggunakan metode GET yaitu dengan mengirimkan URL yang berisi data. Server web kemudian memasukkan data yang diperoleh ke software MySQL sebagai pengelola basis data. Sebuah situs web kemudian akan dibuat sebagai front-end web dengan bahasa PHP agar pengguna dapat melihat data. Data yang ditampilkan berupa data pemantauan realtime yang akan memperbaharui nilai data sensor setiap 5 menit. Data panel surya yang ditampilkan berupa data arus, tegangan, dan daya. Data pengisian baterai yang ditampilkan berupa data arus pengisian, tegangan pengisian, dan tegangan baterai. Sementara itu, data pemakaian baterai yang ditampilkan

PERANCANGAN SISTEM PEMANTAU LUMINER PENERANGAN JALAN UMUM TENAGA SURYA

berupa data arus dan tegangan. Data tersebut kemudian ditampilkan dalam sebuah grafik yang dibuat menggunakan canva.js dan sebuah tabel. Data grafik dan tabel dapat disaring berdasarkan hari yang diinginkan.

Pengujian

Pengujian dilakukan terhadap ketiga sensor INA219 dan pengiriman data oleh ESP32. Sensor INA219 diuji untuk melihat akurasi terhadap multimeter pada nilai tegangan dan arus yang berbeda. Multimeter yang digunakan yaitu multimeter *true* RMS yang sebelumnya dibandingkan terlebih dahulu dengan multimeter fluke yang tersertifikasi. Data pengujian ini akan ditampilkan dalam bentuk tabel yang menggambarkan deviasi antara nilai yang dibaca dari rata-rata ketiga modul INA219 dan multimeter *true* RMS.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 8 menunjukkan realisasi perangkat keras yang dibuat untuk sistem pemantau. Sementara itu, gambar 9 menunjukkan realisasi situs web yang digunakan untuk melihat data pemantauan realtime, grafik, maupun tabel.



Gambar 8. Realisasi Rancangan Perangkat Keras



Gambar 9. Realisasi Situs Web Pemantau

Tabel 3 menunjukkan nilai deviasi tegangan INA219 dengan multimeter fluke dalam satuan *volt* (V). Tegangan yang diuji mempunyai rentang 1 – 20 V. Sementara itu, nilai deviasi arus INA219 dengan multimeter *fluke* ditunjukkan pada Tabel 4 dalam satuan *miliampere* (mA). Arus yang diuji mempunyai rentang 4 – 92 mA.

Tabel 3. Tabel Deviasi Tegangan INA219 dan Multimeter Fluke

Tegangan INA219 (V)	Tegangan Multimeter (V)	Deviasi (V)
0,998	0,997	0,001
1,970	1,968	0,002

2,942	2,940	0,002
3,990	3,980	0,010
4,970	4,970	0,000
5,970	5,960	0,010
6,960	6,950	0,010
7,960	7,950	0,010
8,960	8,950	0,010
10,600	9,940	0,660
11,010	10,990	0,020
11,940	11,920	0,020
12,930	12,910	0,020
13,930	13,910	0,020
14,930	14,910	0,020
15,920	15,900	0,020
16,960	16,940	0,020
17,910	17,890	0,020
18,920	18,900	0,020
19,920	19,890	0,030
Rata-Rata Deviasi Tegangan (V)		0,046

Tabel 4. Tabel Deviasi Arus INA219 dan Multimeter Fluke

Tegangan INA219 (mA)	Tegangan Multimeter (mA)	Deviasi (mA)
4,50	4,44	0,06
8,91	8,86	0,05
13,11	13,25	0,14
18,12	17,85	0,27
22,24	20,81	1,43
25,19	26,54	1,35
31,71	30,93	0,78
36,10	35,30	0,80
40,60	39,70	0,90
45,40	44,40	1,00
49,60	48,40	1,20
53,80	53,40	0,40
59,20	57,70	1,50
63,70	62,10	1,60
66,80	67,20	0,40
72,50	71,30	1,20
78,40	76,50	1,90
82,20	80,70	1,50
85,70	85,00	0,70
91,50	90,10	1,40
Rata-Rata Deviasi Arus (mA)		0,93

Berdasarkan data pada tabel 3, rata-rata deviasi tegangan sebesar 0,046 V. Sementara itu, data pada tabel 4 menunjukkan rata-rata deviasi arus sebesar 0,93 mA. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa sensor INA219 deviasi arus dan tegangan yang kecil terhadap multimeter fluke.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan data pada tabel 3 dan 4, dapat disimpulkan bahwa sensor INA219 deviasi arus dan tegangan yang kecil terhadap multimeter fluke. Rata-rata deviasi tegangan adalah sebesar 0,046 V. Sementara itu, rata-rata deviasi arus adalah sebesar 0,93 mA.

Saran

Rancangan alat ini dapat dikembangkan lebih lanjut untuk pemantauan arus dan tegangan PJUTS secara jangka panjang. Hal ini dilakukan agar karakteristik arus dan tegangan pada PJUTS dapat digambarkan berdasarkan pola cuaca di suatu lokasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada Program studi Teknik Elektro Universitas Tarumanagara yang telah mendukung penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. van Bommel, *Road lighting: Fundamentals, technology and application*. Springer International Publishing, 2015.
- [2] W. Sutopo, I. S. Mardikaningsih, R. Zakaria, and A. Ali, "A Model to Improve the Implementation Standards of Street Lighting Based on Solar Energy: A Case Study," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 3, 2020.
- [3] D. Y. Goswami, *Principles of Solar Engineering*, 3rd ed. Boca Raton: Taylor and Francis Group, 2015.
- [4] T. Dittrich, *Materials Concepts for Solar Cells*. London: World Scientific Publishing Europe, 2018.
- [5] P. Gevorkian, *Large-Scale Solar Power System Design : An Engineering Guide for Grid-Connected Solar Power Generation*. United States of America: Mc-Graw Hill, 2011.
- [6] M. Boxwell, *Solar Electricity Handbook : A Simple Practical Guide to Solar Energy - Designing and Installing Solar PV Systems*, 11th ed. Birmingham: Greenstream Publishing Ltd, 2017.
- [7] D. F. Silalahi, A. Blakers, M. Stocks, B. Lu, C. Cheng, and L. Hayes, "Indonesia's Vast Solar Energy Potential," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 17, Sep. 2021.
- [8] R. A. Marques Lameirinhas, J. P. N. Torres, and J. P. de Melo Cunha, "A Photovoltaic Technology Review: History, Fundamentals and Applications," *Energies*, vol. 15, no. 5. MDPI, Mar. 01, 2022.

- [9] A. Al-bashir, M. Al-Dweri, A. Al-ghandoor, B. Hammad, and W. Al-kouz, "Analysis of Effects of Solar Irradiance, Cell Temperature and Wind Speed on Photovoltaic Systems Performance," *International Journal of Energy Economics and Policy*, vol. 10, no. 1, pp. 353–359, 2020.
- [10] M. Dhimish, V. d'Alessandro, and S. Daliento, "Investigating the Impact of Cracks on Solar Cells Performance: Analysis Based on Nonuniform and Uniform Crack Distributions," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 3, pp. 1684–1693, 2021.
- [11] K. Hasan, S. B. Yousuf, M. S. H. K. Tushar, B. K. Das, P. Das, and M. S. Islam, "Effects of Different Environmental and Operational Factors on the PV Performance: A Comprehensive Review," *Energy Science and Engineering*, vol. 10, no. 2. John Wiley and Sons Ltd, pp. 656–675, Feb. 01, 2022.
- [12] J. S. Edge *et al.*, "Lithium Ion Battery Degradation: What You Need to Know," *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 23, no. 14. Royal Society of Chemistry, pp. 8200–8221, Apr. 14, 2021.
- [13] N. Kularatna, "Rechargeable Batteries and Their Management," *IEEE Instrum Meas Mag*, vol. 14, no. 2, pp. 20–33, Apr. 2011.
- [14] K. El, H. Mahmoudi, and B. Lakssir, "Smart Solar Battery Charge for PV-Application," *Journal of Power Electronics*, vol. 11, no. 2, pp. 117–130, 2018.
- [15] E. Mulyana and S. Sumaryo, "Data Monitoring System of Solar Module with Data Logger for Public Street Lighting Application," in *26th International Conference on Telecommunication (ICT)*, 2019, pp. 280–283.
- [16] D. Bentabet and S. R. Sonaskar, "Energy efficient: IOT Based Street Lights Monitoring System by using Solar Energy with NodeMCU," in *Second International Conference on Embedded and Distributed Systems*, 2019.
- [17] B. J. Setiawan, G. A. Pauzi, A. Riyanto, and A. Surtono, "Design and Build Voltage and Current Monitoring Parameters Device of Rechargeable Batteries in Real-Time Using the INA219 GY-219 Sensor," *Journal of Energy, Material, and Instrumentation Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 58–71, 2023.
- [18] Texas Instruments, *INA219 Zero-Drift, Bidirectional Current/Power Monitor With I2C Interface*. United State of America: Texas Instruments, 2015.
- [19] Espressif Systems, *ESP32 Series Datasheet v4.4*. Shanghai: Espressif Systems, 2023.
- [20] B. Razavi, *Fundamentals of Microelectronics : With Robotics and Bioengineering Applications*, 3rd ed. Hoboken: Willey, 2021.