pISSN : 0852-0232, eISSN : 2656-582X DOI : 10.14710/gt.v23i2.xxxxx

RANCANG BANGUN SISTEM MONITORING DAN DETEKSI DINI GANGGUAN PADA PANEL SURYA BERBASIS INTERNET OF THINGS (IOT) MENGGUNAKAN KOMUNIKASI BLYNK

Gilang Alviano[1)], Jaka Windarta[2)], Yuniarto[3)]
[1)]Program Studi Str. Teknik Listrik Industri, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275
*E-mail : yuniartostmt@gmail.com

ABSTRACT

The use of solar power plants (SPP) requires a monitoring system capable of displaying operating parameters and identifying malfunctions early on. This study aims to design and build an Internet of Things (IoT)-based monitoring and early fault detection system for solar panels using the ESP32 and Blynk communication. The system uses an INA219 sensor to measure voltage, current, and power; a BH1750 sensor to measure light intensity; and a DS3231 RTC for time logging. Data is processed using the Rule-Based Fault Detection method to identify NORMAL, SHADOW, and CABLE FAULT conditions, displayed in real-time on Blynk, and saved to Google Spreadsheet at five-minute intervals. Testing included sensor validation, 24-hour monitoring, and fault simulations. Validation results showed an average error of 0.94% for the INA219 current, 0.50% for voltage, and 0.35% for the BH1750 light intensity, with accuracies of 99.06%, 99.50%, and 99.65%, respectively. During the monitoring test, the maximum power during charging reached 33.841 W, while the minimum power during discharging was recorded at 0 W. The system identified normal conditions at a voltage of 14.38 V, a current of 2.16 A, a power of 30.62 W, and a light intensity of 54,612 lux without issuing a notification. Under SHADOW conditions, a light intensity of 67.5 lux, a current of 0.0002 A, and a power of 0.002 W triggered a fault status and a notification. Under CABLE FAULT conditions, a light intensity of 1,496.67 lux with a current of 0 A and a power of 0 W was also detected and generated a notification. These results demonstrate that the system can monitor solar panel parameters and distinguish between three operating conditions based on the applied rules.

Keywords: *Solar Panels, Internet of Things (IoT), ESP32, Rule-Based Fault Detection, Blynk, Monitoring.*

PENDAHULUAN

Pemanfaatan energi surya sebagai sumber energi terbarukan mengalami peningkatan signifikan di Indonesia seiring dengan kebutuhan energi listrik yang terus meningkat serta dorongan transisi energi nasional[1]. Potensi energi surya yang tinggi akibat letak geografis Indonesia pada wilayah khatulistiwa dengan rata-rata radiasi harian sebesar 4,5–5,5 kWh/m² menjadikan sistem fotovoltaik sebagai solusi strategis dalam penyediaan energi listrik berkelanjutan. Pemanfaatan panel surya telah diaplikasikan pada berbagai sektor, termasuk pertanian, rumah tangga, serta industri skala kecil dan menengah[2]. Kinerja panel surya dipengaruhi oleh berbagai faktor operasional seperti intensitas radiasi matahari, suhu lingkungan, orientasi panel, serta kondisi instalasi[3]. Penumpukan debu pada permukaan modul surya menjadi salah satu faktor lingkungan yang dapat menurunkan performa sistem fotovoltaik secara signifikan, khususnya pada daerah beriklim tropis seperti Indonesia[4].

Sistem monitoring panel surya berbasis Internet of Things (IoT) telah banyak dikembangkan di Indonesia sebagai solusi pengawasan energi listrik secara real-time[5]. Implementasi monitoring berbasis IoT memungkinkan pengukuran parameter listrik seperti tegangan, arus, dan daya secara kontinu serta ditampilkan melalui perangkat mobile[6]. Aplikasi Blynk dapat dioperasikan melalui smartphone maupun antarmuka berbasis web, sehingga memberikan fleksibilitas dalam proses monitoring baik pada jarak dekat maupun jarak jauh[7]. Sistem monitoring PLTS pada umumnya masih difokuskan pada pemantauan parameter listrik secara real-time, namun belum dilengkapi dengan kemampuan analisis gangguan dan peringatan dini terhadap kondisi abnormal secara otomatis, sehingga proses identifikasi permasalahan menjadi kurang cepat dan efektif[8].

Data logging menjadi komponen penting dalam pengembangan sistem deteksi dini gangguan karena memungkinkan pencatatan data historis secara kontinu[9]. Data yang tersimpan dimanfaatkan sebagai acuan dalam mengidentifikasi gangguan maupun anomali performa dengan tingkat ketelitian yang lebih tinggi dibandingkan metode konvensional[10]. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan dalam sistem deteksi gangguan adalah Rule-Based Fault Detection, yaitu metode yang memanfaatkan aturan logika berdasarkan parameter hasil pengukuran untuk membedakan kondisi operasi normal dan kondisi gangguan. Pendekatan ini

memiliki keunggulan karena mudah diimplementasikan, tidak memerlukan proses pelatihan model, serta mampu melakukan identifikasi gangguan secara cepat[11]. Keterlambatan dalam proses identifikasi gangguan pada sistem PLTS berpotensi menyebabkan kerusakan yang semakin parah serta berdampak pada penurunan umur komponen[12].

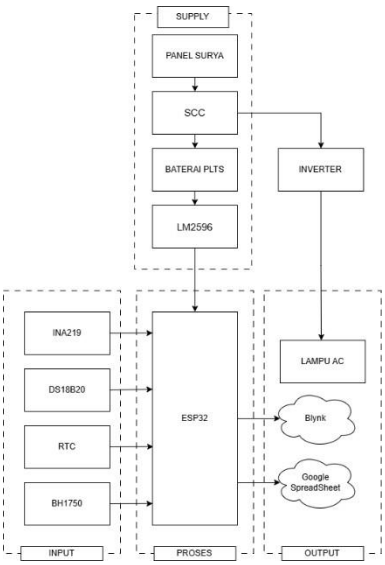
Permasalahan utama dalam penelitian terapan ini terletak pada sistem monitoring PLTS yang pada umumnya masih berfokus pada pengukuran dan visualisasi parameter secara real-time, namun belum dilengkapi dengan kemampuan analisis gangguan secara otomatis sehingga proses identifikasi kondisi abnormal masih belum optimal[13]. Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan sistem monitoring dan deteksi dini gangguan panel surya berbasis Internet of Things (IoT) dengan memanfaatkan mikrokontroler ESP32, data logging, serta metode Rule-Based Fault Detection. Melalui pendekatan ini, sistem tidak hanya mampu melakukan pemantauan parameter operasional panel surya secara real-time, tetapi juga dapat mengidentifikasi kondisi normal maupun gangguan berdasarkan aturan logika yang memanfaatkan parameter intensitas cahaya, arus, dan daya, sehingga proses deteksi dini dapat dilakukan secara cepat, konsisten, dan andal[14].

METODE PENELITIAN

1. Perancangan Sistem

Penelitian ini menggunakan metode rancang bangun yang meliputi tahap perancangan perangkat keras, perancangan perangkat lunak, implementasi sistem, dan pengujian kinerja. Sistem dirancang untuk memantau kondisi panel surya secara real-time menggunakan sensor INA219 untuk mengukur tegangan, arus, dan daya, sensor BH1750 untuk mengukur intensitas cahaya. Seluruh data diproses oleh mikrokontroler ESP32, ditampilkan secara real-time pada aplikasi Blynk, dan disimpan secara otomatis ke Google Spreadsheet dengan interval 5 menit sebagai media data logging.

Deteksi gangguan diterapkan menggunakan metode RuleBased Fault Detection yang membandingkan nilai intensitas cahaya, arus, dan daya terhadap nilai ambang (threshold) yang telah ditentukan untuk membedakan kondisi NORMAL, SHADOW, dan CABLE FAULT. Ketika sistem mendeteksi kondisi SHADOW maupun CABLE FAULT, aplikasi Blynk secara otomatis mengirimkan notifikasi kepada pengguna melalui fitur Event Notification. Pengujian kinerja sistem dilakukan melalui tahap kalibrasi sensor, pengujian monitoring selama 24 jam, serta pengujian sistem deteksi dini gangguan pada tiga kondisi operasional. **2. Diagram Blok Sistem**

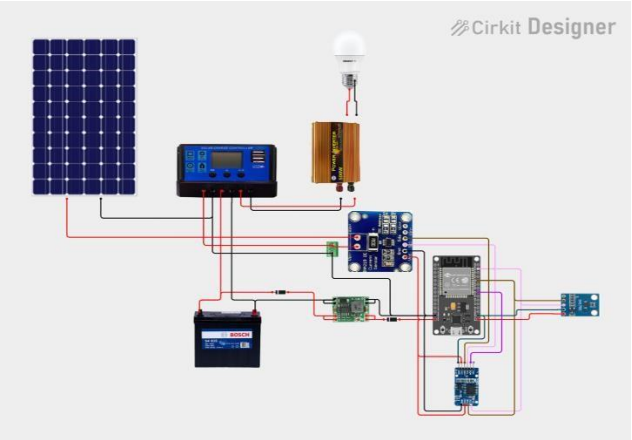


Gambar 1. Diagram Blok Sistem

Diagram blok sistem ditunjukkan pada Gambar 1. Sistem terdiri dari subsistem supply berupa panel surya 50 Wp, Solar Charge Controller (SCC), baterai VRLA 12 V 20 Ah, buck converter, dan inverter sebagai penyedia energi; subsistem input berupa sensor INA219, BH1750, beserta modul RTC DS3231 sebagai sumber data; ESP32 sebagai pusat pemrosesan; serta subsistem output berupa aplikasi Blynk, Google Spreadsheet, dan beban lampu AC.

Panel surya mengonversi radiasi matahari menjadi energi listrik DC yang dikondisikan oleh SCC untuk mengisi baterai secara aman, sedangkan buck converter menurunkan tegangan baterai menjadi 5 VDC untuk mensuplai ESP32 dan seluruh sensor. Sensor INA219 mengukur tegangan, arus, dan daya keluaran panel surya; dan sensor BH1750 mengukur intensitas cahaya matahari. ESP32 memproses seluruh data sensor menggunakan metode Rule-Based Fault Detection, kemudian mengirimkan hasilnya ke aplikasi Blynk untuk monitoring dan notifikasi real-time, serta ke Google Spreadsheet untuk penyimpanan data historis.

3. Rangkaian Keseluruhan Sistem



Gambar 2. Rangkaian Keseluruhan Sistem

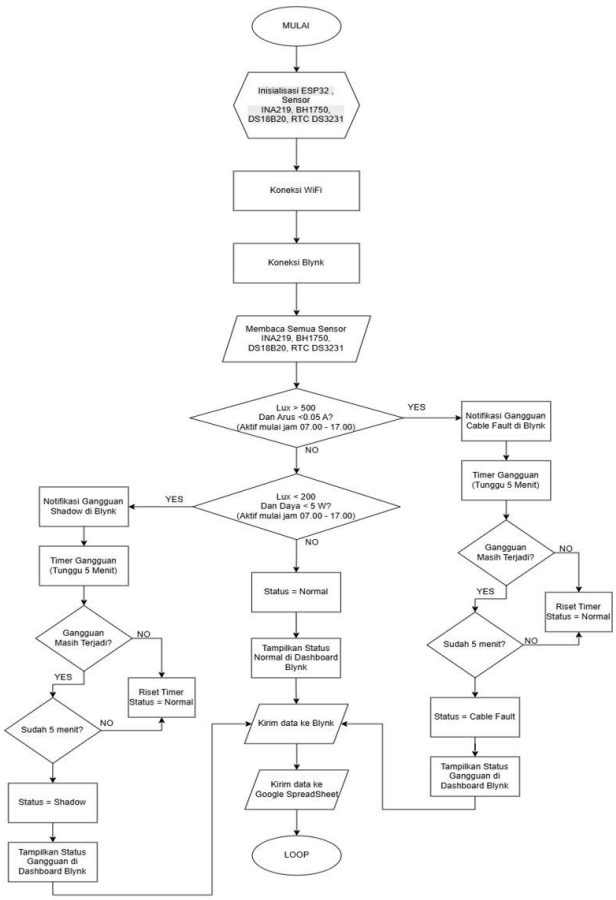
Sistem terdiri dari panel surya sebagai sumber energi yang terhubung ke Solar Charge Controller (SCC) untuk mengatur proses pengisian baterai. Energi dari baterai digunakan sebagai sumber catu daya bagi rangkaian sistem monitoring serta beban berupa lampu melalui inverter.

Pada sisi pengukuran, sensor INA219 digunakan untuk mengukur tegangan, arus, dan daya yang dihasilkan panel surya. Sensor BH1750 digunakan untuk mengukur intensitas cahaya dalam satuan lux sebagai salah satu parameter dalam proses deteksi gangguan. Data dari sensor kemudian diproses oleh ESP32 sebagai mikrokontroler utama. Sistem juga dilengkapi dengan modul RTC untuk memberikan informasi waktu pengukuran secara aktual serta rangkaian regulator DCDC untuk menyesuaikan tegangan catu daya yang dibutuhkan oleh perangkat.

Data hasil pengukuran yang diproses oleh ESP32 selanjutnya dikirimkan melalui koneksi internet ke platform Blynk sehingga kondisi panel surya dapat dipantau secara realtime dan jarak jauh. Berdasarkan parameter tegangan, arus, daya, intensitas cahaya, dan waktu operasi, sistem melakukan proses deteksi dini gangguan menggunakan aturan yang telah ditentukan. Dengan konfigurasi tersebut, rangkaian mampu mengintegrasikan proses pembangkit energi, pengukuran parameter, pemrosesan data, pemantauan, dan deteksi gangguan dalam satu sistem berbasis IoT.

4. Flowchart Sistem

Flowchart sistem ditunjukkan pada Gambar 3. Proses diawali dengan inisialisasi seluruh perangkat yang terdiri atas ESP32, sensor INA219, sensor BH1750, modul RTC DS3231, serta koneksi Wi-Fi menuju platform Blynk. Setelah proses inisialisasi berhasil, sistem akan melakukan pembacaan data tegangan, arus, daya, intensitas cahaya, dan waktu secara berkala untuk selanjutnya diproses dalam mendeteksi kondisi panel surya.



Gambar 3. Flowchart Sistem

Berdasarkan flowchart pada Gambar 3, Sistem monitoring dan deteksi dini gangguan panel surya berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan ESP32 dimulai dengan proses inisialisasi mikrokontroler dan seluruh sensor yang digunakan, yaitu INA219 untuk mengukur tegangan dan arus, BH1750 untuk mengukur intensitas cahaya, serta RTC DS3231 sebagai acuan waktu pengukuran. Setelah proses inisialisasi selesai, ESP32 menghubungkan sistem ke jaringan WiFi dan server Blynk agar data hasil pengukuran dapat dikirimkan dan ditampilkan secara real-time. Selanjutnya, sistem melakukan pembacaan seluruh parameter, meliputi tegangan, arus, daya, suhu, intensitas cahaya, dan waktu, yang digunakan sebagai dasar pemantauan serta identifikasi gangguan pada panel surya.

Proses deteksi gangguan menggunakan metode RuleBased Fault Detection dengan membandingkan hasil pengukuran terhadap nilai ambang batas (threshold) yang telah ditentukan. Deteksi dilakukan pada rentang waktu operasional pukul 07.00–17.00 untuk menghindari identifikasi gangguan akibat tidak adanya penyinaran pada malam hari. Sistem mengidentifikasi dua jenis gangguan, yaitu Cable Fault berdasarkan kondisi intensitas cahaya lebih dari 500 lux dan arus kurang dari 0,05 A, serta Shadow berdasarkan

intensitas cahaya kurang dari 200 lux dan daya keluaran kurang dari 5 W. Apabila salah satu kondisi gangguan terdeteksi, sistem mengirimkan notifikasi melalui Blynk dan menjalankan timer selama 5 menit untuk memastikan gangguan berlangsung secara berkelanjutan. Jika gangguan menghilang sebelum durasi tersebut tercapai, timer diatur ulang dan status sistem dikembalikan menjadi NORMAL. Sebaliknya, apabila gangguan berlangsung selama 5 menit atau lebih, sistem menetapkan status gangguan sesuai jenisnya dan menampilkannya pada dashboard Blynk.

Setelah proses deteksi selesai, sistem mengirimkan seluruh parameter pengukuran, meliputi tegangan, arus, daya, suhu, intensitas cahaya, waktu, dan status gangguan, ke Blynk agar pengguna dapat memantau kondisi panel surya secara real-time melalui jaringan internet. Data yang sama juga disimpan secara otomatis ke Google Spreadsheet sebagai data logging, sehingga riwayat pengukuran dapat dimanfaatkan untuk analisis kinerja panel surya, evaluasi hasil pengujian, dan dokumentasi kondisi sistem. Setelah proses pengiriman dan penyimpanan data selesai, sistem kembali melakukan pembacaan sensor dan mengulangi seluruh tahapan selama ESP32 memperoleh catu daya. Dengan mekanisme tersebut, sistem mampu mendukung pemantauan kondisi panel surya secara kontinu serta memberikan informasi dini ketika terindikasi gangguan Cable Fault maupun Shadow.

5. Perangkat Lunak dan Metode Deteksi Gangguan

Perangkat lunak dikembangkan menggunakan Arduino IDE dengan bahasa C/C++ pada mikrokontroler ESP32. Program mencakup inisialisasi WiFi dan platform Blynk, inisialisasi sensor INA219, BH1750, dan RTC DS3231, pembacaan data sensor secara berkala, proses deteksi dini gangguan menggunakan metode Rule-Based Fault Detection, pengiriman data ke dashboard Blynk, serta penyimpanan data ke Google Sheets melalui HTTP POST. Sebelum digunakan, sensor INA219 dikalibrasi dengan menuliskan nilai kalibrasi ke register kalibrasi melalui komunikasi I2C sesuai dengan resistor shunt 0,1 Ω yang digunakan.

Metode Rule-Based Fault Detection membandingkan nilai intensitas cahaya, arus, dan daya terhadap nilai ambang (threshold) yang telah ditentukan pada program. Ketiga aturan deteksi yang diterapkan dinyatakan sebagai berikut.

IF (Lux ≥ Threshold) AND (Arus ≥ Threshold) AND (Daya ≥ Threshold) THEN Status = NORMAL

IF (Lux < Threshold) AND (Arus < Threshold) AND (Daya < Threshold) THEN Status = SHADOW

IF (Lux ≥ Threshold) AND (Arus = 0) AND (Daya = 0) THEN Status = CABLE FAULT

Kondisi SHADOW disimulasikan dengan memberi bayangan pada sebagian permukaan panel sehingga intensitas cahaya, arus, dan daya menurun secara bersamaan, sedangkan kondisi CABLE FAULT disimulasikan dengan memutus kabel panel surya menuju SCC sehingga arus dan daya bernilai nol meskipun intensitas cahaya masih tinggi. Setiap kali sistem mendeteksi status SHADOW atau CABLE FAULT, aplikasi Blynk secara otomatis mengirimkan notifikasi kepada pengguna secara real-time tanpa menunggu interval pencatatan data logging.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil Kalibrasi Sensor

Sebelum digunakan pada sistem monitoring, seluruh sensor dikalibrasi terhadap alat ukur acuan untuk mengetahui tingkat akurasinya. Rekapitulasi hasil kalibrasi ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Rekapitulasi Hasil Kalibrasi Sensor

Sensor	Parameter	Error (%)	Akurasi (%)
INA219	Arus	0,94%	99,06%
INA219	Tegangan	0,50%	99,50%
Sensor	**Parameter**	**Error (%)**	**Akurasi (%)**
BH1750	Cahaya	0,35%	99,65%

Berdasarkan hasil kalibrasi pada Tabel 1, seluruh sensor menunjukkan rata-rata error di bawah 1% dengan akurasi di atas 99%, sehingga sensor INA219, dan BH1750 dinyatakan layak digunakan pada sistem monitoring dan deteksi dini gangguan panel surya berbasis IoT.

2. Hasil Pengujian Monitoring Selama 24 Jam

Pengambilan data monitoring dilakukan selama 24 jam pada tanggal 14 Juli 2026 mulai pukul 06.00 WIB dengan interval pencatatan setiap 5 menit, sehingga diperoleh 288 data pengamatan untuk setiap parameter. Rekapitulasi hasil pengujian pada kondisi charging dan discharging ditunjukkan pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2. Rekap Data Kondisi Charging (Siang Hari)

Parameter	Maks	Min	Rata2
Tegangan (V)	14,582	12,95	13,54
Arus (A)	2,36	0,2	1,18
Daya (W)	33,84	2,5	16,56
Cahaya (lux)	54.612	10.500	37.000

Tabel 3. Rekap Data Kondisi Discharging (Malam Hari)

Parameter	Maks	Min	Rata2
Tegangan (V)	13,41	0,248	0,37
Arus (A)	0,35	0	0,03

Daya (W)	4,5	0	0,52
Cahaya (lux)	13.000	1	950

Selama periode charging, tegangan, arus, dan daya panel surya meningkat seiring bertambahnya intensitas cahaya matahari hingga mencapai nilai maksimum sekitar tengah hari. Setelah matahari terbenam, sistem memasuki kondisi discharging, di mana arus dan daya panel menurun mendekati 0 A dan 0 W karena panel tidak lagi menghasilkan energi listrik, sedangkan tegangan menurun secara bertahap sesuai proses pelepasan energi baterai melalui SCC. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem monitoring mampu merekam siklus operasional panel surya secara real-time dan konsisten dengan karakteristik dasar sel fotovoltaik.

3. Hasil Pengujian Sistem Deteksi Dini Gangguan

Pengujian sistem deteksi dini gangguan dilakukan pada tiga kondisi, yaitu NORMAL, SHADOW, dan CABLE FAULT. Kondisi NORMAL diuji ketika panel surya menerima penyinaran matahari secara optimal tanpa gangguan. Kondisi SHADOW disimulasikan dengan menutup sebagian permukaan panel, sedangkan kondisi CABLE FAULT disimulasikan dengan memutus kabel panel surya menuju SCC.

Tabel 4. Hasil Data Kondisi Normal

Parameter	Hasil
Tegangan	14,38 V
Arus	2,16 A
Daya	30,62 W
Intensitas Cahaya	54.612 lux
Status	NORMAL
Notifikasi	Tidak ada

Tabel 5. Hasil Data Kondisi Gangguan Shadow

Parameter	Hasil
Tegangan	8,20 V
Arus	0,0002 A
Daya	0,002 W
Intensitas Cahaya	67,5 lux
Status	SHADOW
Notifikasi	Ada

Tabel 6. Hasil Data Kondisi Gangguan Cable Fault

Parameter	Hasil
Tegangan	1,01 V
Arus	0 A
Daya	0 W
Intensitas Cahaya	1.496,67 lux
Status	CABLE FAULT
Notifikasi	Ada

Pada kondisi NORMAL, intensitas cahaya, arus, dan daya berada di atas nilai ambang sehingga sistem menetapkan status NORMAL tanpa mengirimkan notifikasi. Pada kondisi SHADOW, intensitas cahaya turun menjadi 67,5 lux yang diikuti penurunan drastis arus dan daya, sedangkan tegangan tetap terbaca karena panel masih terhubung dengan baterai melalui SCC, sehingga sistem menetapkan status SHADOW dan mengirimkan notifikasi. Pada kondisi CABLE FAULT, intensitas cahaya tetap tinggi karena panel masih menerima penyinaran matahari, namun arus dan daya bernilai nol akibat terputusnya jalur kabel menuju SCC, sehingga sistem berhasil membedakannya dari kondisi SHADOW dan menetapkan status CABLE FAULT beserta notifikasinya. Tampilan dashboard aplikasi Blynk pada ketiga kondisi tersebut ditunjukkan pada Gambar 3, Gambar 4, dan Gambar 5.



Gambar 3. Dashboard Blynk Kondisi Normal



Gambar 4. Dashboard Blynk Kondisi Gangguan Shadow



Gambar 5. Dashboard Blynk Kondisi Gangguan Cable Fault

Hasil pengujian membuktikan bahwa metode Rule-Based Fault Detection mampu membedakan gangguan akibat bayangan (shadow) dan gangguan akibat terputusnya jalur kabel (cable fault), karena keputusan deteksi tidak hanya berdasarkan satu parameter, melainkan mempertimbangkan hubungan antara intensitas cahaya, arus, dan daya secara bersamaan. Notifikasi pada aplikasi Blynk dikirimkan secara real-time segera setelah gangguan terdeteksi, tanpa menunggu interval pencatatan data logging setiap 5 menit, sehingga pengguna dapat segera mengetahui dan menindaklanjuti gangguan yang terjadi pada sistem panel surya.

4. Analisis Daya Tahan Baterai

Analisis daya tahan baterai dilakukan untuk mengetahui lama waktu operasional sistem ketika panel surya tidak menghasilkan energi listrik, misalnya pada malam hari. Berdasarkan total konsumsi arus seluruh komponen sebesar 1,355 A dan kapasitas baterai VRLA 12 V 20 Ah, diperoleh estimasi lama operasi selama 14,76 jam apabila kapasitas baterai digunakan secara penuh. Dengan mempertimbangkan Depth of Discharge (DoD) sebesar 50% untuk menjaga umur pakai baterai, kapasitas yang dapat digunakan menjadi 10 Ah sehingga estimasi lama operasi sistem menjadi sekitar 7,38 jam. Hasil ini menunjukkan bahwa kapasitas baterai yang digunakan telah memadai untuk mendukung operasional sistem monitoring dan deteksi dini gangguan panel surya sesuai kebutuhan penelitian.

KESIMPULAN

1. Sistem monitoring panel surya berbasis Internet of Things (IoT) berhasil dirancang dan dibangun menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan sensor INA219, dan BH1750, serta mampu mengakuisisi data tegangan, arus, daya, dan intensitas cahaya secara realtime.
2. Mekanisme data logging berhasil diimplementasikan dengan menyimpan seluruh data hasil monitoring secara otomatis ke Google Spreadsheet setiap interval 5 menit sebagai dasar analisis kinerja panel surya.
3. Metode Rule-Based Fault Detection berhasil diimplementasikan menggunakan parameter intensitas cahaya, arus, dan daya, serta mampu mengidentifikasi kondisi NORMAL, SHADOW, dan CABLE FAULT sesuai aturan yang ditetapkan.
4. Integrasi sistem dengan platform Blynk dan Google Spreadsheet berhasil dilakukan; aplikasi Blynk mampu menampilkan parameter monitoring dan status kondisi panel surya secara real-time serta mengirimkan notifikasi otomatis ketika sistem mendeteksi gangguan.
5. Hasil pengujian selama 24 jam menunjukkan nilai maksimum pada kondisi charging berupa tegangan 14,38 V, arus 2,16 A, daya 30,62 W, dan intensitas cahaya 54.612 lux, sedangkan pada kondisi discharging arus dan daya menurun mendekati 0 A dan 0 W, sehingga sistem terbukti mampu memantau siklus operasional panel surya serta mendeteksi kondisi NORMAL, SHADOW, dan CABLE FAULT secara akurat dan real-time.

SARAN

1. Mengembangkan metode deteksi gangguan menggunakan algoritma berbasis machine learning atau artificial intelligence sehingga sistem mampu mengenali lebih banyak jenis gangguan dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi dibandingkan metode rule-based.
2. Menambahkan parameter monitoring lain, seperti kelembapan lingkungan atau pengukuran arus dan tegangan pada sisi baterai dan beban, sehingga kondisi sistem pembangkit dapat dipantau secara lebih menyeluruh.
3. Mengimplementasikan sistem pada instalasi panel surya berkapasitas lebih besar dan melakukan pengujian dalam jangka waktu lebih panjang untuk mengevaluasi keandalan sistem pada berbagai kondisi cuaca.
4. Menambahkan fitur pencatatan riwayat gangguan, analisis tren performa panel surya, serta dashboard berbasis web agar proses monitoring dan evaluasi kinerja sistem menjadi lebih komprehensif.
5. Mengembangkan sistem notifikasi dengan beberapa media komunikasi tambahan, seperti Telegram atau WhatsApp, agar informasi gangguan dapat diterima pengguna melalui lebih dari satu platform.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), "Statistik Energi Indonesia 2023," 2023.

[2] International Energy Agency (IEA), "World Energy Outlook 2022," 2022.

[3] J. A. Duffie and W. A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley & Sons, 2013.

[4] P. H. Ilra, A. Faisal, and R. Juliangga, "Analisis Kinerja Panel Surya Akibat Akumulasi Debu pada Permukaan Modul Fotovoltaik," J. Komput. Teknol. Inf. Sist. Komput., vol. 5, no. 1, pp. 104–113, 2026.

[5] A. Al Amin and M. Yuhendri, "IoT Based Monitoring System of Power Supplies Using Solar Panel and PLN," J. Ind. Autom. Electr. Eng., vol. 2, no. 1, pp. 194–200, 2025.

[6] W. I. Kusumawati, A. N. Malik, H. Harianto, and P. Susanto, "Monitoring Tenaga Panel Surya Berbasis IoT (Internet of Things) di Lahan Padi," MULTITEK Indones. J. Ilm., vol. 18, no. 1, pp. 28–43, 2024.

[7] L. O. Sari, M. F. E. Saputra, and E. Safrianti, "Sistem Monitoring Arus Listrik Berbasis Internet of Things (IoT) pada Solar Panel di Laboratorium PLTS UIN Suska Riau," MALCOM Indones. J. Mach. Learn. Comput.

Sci., vol. 4, no. 1, pp. 205–211, 2024.

[8] T. S. Madjowa, J. Ilham, I. Hidayat, S. Abdussamad, S. Tansa, and I. Z. Nasibu, "Solar Power Plant (PLTS) Power Monitoring System Based on the Internet of Things (IoT) Using the Blynk and Telegram Platforms," Emit. J. Tek. Elektro, pp. 8–15, 2026.

[9] International Electrotechnical Commission (IEC), "IEC 61724: Photovoltaic System Performance Monitoring – Guidelines," 2017.

[10] A. E. Lazzaretti et al., "A Monitoring System for Online Fault Detection and Classification in Photovoltaic Plants," Sensors, vol. 20, no. 17, p. 4688, 2020.

[11] B. M. Severiano et al., "A Robust Rule-Based Method for Detecting and Classifying Underperformance in Photovoltaic Systems Using Inverter Data," Sol. Energy, vol. 308, p. 114382, 2026.

[12] T. Hidayat, "Teknologi Deteksi dan Diagnosis Kerusakan pada PLTS," J. Tek. Elektro, vol. 9, no. 1, pp. 11–18, 2020.

[13] T. Sutikno, H. S. Purnama, A. Pamungkas, A. Fadlil, I. M. Alsofyani, and M. H. Jopri, "Internet of Things-Based Photovoltaics Parameter Monitoring System Using NodeMCU ESP8266," Int. J. Electr. Comput. Eng., vol. 11, no. 6, 2021.

[14] B. T. K. L. D. Cari, "ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika."