

PENGEMBANGAN SISTEM KONTROL DAN MONITORING ENERGI PADA MINI PLTS OFF-GRID

TESIS

Oleh:
ISKANDAR
NIM: 7312411009

Disusun Untuk Memenuhi salah satu syarat Memperoleh gelar
Magister Terapan Program Studi Teknik Komputer



**PROGRAM STUDI
MAGISTER TERAPAN TEKNIK KOMPUTER
POLITEKNIK NEGERI BATAM
2026**

LEMBAR PENGESAHAN

PENGEMBANGAN SISTEM KONTROL DAN MONITORING ENERGI PADA MINI PLTS OFF-GRID

Oleh:

ISKANDAR

NIM: 7312411009

Telah diuji dan dipertahankan di depan Tim Penguji
dalam Sidang Akhir Tesis
pada tanggal 30 Juli 2026

Dan dinyatakan **LULUS**

polibatam

Batam, 10 Agustus 2026

Disetujui dan disahkan oleh:

Pembimbing Utama,



Andy Triwinarko, ST, M.T., Ph.D.

NIP: 197910072012121001

Pembimbing Pendamping,



Didi Istardi, S.T., M.Sc., Ph.D.

NIP: 197711182012121002

ABSTRAK

PENGEMBANGAN SISTEM KONTROL DAN MONITORING ENERGI PADA MINI PLTS OFF-GRID

Oleh

ISKANDAR

NIM: 7312411009

(Program Studi Magister Teknik Komputer)

Penelitian ini mengembangkan sistem kontrol dan monitoring energi pada mini Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *off-grid* berkapasitas 100 W berbasis *embedded system* dengan komunikasi LoRa, protokol MQTT, dan platform otomasi Home Assistant. Penelitian ini dilatarbelakangi oleh tiga keterbatasan sistem monitoring PLTS *off-grid* yang ada: ketergantungan pada koneksi internet, tidak adanya mekanisme pengendalian beban otomatis berbasis kondisi sistem secara *real-time*, serta belum tersedianya validasi performa sistem terintegrasi secara *end-to-end*. Sistem yang dikembangkan terdiri dari tiga lapisan: lapisan energi (panel surya monokristalin 100 Wp, *charge controller* MPPT Epever Tracer 3210AN, baterai LiFePO₄ 12V 20Ah, dan inverter *pure sine wave* 300W), lapisan akuisisi dan komunikasi (sensor INA219, PZEM-004T, mikrokontroler ESP32-WROOM, dan modul LoRa SX1276), serta lapisan kontrol dan visualisasi (*gateway* LoRa lokal berbasis *laptop*/PC, broker MQTT Mosquitto, dan Home Assistant). Sistem menerapkan pendekatan *rule-based control* dengan mekanisme *load shedding* tiga tingkat berbasis *State of Charge* (SOC) baterai dan beroperasi sepenuhnya tanpa koneksi internet menggunakan arsitektur *edge computing* lokal. Pengujian dilakukan di Gedung Techno Politeknik Negeri Batam dengan empat skenario: akurasi sensor, keandalan komunikasi LoRa, efektivitas *load shedding*, dan stabilitas sistem. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor INA219 mencapai MAE tegangan 0,82% (target $\leq \pm 1\%$), komunikasi LoRa mempertahankan *Packet Loss Rate* 5% pada jarak 3 km kondisi NLOS (target $< 5\%$), sistem *load shedding* otomatis menghasilkan penghematan energi 24% (target $\geq 20\%$), dan sistem beroperasi dengan *uptime* 99,7% selama 7 hari pengujian kontinu (target $> 99\%$). Penelitian ini membuktikan kelayakan arsitektur *edge computing* lokal berbasis LoRa dan Home Assistant sebagai solusi monitoring dan kontrol PLTS *off-grid* yang mandiri, hemat biaya operasional, dan dapat direplikasi di wilayah terpencil tanpa infrastruktur internet.

Kata kunci: PLTS *off-grid*, LoRa, MQTT, ESP32, Home Assistant, monitoring energi, *rule-based control*, *load shedding*, *embedded system*, *edge computing*

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF AN ENERGY CONTROL AND MONITORING SYSTEM FOR AN OFF-GRID MINI PHOTOVOLTAIC POWER PLANT

By

ISKANDAR

NIM: 7312411009

(Master's Program in Computer Engineering)

This study develops an energy monitoring and control system for a 100 W mini off-grid Solar Power Plant (SPP) based on an embedded system integrating LoRa communication, MQTT protocol, and the Home Assistant automation platform. The research is motivated by three critical limitations of existing off-grid SPP monitoring systems: dependency on internet connectivity, the absence of real-time condition-based automatic load control mechanisms, and the lack of end-to-end integrated system performance validation. The developed system comprises three layers: an energy layer (100 Wp monocrystalline solar panel, Epever Tracer 3210AN MPPT charge controller, 12V 20Ah LiFePO₄ battery, and 300W pure sine wave inverter), an acquisition and communication layer (INA219 sensor, PZEM-004T sensor, ESP32-WROOM microcontroller, and LoRa SX1276 module), and a control and visualization layer (laptop/PC-based local LoRa gateway, Eclipse Mosquitto MQTT broker, and Home Assistant platform). The system implements a rule-based control approach with a three-tier load shedding mechanism based on battery State of Charge (SOC), operating entirely without internet connectivity through a local edge computing architecture. Experimental validation was conducted at the Techno Building, Politeknik Negeri Batam, across four test scenarios: sensor accuracy, LoRa communication reliability, load shedding effectiveness, and system stability. Results demonstrate that the INA219 sensor achieves a voltage MAE of 0.82% (target $\leq \pm 1\%$), LoRa communication maintains a Packet Loss Rate of 5% at 3 km under Non-Line-of-Sight (NLOS) conditions (target $< 5\%$), the automated load shedding system achieves 24% energy savings (target $\geq 20\%$), and the system sustains 99.7% uptime over seven days of continuous operation (target $> 99\%$). These findings confirm the feasibility of a local edge computing architecture based on LoRa and Home Assistant as an autonomous, cost-efficient, and replicable monitoring and control solution for off-grid SPP deployment in remote areas without internet infrastructure.

Keywords: off-grid solar power plant; LoRa; MQTT; ESP32; Home Assistant; energy monitoring; rule-based control; load shedding; embedded system; edge computing

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT.....	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR TABEL.....	ix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Tujuan Penelitian	3
1.4. Manfaat Penelitian	4
1.5. Batasan Penelitian	5
1.6. Metodologi Penelitian	8
1.7. Sistematika Penulisan	11
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	13
2.1 Dasar Teori.....	13
2.1.1 Energi Surya dan Mini PLTS.....	13
2.1.2 Sistem Kontrol dan Monitoring Energi pada PLTS Off-Grid.....	18
2.2 Teknologi LoRa untuk Aplikasi PLTS Off-Grid	21
2.2.1 Keunggulan LoRa	22
2.2.2 Perbandingan LoRa dengan Teknologi Komunikasi Lain	23
2.3 Sistem <i>Existing</i> vs Solusi <i>Proposed</i>	24
2.3.1 Sistem <i>Existing</i>	24
2.3.2 Solusi Proposed (Home Assistant + LoRa).....	26
2.4 Gap Penelitian.....	27
2.5. Kerangka Teori Sistem <i>Proposed</i>	29
2.6. Penelitian Terdahulu	32
2.6.1. Penelitian Berbasis LoRa untuk Monitoring Energi	33
2.6.2. Penelitian Berbasis ESP32 dan MQTT untuk Monitoring PV.....	33
2.6.3. Penelitian Manajemen Energi Berbasis Aturan	34
2.6.4. Penelitian AIoT untuk Sistem Fotovoltaik.....	34
2.6.5. Posisi Penelitian Ini.....	35

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN	37
3.1. Rancangan dan Pendekatan Penelitian.....	37
3.1.1. Justifikasi Pemilihan Metode Penelitian	37
3.1.2. Kerangka Metodologi Penelitian.....	40
3.1.3. Metode Penelitian untuk Setiap Objektif	41
3.1.4. Pendekatan Iteratif dan Validasi Sistem	42
3.1.5. Instrumen dan Tools Penelitian.....	44
3.1.6. Kriteria Keberhasilan Penelitian	45
3.2. Alur Penelitian	46
3.2.1. Ringkasan Tahapan Penelitian	48
3.2.2. Kriteria Transisi Antar Tahap (Gate Review).....	49
3.3. Desain Sistem.....	51
3.3.1. Jalur Energi (Energy Pathway)	53
3.3.2. Jalur Monitoring dan Kontrol	56
3.4. Spesifikasi Perangkat Keras.....	63
3.5. Spesifikasi Perangkat Lunak.....	65
3.6. Prosedur Pengujian	66
3.6.1. Pengujian Kinerja Jalur Energi dan Akurasi Sensor	67
3.6.2. Pengujian Performa Komunikasi LoRa	70
3.6.3. Pengujian Otomasi Home Assistant.....	71
3.6.4. Verifikasi Mekanisme <i>Fail-Safe</i>	72
3.6.5. Pengujian Protokol Komunikasi MQTT	72
3.7. Analisis Data	73
BAB IV PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI SISTEM	75
4.1. Gambaran Umum Sistem	75
4.2. Perancangan dan Implementasi Arsitektur Sistem.....	76
4.2.1. Implementasi Arsitektur Perangkat Keras	78
4.2.2. Implementasi Arsitektur Perangkat Lunak.....	79
4.2.3. Implementasi Alur Data Sistem	79
4.3. Implementasi Perangkat Keras.....	81
4.3.1. Implementasi Sistem Energi	81
4.3.2. Implementasi Sistem Monitoring.....	83
4.3.3. Implementasi Sistem Komunikasi	84
4.4. Implementasi Dashboard Monitoring dan Sistem Kontrol	86

4.4.1.	Implementasi Dashboard Home Assistant	86
4.4.2.	Implementasi MQTT dan Aliran Data	88
4.4.3.	Implementasi Otomasi Load Shedding	88
4.4.4.	Hasil Implementasi Monitoring dan Kontrol	90
BAB V. PENGUJIAN DAN ANALISIS SISTEM		91
5.1.	Pendahuluan	91
5.2.	Implementasi Dashboard Monitoring	91
5.3.	Pengujian Akurasi Sensor	92
5.3.1.	Pengujian Sensor INA219.....	92
5.3.2.	Hasil Pengujian Sensor PZEM-004T (AC).....	93
5.4.	Pengujian Komunikasi LoRa	94
5.5.	Pengujian Komunikasi MQTT dan Dashboard.....	96
5.6.	Pengujian Otomasi Load Shedding.....	97
5.7.	Pengujian Stabilitas Sistem	98
5.8.	Pembahasan Umum	99
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN		102
6.1.	Kesimpulan	102
6.2.	Saran	103
DAFTAR PUSTAKA		105

DAFTAR GAMBAR

Figure 1. Arsitektur Three-Tier Sistem Proposed.....	30
Figure 2 V-Model Metodologi Penelitian.....	40
Figure 3 Diagram Alur Penelitian	48
Figure 4 Gantt chart timeline penelitian thesis	51
Figure 5 Arsitektur Desain Sistem	52
Figure 6 Diagram komunikasi.....	58
Figure 7 Jalur Energi.....	62
Figure 8 Diagram Arsitektur Sistem	75
Figure 9 Implementasi Arsitektur Sistem Mini PLTS Off-grid.....	77
Figure 10 Implementasi Perangkat Keras Sistem.....	78
Figure 11 Implementasi Komunikasi MQTT dan Home Assistant.....	79
Figure 12 Diagram Alur Data Sistem	80
Figure 13 Implementasi Sistem Energi.....	82
Figure 14 Implementasi Sistem Monitoring	84
Figure 15 Dashboard Monitoring Home Assistant.....	87
Figure 16 Monitoring Topic MQTT menggunakan MQTT Explorer.....	88
Figure 17 Alur otomasi.....	89
Figure 18 Konfigurasi Automation Home Assistant	90
Figure 19 Dashboard Monitoring Home Assistant.....	92
Figure 20 Grafik Error Pengukuran Sensor INA219.....	93
Figure 21 Grafik Error Pengukuran Sensor PZEM-004T	94
Figure 22 Grafik hubungan jarak terhadap packet loss rate (PLR) pada komunikasi LoRa	95
Figure 23 Grafik RSSI terhadap Jarak	95
Figure 24 MQTT Explorer	96
Figure 25 Dashboard Home Assistant Saat Pengujian	97

DAFTAR TABEL

Table 1 Ringkasan Justifikasi Pemilihan Komponen	16
Table 2 Perbandingan Teknologi Komunikasi Nirkabel untuk Sistem IoT.....	24
Table 3 Komparasi Sistem Monitoring PLTS Off-Grid	27
Table 4 Perbandingan karakteristik penelitian terdahulu dengan penelitian yang diusulkan	35
Table 5 Perbandingan Kontribusi Penelitian.....	36
Table 6 Pemetaan Tujuan Penelitian, Metode, Indikator Keberhasilan, dan Luaran Penelitian	41
Table 7 Instrumen dan Tools Penelitian	44
Table 8 Kriteria Keberhasilan Penelitian	45
Table 9 Ringkasan Tahapan, Jadwal, dan Deliverable Penelitian	49
Table 10 Gate Review Criteria.....	49
Table 11 Jadwal Penelitian dan Milestone	50
Table 12 Spesifikasi Komponen Jalur Energi.....	54
Table 13 Klasifikasi Prioritas Beban	56
Table 14 Spesifikasi Komponen Jalur Monitoring dan Kontrol.....	57
Table 15 Spesifikasi Perangkat Keras	65
Table 16 Spesifikasi Perangkat Lunak	66
Table 17 Parameter Pengujian Jalur Energi	68
Table 18 Peralatan Pengujian dan Kalibrasi.....	69
Table 19 Parameter Pengujian Komunikasi LoRa	71
Table 20 Parameter Pengujian Otomasi Home Assistant	72
Table 21 Parameter Pengujian MQTT	73
Table 22 Spesifikasi Aktual Komponen Sistem Energi	82
Table 23 Implementasi Sensor Monitoring.....	84
Table 24 Konfigurasi Parameter LoRa yang Diimplementasikan	85
Table 25 Topic MQTT yang Diimplementasikan	85
Table 26 Tingkat prioritas beban	89
Table 27 Sampel Hasil Pengujian Sensor INA219.....	92
Table 28 Ringkasan Statistik Pengujian INA219 (100 sampel)	93
Table 29 Sampel Hasil Pengujian Sensor PZEM-004T	93
Table 30 Ringkasan Statistik Pengujian PZEM-004T (100 sampel)	94
Table 31 Hasil Pengujian Komunikasi LoRa.....	95
Table 32 Hasil Pengujian MQTT	97
Table 33 Perbandingan Sistem dengan dan tanpa Automasi	97
Table 34 Hasil Uji Stabilitas 7 Hari.....	98

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Akses energi yang andal di daerah terpencil masih menjadi tantangan di Indonesia, terutama di wilayah yang belum terjangkau jaringan listrik utama. Data (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2025) menunjukkan bahwa rasio elektrifikasi nasional mencapai 99,5%, namun masih terdapat sekitar 2.590 desa yang belum dialiri listrik, sebagian besar berlokasi di wilayah terluar dan terpencil. Salah satu solusi potensial adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) off-grid skala mini, yang dapat beroperasi secara mandiri tanpa bergantung pada jaringan PLN.

Meskipun menjanjikan, implementasi PLTS off-grid skala mini di daerah terpencil masih menghadapi tiga tantangan teknis utama:

1. Sistem monitoring konvensional berbasis cloud (WiFi/4G) sulit diterapkan di daerah terpencil karena infrastruktur jaringan tidak tersedia atau tidak stabil. Data BPS (Badan Pusat Statistik, 2025) menunjukkan hanya 45% desa di Indonesia memiliki akses internet 4G yang stabil, sehingga sistem monitoring berbasis cloud tidak dapat diandalkan untuk operasional berkelanjutan. (Khan et al., 2024)
2. Sistem existing umumnya hanya menampilkan data secara pasif tanpa kemampuan pengambilan keputusan otomatis. Tidak adanya mekanisme load shedding berbasis State of Charge (SOC) baterai mengakibatkan risiko deep discharge yang dapat menurunkan umur pakai baterai hingga 40% pada baterai VRLA/Li-ion dalam kondisi penggunaan intensif (Syahputra & Soesanti, 2021). Selain itu, sistem tidak memiliki mekanisme deteksi dini untuk kondisi abnormal seperti over-current, under-voltage, atau kegagalan komponen (Syahputra & Soesanti, 2021).
3. Sistem monitoring lokal berbasis WiFi memiliki jangkauan terbatas (< 100 meter), sehingga tidak cocok untuk konfigurasi multi-node atau PLTS yang tersebar di beberapa lokasi. Hal ini menghambat skalabilitas sistem untuk aplikasi komunitas atau area yang lebih luas.

Sejauh kajian penulis, belum terdapat sistem yang mengintegrasikan komunikasi LoRa, load shedding berbasis SOC, dan arsitektur multi-node secara bersamaan pada konteks PLTS off-grid skala mini di daerah terpencil.

Perkembangan teknologi embedded system berdaya rendah seperti ESP32 dan protokol komunikasi jarak jauh hemat daya seperti LoRa (Long Range) membuka peluang untuk mengatasi kendala tersebut. Teknologi LoRa mampu mentransmisikan data hingga jarak 5-15 km dengan konsumsi daya sangat rendah (0,1 W pada mode sleep), sehingga cocok untuk aplikasi off-grid tanpa memerlukan infrastruktur internet. (Augustin et al., 2016)

Fokus Penelitian:

Selain LoRa sebagai media komunikasi nirkabel, penelitian ini memanfaatkan protokol MQTT sebagai mekanisme pertukaran data antara gateway dan Home Assistant. MQTT dipilih karena menggunakan arsitektur publish-subscribe yang ringan, memiliki kebutuhan bandwidth rendah, mendukung komunikasi real-time, serta sesuai untuk perangkat embedded dengan sumber daya terbatas.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini berfokus pada perancangan dan implementasi sistem kontrol dan monitoring energi pada mini PLTS off-grid berkapasitas 100 W yang memiliki karakteristik:

1. Mandiri tanpa internet: Menggunakan komunikasi LoRa untuk transmisi data jarak jauh tanpa ketergantungan pada cloud atau jaringan seluler
 2. Kontrol otomatis berbasis aturan (rule-based): Implementasi load shedding otomatis saat SOC baterai < 20% untuk melindungi baterai dari deep discharge
 3. Deteksi kondisi abnormal: Monitoring real-time parameter kritis (tegangan, arus, suhu, SOC) dengan sistem alert untuk kondisi di luar batas operasional normal
 4. Skalabilitas tinggi: Arsitektur multi-node yang mendukung penambahan sensor atau lokasi monitoring tanpa perubahan infrastruktur signifikan
- Sistem yang dikembangkan menggunakan pendekatan rule-based control sederhana yang tidak memerlukan komputasi kompleks, sehingga cocok

untuk implementasi pada embedded system berdaya rendah dan dapat diandalkan untuk operasional jangka panjang di lingkungan off-grid.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, penelitian ini berupaya menjawab tiga pertanyaan penelitian utama:

- 1 Bagaimana merancang sistem monitoring energi real-time pada mini PLTS off-grid yang dapat beroperasi tanpa koneksi internet menggunakan teknologi komunikasi LoRa?
- 2 Bagaimana mengimplementasikan mekanisme kontrol otomatis berbasis rule-based untuk load shedding saat SOC baterai mencapai batas kritis ($< 20\%$) guna melindungi umur pakai baterai?
- 3 Bagaimana performa sistem yang dikembangkan dalam hal:
 - a. Akurasi pembacaan sensor energi (target error $\leq \pm 1\%$)
 - b. Keandalan komunikasi LoRa jarak jauh (target packet loss $< 5\%$ pada jarak 5 km)
 - c. Efisiensi kontrol beban otomatis (target penghematan energi $\geq 20\%$ saat kondisi SOC rendah).

1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem kontrol dan monitoring energi berbasis embedded system pada mini PLTS off-grid berkapasitas 100 W yang mandiri tanpa koneksi internet. Secara khusus, tujuan penelitian ini adalah:

1. Merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring energi real-time berbasis embedded system ESP32 dan sensor INA219/PZEM-004T untuk membaca parameter kunci PLTS off-grid (tegangan, arus, daya, dan State of Charge baterai) tanpa ketergantungan pada koneksi internet.
2. Mengembangkan sistem kontrol otomatis berbasis aturan (rule-based) menggunakan platform Home Assistant untuk load shedding saat SOC baterai mencapai batas kritis ($< 20\%$), guna melindungi umur pakai baterai dari deep discharge.

3. Mengimplementasikan komunikasi data jarak jauh multi-node menggunakan teknologi LoRa pada frekuensi 923 MHz dengan konfigurasi hemat daya yang sesuai untuk aplikasi off-grid di daerah terpencil.
4. Mengevaluasi performa sistem secara komprehensif berdasarkan tiga indikator kinerja utama:
 - a. Akurasi pembacaan sensor energi dengan target error maksimal $\pm 1\%$
 - b. Keandalan komunikasi LoRa dengan target packet loss $< 5\%$ pada jarak operasional hingga 5 km
 - c. target penghematan energi minimal 20% dibandingkan kondisi operasi tanpa sistem load shedding otomatis, saat SOC baterai berada di bawah ambang kritis.

1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi pada tiga aspek utama:

1. Manfaat Akademik

- a. Memberikan kontribusi pada pengembangan ilmu sistem kontrol dan monitoring energi berbasis *embedded system*, khususnya pada aspek integrasi komunikasi LoRa dengan platform otomasi *open-source* untuk aplikasi PLTS *off-grid*.
- b. Menyediakan metodologi validasi performa sistem terintegrasi yang mencakup akurasi sensor, keandalan komunikasi, dan efisiensi kontrol, sehingga dapat menjadi referensi metodologis bagi penelitian sejenis di bidang energi terbarukan.
- c. Memperkaya kajian implementasi *rule-based control* pada sistem energi terbarukan di wilayah terpencil melalui pendekatan yang terukur dan dapat direproduksi secara ilmiah.

2. Manfaat Teknis

- a. Menghasilkan arsitektur sistem monitoring real-time yang beroperasi secara mandiri tanpa ketergantungan pada infrastruktur internet atau layanan *cloud*, sehingga cocok diterapkan di wilayah minim infrastruktur telekomunikasi.

- b. Memberikan bukti empiris tentang kelayakan penggunaan sensor berbiaya rendah (INA219/PZEM-004T) untuk aplikasi monitoring energi yang menuntut akurasi tinggi pada kondisi operasional nyata.
- c. Mendemonstrasikan efektivitas strategi *load shedding* berbasis *State of Charge* (SOC) sebagai mekanisme perlindungan baterai dari kondisi *deep discharge* sekaligus instrumen efisiensi energi pada sistem PLTS *off-grid*.

3. Manfaat Praktis

- a. Menyediakan solusi monitoring dan kontrol PLTS *off-grid* yang hemat biaya operasional jangka panjang karena tidak memerlukan biaya langganan internet atau layanan *cloud*, sehingga meningkatkan keberlangsungan operasional sistem di daerah terpencil.
- b. Mendukung pencapaian *Sustainable Development Goals* (SDG) ke-7 tentang akses energi bersih dan terjangkau, dengan menyediakan sistem yang dapat meningkatkan keandalan dan efisiensi operasional PLTS skala kecil di daerah yang belum terjangkau jaringan listrik PLN.
- c. Menghasilkan sistem yang mudah direplikasi oleh praktisi dan peneliti lain, didukung oleh penggunaan komponen yang tersedia di pasaran lokal serta dokumentasi implementasi yang terstruktur dan lengkap.

1.5. Batasan Penelitian

Agar penelitian ini terfokus dan sesuai dengan sumber daya yang tersedia, batasan penelitian ditetapkan sebagai berikut:

1. Ruang Lingkup Sistem

- a. Sistem PLTS *off-grid* skala mini dengan kapasitas 100 W dalam konfigurasi *standalone*.
- b. Tidak mencakup sistem *hybrid* (integrasi dengan PLN atau genset), sistem *grid-connected*, skala besar (>1 kW), atau integrasi sumber energi lain (turbin angin, diesel).
- c. Fokus pada satu titik instalasi dengan maksimal 3 node sensor untuk validasi kemampuan komunikasi *multi-node*.

2. Parameter yang Dimonitor

- a. Parameter kelistrikan DC: tegangan dan arus panel surya, tegangan dan SOC baterai.
- b. Parameter kelistrikan AC: tegangan, arus, daya aktif, dan konsumsi energi beban melalui inverter.
- c. Parameter lingkungan (suhu *ambient*, iradiasi matahari, dan kelembaban) tidak diukur secara langsung; apabila diperlukan untuk analisis, data diperoleh dari stasiun cuaca terdekat sebagai referensi sekunder.

3. Teknologi Komunikasi dan Arsitektur Sistem

- a. Sistem komunikasi menggunakan protokol LoRa pada frekuensi 923 MHz sesuai regulasi Indonesia untuk transmisi data antara node sensor dan *gateway* lokal.
- b. Arsitektur sistem bersifat lokal/*edge computing* tanpa koneksi ke internet, jaringan seluler (4G/5G), atau layanan *cloud* eksternal. Keputusan ini didasarkan pada konteks penerapan di daerah terpencil yang tidak memiliki infrastruktur internet stabil menggunakan *cloud server* justru akan menciptakan ketergantungan baru yang bertentangan dengan tujuan kemandirian sistem. Seluruh pemrosesan data, penyimpanan historis, dan eksekusi otomasi dilakukan secara lokal pada ESP32 *gateway* yang berfungsi sebagai *edge server*, sehingga sistem tetap beroperasi penuh bahkan tanpa koneksi internet sama sekali..
- c. Server kontrol menggunakan platform *open-source* (Home Assistant) yang berjalan pada perangkat lokal laptop/PC.

4. Lingkungan dan Durasi Pengujian

- a. Pengujian dilakukan dalam lingkungan Gedung Techno dan simulasi *outdoor* terkontrol dengan durasi maksimal 2 minggu per skenario uji.
- b. Beban pengujian menggunakan *resistive dummy load* dengan kapasitas maksimal 100 W untuk merepresentasikan konsumsi peralatan rumah tangga (lampu, kipas angin, *charger*).
- c. Tidak termasuk uji lapangan jangka panjang (>1 bulan) atau pengujian pada kondisi cuaca ekstrem (badai, banjir, suhu <0°C atau >50°C). Untuk kondisi cuaca ekstrem, sistem dilengkapi mekanisme proteksi

dasar berupa *enclosure weatherproof* (rating IP65) pada modul ESP32 dan LoRa, proteksi *thermal shutdown* pada inverter saat suhu $>65^{\circ}\text{C}$, serta proteksi *over-voltage* dan *under-voltage* pada *charge controller* MPPT. Pengujian ketahanan pada kondisi cuaca ekstrem yang lebih komprehensif direkomendasikan pada tahap pengembangan lanjutan.

5. Metode Kontrol Sistem

- a. Sistem kontrol menggunakan pendekatan *rule-based* (berbasis aturan) sederhana yang bersifat deterministik, tanpa algoritma *Machine Learning* atau *Artificial Intelligence*, sehingga sesuai untuk *proof-of-concept* pada sistem dengan komputasi terbatas.
- b. Logika kontrol yang diimplementasikan mencakup tiga fungsi utama:
 - 1) *load shedding* otomatis saat SOC baterai $<20\%$
 - 2) proteksi *over-current*, dan
 - 3) notifikasi kondisi abnormal.
- c. Tidak mencakup prediksi beban berbasis AI, optimasi MPPT adaptif menggunakan ML, atau prediksi kerusakan komponen berbasis data historis. Pendekatan *rule-based* dipilih pada penelitian ini karena tiga alasan:
 - 1) Tidak memerlukan data *training* dalam jumlah besar yang sulit diperoleh pada sistem *proof-of-concept* baru;
 - 2) Bersifat deterministik sehingga perilaku sistem dapat diprediksi dan diverifikasi; dan
 - 3) Komputasi ringan sehingga dapat dijalankan pada *embedded system* berdaya rendah seperti ESP32. Penerapan AI/ML pada sistem PLTS *off-grid* - misalnya prediksi SOC berbasis *neural network*, deteksi anomali komponen, atau prediksi produksi energi berdasarkan data cuaca - merupakan arah pengembangan lanjutan yang memerlukan dataset historis operasional yang memadai, dan direkomendasikan sebagai penelitian lanjutan setelah sistem dasar ini tervalidasi.
- d. Batasan-batasan di atas ditetapkan berdasarkan pertimbangan ketersediaan sumber daya, durasi penelitian, serta fokus pada validasi

konsep dasar sistem monitoring dan kontrol PLTS *off-grid* berbasis *embedded system* dan komunikasi LoRa.

1.6. Metodologi Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan rekayasa sistem (*engineering design*) dengan metode pengembangan eksperimental yang terdiri dari lima tahap utama:

1. Studi Literatur dan Analisis Gap

Tahap ini mengkaji literatur terkait sistem PLTS *off-grid*, teknologi monitoring berbasis *embedded system*, dan protokol komunikasi LoRa. Analisis dilakukan terhadap:

- a. Penelitian terdahulu tentang sistem monitoring PLTS (2019–2025).
- b. Spesifikasi teknis komponen (panel surya, *charge controller*, baterai, sensor, mikrokontroler).
- c. Perbandingan teknologi komunikasi (WiFi vs LoRa vs Zigbee) untuk mengidentifikasi solusi optimal.
- d. *Gap* penelitian melalui analisis kelebihan dan keterbatasan sistem *existing*.
- e. *Output: State-of-the-art review* dan justifikasi pemilihan teknologi.

2. Perancangan Sistem

Tahap ini merancang arsitektur sistem secara komprehensif:

- a. Perancangan Perangkat Keras:
 - 1) Diagram blok sistem PLTS mini 100W (panel surya → MPPT → baterai → inverter → beban).
 - 2) Pemilihan komponen berdasarkan kriteria efisiensi, ketersediaan, dan biaya, meliputi: panel surya 100Wp monokristalin (efisiensi >18%), sensor INA219 untuk DC (akurasi $\pm 1\%$) dan PZEM-004T untuk AC, mikrokontroler ESP32-WROOM (*dual-core*, WiFi/LoRa ready), serta modul LoRa SX1276/SX1278 (frekuensi 923 MHz).
 - 3) Skema jalur energi dan monitoring.
- b. Perancangan Perangkat Lunak:

- 1) *Firmware* ESP32 menggunakan Arduino IDE dengan *library*: Wire.h untuk komunikasi I²C, LoRa.h untuk transmisi data, dan PubSubClient.h untuk protokol MQTT.
- 2) Konfigurasi parameter LoRa: frekuensi 923 MHz, *Spreading Factor* 7, *Bandwidth* 125 kHz, dan *Coding Rate* 4/5.
- 3) Logika *rule-based control* untuk *load shedding*:
 - a) IF SOC < 20% THEN matikan beban non-prioritas.
 - b) IF tegangan panel < 10V (malam) THEN mode hemat daya.
- 4) Integrasi dengan Home Assistant untuk *dashboard* dan otomasi.
- c. Desain Protokol Komunikasi:
 - 1) Topologi: *star network* (multi-node → 1 *gateway*).
 - 2) Format data: JSON *lightweight*.
 - 3) Interval transmisi: 5 detik (mode normal) dan 30 detik (mode hemat daya).

Output: Diagram sistem, *bill of materials*, *pseudocode firmware*.

3. Implementasi Prototipe

Tahap ini membangun sistem fisik dan perangkat lunak:

- a. Perakitan *Hardware*:
 - 1) Instalasi panel surya 100Wp dengan sudut optimal ($\pm 15^\circ$ dari horizontal untuk lokasi Batam).
 - 2) Koneksi *charge controller* MPPT ke baterai LiFePO₄ 12V 20Ah.
 - 3) Pemasangan sensor INA219 pada bus DC dan PZEM-004T pada *output inverter*.
 - 4) Integrasi ESP32 dan modul LoRa dengan *casing weatherproof*.
- b. Pengembangan *Software*:
 - 1) Pemrograman *firmware* ESP32 untuk akuisisi data sensor setiap 5 detik, *filtering* data menggunakan *moving average filter* (*window size* = 5), dan transmisi via LoRa dengan *error handling*.
 - 2) Konfigurasi Home Assistant meliputi: *setup MQTT broker* (Mosquitto), konfigurasi sensor virtual untuk data LoRa, pembuatan *dashboard* monitoring *real-time*, dan otomasi *load shedding* berbasis SOC.

c. Kalibrasi Sensor:

- 1) Metode: *two-point calibration* menggunakan multimeter referensi (Fluke 87V, akurasi $\pm 0,05\%$).
- 2) Titik kalibrasi: 0V dan 12V untuk tegangan; 0A dan 5A untuk arus.
- 3) Koreksi *offset* dan *gain* melalui persamaan regresi linier.
- 4) Target akurasi: $error \leq \pm 1\%$.

Output: Sistem prototipe yang siap diuji, dokumentasi kode.

4. **Pengujian dan Validasi Performa**

Tahap ini mengevaluasi kinerja sistem secara kuantitatif:

a. Pengujian Akurasi Sensor:

- 1) Metode: perbandingan pembacaan sensor terhadap multimeter referensi dengan 100 sampel per parameter.
- 2) Analisis menggunakan *Mean Absolute Error* (MAE) dan *Root Mean Square Error* (RMSE).
- 3) Kriteria keberhasilan: $MAE \leq \pm 1\%$.

b. Pengujian Komunikasi LoRa:

- 1) Metode: pengiriman 500 paket data pada jarak bervariasi (100m, 500m, 1km, 3km, dan 5km) dalam kondisi LOS dan NLOS.
- 2) Parameter yang diukur: *Packet Loss Rate* (PLR), *latency*, dan RSSI (*Received Signal Strength Indicator*).
- 3) *Tools*: Wireshark untuk analisis paket, GPS untuk pemetaan lokasi.
- 4) Kriteria keberhasilan: $PLR < 5\%$, *latency* < 1 detik.

c. Pengujian Efisiensi *Load Shedding*:

- 1) Metode: simulasi kondisi SOC rendah menggunakan *dummy load* 100W dengan dua skenario, yaitu *baseline* (tanpa *load shedding*, SOC turun hingga 10%) dan *treatment* (dengan *load shedding*, SOC minimum 20%).
- 2) Parameter yang diukur: energi yang dihemat (Wh), waktu respons sistem, dan jumlah siklus *deep discharge* yang dicegah.
- 3) Kriteria keberhasilan: penghematan energi $\geq 20\%$, waktu respons < 500 ms.

d. Pengujian Stabilitas Sistem:

- 1) Metode: pengujian kontinyu selama 7 hari $\times$ 24 jam.
 - 2) Parameter: *uptime* sistem, *error rate*, dan *memory usage*.
 - 3) Kriteria keberhasilan: *uptime* >99%, tidak terjadi *system crash*.
- Output: dataset* hasil pengujian, grafik performa, *log* sistem.

5. Analisis Data dan Dokumentasi

Tahap ini menganalisis hasil pengujian dan menyusun rekomendasi:

- a. Pengolahan Data:
 - 1) *Tools*: Python (Pandas, NumPy, Matplotlib) untuk analisis statistik.
 - 2) Metode: analisis deskriptif dan uji hipotesis untuk data komparatif.
 - 3) Visualisasi: *time-series plot*, *heatmap*, dan *box plot*.
- b. Evaluasi Pencapaian Tujuan:
 - 1) Membandingkan hasil pengujian dengan target yang ditetapkan.
 - 2) Identifikasi faktor yang mempengaruhi performa sistem.
 - 3) Analisis *trade-off*, misalnya jangkauan vs konsumsi daya.
- c. Penyusunan Rekomendasi:
 - 1) Rekomendasi teknis untuk implementasi lapangan.
 - 2) Estimasi biaya implementasi per instalasi.
 - 3) Panduan *troubleshooting* dan *maintenance*.
 - 4) Saran untuk pengembangan sistem lanjutan.

Output: laporan akhir, dokumentasi teknis, publikasi ilmiah.

Metodologi ini dirancang untuk memastikan validitas dan reliabilitas hasil penelitian melalui pendekatan yang sistematis dan terukur.

1.7. Sistematika Penulisan

Tesis ini disusun dalam enam bab dengan sistematika sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan penelitian, metodologi penelitian secara ringkas, dan sistematika penulisan. Bab ini memberikan gambaran umum mengenai konteks, urgensi, dan ruang lingkup penelitian yang dilakukan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menguraikan landasan teori yang relevan dan hasil penelitian terdahulu, mencakup teknologi PLTS off-grid, sistem kontrol dan monitoring energi berbasis

embedded system, protokol komunikasi LoRa, serta platform otomasi open-source. Bab ini juga mengidentifikasi gap penelitian yang menjadi dasar pengembangan sistem yang diusulkan.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan secara rinci tahapan pelaksanaan penelitian, mulai dari studi literatur, perancangan sistem (hardware dan software), implementasi prototipe, hingga prosedur pengujian dan metode analisis data. Penelitian ini menggunakan pendekatan rekayasa sistem (engineering design) dengan metode pengembangan eksperimental.

BAB IV PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI SISTEM

Bab ini menguraikan proses perancangan arsitektur sistem secara komprehensif, meliputi desain jalur energi, jalur monitoring dan kontrol, pemilihan komponen (sensor, mikrokontroler, modul komunikasi), serta implementasi perangkat keras dan perangkat lunak. Bab ini juga membahas integrasi sistem dengan platform Home Assistant dan konfigurasi komunikasi LoRa.

BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil pengujian sistem dan analisis performa, meliputi akurasi sensor, keandalan komunikasi LoRa (jangkauan, latency, packet loss), efisiensi kontrol beban otomatis, dan stabilitas sistem. Pembahasan mencakup interpretasi hasil, perbandingan dengan target yang ditetapkan, serta identifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja sistem.

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini merangkum kesimpulan utama dari penelitian berdasarkan hasil pengujian dan analisis, serta memberikan saran untuk pengembangan sistem lebih lanjut, termasuk rekomendasi implementasi di lapangan dan potensi penelitian lanjutan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dasar Teori

2.1.1 Energi Surya dan Mini PLTS

Energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang paling melimpah dan dapat dimanfaatkan secara berkelanjutan. Intensitas radiasi matahari yang mencapai permukaan bumi pada kondisi Standard Test Condition (STC) rata-rata sebesar 1.000 W/m^2 , dengan potensi energi global mencapai sekitar 173.000 TW, jauh melampaui kebutuhan energi dunia yang diperkirakan hanya sekitar 18 TW (International Energy Agency (IEA), 2023). Potensi tersebut menjadikan energi surya sebagai salah satu alternatif utama dalam mendukung transisi energi bersih sekaligus meningkatkan rasio elektrifikasi, khususnya pada wilayah yang belum terjangkau jaringan listrik utama. Di Indonesia, pemanfaatan energi surya melalui Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) menjadi solusi yang semakin strategis karena karakteristik geografis yang terdiri atas ribuan pulau dengan tingkat penyebaran penduduk yang tidak merata (Karna et al., 2024).

PLTS dengan sistem off-grid atau standalone merupakan sistem pembangkit listrik yang dirancang untuk beroperasi secara mandiri tanpa terhubung dengan jaringan PLN. Sistem ini mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik arus searah (*Direct Current/DC*) melalui efek fotovoltaiik, kemudian menyimpan energi yang dihasilkan ke dalam baterai untuk digunakan ketika intensitas cahaya matahari rendah atau pada malam hari. Berbeda dengan sistem on-grid, PLTS off-grid memerlukan sistem penyimpanan energi dan strategi manajemen energi yang baik agar kontinuitas suplai listrik tetap terjaga. Oleh karena itu, performa sistem tidak hanya dipengaruhi oleh efisiensi panel surya, tetapi juga oleh karakteristik baterai, charge controller, inverter, kondisi lingkungan seperti temperatur, intensitas iradiasi, serta metode pengendalian energi yang diterapkan (Saini et al., 2024).

Pada penelitian ini digunakan mini PLTS off-grid berkapasitas 100 Wp sebagai media implementasi sistem monitoring dan kontrol energi. Kapasitas tersebut dipilih sebagai proof-of-concept karena telah mewakili karakteristik kerja

PLTS off-grid skala kecil, namun tetap memungkinkan proses pengujian dilakukan secara terkendali di lingkungan laboratorium. Sistem dirancang untuk mengintegrasikan jalur energi, jalur monitoring, serta mekanisme pengendalian otomatis sehingga dapat digunakan sebagai platform penelitian untuk mengevaluasi komunikasi LoRa, monitoring energi secara real-time, dan kontrol beban berbasis kondisi baterai.

Secara umum mini PLTS off-grid yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas lima komponen utama, yaitu panel surya, charge controller, baterai, inverter, dan sistem embedded berbasis ESP32 yang terintegrasi dengan sensor monitoring dan komunikasi LoRa. Setiap komponen memiliki fungsi yang saling berkaitan sehingga membentuk suatu sistem konversi, penyimpanan, distribusi, monitoring, dan pengendalian energi yang terintegrasi.

1. **Panel Surya Monokristalin 100 Wp**

Panel surya merupakan komponen utama yang berfungsi mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik arus searah (*DC*) melalui efek fotovoltaik. Penelitian ini menggunakan panel surya monokristalin berkapasitas 100 Wp karena memiliki efisiensi konversi yang lebih tinggi, yaitu sekitar 18-22%, dibandingkan panel polikristalin (15-17%) maupun thin-film (10-12%), sehingga mampu menghasilkan daya yang lebih besar pada luas permukaan yang sama (Rumagit et al., 2023). Kapasitas 100 Wp dipilih agar sesuai dengan kebutuhan sistem penelitian yang dirancang untuk melayani beban maksimum 100 W. Dengan mempertimbangkan rata-rata Peak Sun Hours (PSH) di Indonesia sebesar 4-5 jam per hari serta efisiensi sistem sekitar 85%, estimasi energi harian yang dihasilkan adalah:

$$\text{Energi harian} = 100 \text{ Wp} \times 4,5 \text{ jam} \times 0,85 \text{ (system efficiency)}$$

$$= 382,5 \text{ Wh/hari}$$

Besarnya energi yang dihasilkan dipengaruhi oleh intensitas iradiasi matahari, temperatur modul, sudut kemiringan, orientasi panel, serta adanya bayangan (*shading*). Peningkatan temperatur di atas 25°C dapat menurunkan efisiensi panel sekitar 0,4-0,5% setiap kenaikan 1°C, sehingga pemasangan panel yang tepat menjadi faktor penting dalam meningkatkan performa sistem (Messenger & Abtahi, 2018).

2. **Charge Controller MPPT (*Maximum Power Point Tracking*)**

Charge controller merupakan perangkat yang mengatur proses pengisian baterai serta melindungi baterai dari kondisi overcharging maupun deep discharge. Penelitian ini menggunakan charge controller tipe Maximum Power Point Tracking (MPPT) karena mampu menyesuaikan titik operasi panel surya agar selalu bekerja pada titik daya maksimum (*Maximum Power Point*).

Dibandingkan metode *Pulse Width Modulation (PWM)*, teknologi MPPT memiliki efisiensi konversi sebesar 95-97%, sedangkan PWM hanya sekitar 74-79% pada kondisi operasi nyata. Selain itu, MPPT mampu meningkatkan energi yang dipanen sebesar 20-30%, khususnya pada kondisi iradiasi rendah atau berubah-ubah akibat tutupan awan (Tin Swe et al., 2024). Oleh karena itu, penggunaan MPPT dinilai lebih sesuai untuk sistem PLTS off-grid yang memerlukan efisiensi pemanfaatan energi secara maksimal.

3. **Baterai LiFePO₄ (*Lithium Iron Phosphate*) 12V 20Ah**

Baterai berfungsi sebagai media penyimpanan energi sehingga suplai listrik tetap tersedia ketika panel surya tidak menghasilkan daya yang cukup. Pada penelitian ini digunakan baterai Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄) 12 V 20 Ah karena memiliki umur siklus yang lebih panjang, efisiensi pengisian yang tinggi, serta tingkat keamanan yang lebih baik dibandingkan baterai VRLA.

Baterai LiFePO₄ mampu mencapai 2.000-3.500 siklus pengisian pada Depth of Discharge (DoD) 80%, sedangkan baterai VRLA umumnya hanya mencapai 300-800 siklus. Selain itu, efisiensi charge-discharge baterai LiFePO₄ mencapai 95-98%, lebih tinggi dibandingkan baterai VRLA yang hanya sekitar 80-85%. Struktur kristal olivin pada LiFePO₄ juga memberikan stabilitas termal yang lebih baik sehingga risiko thermal runaway menjadi lebih rendah (Heydarzadeh et al., 2025). Kapasitas 20 Ah dipilih agar cukup untuk mendukung pengujian mekanisme load shedding sebagai bagian dari pembuktian konsep sistem.

4. **Inverter *Pure Sine Wave* 300W**

Inverter berfungsi mengubah energi listrik arus searah (*DC*) dari baterai menjadi arus bolak-balik (*AC*) sebesar 220 V, 50 Hz sehingga dapat digunakan oleh peralatan listrik rumah tangga. Penelitian ini menggunakan inverter tipe pure sine wave karena menghasilkan bentuk gelombang sinus murni dengan Total Harmonic Distortion (THD) kurang dari 3%, sehingga aman digunakan untuk peralatan elektronik yang sensitif.

Dibandingkan inverter modified sine wave, inverter pure sine wave memiliki efisiensi yang lebih tinggi yaitu sekitar 90-95%, sedangkan modified sine wave hanya berkisar 80-85%. Kapasitas 300 W dipilih untuk memberikan margin sekitar tiga kali terhadap beban maksimum sistem sebesar 100 W, sehingga mampu mengakomodasi arus awal (*inrush current*) pada saat beban induktif mulai dioperasikan.

5. Mikrokontroler ESP32 dengan Modul LoRa

Sistem monitoring dan kontrol pada penelitian ini menggunakan mikrokontroler ESP32-WROOM sebagai inti dari embedded system. ESP32 dipilih karena memiliki prosesor dual-core 240 MHz, mendukung komunikasi serial maupun I²C, memiliki konsumsi daya rendah, serta mudah diintegrasikan dengan berbagai sensor dan modul komunikasi.

Sensor yang digunakan terdiri atas INA219 untuk pengukuran tegangan dan arus DC dengan akurasi sekitar $\pm 1\%$, serta PZEM-004T untuk pengukuran parameter daya AC melalui komunikasi Modbus RTU. Seluruh data sensor diproses oleh ESP32 sebelum dikirimkan menggunakan modul LoRa SX1276/SX1278.

Teknologi LoRa dipilih karena mampu menyediakan komunikasi jarak jauh tanpa memerlukan infrastruktur internet dengan konsumsi daya yang sangat rendah. Pada lingkungan perkotaan, LoRa mampu menjangkau komunikasi hingga sekitar 3-5 km, sedangkan pada kondisi line-of-sight jangkauan dapat mencapai lebih dari 10 km. Selain itu, modul LoRa beroperasi pada frekuensi 923 MHz yang sesuai dengan regulasi pita ISM di Indonesia (Bonilla et al., 2023); (Wang et al., 2025).

Table 1 Ringkasan Justifikasi Pemilihan Komponen

Komponen	Dipilih	Alternatif	Alasan Utama Pemilihan
Panel surya	Monokristalin 100 Wp	Polikristalin, thin-film	Efisiensi tertinggi (18-22%) per m ² , cocok area terbatas

Charge controller	MPPT Epever 3210AN	PWM	Efisiensi 95-97% vs 74-79% PWM; gain 20-30% pada iradiasi rendah
Baterai	LiFePO ₄ 12V 20Ah	VRLA/Gel	Siklus hidup 4× lebih panjang, efisiensi lebih tinggi, aman termal
Inverter	Pure sine wave 300W	Modified sine wave	THD <3%, aman untuk beban sensitif, efisiensi 90–95%
Mikrokontroler	ESP32-WROOM	Arduino Uno, STM32	Dual-core, WiFi built-in, konsumsi daya rendah, harga ekonomis
Sensor DC	INA219	ACS712, INA3221	Akurasi ±1%, antarmuka I ² C hemat GPIO, high-side measurement
Sensor AC	PZEM-004T	CT meter terpisah	Multi-parameter dalam 1 perangkat, CT non-invasive, biaya rendah
Komunikasi	LoRa SX1276	WiFi, Zigbee, NB-IoT	Jangkauan 3-15 km tanpa internet, konsumsi daya terendah, gratis
Platform kontrol	Home Assistant	Node-RED, Blynk	Local-first, MQTT native, otomasi YAML fleksibel, open-source

Agar energi yang tersedia dapat dimanfaatkan secara optimal, penelitian ini menerapkan strategi manajemen energi berbasis aturan (*rule-based control*). Pendekatan ini dipilih karena memiliki karakteristik deterministik, tidak memerlukan proses pelatihan data (*training dataset*), membutuhkan sumber daya komputasi yang rendah, serta mudah diimplementasikan pada embedded system dengan keterbatasan memori dan daya. Berdasarkan tinjauan komprehensif yang dilakukan oleh (Saini et al., 2024), metode *rule-based control* masih menjadi pendekatan yang paling banyak digunakan pada sistem mikrogrid dan PLTS off-grid karena sederhana, andal, dan mudah dipelihara.

Pada penelitian ini diterapkan tiga aturan utama, yaitu:

1. IF SOC < 20% THEN sistem melakukan load shedding dengan memutuskan beban non-prioritas untuk mencegah deep discharge baterai.
2. IF tegangan panel surya < 10 V THEN ESP32 memasuki deep sleep mode guna mengurangi konsumsi daya saat malam hari.
3. IF temperatur sistem > 60°C THEN sistem mengaktifkan thermal protection untuk mencegah kerusakan komponen.

Pendekatan *rule-based* dipilih karena bersifat deterministik, tidak memerlukan data *training*, komputasi ringan, dan reliabilitas tinggi untuk aplikasi kritis. Tinjauan komprehensif oleh (Saini et al., 2024) menegaskan strategi ini masih menjadi pilihan utama dalam manajemen energi mikrogrid *off-grid*. Prioritas beban dikonfigurasi menggunakan Home Assistant melalui mekanisme otomasi berbasis YAML, dengan urutan prioritas terdiri atas beban kritis, beban normal, dan beban non-kritis. Pendekatan ini memungkinkan sistem tidak hanya melakukan

monitoring kondisi energi secara real-time, tetapi juga melakukan pengendalian otomatis terhadap distribusi daya sesuai kondisi *State of Charge (SOC)* baterai. Strategi tersebut diharapkan mampu meningkatkan keandalan operasi sistem sekaligus memperpanjang umur pakai baterai dengan menghindari kondisi deep discharge (Heydarzadeh et al., 2025). Sistem prioritas beban dikonfigurasi melalui Home Assistant dengan hierarki: beban kritis → beban normal → beban non-kritis.

2.1.2 Sistem Kontrol dan Monitoring Energi pada PLTS Off-Grid

Sistem kontrol dan monitoring energi pada PLTS off-grid merupakan bagian penting yang berfungsi untuk menjaga keandalan, efisiensi, dan keamanan operasi sistem pembangkit. Berbeda dengan sistem on-grid yang memperoleh dukungan kestabilan dari jaringan utilitas, PLTS off-grid harus mampu mengelola produksi, penyimpanan, dan konsumsi energi secara mandiri. Oleh karena itu, sistem monitoring tidak hanya berfungsi sebagai media visualisasi data, tetapi juga sebagai dasar pengambilan keputusan otomatis dalam pengelolaan energi.

Parameter yang umumnya dipantau pada sistem PLTS off-grid meliputi tegangan panel surya, arus pengisian baterai, daya keluaran inverter, State of Charge (SOC) baterai, temperatur sistem, serta kondisi beban. Informasi tersebut digunakan untuk mengevaluasi performa sistem, mendeteksi kondisi abnormal seperti over-voltage, under-voltage, over-current, dan over-temperature, sekaligus menjalankan strategi pengendalian energi untuk melindungi komponen utama dari kerusakan akibat kondisi operasi yang tidak normal. Tanpa sistem monitoring dan kontrol yang memadai, PLTS off-grid berpotensi mengalami kehilangan energi, penurunan efisiensi, serta percepatan degradasi baterai (Saini et al., 2024).

Lapisan perangkat keras merupakan bagian yang bertanggung jawab terhadap proses akuisisi data dari sistem tenaga. Pada penelitian ini proses tersebut dilakukan menggunakan sensor pengukuran, mikrokontroler, dan modul komunikasi nirkabel.

Sensor INA219 digunakan untuk mengukur tegangan dan arus pada sisi DC dengan rentang pengukuran 0-26 V dan arus hingga $\pm 3,2$ A menggunakan antarmuka I²C. Sensor ini memiliki tingkat akurasi sekitar $\pm 1\%$, sehingga sesuai digunakan untuk memantau performa panel surya maupun proses pengisian baterai.

Sementara itu, sensor PZEM-004T digunakan untuk memantau parameter listrik pada sisi AC, meliputi tegangan, arus, daya aktif, energi kumulatif, frekuensi, serta faktor daya melalui komunikasi Modbus RTU dengan tingkat akurasi sekitar $\pm 2\%$. Kombinasi kedua sensor tersebut memungkinkan sistem memperoleh informasi kondisi energi secara menyeluruh, mulai dari proses pembangkitan hingga konsumsi energi oleh beban (Ndeke et al., 2024). Seluruh data sensor diproses oleh mikrokontroler ESP32 yang berfungsi sebagai embedded system. Selain melakukan akuisisi data, ESP32 juga menjalankan logika pengendalian, melakukan pengolahan awal data (*pre-processing*), serta mengirimkan data menuju gateway menggunakan komunikasi LoRa (Amorim et al., 2024).

Lapisan perangkat lunak bertugas mengelola komunikasi data, penyimpanan informasi, visualisasi, dan proses otomatisasi sistem. Pada penelitian ini komunikasi data menggunakan protokol Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) yang bekerja berdasarkan mekanisme publish-subscribe.

MQTT dipilih karena memiliki ukuran header yang sangat kecil, yaitu sekitar 2 byte, jauh lebih ringan dibandingkan protokol HTTP yang memerlukan overhead lebih besar. Karakteristik tersebut membuat MQTT sangat sesuai digunakan pada perangkat IoT dengan keterbatasan bandwidth, memori, dan konsumsi daya. Selain itu, MQTT menyediakan tiga tingkat Quality of Service (QoS) sehingga tingkat keandalan pengiriman data dapat disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi (Mishra & Kertesz, 2020).

Dalam sistem yang dikembangkan, data hasil pengukuran dikirim dari ESP32 melalui jaringan LoRa menuju gateway lokal, kemudian diteruskan ke MQTT Broker (Mosquitto) sebelum dipublikasikan ke platform monitoring menggunakan struktur topik yang bersifat hierarkis. Arsitektur ini memungkinkan komunikasi antarperangkat berlangsung secara efisien, modular, dan mudah dikembangkan untuk sistem multi-node.

Penggunaan MQTT juga memberikan beberapa keuntungan dibandingkan komunikasi berbasis HTTP, yaitu:

1. konsumsi bandwidth yang lebih rendah,
2. komunikasi bersifat asynchronous,
3. mendukung banyak node secara bersamaan,

4. latensi lebih kecil pada jaringan lokal,
5. mudah diintegrasikan dengan berbagai platform IoT.

Atas dasar karakteristik tersebut, MQTT dipilih sebagai protokol komunikasi utama pada penelitian ini.

Platform Home Assistant Sebagai pusat monitoring dan otomasi, penelitian ini menggunakan Home Assistant, yaitu platform IoT bersifat open-source dengan pendekatan local-first sehingga seluruh proses monitoring maupun pengendalian dapat dilakukan tanpa ketergantungan terhadap layanan cloud.

Home Assistant mendukung integrasi MQTT secara native, menyediakan mekanisme otomasi berbasis YAML, serta mampu menyimpan data historis untuk kebutuhan analisis performa sistem. Selain itu, platform ini menyediakan antarmuka visual (*dashboard*) yang dapat menampilkan kondisi sistem secara real-time, meliputi tegangan panel, arus pengisian, daya beban, kapasitas baterai, status relay, serta riwayat operasi sistem. Dashboard dapat diakses melalui komputer maupun perangkat bergerak menggunakan jaringan local (Syukri, 2024).

Keunggulan lain dari Home Assistant adalah kemampuannya mengintegrasikan berbagai perangkat IoT dari vendor yang berbeda dalam satu platform sehingga memudahkan proses pengembangan sistem monitoring energi secara bertahap.

Implementasi Kontrol Berbasis Aturan (Rule-Based Control) Selain melakukan monitoring, sistem juga menerapkan mekanisme rule-based control sebagai strategi pengelolaan energi. Pendekatan ini menggunakan seperangkat aturan logika IF–THEN yang dijalankan berdasarkan kondisi aktual sistem.

Pada penelitian ini mekanisme load shedding dilakukan secara bertingkat berdasarkan nilai State of Charge (SOC) baterai. Ketika kapasitas baterai mulai menurun, sistem secara otomatis memutus beban sesuai tingkat prioritas sehingga energi yang tersisa tetap tersedia untuk beban yang lebih penting.

Pendekatan rule-based dipilih karena memiliki beberapa keunggulan, yaitu bersifat deterministik, mudah dipahami, tidak memerlukan proses pelatihan data (*training*), membutuhkan sumber daya komputasi yang rendah, serta mudah dimodifikasi ketika terjadi perubahan kebutuhan sistem. Karakteristik tersebut

menjadikan metode ini masih banyak digunakan pada sistem mikrogrid dan PLTS off-grid yang menuntut keandalan tinggi (Saini et al., 2024).

Meskipun penelitian ini menggunakan pendekatan rule-based control, arsitektur sistem yang dikembangkan telah dirancang agar dapat mendukung pengembangan teknologi Artificial Intelligence (AI) pada penelitian selanjutnya.

Data historis yang diperoleh dari proses monitoring dapat dimanfaatkan sebagai dataset untuk pengembangan berbagai metode pembelajaran mesin, antara lain:

1. prediksi State of Charge (SOC) menggunakan Recurrent Neural Network (RNN) atau model berbasis deret waktu;
2. deteksi dini kerusakan komponen melalui analisis pola data sensor (*anomaly detection*);
3. prediksi produksi energi berdasarkan kondisi cuaca untuk mendukung optimasi penjadwalan beban.

Namun demikian, implementasi AI memerlukan data historis operasional yang memadai agar model yang dibangun memiliki tingkat akurasi yang baik. Oleh karena itu, sistem monitoring yang dikembangkan dalam penelitian ini berperan sebagai fondasi dalam menyediakan data operasional yang terstruktur bagi pengembangan sistem kontrol cerdas pada penelitian selanjutnya.

2.2 Teknologi LoRa untuk Aplikasi PLTS Off-Grid

LoRa (Long Range) merupakan teknologi komunikasi nirkabel berbasis modulasi *Chirp Spread Spectrum (CSS)* yang dikembangkan oleh Semtech Corporation untuk mendukung implementasi *Low-Power Wide-Area Network (LPWAN)*. Teknologi ini dirancang agar perangkat *Internet of Things (IoT)* dapat melakukan komunikasi data dalam jarak yang jauh dengan konsumsi daya yang sangat rendah. Karakteristik tersebut menjadikan LoRa sebagai salah satu teknologi komunikasi yang banyak diterapkan pada sistem monitoring lingkungan, pertanian cerdas, kota pintar, serta sistem energi terdistribusi, termasuk Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) off-grid.

Berbeda dengan komunikasi berbasis WiFi atau jaringan seluler yang memerlukan infrastruktur internet, LoRa mampu membangun komunikasi secara langsung antara node sensor dan gateway menggunakan pita frekuensi Industrial,

Scientific, and Medical (ISM). Dengan demikian, sistem tetap dapat beroperasi pada daerah terpencil yang belum memiliki akses internet maupun jaringan seluler. Pada penelitian ini, LoRa digunakan sebagai media komunikasi antara node monitoring berbasis ESP32 dengan gateway lokal yang terintegrasi dengan Home Assistant, sehingga seluruh proses monitoring dan pengendalian energi dapat dilakukan secara local-first tanpa ketergantungan terhadap layanan cloud.

2.2.1 Keunggulan LoRa

Salah satu keunggulan utama LoRa adalah konsumsi daya yang sangat rendah dibandingkan teknologi komunikasi nirkabel lainnya. Pada kondisi transmisi (transmit mode), modul LoRa hanya mengonsumsi arus sekitar 120 mA, sedangkan pada kondisi penerimaan (receive mode) sekitar 12 mA. Ketika berada pada sleep mode, konsumsi arus dapat turun hingga 0,2 μ A, jauh lebih rendah dibandingkan modul WiFi yang umumnya mengonsumsi 300-500 mA saat transmisi dan 10-50 mA pada mode siaga (Mekki et al., 2019).

Efisiensi energi tersebut sangat penting pada sistem PLTS off-grid karena seluruh perangkat monitoring memperoleh suplai daya dari sistem yang sama dengan beban utama. Dengan konsumsi daya yang rendah, energi yang digunakan oleh sistem monitoring menjadi relatif kecil sehingga tidak mengurangi secara signifikan energi yang tersedia untuk beban. Pada aplikasi dengan frekuensi transmisi yang rendah, perangkat berbasis LoRa bahkan dapat beroperasi hingga 10 tahun hanya menggunakan satu baterai berkapasitas kecil (Mekki et al., 2019)

Jangkauan Komunikasi Luas. Selain hemat energi, LoRa memiliki kemampuan komunikasi jarak jauh tanpa memerlukan repeater maupun infrastruktur internet. Berdasarkan penelitian (Augustin et al., 2016). LoRa mampu mencapai jangkauan sekitar 2-5 km pada lingkungan perkotaan (Non-Line of Sight/NLOS) dengan Packet Delivery Rate (PDR) sebesar 90-95%. Pada lingkungan terbuka (Line of Sight/LOS), jangkauan komunikasi dapat meningkat hingga 10-15 km dengan PDR mencapai 95-99%.

Kemampuan tersebut sangat sesuai untuk implementasi PLTS off-grid yang umumnya berada di wilayah terpencil atau memiliki beberapa titik monitoring yang saling berjauhan. Pada penelitian ini, sistem dirancang dengan target komunikasi hingga 5 km pada kondisi perkotaan dan 15 km pada kondisi terbuka, dengan packet

loss kurang dari 5%, sehingga komunikasi antara node sensor dan gateway tetap berlangsung secara andal.

Fleksibilitas Konfigurasi, Keunggulan lain dari LoRa adalah fleksibilitas dalam menentukan parameter komunikasi sesuai kebutuhan aplikasi. Parameter utama yang dapat dikonfigurasi meliputi Spreading Factor (SF), Bandwidth (BW), dan Coding Rate (CR).

Nilai Spreading Factor berkisar antara SF7 hingga SF12, di mana nilai yang lebih tinggi akan meningkatkan sensitivitas penerima dan memperluas jangkauan komunikasi, namun dengan konsekuensi meningkatnya waktu transmisi dan konsumsi energi. Bandwidth tersedia pada pilihan 125 kHz, 250 kHz, dan 500 kHz, sedangkan Coding Rate dapat diatur mulai dari 4/5 hingga 4/8 untuk meningkatkan keandalan pengiriman data pada kondisi kanal yang kurang baik.

Pada penelitian ini digunakan konfigurasi frekuensi 923 MHz, Spreading Factor (SF7), Bandwidth 125 kHz, dan Coding Rate 4/5, sesuai dengan regulasi pita ISM Indonesia berdasarkan Peraturan Menteri Komunikasi dan Informatika Nomor 1 Tahun 2021. Kombinasi parameter tersebut dipilih karena memberikan keseimbangan antara jangkauan komunikasi, waktu transmisi, serta konsumsi daya untuk aplikasi monitoring energi dengan interval pengiriman data setiap 5 detik.

2.2.2 Perbandingan LoRa dengan Teknologi Komunikasi Lain

Alasan Pemilihan LoRa pada Penelitian, Pemilihan LoRa dalam penelitian ini didasarkan pada karakteristik sistem PLTS off-grid yang beroperasi secara mandiri di lokasi yang belum tentu memiliki akses internet. Dibandingkan teknologi komunikasi lain seperti WiFi, Zigbee, maupun NB-IoT, LoRa memiliki beberapa keunggulan yang paling sesuai dengan kebutuhan penelitian, yaitu:

1. Tidak memerlukan infrastruktur internet, sehingga sistem tetap dapat beroperasi pada daerah terpencil.
2. Konsumsi daya sangat rendah, sehingga tidak membebani sistem energi PLTS.
3. Jangkauan komunikasi mencapai beberapa kilometer, sehingga memungkinkan pengembangan sistem monitoring multi-node.
4. Biaya operasional rendah, karena komunikasi berlangsung melalui gateway lokal tanpa biaya langganan jaringan seluler.

5. Mudah diintegrasikan dengan ESP32, MQTT, dan Home Assistant, sehingga mendukung implementasi sistem monitoring dan kontrol energi berbasis IoT secara menyeluruh.

Dengan karakteristik tersebut, LoRa dinilai mampu memenuhi kebutuhan utama penelitian, yaitu menyediakan komunikasi data yang andal, hemat energi, dan dapat diimplementasikan pada sistem PLTS off-grid di wilayah terpencil tanpa ketergantungan terhadap jaringan internet.

Table 2 Perbandingan Teknologi Komunikasi Nirkabel untuk Sistem IoT

Parameter	LoRa	WiFi (802.11n)	Zigbee	4G/LTE	NB-IoT
Jangkauan	2-15 km	50-100 m	10-100 m	1-10 km	1-10 km
Konsumsi daya (TX)	± 120 mA	300-500 mA	30-40 mA	500-800 mA	200-300 mA
Konsumsi daya (sleep)	$\pm 0,2$ μ A	10-50 mA	3-5 μ A	5-10 mA	± 5 μ A
Infrastruktur	Tidak perlu	Router/AP	Koordinator	BTS/Tower	BTS/Tower
Biaya bulanan	Gratis	$\pm$ USD 10-30	Gratis	$\pm$ USD 5-20	$\pm$ USD 1-5
Cocok untuk off-grid	Sangat cocok	Tidak cocok	Terbatas	Terbatas	Terbatas

2.3 Sistem Existing vs Solusi Proposed

2.3.1 Sistem Existing

Sistem Berbasis Cloud (WiFi/4G) Pendekatan pertama menggunakan komunikasi berbasis WiFi atau jaringan seluler (4G) untuk mengirimkan data sensor menuju server cloud. Data tersebut kemudian ditampilkan melalui dashboard berbasis web atau aplikasi bergerak sehingga pengguna dapat memantau kondisi sistem secara real-time dari lokasi mana pun.

Keunggulan utama sistem ini adalah kemampuan visualisasi data yang lengkap, penyimpanan data historis secara otomatis, serta kemudahan integrasi dengan berbagai layanan analitik berbasis cloud. Selain itu, beberapa platform telah menyediakan fitur notifikasi dan analisis performa sehingga memudahkan proses pemeliharaan sistem.

Namun demikian, pendekatan berbasis cloud memiliki beberapa keterbatasan ketika diterapkan pada PLTS off-grid di daerah terpencil. Pertama, sistem sangat bergantung pada ketersediaan jaringan internet. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS, 2023), hanya sekitar 45% desa di Indonesia yang memiliki akses jaringan 4G yang stabil sehingga keberlangsungan monitoring tidak dapat dijamin pada seluruh lokasi.

Kedua, penggunaan layanan cloud umumnya memerlukan biaya operasional berupa langganan server maupun layanan komunikasi data yang berkisar USD 10-50 per bulan untuk setiap instalasi. Biaya tersebut dapat meningkatkan Levelized Cost of Energy (LCOE) sebesar sekitar 15-30%, terutama pada sistem PLTS skala kecil (Joseph M. Dowell et al., 2025)

Ketiga, modul komunikasi WiFi maupun 4G memiliki konsumsi daya yang relatif tinggi, yaitu sekitar 0,5-1,5 W untuk WiFi dan 1-2 W untuk modem 4G. Pada sistem PLTS berkapasitas kecil, konsumsi daya tersebut menjadi tambahan beban yang dapat mengurangi energi yang tersedia bagi beban utama.

Sistem lokal berbasis mikrokontroler Pendekatan kedua menggunakan mikrokontroler seperti Arduino maupun ESP32 untuk melakukan akuisisi data secara lokal. Informasi hasil pengukuran umumnya ditampilkan melalui LCD ataupun web server lokal tanpa memerlukan koneksi internet.

Keunggulan pendekatan ini adalah biaya implementasi yang relatif rendah, yaitu kurang dari USD 20, serta mampu beroperasi secara mandiri tanpa ketergantungan pada layanan cloud. Oleh karena itu, sistem lokal banyak digunakan pada penelitian laboratorium maupun implementasi PLTS skala kecil.

Meskipun demikian, sistem lokal juga memiliki beberapa keterbatasan. Jangkauan komunikasi umumnya hanya sekitar 100 meter, sehingga kurang sesuai untuk sistem monitoring yang tersebar di beberapa lokasi. Selain itu, sebagian besar sistem hanya berfungsi sebagai media monitoring pasif tanpa kemampuan melakukan pengendalian beban secara otomatis. Penyimpanan data historis juga masih terbatas sehingga analisis performa jangka panjang sulit dilakukan. Keterbatasan tersebut menyebabkan sistem kurang fleksibel untuk dikembangkan menjadi arsitektur multi-node (Rajita & Mandal, 2016).

Analisis Keterbatasan Sistem Existing Berdasarkan hasil kajian literatur, dapat disimpulkan bahwa sistem monitoring PLTS off-grid yang telah ada masih memiliki beberapa keterbatasan mendasar, yaitu:

1. Ketergantungan terhadap infrastruktur internet pada sistem berbasis cloud.
2. Konsumsi daya komunikasi yang relatif tinggi.
3. Belum mendukung mekanisme kontrol otomatis berbasis kondisi baterai (*State of Charge*).

4. Sulit dikembangkan menjadi sistem monitoring multi-node dengan biaya rendah.
5. Sebagian besar penelitian masih berfokus pada fungsi monitoring, sementara fungsi pengendalian energi masih terbatas.

Keterbatasan tersebut menjadi dasar pengembangan sistem yang diusulkan pada penelitian ini.

2.3.2 Solusi Proposed (Home Assistant + LoRa)

Untuk mengatasi berbagai keterbatasan tersebut, penelitian ini mengusulkan sistem kontrol dan monitoring energi berbasis Home Assistant dan LoRa pada mini PLTS off-grid berkapasitas 100 W. Arsitektur sistem dirancang menggunakan pendekatan edge computing, di mana seluruh proses akuisisi data, komunikasi, penyimpanan, visualisasi, serta otomasi dilakukan secara lokal tanpa memerlukan koneksi internet.

Sistem terdiri atas tiga lapisan utama.

1. Lapisan Edge Device, yaitu node monitoring yang terdiri atas mikrokontroler ESP32, modul komunikasi LoRa SX1276, sensor INA219 dan PZEM-004T untuk melakukan pengukuran parameter kelistrikan secara real-time.
2. Lapisan Komunikasi, yaitu jaringan LoRa dengan topologi star yang bekerja pada frekuensi 923 MHz sesuai regulasi pita ISM Indonesia. Seluruh node mengirimkan data menuju satu gateway lokal menggunakan komunikasi jarak jauh berdaya rendah.
3. Lapisan Monitoring dan Kontrol, yaitu Home Assistant yang dijalankan pada komputer lokal sebagai pusat monitoring. Platform ini terintegrasi dengan Mosquitto MQTT sebagai broker komunikasi dan InfluxDB sebagai penyimpanan data historis sehingga mampu menampilkan dashboard monitoring secara real-time sekaligus menjalankan otomasi load shedding berdasarkan nilai State of Charge (SOC) baterai.

Pendekatan ini memungkinkan sistem tidak hanya melakukan monitoring kondisi energi, tetapi juga melakukan pengambilan keputusan secara otomatis berdasarkan kondisi operasi sistem. Seluruh data tetap berada pada

jaringan lokal sehingga keamanan data lebih terjaga serta biaya operasional dapat ditekan mendekati nol.

Table 3 Komparasi Sistem Monitoring PLTS Off-Grid

Aspek	Sistem Existing	Solusi Proposed
Konektivitas	WiFi/4G (bergantung ISP)	LoRa 923 MHz (tanpa internet)
Konsumsi daya komunikasi	0,5 - 2 W	~0,003 W (rata-rata, duty cycle 1%)
Kontrol beban	Manual atau statis	Otomatis berbasis SOC (Home Assistant)
Biaya operasional	USD 10–50/bulan	~USD 0/bulan
Latency end-to-end	1 - 5 detik	<500 ms
Skalabilitas	Biaya linear per node	1 gateway → puluhan node
Data privacy	Cloud pihak ketiga	Lokal (user-controlled)
Biaya implementasi per node	USD 200 - 500	~USD 15–20

2.4 Gap Penelitian

Berdasarkan kajian teori dan penelitian terdahulu yang telah dibahas pada subbab sebelumnya, masih terdapat beberapa kesenjangan penelitian (*research gap*) yang menjadi dasar pengembangan sistem pada penelitian ini. Kesenjangan tersebut tidak hanya berkaitan dengan aspek komunikasi data, tetapi juga mencakup kemampuan pengendalian energi, integrasi sistem, serta kemudahan implementasi pada PLTS off-grid skala kecil di daerah terpencil.

Gap 1 Tidak adanya kontrol otomatis berbasis kondisi *real-time*.

Sebagian besar penelitian mengenai monitoring PLTS off-grid masih berfokus pada proses akuisisi dan visualisasi data. Sistem yang dikembangkan umumnya hanya menampilkan parameter seperti tegangan, arus, daya, maupun kondisi baterai tanpa melakukan tindakan otomatis ketika terjadi perubahan kondisi sistem.

Kondisi tersebut menyebabkan operator harus melakukan pemutusan beban secara manual ketika kapasitas baterai mulai menurun. Pada lokasi terpencil, proses ini sulit dilakukan secara terus-menerus sehingga meningkatkan risiko terjadinya deep discharge yang dapat mempercepat degradasi baterai dan mengurangi umur pakainya (Rahman & Alharbi, 2024).

Solusi penelitian ini adalah menerapkan mekanisme rule-based load shedding yang bekerja secara otomatis berdasarkan nilai State of Charge (SOC) baterai. Ketika SOC turun di bawah batas tertentu, sistem akan memutus beban non-prioritas secara bertahap menggunakan automasi Home Assistant sehingga energi yang tersisa dapat diprioritaskan untuk beban kritis.

Gap 2 Ketergantungan pada infrastruktur internet dan *cloud*.

Sebagian besar sistem monitoring PLTS memanfaatkan komunikasi berbasis WiFi atau jaringan seluler yang terhubung dengan layanan cloud. Pendekatan ini memberikan kemudahan akses dari mana saja, namun sangat bergantung pada ketersediaan jaringan internet.

Di Indonesia, kondisi tersebut menjadi kendala karena tidak seluruh wilayah memiliki kualitas jaringan yang memadai. Data Badan Pusat Statistik (2023) menunjukkan bahwa hanya sekitar 45% desa yang memiliki akses 4G yang stabil. Selain itu, penggunaan layanan cloud juga meningkatkan biaya operasional sistem hingga USD 10-50 per bulan untuk setiap instalasi (Joseph M. Dowell et al., 2025). *Solusi*: komunikasi berbasis LoRa 923 MHz dengan server kontrol lokal yang beroperasi *fully offline*.

Gap 3 Tidak adanya validasi performa sistem terintegrasi secara *end-to-end*.

Penelitian terdahulu umumnya mengevaluasi setiap komponen secara terpisah, misalnya hanya menguji akurasi sensor, performa komunikasi LoRa, atau algoritma kontrol melalui simulasi. Pendekatan tersebut belum mampu menggambarkan performa sistem secara keseluruhan ketika seluruh komponen diintegrasikan dalam satu platform (Mekki et al., 2019); (Syukri, 2024). Padahal pada implementasi nyata, kualitas sistem sangat dipengaruhi oleh interaksi antar komponen mulai dari proses pengukuran sensor, transmisi data, pengolahan data di gateway, hingga proses automasi pada platform monitoring.

Solusi: Penelitian ini melakukan validasi sistem secara end-to-end dengan mengevaluasi beberapa parameter utama, yaitu:

1. akurasi sensor menggunakan MAE dan RMSE,
2. keandalan komunikasi LoRa menggunakan Packet Loss Rate (PLR),
3. latency komunikasi MQTT,
4. efektivitas mekanisme load shedding,
5. serta stabilitas operasi sistem selama pengujian kontinu.

Pendekatan ini memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai performa sistem dibandingkan pengujian komponen secara parsial.

Gap 4 Keterbatasan skalabilitas dan kemudahan replikasi.

Sebagian besar solusi komersial menggunakan perangkat proprietary yang memiliki biaya implementasi tinggi dan hanya dapat digunakan pada ekosistem vendor tertentu. Di sisi lain, beberapa penelitian akademik menggunakan rancangan perangkat keras khusus (*custom hardware*) sehingga sulit direplikasi oleh peneliti maupun teknisi lapangan.

Kondisi tersebut membatasi peluang adopsi sistem secara lebih luas, terutama pada PLTS off-grid skala kecil yang membutuhkan solusi berbiaya rendah dan mudah dikembangkan.

Penelitian ini mengatasi keterbatasan tersebut dengan menggunakan komponen Commercial Off-The-Shelf (COTS) yang mudah diperoleh di pasaran, dipadukan dengan perangkat lunak open-source seperti Home Assistant, Mosquitto MQTT, dan ESPHome. Pendekatan ini menghasilkan biaya implementasi sekitar IDR 350.000 per node, sekaligus memberikan fleksibilitas tinggi untuk penambahan node monitoring tanpa perubahan arsitektur utama.

2.5. Kerangka Teori Sistem *Proposed*

Berdasarkan research gap yang telah diidentifikasi pada subbab sebelumnya, penelitian ini mengusulkan suatu sistem kontrol dan monitoring energi pada mini PLTS off-grid yang mengintegrasikan teknologi embedded system, komunikasi LoRa, protokol MQTT, dan platform Home Assistant dalam satu arsitektur terpadu. Arsitektur tersebut mengadopsi konsep three-tier architecture yang membagi fungsi sistem menjadi tiga lapisan utama, yaitu Sensor Layer, Communication Layer, dan Control & Monitoring Layer. Pendekatan ini dipilih karena mampu meningkatkan modularitas sistem, mempermudah proses pengembangan, serta memungkinkan setiap lapisan dikembangkan atau diperluas tanpa memengaruhi lapisan lainnya.

Pada penelitian ini, setiap lapisan memiliki fungsi yang berbeda namun saling terintegrasi sehingga membentuk suatu siklus monitoring dan pengendalian energi secara real-time. Arsitektur sistem yang diusulkan ditunjukkan pada Gambar 1.

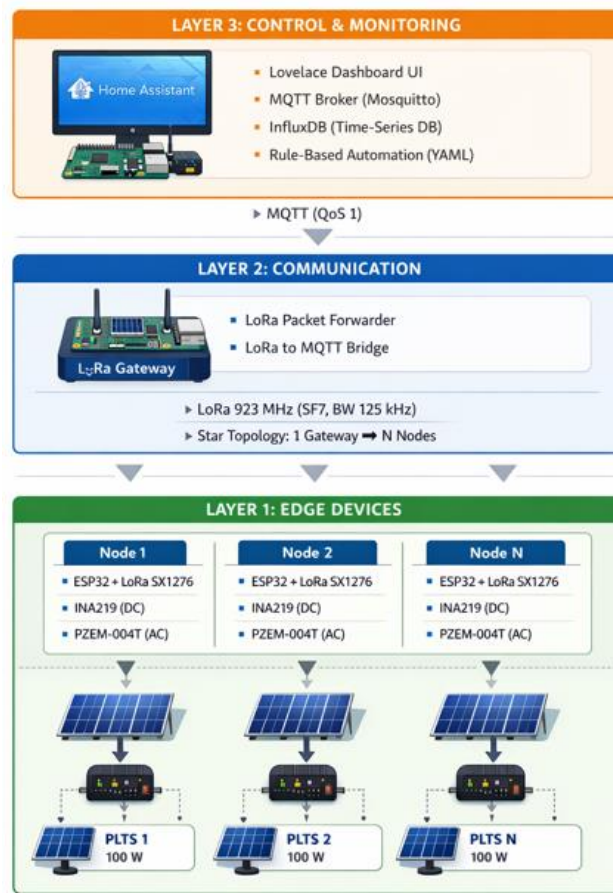


Figure 1. Arsitektur Three-Tier Sistem Proposed

Lapisan 1

Sensor Layer merupakan lapisan pertama yang bertugas melakukan akuisisi data dari sistem PLTS secara real-time. Parameter yang diukur meliputi tegangan, arus, daya, energi, serta kondisi baterai sebagai dasar proses pengambilan keputusan pada lapisan kontrol.

Pada penelitian ini digunakan dua jenis sensor, yaitu INA219 dan PZEM-004T. Sensor INA219 ditempatkan pada sisi panel surya dan baterai untuk mengukur parameter kelistrikan DC, sedangkan sensor PZEM-004T digunakan pada sisi keluaran inverter untuk memperoleh parameter kelistrikan AC, meliputi tegangan, arus, daya aktif, energi kumulatif, frekuensi, dan faktor daya.

Agar hasil pengukuran memiliki tingkat akurasi yang baik, seluruh sensor dikalibrasi menggunakan metode two-point calibration dengan multimeter referensi Fluke 87V. Proses kalibrasi dilakukan pada dua titik pengukuran yang mewakili

rentang operasi sistem sehingga kesalahan pembacaan sensor dapat dikurangi dari sekitar $\pm 1\%$ menjadi $\pm 0,5\%$ (Maulidi et al., 2023).

Selain melakukan pembacaan data, ESP32 juga menjalankan proses pre-processing, seperti penyaringan data menggunakan *moving average filter*, perhitungan State of Charge (SOC) baterai, serta validasi data sebelum dikirimkan ke lapisan komunikasi. Tahapan ini bertujuan mengurangi fluktuasi pembacaan sensor sehingga data yang diterima sistem monitoring menjadi lebih stabil.

Lapisan 2

Communication Layer bertugas mengirimkan data hasil pengukuran dari node sensor menuju pusat kendali. Penelitian ini menggunakan teknologi LoRa karena mampu menyediakan komunikasi jarak jauh dengan konsumsi daya yang rendah tanpa memerlukan infrastruktur internet maupun jaringan seluler.

Jaringan LoRa menggunakan topologi star network, di mana setiap node sensor berkomunikasi langsung dengan satu gateway. Konfigurasi komunikasi menggunakan frekuensi 923 MHz, Spreading Factor (SF7), Bandwidth 125 kHz, Coding Rate 4/5, serta Transmission Power +20 dBm. Kombinasi parameter tersebut dipilih untuk memperoleh keseimbangan antara jangkauan komunikasi, kecepatan transmisi, dan efisiensi energi. Berdasarkan karakteristik LoRa, konfigurasi tersebut mampu memberikan jangkauan komunikasi sekitar 3-5 km pada kondisi urban dengan waktu transmisi paket sekitar 40–70 ms dan konsumsi energi yang relatif rendah (Adelantado et al., 2017).

Data yang diterima gateway selanjutnya diteruskan menuju broker MQTT Mosquitto menggunakan jaringan lokal. Pada penelitian ini digunakan MQTT Quality of Service (QoS) Level 1, yaitu mekanisme komunikasi yang menjamin setiap pesan diterima minimal satu kali (*at least once delivery*). Pemilihan QoS Level 1 merupakan kompromi antara keandalan komunikasi dan efisiensi bandwidth, sehingga sesuai untuk aplikasi monitoring energi yang membutuhkan kontinuitas data tanpa menghasilkan overhead komunikasi yang berlebihan.

Lapisan 3

Control and Monitoring Layer merupakan pusat pengolahan data, visualisasi, serta pengendalian sistem. Platform yang digunakan adalah Home

Assistant, karena mendukung konsep local-first architecture, integrasi MQTT secara native, serta kemampuan otomasi berbasis aturan (*rule-based automation*).

Data yang diterima dari broker MQTT divisualisasikan melalui dashboard Lovelace secara real-time, sedangkan seluruh histori pengukuran disimpan menggunakan InfluxDB sehingga dapat digunakan untuk analisis performa sistem.

Selain melakukan monitoring, Home Assistant juga menjalankan logika pengendalian energi berdasarkan kondisi baterai. Sistem menerapkan mekanisme rule-based load shedding, yaitu memutuskan beban non-prioritas secara otomatis ketika nilai SOC baterai berada di bawah 20%. Perintah pengendalian dikirim kembali melalui broker MQTT menuju ESP32 untuk mengaktifkan relay pemutus beban. Berdasarkan penelitian (Khan et al., 2024), pendekatan ini mampu memberikan waktu respons kurang dari 500 ms sejak kondisi pemicu terdeteksi hingga relay berubah status.

Integrasi Antar Lapisan Sistem

Ketiga lapisan tersebut bekerja secara terpadu membentuk suatu siklus monitoring dan pengendalian energi. Sensor melakukan pengukuran setiap 5 detik, kemudian data diproses oleh ESP32 melalui proses penyaringan dan perhitungan SOC sebelum dikemas dalam format JSON. Selanjutnya data dikirim menggunakan komunikasi LoRa menuju gateway dan diteruskan ke broker MQTT. Home Assistant menerima data tersebut untuk ditampilkan pada dashboard sekaligus mengevaluasi kondisi sistem berdasarkan aturan otomasi yang telah ditentukan. Apabila nilai SOC berada di bawah batas yang telah ditetapkan, Home Assistant mengirimkan perintah MQTT menuju ESP32 untuk mengaktifkan relay pemutus beban sehingga konsumsi energi dapat dikendalikan secara otomatis.

Dengan mekanisme tersebut, sistem tidak hanya mampu melakukan monitoring parameter listrik secara real-time, tetapi juga menyediakan fungsi pengendalian energi secara otomatis tanpa bergantung pada koneksi internet. Arsitektur ini menjadi dasar implementasi sistem yang dijelaskan pada Bab III serta menjadi landasan pengujian performa sistem pada Bab IV.

2.6. Penelitian Terdahulu

Kajian terhadap penelitian terdahulu dilakukan untuk mengetahui perkembangan teknologi monitoring dan kontrol PLTS off-grid, mengidentifikasi

pendekatan yang telah digunakan oleh peneliti sebelumnya, serta menemukan kesenjangan penelitian (*research gap*) yang belum banyak dikaji. Selain itu, kajian ini menjadi dasar dalam menentukan posisi dan kontribusi penelitian yang diusulkan.

Berdasarkan fokus penelitian, studi terdahulu dikelompokkan menjadi empat kategori, yaitu penelitian berbasis komunikasi LoRa, penelitian berbasis ESP32 dan MQTT, penelitian mengenai manajemen energi berbasis aturan (*rule-based energy management*), serta penelitian mengenai Artificial Intelligence of Things (AIoT) untuk sistem fotovoltaik.

2.6.1. Penelitian Berbasis LoRa untuk Monitoring Energi

Penelitian oleh (Ndukwe et al., 2022). mengembangkan platform IoT berbasis LoRa untuk monitoring pembangkit energi terbarukan menggunakan perangkat lunak open-source. Sistem yang dikembangkan mampu mengirimkan data pengukuran menuju server lokal tanpa bergantung pada layanan cloud sehingga biaya operasional dapat ditekan. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa komunikasi LoRa merupakan alternatif yang efektif untuk sistem monitoring di wilayah dengan keterbatasan infrastruktur internet. Namun, sistem yang dikembangkan masih berorientasi pada proses monitoring sehingga belum menyediakan mekanisme pengendalian otomatis berdasarkan kondisi sistem secara real-time maupun integrasi dengan platform otomasi seperti Home Assistant.

Sementara itu, (Hameed & Kurnaz, 2024) mengembangkan sistem monitoring fotovoltaik berbasis LoRaWAN yang dipadukan dengan algoritma kecerdasan buatan untuk meningkatkan akurasi pemantauan hingga 97,65%. Sistem mampu beroperasi dengan konsumsi daya rendah dan jangkauan komunikasi hingga 10 km. Walaupun memberikan performa yang baik, pendekatan tersebut masih menggunakan arsitektur LoRaWAN yang memerlukan *network server* dan infrastruktur tambahan sehingga implementasinya lebih kompleks dibandingkan komunikasi LoRa point-to-point yang digunakan pada penelitian ini.

2.6.2. Penelitian Berbasis ESP32 dan MQTT untuk Monitoring PV

Penelitian yang dilakukan oleh (He et al., 2023) mengembangkan sistem SCADA berbasis perangkat open-source menggunakan ESP32, Banana Pi, Node-RED, dan protokol MQTT. Sistem mampu melakukan monitoring parameter

kelistrikan secara real-time serta mengendalikan relay melalui antarmuka web. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa MQTT sangat sesuai digunakan sebagai protokol komunikasi IoT karena ringan dan mendukung komunikasi publish-subscribe. Akan tetapi, komunikasi masih bergantung pada jaringan WiFi sehingga cakupan sistem terbatas pada area yang memiliki akses jaringan.

Penelitian lain oleh (Khan et al., 2024) mengembangkan sistem monitoring dan kontrol PLTS menggunakan ESP32 dan Arduino Nano dengan platform Blynk melalui jaringan GSM dan WiFi. Biaya implementasi sistem relatif rendah sehingga cocok untuk aplikasi skala kecil. Namun, sistem masih bergantung pada infrastruktur jaringan seluler sehingga belum dapat diimplementasikan secara mandiri pada wilayah yang tidak memiliki akses internet.

2.6.3. Penelitian Manajemen Energi Berbasis Aturan

Penelitian oleh (Tradacete-Ágreda et al., 2025) mengembangkan sistem manajemen energi berbasis ESP32 pada mikrogrid fotovoltaik yang dilengkapi baterai penyimpanan. Sistem menggunakan komunikasi Modbus untuk mengendalikan inverter komersial dan berhasil meningkatkan fleksibilitas pengelolaan energi pada instalasi nyata.

Walaupun demikian, penelitian tersebut lebih berfokus pada pengendalian inverter dan belum menerapkan mekanisme load shedding berbasis kondisi State of Charge (SOC) baterai. Selain itu, sistem masih memanfaatkan komunikasi berbasis internet sehingga belum sepenuhnya sesuai untuk implementasi pada PLTS off-grid di daerah terpencil.

2.6.4. Penelitian AIoT untuk Sistem Fotovoltaik

Tinjauan komprehensif yang dilakukan oleh (Hameed & Kurnaz, 2024) menunjukkan bahwa integrasi Artificial Intelligence dan Internet of Things (AIoT) telah menjadi salah satu arah perkembangan sistem monitoring energi surya. Pendekatan AI digunakan untuk berbagai aplikasi, seperti prediksi produksi energi, optimasi Maximum Power Point Tracking (MPPT), deteksi gangguan, hingga pemeliharaan prediktif.

Meskipun memberikan peningkatan performa yang signifikan, implementasi AI membutuhkan data historis operasional dalam jumlah besar sebagai proses pelatihan model. Oleh karena itu, keberadaan sistem monitoring

yang mampu mengumpulkan data secara kontinu menjadi prasyarat sebelum teknologi AI dapat diterapkan secara optimal. Penelitian ini memposisikan diri sebagai fondasi pengembangan tersebut dengan membangun sistem monitoring dan kontrol berbasis rule-based yang mampu menghasilkan data operasional secara berkelanjutan.

2.6.5. Posisi Penelitian Ini

Hasil kajian terhadap penelitian terdahulu menunjukkan bahwa sebagian besar penelitian hanya berfokus pada salah satu aspek, yaitu komunikasi data, monitoring sistem, ataupun pengendalian energi. Belum banyak penelitian yang mengintegrasikan komunikasi LoRa tanpa internet, protokol MQTT, platform Home Assistant, serta mekanisme load shedding berbasis SOC dalam satu sistem yang divalidasi secara end-to-end.

Perbandingan karakteristik penelitian terdahulu dengan penelitian yang diusulkan disajikan pada Tabel 4.

Table 4 Perbandingan karakteristik penelitian terdahulu dengan penelitian yang diusulkan

Peneliti	Tahun	Komunikasi	Platform	Kontrol Otomatis	Load Shedding	Tanpa Internet	DOI
Ndukwe et al.	2022	LoRa	Custom SCADA	Tidak	Tidak	√	10.21926/jept.2201007
He et al.	2024	WiFi	Node-RED	Sebagian	Tidak	X	10.3390/en17102295
Khalid et al.	2024	GSM/WiFi	Blynk	Tidak	Tidak	X	10.3390/en17164083
Hameed & Kurnaz	2024	LoRaWAN	Cloud + AI	Ya (AI)	Tidak	X	10.1007/s10791-024-09475-0
Tradacete-Ágreda et al.	2025	WiFi/Modbus	ESP32 + cloud	Ya	Sebagian	X	10.3390/s25216595
Penelitian ini	2025	LoRa P2P	Home Assistant	Ya (rule-based)	Ya (3 tier)	√	10.3390/s25216595

Dari hasil komparasi tersebut dapat disimpulkan bahwa penelitian ini menawarkan kombinasi beberapa karakteristik yang belum ditemukan secara bersamaan pada penelitian sebelumnya, yaitu penggunaan komunikasi LoRa point-to-point tanpa internet, integrasi MQTT sebagai protokol komunikasi data, pemanfaatan Home Assistant sebagai pusat monitoring dan otomasi, implementasi load shedding berbasis State of Charge (SOC), serta validasi performa sistem secara

end-to-end mulai dari akuisisi data sensor hingga proses pengendalian beban. Kombinasi tersebut menjadi kontribusi utama (*research contribution*) penelitian ini dalam pengembangan sistem monitoring dan kontrol energi untuk mini PLTS off-grid.

Table 5 Perbandingan Kontribusi Penelitian

Kontribusi	Penelitian Sebelumnya	Penelitian Ini
Monitoring real-time	✓	✓
LoRa tanpa internet	Sebagian	✓
MQTT	Sebagian	✓
Home Assistant	X	✓
Rule-based control	Sebagian	✓
Load shedding berbasis SOC	X	✓
Dashboard monitoring	Sebagian	✓
Validasi end-to-end	X	✓
MAE & RMSE	Sebagian	✓

BAB III.

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Rancangan dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan rekayasa sistem (systems engineering) dengan metode pengembangan eksperimental (experimental development method) yang dilaksanakan secara terstruktur dan iteratif. Pendekatan ini dipilih karena penelitian tidak hanya bertujuan merancang dan membangun sebuah prototipe sistem, tetapi juga melakukan validasi terhadap performa sistem melalui serangkaian pengujian eksperimental berdasarkan parameter yang telah ditetapkan.

Melalui pendekatan tersebut, proses analisis kebutuhan, perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, integrasi sistem, implementasi, hingga evaluasi kinerja dapat dilakukan secara sistematis. Selain menghasilkan sistem yang berfungsi sesuai kebutuhan, penelitian ini juga bertujuan membuktikan bahwa sistem yang dikembangkan mampu menjawab research gap yang telah diidentifikasi pada Bab II, yaitu keterbatasan sistem monitoring PLTS off-grid yang masih bergantung pada internet, belum memiliki mekanisme kontrol otomatis berbasis kondisi baterai, serta belum banyak divalidasi secara end-to-end.

3.1.1. Justifikasi Pemilihan Metode Penelitian

Pemilihan metode rekayasa sistem dengan pendekatan eksperimental didasarkan pada beberapa pertimbangan berikut.

1. Kompleksitas Sistem yang Dikembangkan

Sistem yang dikembangkan merupakan integrasi dari beberapa subsistem yang memiliki karakteristik berbeda, meliputi:

- a. Hardware domain, terdiri atas panel surya, charge controller MPPT, baterai LiFePO₄, inverter, sensor INA219, sensor PZEM-004T, relay, dan mikrokontroler ESP32.
- b. Communication domain, yang mencakup komunikasi LoRa, gateway, serta protokol MQTT sebagai media pertukaran data.
- c. Software domain, berupa firmware ESP32, broker MQTT Mosquitto, basis data InfluxDB, dan platform Home Assistant.

- d. Control domain, yaitu mekanisme monitoring, otomasi berbasis aturan (*rule-based automation*), dan pengendalian beban (*load shedding*) berdasarkan kondisi State of Charge (SOC) baterai.

Kompleksitas integrasi antar subsistem tersebut memerlukan pendekatan rekayasa sistem yang memungkinkan setiap subsistem dirancang, diuji, dan divalidasi secara terpisah sebelum diintegrasikan menjadi satu sistem yang utuh. Pendekatan ini juga mempermudah proses identifikasi serta perbaikan apabila terjadi kesalahan pada salah satu bagian sistem (Blanchard & Fabrycky, 2014).

2. Kebutuhan Validasi Empiris terhadap Performa Sistem

Penelitian ini tidak hanya berfokus pada pembangunan prototipe, tetapi juga melakukan pengujian untuk mengetahui tingkat keberhasilan sistem yang dikembangkan.

Beberapa parameter utama yang divalidasi meliputi:

- a. akurasi pengukuran sensor INA219 dan PZEM-004T;
- b. keandalan komunikasi LoRa;
- c. efektivitas mekanisme load shedding otomatis;
- d. serta stabilitas sistem selama beroperasi secara kontinu.

Akurasi sensor dievaluasi dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap alat ukur referensi Fluke 87V menggunakan parameter statistik Mean Absolute Error (MAE) dan Root Mean Square Error (RMSE). MAE digunakan untuk mengetahui rata-rata penyimpangan hasil pengukuran terhadap nilai referensi, sedangkan RMSE digunakan untuk mengidentifikasi adanya kesalahan pengukuran yang besar (*outlier*) sehingga evaluasi akurasi menjadi lebih komprehensif.

Keandalan komunikasi LoRa dievaluasi menggunakan parameter Packet Loss Rate (PLR), Received Signal Strength Indicator (RSSI), serta latency komunikasi pada beberapa variasi jarak pengujian.

Sementara itu, efektivitas kontrol otomatis dianalisis melalui pengujian perbandingan antara sistem yang menggunakan mekanisme *load shedding* dan sistem tanpa *load shedding*, sehingga dapat diketahui besarnya penghematan energi yang diperoleh.

Seluruh pengujian tersebut memerlukan implementasi prototipe perangkat keras sehingga metode eksperimental menjadi pendekatan yang paling sesuai (Creswell & Creswell, 2018).

3. Kebutuhan Pengembangan Secara Iteratif

Pengembangan sistem dilakukan secara bertahap melalui proses desain, implementasi, pengujian, evaluasi, dan penyempurnaan. Pendekatan iteratif dipilih karena beberapa parameter sistem memerlukan proses penyesuaian (*fine tuning*) agar diperoleh konfigurasi yang optimal.

Parameter yang dioptimasi meliputi:

- a. konfigurasi komunikasi LoRa (Spreading Factor, Bandwidth, Coding Rate, dan Transmission Power);
- b. interval pengiriman data sensor;
- c. nilai ambang (*threshold*) State of Charge untuk aktivasi *load shedding*;
- d. serta pengelompokan prioritas beban menjadi beban kritis, normal, dan non-kritis.

Setiap hasil pengujian digunakan sebagai umpan balik (*feedback*) untuk memperbaiki konfigurasi sistem sebelum dilakukan pengujian berikutnya. Dengan pendekatan ini diharapkan diperoleh sistem yang memiliki keseimbangan antara keandalan komunikasi, efisiensi energi, serta kestabilan operasi (Saunders et al., 2020).

4. Dalam konteks penelitian ini, AI/ML berpotensi diterapkan pada tiga titik dalam arsitektur sistem:

- a. Pada lapisan *firmware* ESP32 untuk estimasi SOC berbasis *neural network* yang lebih akurat dibanding metode estimasi berbasis tegangan yang digunakan saat ini;
- b. Pada lapisan *gateway* untuk deteksi anomali sinyal sensor secara otomatis berdasarkan pola data yang menyimpang dari kondisi normal dan;
- c. Pada lapisan Home Assistant untuk prediksi produksi energi dan optimasi penjadwalan beban berbasis data cuaca historis. Ketiga penerapan tersebut memerlukan *dataset* operasional jangka panjang yang baru dapat diperoleh setelah sistem dasar ini beroperasi secara

kontinu menjadikan penelitian ini sebagai fondasi pengumpulan data bagi pengembangan sistem berbasis AI di masa mendatang.

3.1.2. Kerangka Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian ini mengadopsi Verification and Validation Model (V-Model) yang merupakan salah satu pendekatan dalam rekayasa sistem untuk mengembangkan sistem yang memerlukan proses verifikasi dan validasi secara bertahap. Model ini dipilih karena penelitian tidak hanya berorientasi pada pembangunan prototipe, tetapi juga menekankan pembuktian bahwa setiap tahapan perancangan telah memenuhi kebutuhan sistem melalui proses pengujian yang terstruktur.

Berbeda dengan model Waterfall yang bersifat linear, V-Model menghubungkan setiap tahap pengembangan dengan tahap verifikasi yang bersesuaian sehingga kesalahan desain dapat diidentifikasi lebih awal sebelum sistem diintegrasikan secara penuh. Pendekatan ini sangat sesuai dengan penelitian yang melibatkan integrasi perangkat keras, komunikasi nirkabel, dan perangkat lunak dalam satu sistem monitoring energi berbasis IoT.

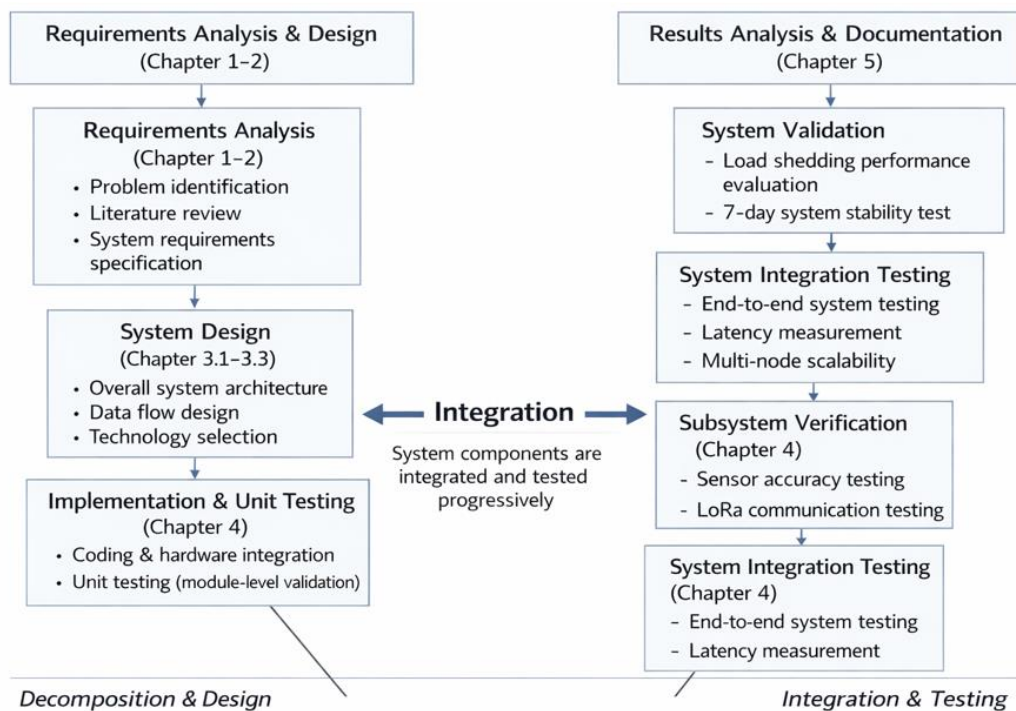


Figure 2 V-Model Metodologi Penelitian

Sisi kiri V-Model menggambarkan proses pengembangan sistem yang dimulai dari studi literatur, analisis kebutuhan, perancangan arsitektur sistem,

hingga implementasi prototipe. Titik terbawah V-Model merepresentasikan proses integrasi seluruh komponen menjadi satu sistem mini PLTS off-grid yang siap diuji.

Selanjutnya, sisi kanan menggambarkan proses verifikasi dan validasi yang dilakukan secara bertingkat. Verifikasi dilakukan melalui pengujian unit pada sensor dan modul komunikasi, dilanjutkan dengan pengujian integrasi antara ESP32, LoRa, MQTT, dan Home Assistant. Tahap akhir berupa validasi sistem secara menyeluruh dilakukan menggunakan parameter akurasi sensor (MAE dan RMSE), keandalan komunikasi (Packet Loss Rate dan RSSI), efektivitas mekanisme load shedding, serta stabilitas operasi sistem selama pengujian kontinu. Dengan pendekatan tersebut, setiap keputusan desain yang dibuat pada tahap pengembangan memperoleh proses verifikasi yang sesuai sehingga kualitas sistem dapat dievaluasi secara objektif dan terukur.

3.1.3. Metode Penelitian untuk Setiap Objektif

Penelitian ini memiliki empat tujuan utama sebagaimana ditetapkan pada Sub-bab 1.3. Masing-masing tujuan dijawab dengan metode penelitian yang spesifik dan menghasilkan *output* terukur sebagaimana dirangkum pada Tabel 6.

Table 6 Pemetaan Tujuan Penelitian, Metode, Indikator Keberhasilan, dan Luaran Penelitian

No	Tujuan Penelitian	Metode Penelitian	Indikator Keberhasilan	Luaran Penelitian
1	Merancang arsitektur sistem monitoring dan kontrol energi mini PLTS off-grid berbasis LoRa tanpa ketergantungan internet.	• Studi literatur • Analisis kebutuhan sistem • Pemilihan komponen berdasarkan performa, biaya, dan ketersediaan • Perancangan prototipe	Arsitektur sistem memenuhi kebutuhan fungsional penelitian	Diagram blok sistem, skematik rangkaian, Bill of Materials (BoM), justifikasi pemilihan komponen
2	Mengembangkan sistem kontrol otomatis berbasis State of Charge (SOC) menggunakan pendekatan rule-based.	• Perancangan algoritma IF–THEN • Implementasi Home Assistant • Pengujian fungsi load shedding	Seluruh aturan otomatis berjalan sesuai kondisi SOC baterai	Flowchart kontrol, file automasi YAML, skenario pengujian load shedding
3	Mengimplementasikan komunikasi LoRa sebagai media transmisi data antara node monitoring dan gateway lokal.	• Konfigurasi parameter LoRa (SF, BW, CR) • Implementasi gateway MQTT • Pengujian komunikasi pada beberapa jarak	Data berhasil dikirim secara konsisten dengan Packet Loss Rate sesuai target	Konfigurasi LoRa, dokumentasi gateway, hasil pengujian RSSI dan PLR
4	Memvalidasi performa sistem berdasarkan parameter akurasi sensor, keandalan komunikasi, efektivitas kontrol, dan stabilitas operasi.	• Kalibrasi sensor • Pengujian komunikasi • Pengujian load shedding • Pengujian stabilitas sistem selama 7 hari	MAE $\leq 1\%$; RMSE minimum; PLR $< 5\%$; Response time < 500 ms; Uptime $> 99\%$	Laporan hasil pengujian, grafik performa, analisis statistik, pembahasan hasil penelitian

3.1.4. Pendekatan Iteratif dan Validasi Sistem

Meskipun penelitian ini menggunakan kerangka System Engineering dengan pendekatan V-Model, proses pengembangan prototipe dilakukan secara iteratif. Pendekatan ini digunakan agar setiap hasil pengujian pada suatu tahapan dapat menjadi dasar penyempurnaan desain sebelum dilanjutkan ke tahap berikutnya. Dengan demikian, proses validasi tidak hanya dilakukan pada akhir penelitian, tetapi berlangsung secara berkesinambungan selama proses pengembangan sistem.

Pengembangan sistem dibagi menjadi tiga tahapan iteratif sebagai berikut.

Iterasi 1 Pengembangan Prototipe Dasar *Proof of Concept* (Minggu 1 - 4)

Tahap pertama bertujuan membangun dan memverifikasi fungsi dasar sistem. Aktivitas yang dilakukan meliputi integrasi panel surya, baterai, sensor INA219 dan PZEM-004T, mikrokontroler ESP32, serta komunikasi LoRa pada konfigurasi single-node.

Pengujian dilakukan untuk memastikan seluruh sensor mampu membaca parameter listrik dengan benar dan data berhasil dikirim menuju gateway melalui komunikasi LoRa.

Keluaran tahap ini meliputi:

1. Prototipe dasar sistem
2. Firmware pembacaan sensor
3. Komunikasi LoRa point-to-point
4. Data monitoring berhasil ditampilkan pada gateway

Tahap ini dinyatakan berhasil apabila data dapat diterima secara kontinu dengan nilai Packet Loss Rate (PLR) <10% pada pengujian jarak dekat.

Iterasi 2 Integrasi Sistem Monitoring dan Kontrol (Minggu 5 - 12)

Tahap kedua berfokus pada integrasi seluruh subsistem menjadi satu sistem monitoring dan kontrol yang utuh.

Pada tahap ini dilakukan:

1. Integrasi MQTT Broker
2. Integrasi Home Assistant
3. Implementasi dashboard monitoring
4. Implementasi rule-based control

5. Pengujian fungsi load shedding otomatis berdasarkan State of Charge (SOC)

Pengujian dilakukan pada konfigurasi multi-node dengan variasi jarak komunikasi hingga 3 km.

Keluaran tahap ini meliputi:

1. Dashboard monitoring real-time
2. Automasi Home Assistant
3. Sistem load shedding otomatis
4. Penyimpanan data historis

Tahap ini dinyatakan berhasil apabila seluruh fungsi monitoring dan kontrol berjalan sesuai skenario pengujian yang telah dirancang.

Iterasi 3 Optimasi dan Validasi Sistem (Minggu 13 - 20)

Tahap terakhir difokuskan pada optimasi parameter sistem dan validasi performa secara menyeluruh.

Aktivitas yang dilakukan meliputi:

1. Optimasi parameter komunikasi LoRa
2. Kalibrasi sensor
3. Pengujian jangkauan komunikasi
4. Pengujian efektivitas load shedding
5. Pengujian stabilitas operasi selama tujuh hari

Seluruh hasil pengujian dianalisis menggunakan parameter kuantitatif yang telah ditetapkan pada Bab III, yaitu:

1. Mean Absolute Error (MAE)
2. Root Mean Square Error (RMSE)
3. Packet Loss Rate (PLR)
4. Received Signal Strength Indicator (RSSI)
5. Response Time
6. Persentase penghematan energi
7. System Uptime

Tahap ini dinyatakan berhasil apabila seluruh indikator performa memenuhi target penelitian yang telah ditetapkan pada Bab I.

Mekanisme Validasi, Pada setiap akhir iterasi dilakukan proses evaluasi terhadap hasil pengujian untuk mengidentifikasi kekurangan sistem. Apabila ditemukan parameter yang belum memenuhi target, dilakukan analisis akar penyebab (root cause analysis), diikuti dengan penyempurnaan desain perangkat keras, konfigurasi komunikasi, maupun algoritma kontrol sebelum melanjutkan ke tahap berikutnya. Pendekatan ini memastikan bahwa sistem yang dihasilkan telah melalui proses verifikasi dan validasi secara bertahap sehingga memenuhi kebutuhan fungsional maupun kinerja yang ditetapkan.

3.1.5. Instrumen dan Tools Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini didukung oleh beberapa instrumen dan perangkat lunak yang digunakan pada proses perancangan, implementasi, pengujian, dan analisis data. Instrumen penelitian dikelompokkan menjadi empat kategori, yaitu perangkat keras, perangkat lunak, pengujian komunikasi, serta pengolahan dan analisis data sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 7.

Table 7 Instrumen dan Tools Penelitian

Kategori	Instrumen / Tools	Fungsi dalam Penelitian
Perangkat Keras	Panel Surya Monokristalin 100 Wp	Sumber energi utama sistem mini PLTS
	Charge Controller MPPT Epever Tracer 3210AN	Mengatur proses pengisian baterai secara optimal
	Baterai LiFePO ₄ 12 V 20 Ah	Media penyimpanan energi listrik
	Inverter Pure Sine Wave 300 W	Mengubah tegangan DC menjadi AC
	ESP32-WROOM	Mikrokontroler utama untuk akuisisi data dan pengendalian sistem
	INA219	Mengukur tegangan dan arus sisi DC
	PZEM-004T	Mengukur parameter listrik sisi AC
	LoRa SX1276	Media komunikasi data jarak jauh
	Laptop/PC Gateway	Menjalankan MQTT Broker dan Home Assistant
Instrumen Pengujian	Multimeter Fluke 87V	Sebagai alat ukur referensi pada proses kalibrasi sensor dan perhitungan MAE serta RMSE
	Oscilloscope Rigol	Verifikasi sinyal komunikasi dan debugging perangkat keras
	GPS Garmin eTrex 30x	Menentukan jarak aktual pada pengujian komunikasi LoRa
Perangkat Lunak	Arduino IDE 2.2.2	Pengembangan firmware ESP32
	Visual Studio Code + PlatformIO	Pengembangan dan manajemen source code
	Home Assistant	Monitoring real-time, otomasi, dan dashboard sistem
	Mosquitto MQTT Broker	Media komunikasi publish-subscribe antar perangkat
	MQTT Explorer	Monitoring dan debugging komunikasi MQTT

Analisis Data	Wireshark	Analisis paket komunikasi dan pengukuran latency jaringan
	Python 3.11 (NumPy, Pandas, Matplotlib)	Perhitungan MAE, RMSE, Packet Loss Rate (PLR), Response Time, dan visualisasi hasil pengujian
	Microsoft Excel	Tabulasi, pengolahan data, dan penyusunan grafik hasil penelitian
	InfluxDB	Penyimpanan data time-series hasil monitoring sistem

Setiap instrumen digunakan sesuai dengan tahapan penelitian. Multimeter Fluke 87V berfungsi sebagai alat ukur referensi dalam proses kalibrasi sensor INA219 dan PZEM-004T sehingga hasil pengukuran dapat dibandingkan menggunakan parameter Mean Absolute Error (MAE) dan Root Mean Square Error (RMSE). Sementara itu, Wireshark digunakan untuk mengevaluasi performa komunikasi MQTT dan LoRa melalui pengukuran waktu transmisi (latency), sedangkan Python dan Microsoft Excel digunakan untuk melakukan analisis statistik serta penyajian data hasil pengujian.

3.1.6. Kriteria Keberhasilan Penelitian

Penelitian ini dinyatakan berhasil apabila sistem yang dikembangkan memenuhi kriteria keberhasilan yang telah ditetapkan. Kriteria tersebut dibedakan menjadi dua kelompok, yaitu kriteria teknis (kuantitatif) yang diukur berdasarkan hasil pengujian sistem, serta kriteria fungsional (kualitatif) yang dievaluasi berdasarkan kemampuan sistem dalam memenuhi kebutuhan operasional.

Table 8 Kriteria Keberhasilan Penelitian

Aspek Evaluasi	Parameter	Target Keberhasilan	Metode Verifikasi
Akurasi Sensor	Mean Absolute Error (MAE)	$\leq 1\%$	Perbandingan dengan multimeter referensi Fluke 87V
	Root Mean Square Error (RMSE)	Sekecil mungkin dan konsisten terhadap MAE	Analisis statistik hasil pengukuran
Komunikasi LoRa	Packet Loss Rate (PLR)	$< 5\%$ pada jarak maksimum pengujian	Pengiriman paket data secara kontinu
	RSSI	Masih berada di atas batas sensitivitas penerima	Monitoring kualitas sinyal LoRa
Kontrol Otomatis	Response Time	< 500 ms	Pengukuran waktu dari deteksi SOC hingga relay aktif
	Keberhasilan Load Shedding	100% sesuai aturan	Pengujian seluruh skenario SOC
Efisiensi Energi	Penghematan Energi	$\geq 20\%$ dibandingkan tanpa load shedding	Perbandingan konsumsi energi dua skenario pengujian
Stabilitas Sistem	System Uptime	$> 99\%$ selama pengujian 7 hari	Monitoring operasi kontinu
Dashboard Monitoring	Kecepatan pembaruan data	≤ 5 detik	Pengamatan dashboard Home Assistant

Kriteria Fungsional, Selain memenuhi parameter kuantitatif, sistem juga harus memenuhi beberapa kriteria fungsional sebagai berikut.

1. Sistem mampu beroperasi secara mandiri tanpa memerlukan koneksi internet selama proses monitoring maupun pengendalian.
2. Dashboard Home Assistant mampu menampilkan parameter sistem secara real-time, meliputi tegangan, arus, daya, energi, State of Charge (SOC), serta status beban.
3. Mekanisme otomasi load shedding berjalan sesuai aturan yang telah ditetapkan berdasarkan nilai SOC baterai.
4. Sistem mampu mengirimkan data dari node menuju gateway menggunakan komunikasi LoRa secara konsisten.
5. Sistem dapat direplikasi menggunakan komponen Commercial Off-The-Shelf (COTS) yang mudah diperoleh di pasaran.
6. Seluruh konfigurasi perangkat keras, firmware, komunikasi MQTT, dan Home Assistant terdokumentasi sehingga penelitian dapat direplikasi pada pengembangan selanjutnya.

Mekanisme Evaluasi, Apabila salah satu parameter teknis belum memenuhi target yang telah ditetapkan, maka dilakukan analisis akar penyebab (Root Cause Analysis/RCA) untuk mengidentifikasi sumber permasalahan. Hasil analisis tersebut menjadi dasar dalam proses penyempurnaan sistem dan akan dibahas sebagai bagian dari keterbatasan penelitian beserta rekomendasi pengembangan pada Bab V.

3.2. Alur Penelitian

Alur penelitian menggambarkan tahapan pelaksanaan penelitian mulai dari identifikasi permasalahan hingga evaluasi hasil pengujian sistem. Tahapan ini disusun secara sistematis agar proses pengembangan sistem kontrol dan monitoring energi pada mini PLTS off-grid dapat dilaksanakan secara terstruktur dan menghasilkan luaran yang sesuai dengan tujuan penelitian.

Secara umum, penelitian ini terdiri atas lima tahapan utama sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.

1. Studi Literatur dan Identifikasi Kebutuhan

Tahap awal dilakukan melalui studi literatur mengenai sistem PLTS off-grid, teknologi komunikasi LoRa, platform Home Assistant, protokol MQTT, serta metode manajemen energi berbasis rule-based control. Hasil kajian digunakan untuk mengidentifikasi kebutuhan sistem, menyusun spesifikasi fungsional, serta merumuskan parameter yang akan diuji.

2. Perancangan Sistem

Tahap perancangan meliputi penyusunan arsitektur sistem, desain jalur energi (*energy pathway*), desain jalur monitoring dan komunikasi data, pemilihan komponen perangkat keras, serta perancangan algoritma kontrol berbasis State of Charge (SOC). Pada tahap ini juga disusun diagram blok sistem, diagram alir, serta Bill of Materials (BoM).

3. Implementasi Sistem

Tahap implementasi mencakup perakitan perangkat keras, pengembangan firmware ESP32, konfigurasi komunikasi LoRa, implementasi MQTT Broker, integrasi Home Assistant, serta pembuatan dashboard monitoring. Setelah seluruh subsistem selesai dikembangkan, dilakukan proses integrasi sehingga membentuk satu sistem yang utuh.

4. Pengujian dan Validasi

Tahap pengujian dilakukan untuk mengevaluasi performa sistem berdasarkan parameter yang telah ditentukan. Pengujian meliputi kalibrasi sensor, pengujian komunikasi LoRa, pengujian mekanisme load shedding otomatis, pengujian dashboard monitoring, serta pengujian stabilitas sistem secara kontinu. Hasil pengujian dianalisis menggunakan parameter MAE, RMSE, Packet Loss Rate (PLR), RSSI, response time, dan system uptime.

5. Analisis Hasil dan Penyusunan Kesimpulan

Tahap terakhir merupakan analisis terhadap seluruh hasil pengujian untuk mengetahui tingkat keberhasilan sistem dibandingkan dengan target penelitian yang telah ditetapkan. Berdasarkan hasil analisis tersebut dilakukan evaluasi terhadap kelebihan maupun keterbatasan sistem, yang selanjutnya menjadi dasar dalam penyusunan kesimpulan dan rekomendasi pengembangan pada penelitian berikutnya.

Apabila pada tahap pengujian ditemukan parameter yang belum memenuhi target, maka dilakukan proses evaluasi dan penyempurnaan sistem sebelum pengujian diulang. Mekanisme ini memastikan bahwa sistem yang dihasilkan telah melalui proses verifikasi dan validasi secara bertahap.

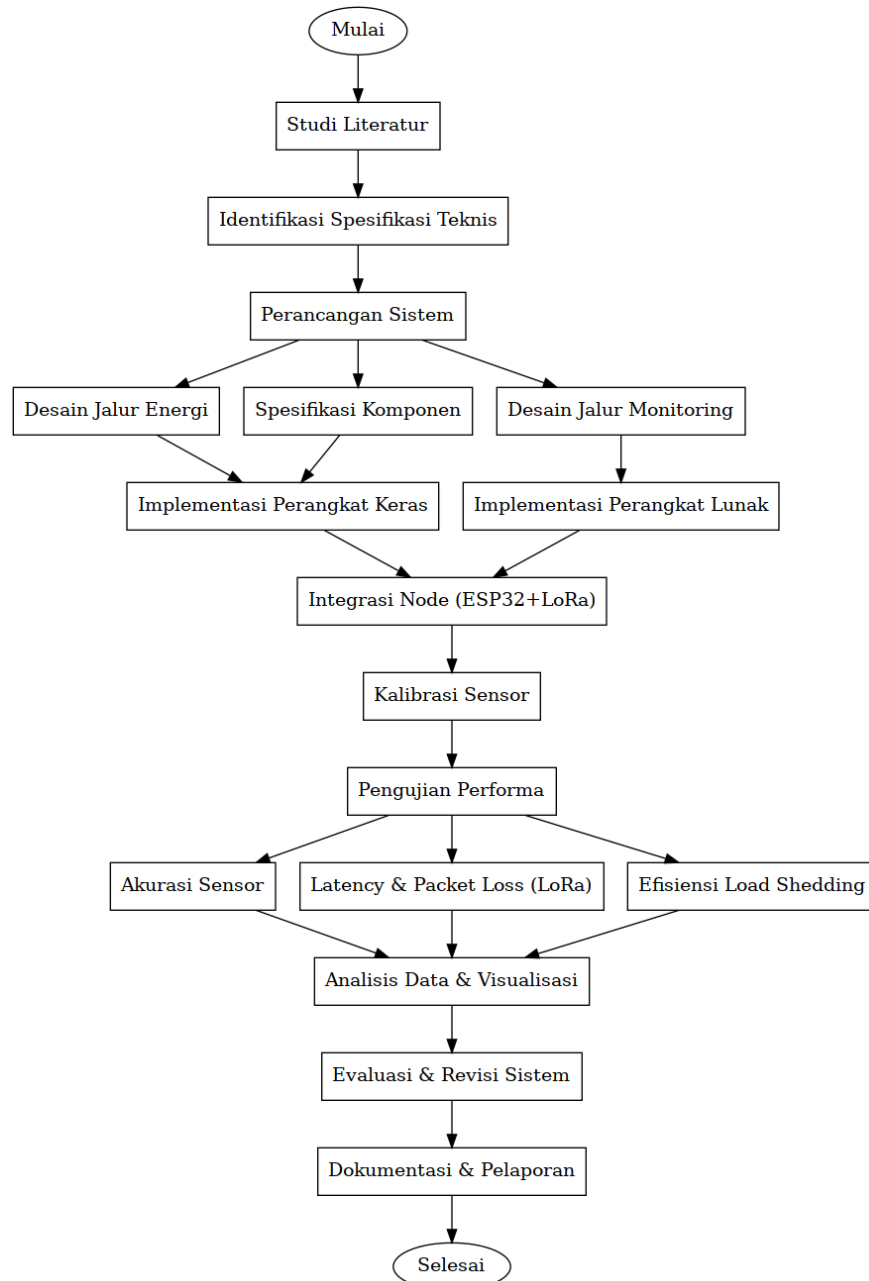


Figure 3 Diagram Alur Penelitian

3.2.1. Ringkasan Tahapan Penelitian

Setiap tahap dalam alur penelitian memiliki lingkup waktu dan *deliverable* yang terukur sebagaimana dirangkum pada Tabel 9.

Table 9 Ringkasan Tahapan, Jadwal, dan Deliverable Penelitian

No	Tahap	Minggu	Deliverable
1	Studi Literatur	1 - 3	Literature review summary, matriks gap analisis, minimum 20 referensi terindeks
2	Identifikasi Spesifikasi Teknis	4	Dokumen spesifikasi kebutuhan sistem, shortlist komponen, Bill of Materials awal
3a	Desain Jalur Energi	5 - 6	Skema jalur energi, perhitungan sizing komponen
3b	Spesifikasi Komponen	6 - 7	Bill of Materials final, justifikasi pemilihan komponen
3c	Desain Jalur Monitoring	7 - 8	Diagram penempatan sensor, struktur topik MQTT, template konfigurasi
4	Implementasi Perangkat Keras	9 - 11	Sistem prototipe terakit, dokumentasi wiring, checklist pengujian komponen
5	Implementasi Perangkat Lunak	12 - 14	Repository kode sumber, file konfigurasi YAML, dokumentasi kode
6	Integrasi Node (ESP32 + LoRa)	15	Laporan pengujian integrasi, system boot log, dokumentasi error handling
7	Kalibrasi Sensor	16	Laporan kalibrasi dengan nilai MAE, firmware dengan konstanta koreksi
8	Pengujian Performa	17 - 20	Dataset hasil pengujian (CSV), analisis statistik, grafik performa
9	Analisis Data & Visualisasi	21	Laporan analisis, dataset dipublikasikan (Zenodo/GitHub), grafik resolusi tinggi
10	Evaluasi & Revisi Sistem	22	Laporan evaluasi, revision log, konfigurasi sistem final
11	Dokumentasi & Pelaporan	23 - 24	Tesis final, repository publik (GitHub), draf artikel jurnal (opsional)

3.2.2. Kriteria Transisi Antar Tahap (Gate Review)

Setiap tahap penelitian memiliki kriteria yang harus dipenuhi sebelum melanjutkan ke tahap berikutnya, guna memastikan kualitas hasil dan mencegah pengerjaan ulang (*rework*) yang tidak perlu.

Table 10 Gate Review Criteria

Transisi	Kriteria Keberhasilan
Studi Literatur → Identifikasi Spesifikasi	- Gap penelitian teridentifikasi dengan jelas - Minimal 20 referensi ilmiah ditinjau - Justifikasi pemilihan teknologi disusun secara logis
Identifikasi Spesifikasi → Perancangan Sistem	- Kebutuhan sistem dirumuskan dengan pendekatan SMART - Komponen tersedia dan dapat diperoleh (<i>procurable</i>) - Estimasi biaya disetujui
Perancangan Sistem → Implementasi Hardware	- Desain sistem lengkap dan telah direview - Bill of Materials (BoM) sesuai anggaran - Tidak terdapat kendala kritis (<i>show-stopper</i>) - Seluruh komponen telah tersedia
Implementasi Hardware → Implementasi Software	- Tidak terjadi kerusakan perangkat - Nilai tegangan dan arus dalam kondisi normal

	- Sinyal LoRa berhasil diterima oleh gateway
Implementasi Software → Integrasi Sistem (Node)	- Firmware berhasil dikompilasi tanpa error - Data berhasil dikirim melalui protokol MQTT - Dashboard menampilkan data secara real-time
Integrasi Sistem → Kalibrasi Sensor	- Aliran data end-to-end berjalan dengan baik - Tidak terjadi kehilangan data selama pengujian ≥ 1 jam - Sistem mampu melakukan recovery saat terjadi error
Kalibrasi Sensor → Pengujian Performa	- Nilai MAE $\leq \pm 1\%$ tercapai - Proses kalibrasi terdokumentasi dengan baik
Pengujian Performa → Analisis Data	- Seluruh skenario pengujian telah dijalankan - Dataset lengkap dan terorganisir - Analisis statistik menunjukkan signifikansi ($p < 0,05$)
Analisis Data → Evaluasi Sistem	- Hasil penelitian diinterpretasikan dengan jelas - Perbandingan terhadap target dilakukan - Insight atau temuan utama dihasilkan
Evaluasi Sistem → Dokumentasi	- Seluruh target tercapai atau keterbatasan dijelaskan dengan justifikasi - Tidak terdapat isu kritis yang belum terselesaikan

3.2.3. Jadwal dan *Milestone* Penelitian

Penelitian dilaksanakan selama 24 minggu dengan lima *milestone* utama sebagaimana ditampilkan pada Tabel 8 dan Gambar 5.

Table 11 Jadwal Penelitian dan Milestone

Minggu	Tahap Penelitian	Deliverable	Milestone
1 - 3	Studi Literatur	Dokumen tinjauan pustaka	
4	Identifikasi Spesifikasi	Dokumen kebutuhan sistem (requirement specification)	M1 - Minggu 4 Proposal disetujui pembimbing
5 - 8	Perancangan Sistem	Dokumen desain sistem dan Bill of Materials (BoM)	M2 - Minggu 8 <i>Design review</i> selesai, desain sistem tervalidasi
9 - 11	Implementasi Hardware	Prototipe perangkat keras terakit	
12 - 14	Implementasi Software	Kode program (firmware & backend)	
15	Integrasi Sistem (Node)	Laporan integrasi sistem	
16	Kalibrasi Sensor	Laporan hasil kalibrasi	M3 - Minggu 16 Demonstrasi sistem ke pembimbing (<i>proof of working system</i>)
17 - 20	Pengujian Performa	Laporan pengujian dan dataset	
21	Analisis Data dan Visualisasi	Laporan analisis data	

22	Evaluasi dan Penyempurnaan Sistem	Laporan evaluasi sistem	M4 - Minggu 22 Seluruh kriteria validasi terpenuhi
23 - 24	Dokumentasi dan Pelaporan	Dokumen tesis dan repositori kode	M5 - Minggu 24 Siap sidang

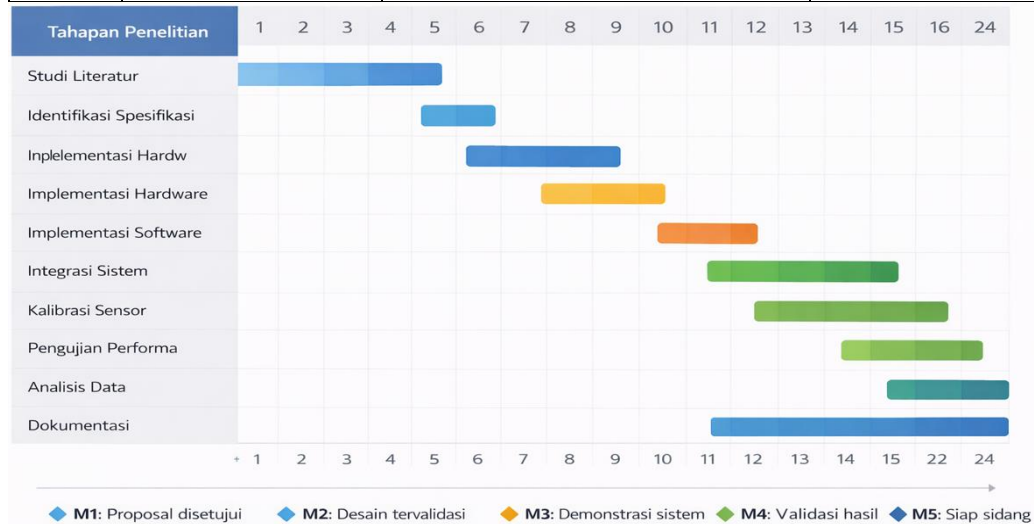


Figure 4 Gantt chart timeline penelitian thesis

Total durasi penelitian adalah 24 minggu dengan *buffer* waktu dua minggu yang telah terintegrasi untuk mengakomodasi keterlambatan pengujian, iterasi perbaikan sistem, dan kendala teknis di lapangan.

3.3. Desain Sistem

Sistem yang dikembangkan pada penelitian ini dirancang sebagai sistem kontrol dan monitoring energi pada mini PLTS off-grid berbasis *embedded system* dengan kapasitas 100 W. Arsitektur sistem mengintegrasikan proses konversi energi, akuisisi data, komunikasi nirkabel, serta pengendalian otomatis dalam satu kesatuan yang bekerja secara terkoordinasi. Pendekatan ini dipilih agar sistem mampu beroperasi secara mandiri tanpa ketergantungan pada jaringan internet, sekaligus tetap menyediakan kemampuan monitoring dan pengendalian secara *real-time*.

Secara umum, sistem terdiri atas dua jalur utama yang saling terintegrasi, yaitu:

1. Jalur energi (Energy Pathway), yang bertugas melakukan konversi, penyimpanan, dan distribusi energi listrik dari panel surya menuju beban.
2. Jalur monitoring dan kontrol (Monitoring and Control Pathway), yang bertugas melakukan akuisisi data sensor, transmisi data menggunakan

komunikasi LoRa, penyimpanan data pada MQTT Broker, serta menjalankan otomasi berbasis Home Assistant.

Kedua jalur tersebut memiliki fungsi yang berbeda, namun saling berinteraksi melalui proses pertukaran data. Jalur energi menyediakan parameter operasional seperti tegangan, arus, daya, energi, dan *State of Charge* (SOC), sedangkan jalur monitoring memanfaatkan informasi tersebut sebagai dasar dalam proses pengambilan keputusan otomatis, seperti mekanisme *load shedding* ketika kapasitas baterai berada di bawah batas yang telah ditentukan. Gambar 6 memperlihatkan arsitektur sistem yang dikembangkan pada penelitian ini.

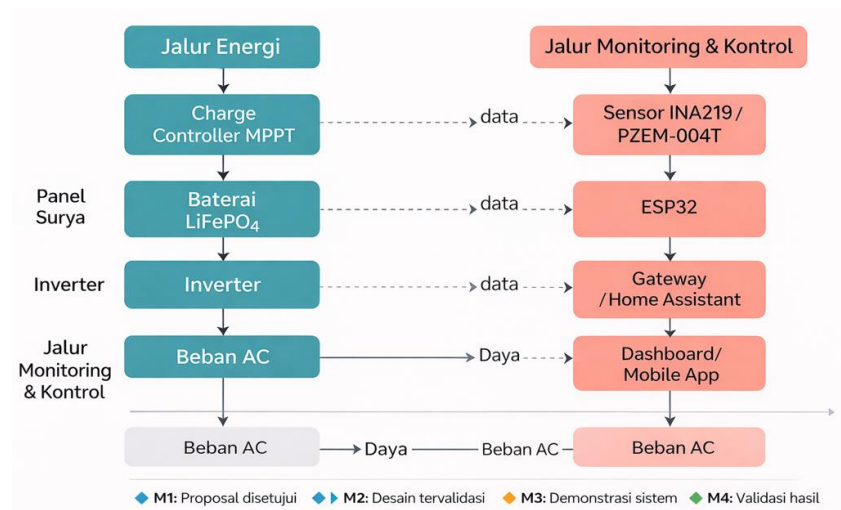


Figure 5 Arsitektur Desain Sistem

Berdasarkan Gambar 5, sisi kiri diagram merepresentasikan jalur energi yang dimulai dari panel surya sebagai sumber energi utama. Energi listrik DC yang dihasilkan selanjutnya dikendalikan oleh MPPT charge controller sebelum disimpan pada baterai LiFePO₄. Energi yang tersimpan kemudian disalurkan menuju inverter untuk menghasilkan tegangan AC yang digunakan oleh beban.

Pada sisi kanan diagram ditunjukkan jalur monitoring dan kontrol. Sensor INA219 melakukan pengukuran parameter listrik DC pada sisi panel surya dan baterai, sedangkan sensor PZEM-004T digunakan untuk memantau parameter listrik AC pada sisi keluaran inverter. Seluruh data sensor diproses oleh mikrokontroler ESP32 sebelum dikirimkan melalui komunikasi LoRa menuju gateway lokal. Gateway kemudian meneruskan data ke MQTT Broker yang

selanjutnya diproses oleh Home Assistant untuk ditampilkan pada dashboard monitoring serta digunakan sebagai dasar eksekusi otomasi sistem.

Garis putus-putus pada diagram menunjukkan hubungan logis antara jalur energi dan jalur monitoring. Jalur monitoring tidak membawa aliran energi listrik, tetapi hanya mengakuisisi informasi dari setiap titik pengukuran sehingga tidak memengaruhi proses distribusi daya pada sistem PLTS. Dengan pemisahan fungsi tersebut, sistem memiliki tingkat modularitas yang lebih baik sehingga proses pemeliharaan, pengembangan, maupun penambahan node monitoring dapat dilakukan tanpa mengubah konfigurasi jalur energi.

Arsitektur ini dipilih karena memenuhi kebutuhan utama penelitian, yaitu menyediakan sistem monitoring dan kontrol yang mandiri, hemat energi, mudah direplikasi, serta mampu beroperasi pada wilayah yang tidak memiliki infrastruktur internet. Selain itu, penggunaan komunikasi LoRa dan platform Home Assistant memungkinkan sistem dikembangkan menjadi arsitektur multi-node pada penelitian lanjutan tanpa memerlukan perubahan mendasar pada struktur sistem.

3.3.1. Jalur Energi (Energy Pathway)

Jalur energi (*energy pathway*) merupakan bagian utama dari sistem yang berfungsi mengonversi, menyimpan, dan mendistribusikan energi listrik dari panel surya menuju beban. Pada penelitian ini, jalur energi dirancang untuk memastikan kontinuitas suplai daya, meningkatkan efisiensi konversi energi, serta mendukung mekanisme pengendalian beban (*load shedding*) secara otomatis berdasarkan kondisi baterai.

Proses konversi energi dimulai ketika modul fotovoltaik (*photovoltaic module*) mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik arus searah (*direct current*–DC). Energi yang dihasilkan kemudian dialirkan menuju *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) charge controller yang berfungsi mengoptimalkan titik operasi panel surya sehingga daya yang diperoleh selalu mendekati daya maksimum. Selain itu, charge controller juga mengatur proses pengisian baterai dengan menerapkan proteksi terhadap kondisi *overcharging*, *overdischarging*, dan arus lebih sehingga umur pakai baterai dapat dipertahankan.

Energi listrik selanjutnya disimpan pada baterai LiFePO₄ sebagai media penyimpanan utama. Ketika diperlukan oleh beban, energi dapat digunakan secara

langsung untuk beban DC maupun dikonversi menjadi tegangan AC 220 V, 50 Hz melalui inverter *pure sine wave*. Konfigurasi tersebut memungkinkan sistem tetap beroperasi baik pada siang maupun malam hari, sekaligus mendukung implementasi mekanisme *load shedding* secara otomatis ketika kapasitas baterai berada di bawah batas yang telah ditentukan.

Spesifikasi komponen utama yang digunakan pada jalur energi ditunjukkan pada Tabel 12.

Table 12 Spesifikasi Komponen Jalur Energi

Komponen	Model/Tipe	Spesifikasi Kunci	Justifikasi Pemilihan
Panel Surya	Monokristalin 100 Wp	Efisiensi 18–22%, Voc 21–22 V, Imp 5,5–6 A	Efisiensi tinggi dan sesuai untuk area instalasi terbatas
Charge Controller	Epever Tracer 3210AN (MPPT)	Efisiensi ≥97%, 30 A	Optimasi daya panel dan efisiensi lebih tinggi dibanding PWM
Baterai	LiFePO ₄ 12 V 20 Ah	>2.000 siklus, DoD 80%, efisiensi ±95%	Umur pakai panjang, aman, dan bebas perawatan
Inverter	Pure Sine Wave 300 W	THD <3%, efisiensi 90–95%	Menghasilkan gelombang AC stabil untuk beban sensitif

Justifikasi teknis pemilihan masing-masing komponen telah dibahas secara rinci pada Subbab 2.1.1. Secara umum, pemilihan komponen mempertimbangkan tiga aspek utama, yaitu kesesuaian spesifikasi teknis terhadap kebutuhan sistem, ketersediaan komponen di pasaran lokal, serta efisiensi biaya sehingga prototipe dapat direalisasikan sebagai *proof-of-concept*.

Perhitungan Produksi Energi

Estimasi energi harian yang dihasilkan panel surya dihitung menggunakan

Persamaan : $E_{\text{harian}} = PPV \times PSH \times \eta_{\text{sys}}$

dengan:

E_{harian} = energi harian (Wh)

PPV = kapasitas panel surya (Wp)

PSH = Peak Sun Hours (jam)

η_{sys} = efisiensi sistem

Pada penelitian ini digunakan:

Kapasitas panel = 100 Wp

PSH Batam = 4,5 jam/hari

Efisiensi sistem = 0,85

sehingga diperoleh

$$E_{\text{harian}} = 100 \times 4.5 \times 0.85 = 382.5 \text{ Wh/hari}$$

Nilai efisiensi sistem sebesar 85% mempertimbangkan rugi-rugi akibat kabel, efisiensi charge controller MPPT, pengaruh temperatur panel, serta faktor kebersihan permukaan panel.

Kapasitas Penyimpanan Energi

Kapasitas energi baterai dihitung menggunakan Persamaan

$$E_{battery} = V \times Ah$$

dengan

$$V=12V$$

$$Ah=20Ah$$

Maka $E_{battery} = 240Wh$

Apabila digunakan batas Depth of Discharge (DoD) sebesar 80%, maka energi yang dapat dimanfaatkan adalah $240 \times 80\% = 192Wh$

Kapasitas tersebut dianggap memadai sebagai proof-of-concept untuk menguji mekanisme monitoring dan *load shedding*. Pada implementasi lapangan, kapasitas baterai dapat ditingkatkan sesuai kebutuhan beban dan lama waktu operasi (*autonomy time*).

Justifikasi lengkap pemilihan setiap komponen terhadap alternatifnya telah dibahas pada Sub-bab 2.1.1. Secara ringkas, pemilihan komponen pada penelitian ini didasarkan pada tiga kriteria utama:

1. Akurasi dan performa teknis yang memenuhi spesifikasi sistem,
2. Ketersediaan di pasaran lokal Batam dan sekitarnya, dan
3. Kesesuaian biaya dengan anggaran penelitian dengan total BOM ditargetkan di bawah Rp 5.000.000 per unit sistem.

Perhitungan Produksi dan Kapasitas Energi

Estimasi produksi energi harian sistem dihitung berdasarkan rata-rata *Peak Sun Hours* (PSH) di Batam sebesar 4-5 jam/hari:

$$\text{Energi harian} = 100 \text{ Wp} \times 4-5 \text{ jam} \times 0,85 \text{ (system efficiency)} = 382,5 \text{ Wh/hari}$$

Faktor *system efficiency* sebesar 0,85 memperhitungkan rugi-rugi *wiring* (3%), MPPT (3%), debu (5%), dan suhu (4%). Kapasitas baterai 20 Ah dipilih untuk keperluan *proof-of-concept* dengan *autonomy* 0,5 hari, yang mencukupi untuk demonstrasi *load shedding*. Untuk implementasi lapangan, kapasitas 50 Ah direkomendasikan untuk *autonomy* 1 hari penuh.

Klasifikasi Prioritas Beban

Untuk mendukung mekanisme *load shedding*, beban pada sistem diklasifikasikan ke dalam tiga tingkat prioritas sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 13.

Table 13 Klasifikasi Prioritas Beban

Tier	Prioritas	Komponen	Daya	Kondisi Operasi
1	Kritis	Lampu utama dan router komunikasi	25 W	Selalu aktif
2	Normal	Kipas angin dan charger	50 W	Diputus ketika SOC < 20%
3	Non-kritis	Lampu taman dan TV	25 W	Diputus ketika SOC < 30%

Pengelompokan prioritas beban bertujuan agar sistem tetap mampu mempertahankan operasi beban kritis meskipun kapasitas energi baterai menurun. Dengan strategi ini, energi yang tersedia dapat dimanfaatkan secara lebih efisien tanpa menyebabkan seluruh sistem kehilangan suplai daya.

Skema Distribusi Energi

Distribusi energi pada sistem mengikuti tiga kondisi operasi utama, yaitu:

1. Mode pengisian (Charging Mode), ketika tegangan panel surya mencukupi, energi dari panel digunakan untuk menyuplai beban sekaligus mengisi baterai melalui MPPT.
2. Mode baterai (Battery Mode), ketika energi panel surya tidak tersedia atau tidak mencukupi, seluruh kebutuhan daya dipenuhi oleh baterai.
3. Mode kritis (Load Shedding Mode), ketika nilai *State of Charge* (SOC) baterai berada di bawah nilai ambang yang telah ditentukan, sistem secara otomatis memutus beban non-kritis melalui relay yang dikendalikan oleh ESP32 sehingga beban prioritas tetap memperoleh suplai energi.

Meskipun jalur energi dan jalur monitoring dibahas pada subbab yang berbeda, keduanya saling terintegrasi. Sensor INA219 dan PZEM-004T ditempatkan pada beberapa titik pengukuran di sepanjang jalur energi untuk memperoleh data tegangan, arus, daya, dan energi secara *real-time*. Data tersebut selanjutnya digunakan sebagai masukan bagi sistem monitoring dan mekanisme pengendalian otomatis yang dijelaskan pada Subbab 3.3.2.

3.3.2. Jalur Monitoring dan Kontrol

Jalur *monitoring* dan kontrol (*monitoring and control pathway*) merupakan subsistem yang bertugas melakukan akuisisi data, transmisi data, visualisasi kondisi sistem secara *real-time*, serta pengendalian otomatis terhadap beban berdasarkan

kondisi operasi sistem. Berbeda dengan jalur energi yang berfungsi mendistribusikan daya listrik, jalur ini mengelola aliran informasi (*information flow*) mulai dari proses pengukuran hingga pengambilan keputusan pengendalian beban.

Pada penelitian ini, sistem dirancang menggunakan arsitektur *local-first*, sehingga seluruh proses monitoring, komunikasi data, penyimpanan data, visualisasi dashboard, dan otomasi tetap dapat beroperasi tanpa ketergantungan terhadap koneksi internet. Pendekatan ini dipilih untuk meningkatkan keandalan sistem, mengurangi latensi komunikasi, serta memastikan sistem tetap berfungsi ketika jaringan internet tidak tersedia.

Spesifikasi komponen yang digunakan pada jalur monitoring dan kontrol ditunjukkan pada Tabel 14.

Table 14 Spesifikasi Komponen Jalur Monitoring dan Kontrol

Komponen	Model/Tipe	Spesifikasi Kunci	Fungsi
Sensor DC	INA219 (2 unit)	Akurasi $\pm 1\%$, antarmuka I ² C, rentang 0–26 V	Mengukur tegangan, arus, dan daya panel surya serta baterai
Sensor AC	PZEM-004T	Akurasi $\pm 1\%$ (tegangan), $\pm 2\%$ (arus dan daya), Modbus RTU	Mengukur parameter listrik keluaran inverter
Mikrokontroler	ESP32-WROOM	Dual-core 240 MHz, RAM 520 KB	Akuisisi data sensor, pengolahan data, dan pengendalian relay
Modul LoRa	SX1276	923 MHz, BW 125 kHz	Transmisi data dari node sensor menuju gateway
Gateway	Laptop/PC + modul LoRa SX1276	USB Serial Interface	Menerima paket LoRa dan meneruskan data ke broker MQTT
MQTT Broker	Mosquitto	MQTT v3.1.1	Mengelola komunikasi publish-subscribe antarperangkat
Platform Monitoring	Home Assistant 2024.6	Local-first, MQTT Native	Visualisasi dashboard dan otomasi sistem

Arsitektur Komunikasi

Aliran komunikasi data pada sistem dimulai dari proses akuisisi data oleh sensor INA219 dan PZEM-004T yang melakukan pengukuran parameter kelistrikan, meliputi tegangan, arus, daya, energi, serta kondisi baterai secara periodik setiap lima detik. Data hasil pengukuran kemudian diproses oleh ESP32 melalui proses validasi dan penyaringan menggunakan *moving average filter* untuk mengurangi fluktuasi akibat *noise* pengukuran.

Selanjutnya, data dikirimkan menuju gateway menggunakan komunikasi LoRa. Gateway berfungsi menerima paket data dari node sensor dan meneruskannya ke broker MQTT Mosquitto yang berjalan secara lokal pada komputer. Home Assistant kemudian melakukan proses *subscribe* terhadap *topic* MQTT untuk memperoleh data secara *real-time*, menyimpan data historis, memperbarui tampilan dashboard, serta menjalankan mekanisme otomasi apabila kondisi tertentu terpenuhi.



Figure 6 Diagram komunikasi

Justifikasi Penggunaan MQTT

Protokol *Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)* digunakan sebagai media komunikasi antara gateway dan Home Assistant karena memiliki karakteristik ringan (*lightweight messaging protocol*) dengan mekanisme komunikasi *publish-subscribe*. Dibandingkan metode komunikasi berbasis *request-response* seperti HTTP, MQTT menghasilkan *overhead* paket data yang lebih kecil, latensi komunikasi yang lebih rendah, serta lebih efisien untuk perangkat dengan sumber daya terbatas seperti ESP32.

Selain efisiensi komunikasi, MQTT dipilih karena mampu memisahkan proses pengiriman (*publisher*) dan penerimaan (*subscriber*) data melalui broker

Mosquitto. Dengan mekanisme tersebut, node sensor hanya bertugas mengirimkan data tanpa perlu mengetahui perangkat yang akan menerima data, sehingga arsitektur sistem menjadi lebih fleksibel dan mudah dikembangkan apabila jumlah node sensor bertambah.

Home Assistant juga menyediakan dukungan MQTT secara *native*, sehingga proses integrasi antara gateway, broker Mosquitto, dan platform monitoring dapat dilakukan tanpa memerlukan perangkat lunak tambahan. Oleh karena itu, penggunaan MQTT mendukung tujuan penelitian untuk membangun sistem monitoring PLTS *off-grid* yang bersifat lokal (*local-first*), andal, dan mudah dikembangkan.

Antarmuka Pengguna

Dashboard monitoring dikembangkan menggunakan Home Assistant sebagai antarmuka pengguna (*Human Machine Interface/HMI*) yang dapat diakses melalui *web browser* maupun aplikasi Home Assistant Companion pada perangkat bergerak. Dashboard dirancang untuk memberikan informasi kondisi sistem secara *real-time* sehingga pengguna dapat memantau performa PLTS secara menyeluruh.

Parameter yang ditampilkan pada dashboard meliputi:

1. tegangan panel surya (*PV Voltage*);
2. arus panel surya (*PV Current*);
3. tegangan baterai (*Battery Voltage*);
4. arus baterai (*Battery Current*);
5. estimasi *State of Charge* (SOC) baterai;
6. daya keluaran inverter (*AC Power*);
7. energi kumulatif yang digunakan beban;
8. status ON/OFF relay pada setiap kelompok beban;
9. kekuatan sinyal komunikasi LoRa (RSSI); dan
10. grafik historis parameter kelistrikan.

Selain menampilkan data secara numerik dan grafis, dashboard juga menyediakan indikator kondisi sistem sehingga perubahan parameter operasi dapat dipantau secara langsung. Implementasi dashboard Home Assistant beserta hasil visualisasi ditampilkan pada Bab IV.

Mekanisme Kontrol Otomatis

Mekanisme pengendalian beban diimplementasikan menggunakan fitur Automation pada Home Assistant dengan konfigurasi berbasis YAML. Sistem secara kontinu memantau nilai *State of Charge* (SOC) baterai yang diterima melalui MQTT. Apabila nilai SOC berada di bawah batas ambang yang telah ditentukan, Home Assistant secara otomatis mengirimkan perintah kepada ESP32 untuk memutus relay pada kelompok beban non-kritis (*load shedding*). Sebaliknya, ketika kapasitas baterai kembali mencukupi, sistem akan mengaktifkan kembali beban sesuai urutan prioritas yang telah ditetapkan.

Dengan mekanisme tersebut, sistem tidak hanya berfungsi sebagai media monitoring, tetapi juga mampu melakukan pengendalian beban secara otomatis untuk menjaga kontinuitas suplai daya pada beban prioritas.

Sebagai rangkaian proses, jalur monitoring dan kontrol mengintegrasikan proses akuisisi data, komunikasi LoRa, pertukaran data melalui MQTT, visualisasi dashboard, serta mekanisme otomasi menjadi satu kesatuan sistem yang mendukung operasi PLTS *off-grid* secara mandiri. Implementasi dan pengujian terhadap setiap tahapan tersebut dibahas lebih lanjut pada Bab IV dan Bab V.

3.3.3. Integrasi Jalur Energi dan Jalur Monitoring

Jalur energi dan jalur monitoring merupakan dua subsistem yang memiliki fungsi berbeda, namun saling terintegrasi melalui mekanisme pertukaran data (*data flow*) dan pengendalian (*control flow*). Integrasi kedua jalur ini memungkinkan sistem tidak hanya melakukan pemantauan kondisi kelistrikan secara *real-time*, tetapi juga mengambil keputusan pengendalian secara otomatis berdasarkan kondisi operasi sistem.

Pada arah pertama, yaitu aliran data (*data flow*), informasi bergerak dari jalur energi menuju jalur monitoring. Sensor INA219 melakukan pengukuran tegangan dan arus pada sisi panel surya (*PV Voltage* dan *PV Current*) serta baterai (*Battery Voltage* dan *Battery Current*), sedangkan sensor PZEM-004T mengukur parameter kelistrikan pada sisi keluaran inverter, meliputi tegangan AC, arus, daya, dan energi beban. Seluruh data hasil pengukuran diakuisisi oleh ESP32, diproses menggunakan *moving average filter* untuk mengurangi fluktuasi pengukuran, kemudian dikirimkan melalui jaringan LoRa menuju *gateway*. Selanjutnya, *gateway* meneruskan data ke broker MQTT Mosquitto sehingga dapat diakses oleh

Home Assistant untuk proses penyimpanan data, visualisasi dashboard, serta evaluasi kondisi sistem.

Pada arah kedua, yaitu aliran kontrol (*control flow*), Home Assistant secara kontinu mengevaluasi data yang diterima dari broker MQTT berdasarkan aturan otomasi (*automation rules*) yang telah ditetapkan. Apabila nilai *State of Charge* (SOC) baterai berada di bawah nilai ambang, sistem menghasilkan perintah pengendalian yang dipublikasikan melalui *topic* MQTT. Perintah tersebut diteruskan melalui *gateway* menuju ESP32 untuk mengendalikan modul relay sehingga beban non-kritis dapat diputus secara otomatis (*load shedding*). Ketika kondisi baterai kembali berada pada rentang operasi yang aman, sistem mengirimkan perintah untuk mengaktifkan kembali beban sesuai urutan prioritas yang telah ditentukan.

Mekanisme integrasi tersebut membentuk suatu sistem umpan balik tertutup (*closed-loop feedback system*), di mana kondisi pada jalur energi selalu dipantau oleh jalur monitoring, kemudian digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan pengendalian. Dengan pendekatan ini, proses monitoring dan pengendalian tidak lagi dilakukan secara terpisah, tetapi menjadi satu kesatuan sistem yang mampu mempertahankan kontinuitas suplai energi sekaligus meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi yang tersedia.

Hubungan antara jalur energi dan jalur monitoring dalam penelitian ini diilustrasikan pada Gambar 7, yang memperlihatkan keterkaitan antara proses akuisisi data, komunikasi LoRa, pertukaran data melalui MQTT, visualisasi pada Home Assistant, serta mekanisme *load shedding* sebagai respons terhadap perubahan kondisi baterai.

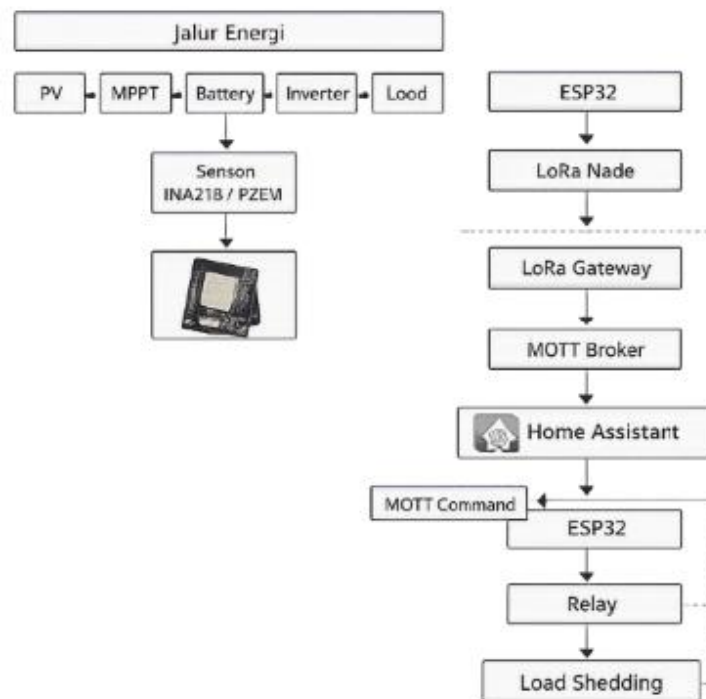


Figure 7 Jalur Energi

3.3.4. Justifikasi Arsitektur Lokal (Tanpa Cloud)

Pemilihan arsitektur lokal (*local-first edge computing*) pada penelitian ini didasarkan pada kebutuhan sistem monitoring dan pengendalian PLTS *off-grid* yang mampu beroperasi secara mandiri tanpa ketergantungan terhadap layanan komputasi awan (*cloud computing*). Seluruh proses akuisisi data, komunikasi, penyimpanan data, visualisasi, dan otomasi dijalankan secara lokal menggunakan ESP32, komunikasi LoRa, *gateway*, broker MQTT Mosquitto, dan Home Assistant.

Dari aspek teknis, arsitektur lokal dipilih karena memberikan beberapa keuntungan. Pertama, sistem tetap dapat beroperasi meskipun koneksi internet tidak tersedia atau kualitas jaringan komunikasi terbatas. Kondisi tersebut menjadi salah satu pertimbangan penting mengingat pemerataan infrastruktur telekomunikasi di Indonesia masih terus berkembang, terutama pada wilayah pedesaan dan daerah terpencil (Badan Pusat Statistik, 2025). Oleh karena itu, sistem yang tidak bergantung pada layanan *cloud* memiliki tingkat keandalan yang lebih tinggi untuk aplikasi PLTS *off-grid*.

Kedua, komunikasi antarperangkat berlangsung sepenuhnya di dalam jaringan lokal sehingga proses pertukaran data memiliki latensi yang rendah dan

lebih stabil. Karakteristik ini penting untuk mendukung mekanisme pengendalian *real-time*, seperti *load shedding*, yang memerlukan respons cepat terhadap perubahan kondisi baterai.

Ketiga, seluruh data hasil monitoring disimpan pada perangkat lokal sehingga keamanan dan privasi data lebih terjaga karena tidak bergantung pada penyimpanan di server eksternal. Selain itu, sistem tetap dapat beroperasi meskipun terjadi gangguan pada koneksi internet maupun layanan *cloud*.

Dari aspek operasional, penggunaan arsitektur lokal juga memberikan fleksibilitas dalam pengembangan sistem. Penambahan node sensor baru cukup dilakukan dengan mengintegrasikan perangkat ESP32 dan modul LoRa ke jaringan yang telah tersedia tanpa mengubah arsitektur dasar sistem. Integrasi dengan Home Assistant melalui protokol MQTT memungkinkan sistem dikembangkan secara bertahap sesuai kebutuhan pengguna tanpa memerlukan perubahan pada mekanisme komunikasi utama.

Berdasarkan pertimbangan tersebut, arsitektur *local-first edge computing* dinilai lebih sesuai untuk mendukung tujuan penelitian, yaitu membangun sistem monitoring dan pengendalian PLTS *off-grid* yang andal, mandiri, serta mampu beroperasi secara berkelanjutan tanpa ketergantungan terhadap infrastruktur *cloud*. Implementasi arsitektur ini juga sejalan dengan karakteristik sistem yang dikembangkan, di mana seluruh proses pengambilan keputusan dilakukan secara lokal sehingga respons pengendalian dapat berlangsung secara cepat dan konsisten.

3.4. Spesifikasi Perangkat Keras

Perangkat keras yang digunakan pada penelitian ini dipilih berdasarkan pertimbangan kompatibilitas antar-komponen, efisiensi energi, kemudahan integrasi, ketersediaan di pasaran lokal, serta kesesuaian dengan kebutuhan sistem monitoring dan pengendalian PLTS *off-grid*. Peran masing-masing komponen dalam jalur energi dan jalur monitoring telah dijelaskan pada Subbab 3.3.1 dan 3.3.2, sedangkan subbab ini berfokus pada spesifikasi teknis perangkat keras yang digunakan sebagai dasar implementasi sistem.

Panel surya monokristalin berkapasitas 100 Wp digunakan sebagai sumber energi utama karena memiliki efisiensi konversi yang relatif tinggi (>18%) serta mampu menghasilkan daya yang stabil pada kondisi iradiasi yang bervariasi. Energi

listrik yang dihasilkan panel surya dikendalikan menggunakan *charge controller* Epever Tracer 3210AN dengan metode *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Penggunaan MPPT bertujuan mengoptimalkan proses pengisian baterai dengan menjaga titik kerja panel surya berada pada kondisi daya maksimum sehingga efisiensi sistem dapat ditingkatkan (Tin Swe et al., 2024).

Sebagai media penyimpanan energi digunakan baterai LiFePO₄ 12 V 20 Ah yang dipilih karena memiliki umur siklus yang panjang, stabilitas termal yang baik, serta mampu beroperasi pada kedalaman pengosongan (*Depth of Discharge*) yang lebih tinggi dibandingkan baterai timbal-asam (Rahman & Alharbi, 2024)(Heydarzadeh et al., 2025). Karakteristik tersebut menjadikan baterai LiFePO₄ sesuai untuk aplikasi PLTS *off-grid* yang memerlukan siklus pengisian dan pengosongan secara berulang.

Pengukuran parameter kelistrikan dilakukan menggunakan dua jenis sensor. Sensor INA219 digunakan untuk mengukur tegangan, arus, dan daya pada sisi DC, yaitu panel surya dan baterai, sedangkan sensor PZEM-004T digunakan untuk mengukur parameter kelistrikan pada sisi AC keluaran inverter. Kombinasi kedua sensor tersebut memungkinkan sistem memperoleh informasi kondisi kelistrikan secara menyeluruh sebagai dasar proses monitoring dan pengendalian otomatis.

Seluruh proses akuisisi data sensor, pemrosesan data, serta pengendalian relay dilakukan menggunakan mikrokontroler ESP32-WROOM yang memiliki prosesor *dual-core* 240 MHz dengan konektivitas yang mendukung integrasi sistem IoT. Komunikasi antara node sensor dan *gateway* menggunakan modul LoRa SX1276 pada frekuensi 923 MHz yang dipilih karena mampu menyediakan komunikasi jarak jauh dengan konsumsi daya rendah tanpa memerlukan infrastruktur internet (Bonilla et al., 2023). Data hasil pengukuran diterima oleh *gateway* yang terdiri atas komputer (*Laptop/PC*) yang terhubung dengan modul LoRa SX1276 melalui konverter USB-Serial. Selanjutnya data diteruskan menuju broker MQTT Mosquitto dan diintegrasikan dengan Home Assistant untuk proses penyimpanan data, visualisasi dashboard, serta pengendalian sistem secara otomatis.

Spesifikasi teknis seluruh perangkat keras yang digunakan pada penelitian ini dirangkum pada Tabel 15.

Table 15 Spesifikasi Perangkat Keras

Komponen	Model/Spesifikasi	Fungsi Utama	Referensi
Panel surya	100 Wp, monokristalin, efisiensi >18%	Konversi energi surya ke DC	Datasheet SUN-100G
Charge controller	Epever Tracer 3210AN, MPPT, efisiensi $\geq 95\%$	Pengisian baterai optimal	(Tin Swe et al., 2024)
Baterai	LiFePO ₄ 12V 20Ah, >2.000 siklus, DoD 80%	Penyimpanan energi	(Rahman & Alharbi, 2024)
Sensor DC/AC	INA219 (DC) + PZEM-004T (AC), akurasi $\pm 1\%$	Akuisisi data kelistrikan	Datasheet INA219; PZEM-004T
Mikrokontroler	ESP32-WROOM, dual-core 240 MHz	Pemrosesan data & transmisi	Datasheet Espressif
Modul komunikasi	LoRa SX1276, 923 MHz, SF7	Transmisi data jarak jauh	(Bonilla et al., 2023)
Gateway	Laptop/PC + modul LoRa SX1276 via konverter USB-Serial	Penerimaan & konversi data	Datasheet SX1276

3.5. Spesifikasi Perangkat Lunak

Perangkat lunak yang digunakan pada penelitian ini dirancang untuk mendukung proses akuisisi data, komunikasi, penyimpanan data, visualisasi kondisi sistem, serta pengendalian otomatis pada sistem monitoring PLTS *off-grid*. Secara umum, perangkat lunak dibagi menjadi tiga lapisan utama, yaitu firmware mikrokontroler, platform integrasi IoT, dan perangkat bantu pengembangan.

Pada lapisan pertama, firmware dikembangkan menggunakan Arduino IDE versi 2.2.2 dengan bahasa pemrograman Arduino C++. Firmware dijalankan pada mikrokontroler ESP32-WROOM dan berfungsi melakukan pembacaan data dari sensor INA219 dan PZEM-004T, melakukan pemrosesan awal (*pre-processing*) berupa validasi, *filtering* menggunakan *moving average*, serta mengirimkan data hasil pengukuran melalui komunikasi LoRa menuju *gateway*. Pengembangan firmware memanfaatkan beberapa pustaka (*library*), yaitu Wire.h untuk komunikasi I²C, LoRa.h untuk komunikasi LoRa, dan PubSubClient.h untuk implementasi komunikasi MQTT.

Lapisan kedua merupakan platform integrasi IoT yang terdiri atas Home Assistant versi 2024.6 dan Eclipse Mosquitto MQTT Broker versi 2.0. Home Assistant dijalankan secara lokal (*local-first*) pada komputer (*Laptop/PC*) sebagai pusat monitoring dan pengendalian sistem. Platform ini dikonfigurasi untuk menampilkan parameter kelistrikan secara *real-time*, menyimpan data historis, serta menjalankan mekanisme otomasi berbasis aturan (*rule-based automation*) untuk proses *load shedding* berdasarkan nilai *State of Charge* (SOC) baterai. Komunikasi antara *gateway* dan Home Assistant dilakukan menggunakan protokol MQTT

melalui broker Eclipse Mosquitto yang berjalan pada perangkat yang sama sehingga seluruh proses pertukaran data berlangsung di dalam jaringan lokal tanpa memerlukan layanan *cloud*.

Lapisan ketiga terdiri atas perangkat bantu (*development tools*) yang digunakan selama proses implementasi dan pengujian sistem. MQTT Explorer dimanfaatkan untuk memantau struktur *topic*, memverifikasi proses *publish-subscribe*, serta memastikan data yang dikirim oleh ESP32 diterima dengan benar oleh broker MQTT. Sementara itu, Wireshark digunakan untuk menganalisis lalu lintas jaringan selama proses komunikasi sehingga parameter seperti waktu respons (*latency*) dan keandalan komunikasi dapat diamati selama tahap pengujian.

Spesifikasi perangkat lunak yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada Tabel 16.

Table 16 Spesifikasi Perangkat Lunak

Perangkat Lunak	Versi / Pustaka	Fungsi Utama	Dokumentasi Resmi
Arduino IDE	2.2.2, Wire.h, LoRa.h, PubSubClient.h	Pemrograman firmware ESP32	https://docs.arduino.cc
Home Assistant	2024.6	Monitoring & kontrol otomatis	https://www.home-assistant.io/docs
Mosquitto MQTT Broker	2.0	Protokol komunikasi data	https://mosquitto.org/documentation
MQTT Explorer	0.5.1	Debug dan monitoring MQTT	http://mqtt-explorer.com
Wireshark	4.2.0	Analisis latency & packet loss	https://www.wireshark.org/docs

3.6. Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian dilakukan untuk memverifikasi bahwa sistem mini PLTS *off-grid* yang dikembangkan telah berfungsi sesuai dengan rancangan, baik pada jalur energi maupun jalur monitoring dan kontrol. Pengujian meliputi evaluasi kinerja jalur energi, akurasi sensor, komunikasi LoRa, komunikasi MQTT, mekanisme otomasi Home Assistant, serta fungsi *fail-safe* pada sistem pengendalian beban. Seluruh pengujian dilakukan terhadap prototipe yang telah diintegrasikan sehingga mampu menggambarkan performa sistem secara menyeluruh.

Pengujian dilaksanakan secara bertahap dimulai dari verifikasi masing-masing komponen, dilanjutkan dengan pengujian integrasi antar subsistem, kemudian diakhiri dengan pengujian sistem secara keseluruhan (*end-to-end testing*).

3.6.1. Pengujian Kinerja Jalur Energi dan Akurasi Sensor

Pengujian jalur energi bertujuan untuk memverifikasi bahwa proses konversi, penyimpanan, dan distribusi energi pada sistem PLTS *off-grid* berlangsung sesuai dengan rancangan. Selain itu, pengujian ini juga dilakukan untuk mengevaluasi tingkat akurasi sensor INA219 dan PZEM-004T sebagai sumber data utama pada proses monitoring dan pengendalian otomatis.

1. Pengujian Kinerja Jalur Energi

Pengujian dilakukan dengan mengoperasikan sistem menggunakan panel surya 100 Wp, *charge controller* MPPT Epever Tracer 3210AN, baterai LiFePO₄ 12 V 20 Ah, inverter, dan beban uji. Selama proses pengujian, sistem dioperasikan pada kondisi normal sehingga seluruh komponen bekerja sesuai fungsi masing-masing.

Parameter yang diamati meliputi:

- a. tegangan panel surya (*PV Voltage*);
- b. arus panel surya (*PV Current*);
- c. daya keluaran panel surya;
- d. tegangan baterai (*Battery Voltage*);
- e. arus pengisian dan pengosongan baterai;
- f. tegangan keluaran inverter;
- g. daya beban (*Load Power*); dan
- h. estimasi *State of Charge* (SOC) baterai.

Seluruh parameter direkam secara periodik oleh sistem monitoring melalui Home Assistant dan dibandingkan dengan hasil pengukuran menggunakan alat ukur referensi untuk memastikan kesesuaian nilai pengukuran.

2. Pengujian Akurasi Sensor

Pengujian akurasi dilakukan terhadap sensor INA219 dan PZEM-004T dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap alat ukur referensi Fluke 87V yang memiliki akurasi lebih tinggi.

Sebelum proses pengambilan data, sensor dikalibrasi melalui penyesuaian faktor koreksi (*offset* dan *gain*) berdasarkan hasil pengukuran terhadap alat ukur referensi. Nilai koreksi kemudian

diterapkan pada firmware ESP32 sehingga hasil pembacaan sensor telah dikompensasi sebelum proses akuisisi data dilakukan.

Setelah proses kalibrasi selesai, dilakukan pengambilan data sebanyak 100 sampel pada kondisi operasi yang sama. Setiap sampel terdiri atas pasangan nilai hasil pembacaan sensor dan nilai referensi dari Fluke 87V. Selanjutnya seluruh data dianalisis menggunakan parameter Mean Absolute Error (MAE) dan Root Mean Square Error (RMSE) untuk mengevaluasi tingkat akurasi sensor.

Nilai MAE dihitung menggunakan Persamaan

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - y_i^{\wedge}|$$

dengan:

y_i = nilai referensi hasil pengukuran Fluke 87V;

$y_i^{\wedge}$ = nilai hasil pembacaan sensor;

n = jumlah sampel pengujian.

MAE digunakan untuk menunjukkan rata-rata besarnya kesalahan absolut antara hasil pembacaan sensor dan nilai referensi sehingga memberikan gambaran tingkat akurasi sensor secara umum.

Nilai RMSE dihitung menggunakan Persamaan

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_i^{\wedge})^2}$$

RMSE digunakan untuk mengevaluasi besarnya penyimpangan hasil pengukuran dengan memberikan bobot yang lebih besar terhadap kesalahan pengukuran yang ekstrem (*outlier*). Penggunaan MAE dan RMSE secara bersamaan memberikan evaluasi akurasi yang lebih komprehensif dibandingkan hanya menggunakan satu parameter pengukuran.

Table 17 Parameter Pengujian Jalur Energi

Parameter	Alat Ukur	Metode Validasi
Tegangan panel surya	INA219	Dibandingkan dengan Fluke 87V
Arus panel surya	INA219	Dibandingkan dengan Fluke 87V
Tegangan baterai	INA219	Dibandingkan dengan Fluke 87V
Arus baterai	INA219	Dibandingkan dengan Fluke 87V
Tegangan keluaran inverter	PZEM-004T	Dibandingkan dengan Fluke 87V

Arus keluaran inverter	PZEM-004T	Dibandingkan dengan Fluke 87V
Daya beban	PZEM-004T	Dibandingkan dengan hasil perhitungan referensi
MAE	Perhitungan statistik	Evaluasi rata-rata kesalahan absolut
RMSE	Perhitungan statistik	Evaluasi akar kuadrat rata-rata kesalahan

Table 18 Peralatan Pengujian dan Kalibrasi

Peralatan	Spesifikasi	Fungsi
Fluke 87V	Akurasi $\pm 0,05\%$	Alat ukur referensi tegangan dan arus
INA219	Akurasi $\pm 1\%$	Sensor pengukuran sisi DC
PZEM-004T	Akurasi $\pm 1\%$ (tegangan), $\pm 2\%$ (arus dan daya)	Sensor pengukuran sisi AC
Home Assistant	Versi 2024.6	Perekaman data hasil pengujian
ESP32-WROOM	Dual-core 240 MHz	Akuisisi dan pengiriman data sensor

Prosedur Kalibrasi Sensor

Sebelum pengujian akurasi dilaksanakan, sensor INA219 dan PZEM-004T dikalibrasi menggunakan Fluke 87V sebagai alat ukur referensi. Kalibrasi dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap nilai referensi pada beberapa kondisi operasi sehingga diperoleh faktor koreksi berupa *offset* dan *gain*.

Hubungan antara nilai hasil pembacaan sensor dan nilai setelah koreksi dinyatakan menggunakan Persamaan

$$V_{koreksi} = (Gain \times V_{sensor}) + Offset$$

dengan:

V_{sensor} = nilai hasil pembacaan sensor;

Gain = faktor pengali hasil kalibrasi;

Offset = faktor koreksi nilai awal.

Nilai *gain* dan *offset* yang diperoleh dari proses kalibrasi kemudian diterapkan pada firmware ESP32 sebelum proses pengambilan data sebanyak 100 sampel dilakukan. Dengan prosedur tersebut, hasil pengujian akurasi merepresentasikan performa sensor setelah proses kalibrasi sehingga lebih mendekati kondisi implementasi sistem yang sebenarnya.

3.6.2. Pengujian Performa Komunikasi LoRa

Pengujian performa komunikasi LoRa dilakukan untuk mengevaluasi keandalan proses transmisi data antara node sensor berbasis ESP32 dan *gateway*. Pengujian ini bertujuan memastikan bahwa data hasil pengukuran dari sensor dapat diterima oleh *gateway* secara konsisten sehingga proses monitoring dan pengendalian dapat berlangsung dengan baik.

Pengujian dilakukan dengan mengirimkan paket data sensor secara periodik dari node ESP32 menuju *gateway* menggunakan modul LoRa SX1276 pada frekuensi 923 MHz. Setiap paket data berisi informasi tegangan, arus, daya, energi, serta nilai *State of Charge* (SOC) baterai. Selama proses pengujian, data yang diterima oleh *gateway* diteruskan ke broker MQTT dan direkam pada Home Assistant untuk keperluan analisis.

Pengujian dilakukan pada beberapa variasi jarak antara node sensor dan *gateway* sesuai kondisi lingkungan pengujian. Pada setiap titik pengujian dilakukan pengiriman paket data secara berulang sehingga dapat diperoleh karakteristik komunikasi pada berbagai kondisi propagasi.

Parameter yang diamati meliputi:

1. kekuatan sinyal penerimaan (*Received Signal Strength Indicator* / RSSI);
2. *Signal-to-Noise Ratio* (SNR);
3. *Packet Loss Rate* (PLR);
4. *latency end-to-end* pengiriman data; dan
5. keberhasilan penerimaan paket data (*packet delivery*).

Nilai RSSI dan SNR diperoleh dari hasil pembacaan modul LoRa pada sisi *gateway*, sedangkan *Packet Loss Rate* dihitung berdasarkan perbandingan antara jumlah paket yang dikirim oleh node sensor dan jumlah paket yang berhasil diterima oleh *gateway*. *Latency end-to-end* dihitung berdasarkan selisih waktu antara saat paket dikirim oleh node ESP32 hingga data berhasil diterima dan ditampilkan pada Home Assistant melalui broker MQTT. Persentase *Packet Loss Rate* dihitung menggunakan Persamaan

$$PLR(\%) = \frac{N_{kirim} - N_{terima}}{N_{kirim}} \times 100\%$$

dengan:

Nkirim = jumlah paket yang dikirim;

Nterima = jumlah paket yang diterima oleh *gateway*.

Semakin kecil nilai PLR menunjukkan bahwa komunikasi LoRa memiliki tingkat keandalan yang semakin baik.

Table 19 Parameter Pengujian Komunikasi LoRa

Parameter	Metode Pengukuran	Tujuan Pengujian
RSSI	Pembacaan modul LoRa pada gateway	Mengevaluasi kekuatan sinyal
SNR	Pembacaan modul LoRa pada gateway	Mengevaluasi kualitas sinyal
Packet Loss Rate (PLR)	Perbandingan jumlah paket terkirim dan diterima	Mengevaluasi keandalan komunikasi
Latency end-to-end	Selisih waktu pengiriman dan penerimaan paket	Mengevaluasi waktu respons sistem
Keberhasilan penerimaan paket	Perhitungan jumlah paket yang diterima	Memverifikasi kontinuitas komunikasi

Selama pengujian, seluruh data komunikasi direkam melalui broker MQTT dan Home Assistant sehingga nilai RSSI, SNR, PLR, serta *latency* dapat dianalisis pada tahap evaluasi hasil pengujian di Bab IV.

3.6.3. Pengujian Otomasi Home Assistant

Pengujian otomasi Home Assistant dilakukan untuk memverifikasi bahwa mekanisme pengendalian beban (*load shedding*) dapat bekerja secara otomatis berdasarkan nilai *State of Charge* (SOC) baterai. Pengujian ini bertujuan memastikan bahwa aturan (*automation rules*) yang telah dikonfigurasi pada Home Assistant mampu memberikan respons sesuai kondisi operasi sistem.

Pada penelitian ini, Home Assistant dikonfigurasi untuk memutus beban non-kritis apabila nilai SOC baterai berada di bawah 20%. Sebaliknya, apabila kapasitas baterai kembali berada di atas nilai ambang yang ditentukan, sistem secara otomatis mengaktifkan kembali beban sesuai urutan prioritas yang telah ditetapkan.

Pengujian dilakukan dengan mensimulasikan penurunan kapasitas baterai melalui pemberian beban secara bertahap hingga nilai SOC melewati batas ambang otomasi. Setiap perubahan kondisi direkam melalui *event log* Home Assistant sehingga waktu respons sistem dapat dianalisis.

Parameter yang diamati meliputi:

1. keberhasilan eksekusi otomasi (*automation success*);

2. waktu respons sistem sejak nilai SOC melewati ambang hingga relay berubah status;
3. perubahan status relay pada setiap kelompok beban; dan
4. kesesuaian kondisi beban terhadap aturan otomasi yang telah ditetapkan.

Setiap skenario pengujian dilakukan secara berulang untuk memastikan konsistensi mekanisme otomasi pada berbagai kondisi operasi sistem.

Table 20 Parameter Pengujian Otomasi Home Assistant

Parameter	Metode Validasi
Keberhasilan otomasi	Persentase skenario berhasil terhadap jumlah skenario pengujian
Waktu respons otomasi	Selisih waktu antara perubahan nilai SOC dan perubahan status relay
Status relay	Log perubahan status pada Home Assistant
Konsistensi otomasi	Perbandingan hasil pengujian pada setiap skenario

3.6.4. Verifikasi Mekanisme *Fail-Safe*

Pengujian *fail-safe* dilakukan untuk memastikan sistem tetap berada pada kondisi operasi yang aman apabila terjadi gangguan komunikasi maupun kondisi operasi yang tidak normal. Pengujian ini difokuskan pada mekanisme pengendalian beban yang telah diimplementasikan pada sistem.

Skenario pengujian meliputi:

1. Gangguan komunikasi LoRa, yaitu dengan menghentikan sementara proses pengiriman data dari node ESP32 menuju *gateway*. Pengujian dilakukan untuk mengamati apakah sistem tetap mempertahankan kondisi terakhir (*last known state*) hingga komunikasi kembali normal.
2. Kondisi baterai kritis, yaitu ketika nilai SOC berada di bawah batas ambang yang telah ditentukan. Pada kondisi tersebut Home Assistant harus mengeksekusi mekanisme *load shedding* dengan memutus beban non-kritis sehingga suplai energi tetap tersedia untuk beban prioritas.

Keberhasilan mekanisme *fail-safe* dievaluasi berdasarkan kemampuan sistem mempertahankan kondisi operasi yang aman selama gangguan berlangsung.

3.6.5. Pengujian Protokol Komunikasi MQTT

Pengujian komunikasi MQTT dilakukan untuk memastikan proses pertukaran data antara *gateway* dan Home Assistant berlangsung secara andal melalui broker Eclipse Mosquitto.

Pada pengujian ini, ESP32 mengirimkan data hasil pengukuran menuju *gateway* menggunakan komunikasi LoRa. Selanjutnya *gateway* meneruskan data ke broker MQTT yang berjalan secara lokal. Home Assistant melakukan proses *subscribe* terhadap *topic* MQTT sehingga setiap perubahan data dapat ditampilkan secara *real-time* pada dashboard.

Parameter yang diamati meliputi:

1. keberhasilan proses *publish*;
2. keberhasilan proses *subscribe*;
3. waktu penerimaan data pada Home Assistant; dan
4. kesesuaian isi data yang diterima dengan data yang dikirimkan oleh node sensor.

Verifikasi komunikasi dilakukan menggunakan MQTT Explorer untuk memastikan struktur *topic* MQTT, format *payload*, serta proses *publish-subscribe* berjalan sesuai konfigurasi. Selain itu, *event log* Home Assistant digunakan untuk memastikan seluruh data yang diterima broker MQTT berhasil diproses dan ditampilkan pada dashboard monitoring.

Table 21 Parameter Pengujian MQTT

Parameter	Metode Validasi
Publish data MQTT	Monitoring menggunakan MQTT Explorer
Subscribe data MQTT	Monitoring menggunakan MQTT Explorer
Waktu penerimaan data	Timestamp Home Assistant
Integritas data	Perbandingan payload yang dikirim dan diterima

3.7. Analisis Data

Data hasil pengujian dianalisis untuk mengevaluasi kinerja sistem monitoring dan pengendalian PLTS *off-grid* yang telah dikembangkan. Analisis dilakukan terhadap tiga aspek utama, yaitu kinerja jalur energi, keandalan komunikasi LoRa, serta performa mekanisme monitoring dan otomasi Home Assistant.

Visualisasi data dilakukan menggunakan dashboard Home Assistant untuk menampilkan kondisi sistem secara *real-time* maupun historis, meliputi tegangan panel surya, tegangan baterai, arus, daya, energi, serta nilai *State of Charge* (SOC). Dashboard juga digunakan untuk memverifikasi perubahan status relay selama proses *load shedding*.

Selanjutnya, data hasil pengujian diekspor dan dianalisis menggunakan Python dengan pustaka Pandas dan Matplotlib. Analisis meliputi perhitungan statistik deskriptif, visualisasi *time-series*, serta evaluasi parameter kinerja sistem.

Metrik Kinerja Sistem

Efisiensi sistem dihitung menggunakan Persamaan

$$\eta_{sistem}(\%) = \frac{\sum EnergiBeban}{\sum EnergiPanel} \times 100\%$$

Perhitungan tersebut digunakan untuk mengetahui seberapa besar energi yang dihasilkan panel surya dapat dimanfaatkan oleh beban selama sistem beroperasi.

Keandalan komunikasi LoRa dihitung menggunakan Persamaan

$$Reliabilitas(\%) = (1 - \frac{PaketHilang}{PaketDikirim}) \times 100\%$$

Nilai reliabilitas digunakan untuk mengevaluasi kemampuan sistem komunikasi dalam mempertahankan keberhasilan pengiriman data selama proses monitoring.

Selain itu, hasil pengujian akurasi sensor dianalisis menggunakan parameter MAE dan RMSE sebagaimana dijelaskan pada Subbab 3.6.1, sedangkan hasil pengujian komunikasi LoRa dianalisis berdasarkan nilai RSSI, SNR, *Packet Loss Rate* (PLR), dan *latency*. Untuk mekanisme otomasi Home Assistant, analisis dilakukan berdasarkan tingkat keberhasilan eksekusi *load shedding* serta waktu respons sistem terhadap perubahan nilai SOC baterai.

Penyajian Data

Hasil pengujian disajikan dalam bentuk tabel, grafik *time-series*, serta pembahasan kuantitatif terhadap setiap parameter pengujian. Penyajian tersebut bertujuan memudahkan evaluasi performa sistem secara menyeluruh dan menjadi dasar dalam pembahasan hasil penelitian pada Bab IV.

BAB IV

PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI SISTEM

Bab ini menjelaskan hasil implementasi sistem monitoring dan kontrol energi pada mini PLTS *off-grid* yang dibangun sebagai prototipe penelitian di ruang *Project Based Learning* (PBL) Gedung Techno, Politeknik Negeri Batam. Implementasi dilakukan berdasarkan rancangan sistem yang telah dijelaskan pada Bab III, mulai dari perakitan perangkat keras, konfigurasi komunikasi, pengembangan perangkat lunak, hingga integrasi seluruh subsistem menjadi satu kesatuan yang mampu melakukan monitoring dan pengendalian beban secara otomatis.

4.1. Gambaran Umum Sistem

Sistem yang dikembangkan merupakan mini PLTS *off-grid* berkapasitas 100 Wp yang mengintegrasikan jalur energi, jalur monitoring, dan jalur kontrol dalam satu arsitektur berbasis *Internet of Things* (IoT). Seluruh komunikasi data dilakukan secara lokal menggunakan jaringan LoRa dan protokol MQTT sehingga sistem tetap dapat beroperasi tanpa ketergantungan pada koneksi internet. Arsitektur implementasi sistem secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 8.

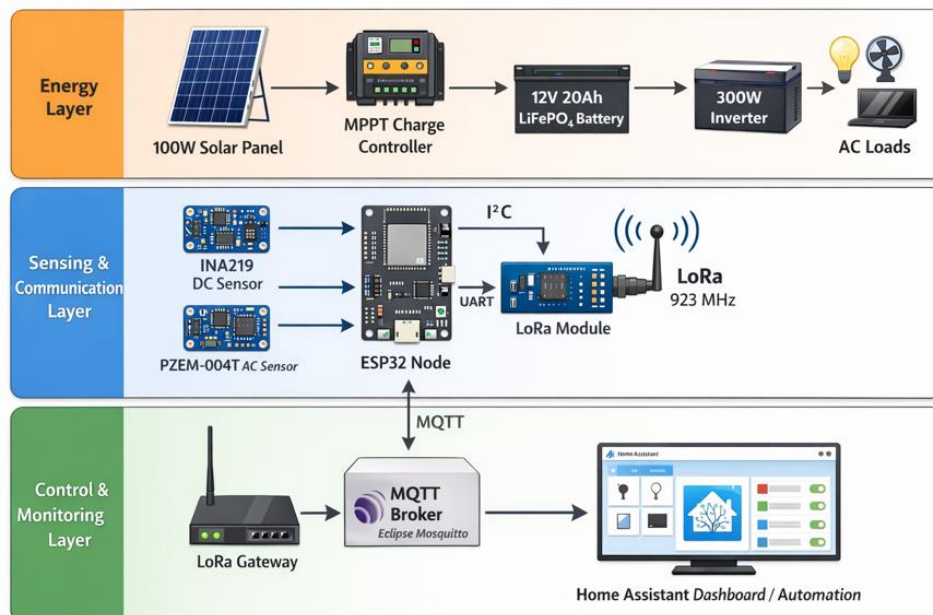


Figure 8 Diagram Arsitektur Sistem

Pada implementasinya, sistem dibagi menjadi tiga lapisan utama. Lapisan pertama merupakan jalur energi, yang bertugas menghasilkan, menyimpan, dan mendistribusikan energi listrik dari panel surya menuju beban. Lapisan kedua merupakan jalur monitoring dan komunikasi, yang melakukan akuisisi data dari sensor, pemrosesan data pada ESP32, serta pengiriman data melalui komunikasi LoRa menuju *gateway*. Lapisan ketiga merupakan jalur kontrol dan visualisasi, yang terdiri atas broker MQTT Eclipse Mosquitto dan Home Assistant sebagai pusat monitoring, penyimpanan data historis, visualisasi dashboard, serta eksekusi mekanisme *load shedding* secara otomatis berdasarkan kondisi *State of Charge* (SOC) baterai.

Implementasi sistem dilakukan secara bertahap menggunakan pendekatan *bottom-up*. Tahap pertama meliputi pengujian masing-masing komponen secara individual, seperti sensor INA219, sensor PZEM-004T, ESP32, modul LoRa, dan perangkat jalur energi. Setelah seluruh komponen berfungsi sesuai spesifikasi, dilakukan integrasi komunikasi antara node sensor, *gateway*, broker MQTT, dan Home Assistant. Tahap terakhir adalah pengujian sistem secara menyeluruh (*end-to-end testing*) untuk memastikan seluruh proses mulai dari akuisisi data, transmisi komunikasi, visualisasi dashboard, hingga pengendalian beban otomatis dapat berjalan sesuai rancangan.

Seluruh implementasi dilakukan pada lingkungan laboratorium yang terkendali. Modul panel surya dipasang pada area terbuka di depan Gedung Techno Politeknik Negeri Batam dengan orientasi menghadap utara dan sudut kemiringan sekitar 10°, menyesuaikan kondisi geografis Kota Batam yang berada di sekitar garis khatulistiwa. Konfigurasi tersebut dipilih agar panel memperoleh paparan radiasi matahari yang relatif optimal sepanjang tahun sehingga pengujian sistem dapat dilakukan pada kondisi operasi yang representatif.

4.2. Perancangan dan Implementasi Arsitektur Sistem

Arsitektur sistem yang diimplementasikan pada penelitian ini mengintegrasikan jalur energi, jalur monitoring, dan jalur kontrol ke dalam satu sistem monitoring PLTS *off-grid* berbasis *Internet of Things* (IoT). Implementasi dilakukan berdasarkan rancangan yang telah dijelaskan pada Bab III dan direalisasikan dalam bentuk prototipe yang mampu melakukan akuisisi data,

komunikasi nirkabel, visualisasi kondisi sistem, serta pengendalian beban secara otomatis.

Secara umum, sistem terdiri atas dua jalur utama yang saling berinteraksi, yaitu jalur energi (energy pathway) dan jalur monitoring serta kontrol (monitoring and control pathway). Jalur energi bertugas menghasilkan, menyimpan, dan mendistribusikan energi listrik kepada beban, sedangkan jalur monitoring bertugas melakukan akuisisi data, pengiriman informasi kondisi sistem, serta mengeksekusi perintah pengendalian berdasarkan kondisi operasi yang terdeteksi.

Implementasi arsitektur sistem secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 9.

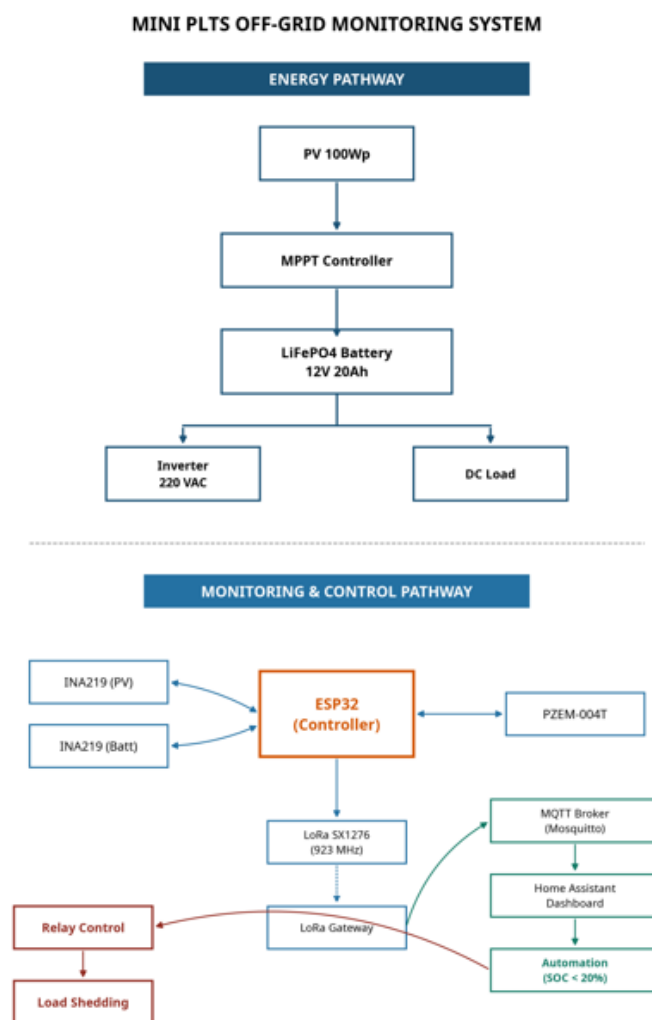


Figure 9 Implementasi Arsitektur Sistem Mini PLTS Off-grid

4.2.1. Implementasi Arsitektur Perangkat Keras

Implementasi perangkat keras dilakukan dengan mengintegrasikan seluruh komponen jalur energi dan jalur monitoring ke dalam satu prototipe mini PLTS *off-grid*. Panel surya 100 Wp berfungsi sebagai sumber energi utama yang dihubungkan ke *charge controller* MPPT Epever Tracer 3210AN untuk mengoptimalkan proses pengisian baterai LiFePO₄ 12 V 20 Ah. Energi yang tersimpan pada baterai selanjutnya digunakan untuk menyuplai beban DC maupun inverter *pure sine wave* 300 W yang menghasilkan tegangan AC 220 V.

Pada sisi monitoring, sensor INA219 dipasang pada jalur panel surya dan baterai untuk mengukur tegangan, arus, dan daya sisi DC, sedangkan sensor PZEM-004T dipasang pada keluaran inverter untuk mengukur parameter kelistrikan sisi AC. Seluruh data hasil pengukuran diproses oleh mikrokontroler ESP32-WROOM sebelum dikirimkan menuju *gateway* menggunakan modul LoRa SX1276.

Komunikasi antarperangkat menggunakan tiga antarmuka utama, yaitu I²C untuk komunikasi ESP32 dengan sensor INA219, UART untuk komunikasi ESP32 dengan sensor PZEM-004T, dan SPI untuk komunikasi ESP32 dengan modul LoRa SX1276. Seluruh perangkat monitoring memperoleh catu daya dari baterai 12 V yang diturunkan menjadi 5 V menggunakan *DC-DC converter*.

Implementasi perangkat keras yang telah direalisasikan ditunjukkan pada Gambar 10.

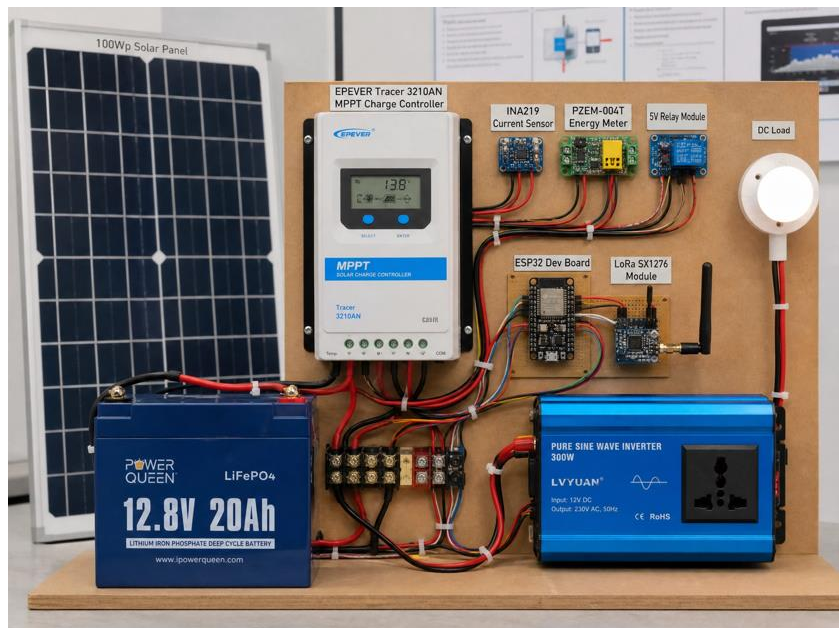


Figure 10 Implementasi Perangkat Keras Sistem

4.2.2. Implementasi Arsitektur Perangkat Lunak

Perangkat lunak sistem dibangun menggunakan arsitektur komunikasi berbasis *publish-subscribe* dengan protokol MQTT. Pada implementasinya, ESP32 berfungsi sebagai *publisher* yang membaca data dari sensor INA219 dan PZEM-004T, kemudian mengirimkan data tersebut melalui komunikasi LoRa menuju *gateway*.

Di sisi *gateway*, data hasil komunikasi LoRa diteruskan ke broker MQTT Eclipse Mosquitto yang berjalan secara lokal pada laptop/PC. Home Assistant dikonfigurasi sebagai *subscriber* untuk menerima setiap data yang dipublikasikan oleh broker MQTT, menyimpan data historis, menampilkan informasi pada dashboard, serta menjalankan otomasi *load shedding* berdasarkan nilai *State of Charge* (SOC) baterai.

Seluruh komunikasi dilakukan pada jaringan lokal (*local network*) sehingga sistem tetap dapat beroperasi tanpa ketergantungan terhadap layanan *cloud* maupun koneksi internet.

Implementasi komunikasi perangkat lunak ditunjukkan pada Gambar 11.



Figure 11 Implementasi Komunikasi MQTT dan Home Assistant

4.2.3. Implementasi Alur Data Sistem

Implementasi alur data dimulai dari proses akuisisi data pada jalur energi. Sensor INA219 membaca parameter tegangan dan arus panel surya serta baterai, sedangkan sensor PZEM-004T mengukur tegangan, arus, daya, dan energi pada sisi

keluaran inverter. Seluruh data tersebut diproses oleh ESP32 melalui proses pembacaan sensor dan konversi satuan sebelum dikirimkan menggunakan komunikasi LoRa.

Pada sisi *gateway*, paket data yang diterima diteruskan menuju broker MQTT menggunakan format *JavaScript Object Notation* (JSON). Selanjutnya Home Assistant menerima data melalui mekanisme *subscribe*, memperbarui tampilan dashboard secara *real-time*, menyimpan data historis, dan mengevaluasi kondisi sistem terhadap aturan otomasi yang telah dikonfigurasi.

Apabila nilai SOC baterai berada di bawah batas ambang yang ditentukan, Home Assistant secara otomatis mengirimkan perintah pengendalian melalui MQTT. Perintah tersebut diterima oleh ESP32 untuk mengaktifkan relay sehingga beban non-kritis diputus sesuai mekanisme *load shedding* yang telah dirancang.

Alur komunikasi dan pengendalian tersebut menghasilkan mekanisme *closed-loop monitoring and control*, di mana informasi kondisi energi digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan secara otomatis tanpa memerlukan intervensi operator.

Implementasi alur data sistem ditunjukkan pada Gambar 12.

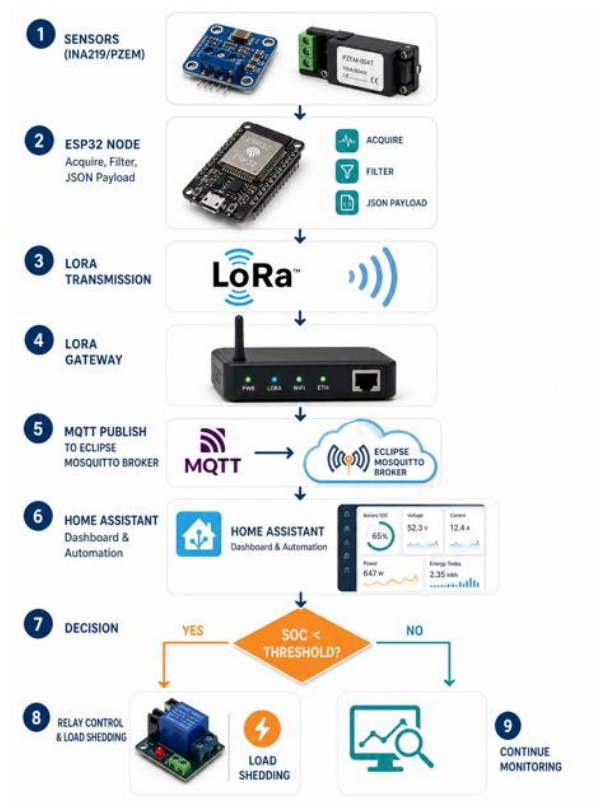


Figure 12 Diagram Alur Data Sistem

4.3. Implementasi Perangkat Keras

Implementasi perangkat keras dilakukan untuk merealisasikan rancangan sistem yang telah dijelaskan pada Bab III menjadi sebuah prototipe mini PLTS *off-grid* yang berfungsi sebagai media pengujian. Prototipe dibangun dengan mengintegrasikan jalur energi (*energy pathway*), jalur monitoring (*monitoring pathway*), serta jalur kontrol (*control pathway*) dalam satu sistem yang mampu melakukan pembangkitan energi, akuisisi data, komunikasi nirkabel, visualisasi kondisi sistem, dan pengendalian beban secara otomatis.

Seluruh komponen dipasang pada panel uji (*testbed*) sehingga mudah diakses selama proses pengujian dan pemeliharaan. Implementasi dilakukan secara bertahap, dimulai dari perakitan sistem energi, pemasangan sensor, integrasi modul komunikasi LoRa, hingga konfigurasi perangkat kontrol berbasis ESP32 dan Home Assistant. Pendekatan ini memudahkan proses verifikasi setiap subsistem sebelum dilakukan integrasi secara keseluruhan.

4.3.1. Implementasi Sistem Energi

Implementasi sistem energi dilakukan dengan menghubungkan panel surya monokristalin 100 Wp, *charge controller* MPPT Epever Tracer 3210AN, baterai LiFePO₄ 12 V 20 Ah, dan inverter *pure sine wave* 300 W menjadi satu jalur distribusi energi. Jalur ini berfungsi menghasilkan, menyimpan, dan menyalurkan energi listrik untuk menyuplai beban AC maupun perangkat monitoring selama proses pengujian.

Panel surya dipasang pada area terbuka di depan Gedung Techno Politeknik Negeri Batam dengan orientasi menghadap utara dan sudut kemiringan sekitar 10° agar memperoleh paparan radiasi matahari yang optimal sesuai kondisi geografis Kota Batam. Energi listrik yang dihasilkan panel dialirkan menuju *charge controller* MPPT untuk mengoptimalkan proses pengisian baterai LiFePO₄ sekaligus memberikan proteksi terhadap kondisi *overcharge*, *over-discharge*, dan *reverse polarity*. Energi yang tersimpan pada baterai kemudian digunakan sebagai sumber daya inverter *pure sine wave* yang menghasilkan tegangan keluaran 220 V AC untuk menyuplai beban pengujian.

Implementasi sistem energi yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 13, sedangkan spesifikasi aktual setiap komponen disajikan pada Tabel 22

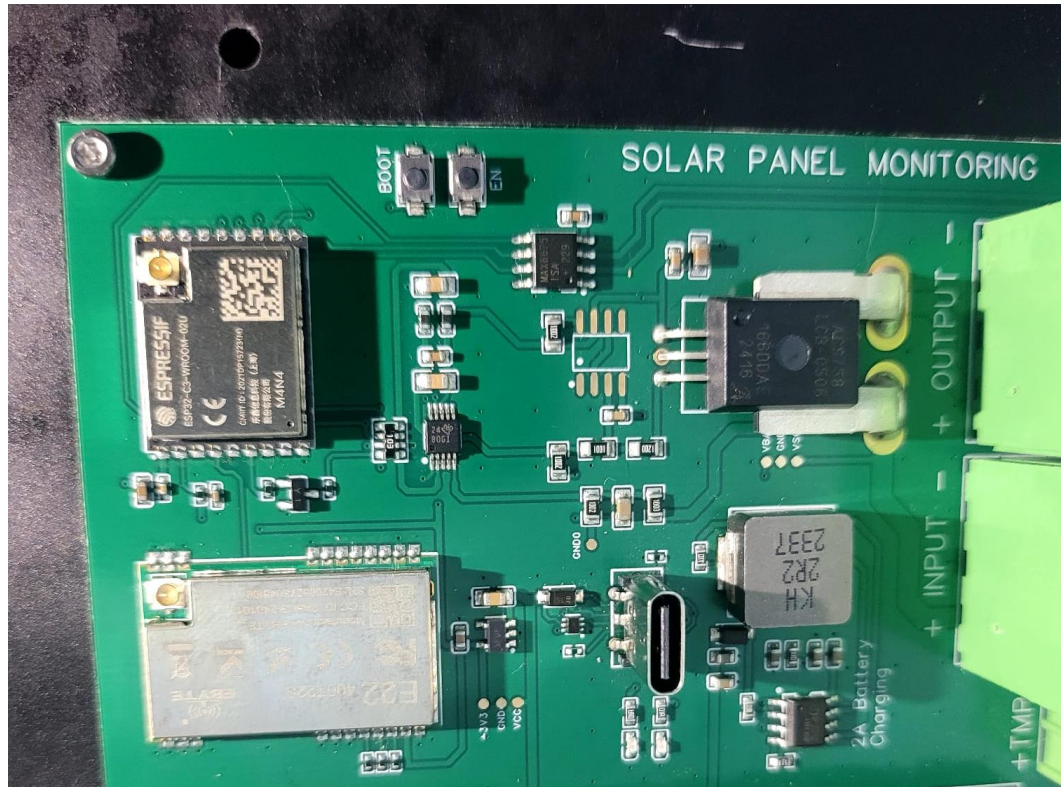


Figure 13 Implementasi Sistem Energi

Table 22 Spesifikasi Aktual Komponen Sistem Energi

Komponen	Model	Parameter Kunci	Nilai Terukur/Aktual
Panel surya	Monokristalin 100 Wp	Voc, Vmpp	21,3V; 17,6V
Charge controller	Epever Tracer 3210AN	Efisiensi MPPT	≥97%
Baterai	LiFePO ₄ 12V 20Ah	Tegangan nominal	12,8V
Inverter	Pure sine wave 300W	Tegangan output AC	220V ±5%

Hasil implementasi menunjukkan bahwa seluruh komponen sistem energi dapat terintegrasi dengan baik sesuai rancangan. Pengujian awal memperlihatkan bahwa panel surya mampu mengisi baterai melalui *charge controller* MPPT secara normal, sedangkan inverter menghasilkan tegangan AC yang stabil untuk menyuplai beban dan perangkat monitoring. Kondisi ini menjadi dasar untuk

implementasi sistem monitoring dan komunikasi yang dibahas pada subbab berikutnya.

4.3.2. Implementasi Sistem Monitoring

Implementasi sistem monitoring dilakukan untuk memperoleh data kondisi kelistrikan mini PLTS *off-grid* secara *real-time*. Sistem monitoring terdiri atas dua sensor utama, yaitu sensor INA219 untuk pengukuran parameter DC dan sensor PZEM-004T untuk pengukuran parameter AC. Seluruh sensor diintegrasikan dengan mikrokontroler ESP32-WROOM yang berfungsi sebagai pusat akuisisi data sebelum data dikirimkan melalui jaringan LoRa menuju *gateway*.

Pada sisi DC, dua buah sensor INA219 dipasang pada jalur panel surya dan jalur baterai menggunakan antarmuka I²C dengan alamat yang berbeda, yaitu 0x40 untuk sensor panel surya dan 0x41 untuk sensor baterai. Konfigurasi ini memungkinkan sistem melakukan pengukuran tegangan, arus, dan daya pada kedua titik secara bersamaan tanpa terjadi konflik alamat perangkat (*address conflict*). Data hasil pembacaan digunakan untuk menghitung daya keluaran panel surya, kondisi pengisian baterai, serta estimasi *State of Charge* (SOC) yang menjadi parameter utama dalam mekanisme pengendalian beban.

Pada sisi AC, sensor PZEM-004T dipasang pada keluaran inverter menggunakan *current transformer* (CT) non-invasif. Sensor ini digunakan untuk mengukur tegangan, arus, daya aktif, faktor daya, frekuensi, dan energi kumulatif beban. Penggunaan sensor AC memungkinkan sistem memantau konsumsi energi beban secara langsung sehingga dapat dibandingkan dengan energi yang dihasilkan oleh panel surya dan energi yang tersimpan pada baterai.

Seluruh data sensor dibaca oleh ESP32 setiap 5 detik, kemudian dilakukan proses penyaringan menggunakan *moving average filter* untuk mengurangi fluktuasi akibat *noise* pengukuran. Setelah proses penyaringan, data dikonversi ke satuan teknik (*engineering units*) dan dikemas menjadi *payload* sebelum dikirim melalui komunikasi LoRa menuju *gateway*.

Implementasi perangkat monitoring yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 14, sedangkan konfigurasi pemasangan sensor dirangkum pada Tabel 23.

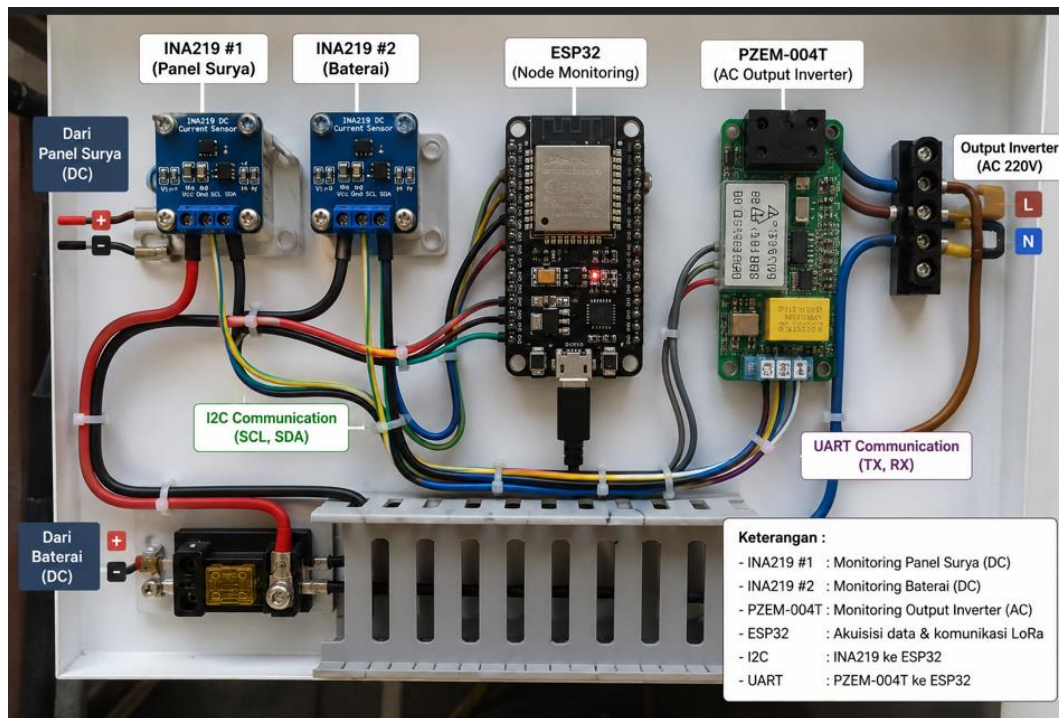


Figure 14 Implementasi Sistem Monitoring

Table 23 Implementasi Sensor Monitoring

Komponen	Lokasi Pemasangan	Parameter yang Diukur	Antarmuka
INA219 #1	Jalur panel surya	Tegangan, arus, daya panel	I ² C (0x40)
INA219 #2	Jalur baterai	Tegangan, arus, daya baterai	I ² C (0x41)
PZEM-004T	Keluaran inverter	Tegangan AC, arus, daya, energi, faktor daya	UART
ESP32-WROOM	Node monitoring	Akuisisi dan pemrosesan data	I ² C, UART, SPI

4.3.3. Implementasi Sistem Komunikasi

Implementasi sistem komunikasi bertujuan untuk menghubungkan node sensor pada mini PLTS *off-grid* dengan platform monitoring Home Assistant melalui jaringan komunikasi lokal tanpa ketergantungan pada koneksi internet. Arsitektur komunikasi terdiri atas empat komponen utama, yaitu node sensor berbasis ESP32, modul komunikasi LoRa SX1276, *gateway*, serta *broker* MQTT Eclipse Mosquitto yang dijalankan secara lokal pada laptop/PC.

ESP32 berfungsi sebagai pusat akuisisi data yang membaca informasi dari sensor INA219 dan PZEM-004T setiap 5 detik. Setelah dilakukan proses penyaringan (*moving average filter*) dan konversi ke satuan teknik, data dikemas dalam format *payload* dan dikirim melalui modul LoRa SX1276 menggunakan antarmuka SPI. Parameter komunikasi LoRa yang digunakan selama implementasi ditunjukkan pada Tabel 24.

Table 24 Konfigurasi Parameter LoRa yang Diimplementasikan

Parameter	Nilai	Justifikasi
Frekuensi	923 MHz	Sesuai pita ISM Indonesia
Spreading Factor	SF7	Kompromi antara jangkauan dan data rate
Bandwidth	125 kHz	Sensitivitas penerimaan yang baik
Coding Rate	04-May	Menjaga keandalan komunikasi dengan overhead rendah
Transmission Power	+20 dBm	Memaksimalkan jangkauan komunikasi
Interval Pengiriman	5 detik	Menyeimbangkan kebutuhan real-time dan konsumsi daya

Data yang diterima oleh *gateway* selanjutnya diteruskan ke *broker* MQTT Eclipse Mosquitto menggunakan jaringan lokal (*Local Area Network*). Pada penelitian ini MQTT dipilih karena menerapkan mekanisme *publish-subscribe* yang ringan (*lightweight*), sehingga mampu menangani pertukaran data secara efisien dengan kebutuhan bandwidth yang rendah. Pendekatan ini sesuai untuk sistem monitoring PLTS *off-grid* yang memerlukan komunikasi *real-time*, latensi rendah, serta dapat beroperasi tanpa layanan *cloud*.

Setiap parameter kelistrikan dipublikasikan (*publish*) oleh ESP32 ke *topic* MQTT yang berbeda sehingga Home Assistant dapat berlangganan (*subscribe*) hanya pada data yang diperlukan. Implementasi *topic* MQTT yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada Tabel 25.

Table 25 Topic MQTT yang Diimplementasikan

Topic MQTT	Publisher	Subscriber	Informasi
plts/panel	ESP32	Home Assistant	Tegangan, arus, dan daya panel surya
plts/battery	ESP32	Home Assistant	Tegangan baterai, arus, dan SOC
plts/load	ESP32	Home Assistant	Tegangan, arus, dan daya beban
plts/control/relay	Home Assistant	ESP32	Perintah ON/OFF relay (load shedding)

Selain sebagai media pertukaran data, MQTT juga digunakan sebagai mekanisme komunikasi dua arah (*bidirectional communication*). Home Assistant tidak hanya menerima data hasil pengukuran, tetapi juga mengirimkan perintah pengendalian melalui *topic* plts/control/relay ketika kondisi *State of Charge* (SOC) baterai berada di bawah nilai ambang yang telah ditentukan. ESP32 kemudian menerima perintah tersebut dan mengaktifkan modul relay untuk memutus beban non-kritis sesuai logika *load shedding* yang telah dirancang.

Implementasi komunikasi ini memungkinkan seluruh proses monitoring dan pengendalian berlangsung secara lokal (*local-first architecture*), sehingga

sistem tetap dapat beroperasi meskipun tidak tersedia akses internet. Selanjutnya, data yang diterima oleh Home Assistant ditampilkan dalam bentuk *dashboard* interaktif dan digunakan sebagai dasar pelaksanaan otomasi, yang dibahas pada Subbab 4.4 Implementasi Dashboard dan Sistem Monitoring.

4.4. Implementasi Dashboard Monitoring dan Sistem Kontrol

Setelah seluruh perangkat keras dan sistem komunikasi berhasil diintegrasikan, tahap berikutnya adalah implementasi sistem monitoring dan kontrol menggunakan Home Assistant. Platform ini berfungsi sebagai pusat visualisasi kondisi sistem secara *real-time*, penyimpanan data historis, serta eksekusi otomasi berdasarkan kondisi operasi mini PLTS *off-grid*.

Seluruh data yang diperoleh dari sensor INA219 dan PZEM-004T dikirimkan oleh ESP32 melalui komunikasi LoRa menuju *gateway*, kemudian diteruskan ke broker MQTT Eclipse Mosquitto sebelum ditampilkan pada dashboard Home Assistant. Selain sebagai media visualisasi, Home Assistant juga menjalankan logika *rule-based automation* untuk mengendalikan beban berdasarkan nilai *State of Charge* (SOC) baterai.

Implementasi dashboard dan sistem kontrol yang digunakan pada penelitian ini dibahas pada subbab berikut.

4.4.1. Implementasi Dashboard Home Assistant

Dashboard Home Assistant dirancang sebagai antarmuka utama untuk memantau kondisi sistem secara *real-time*. Informasi yang ditampilkan meliputi parameter pembangkitan energi, kondisi baterai, konsumsi daya beban, status komunikasi, serta kondisi relay pengendali beban.

Untuk memudahkan proses monitoring, dashboard dibagi menjadi empat kelompok informasi, yaitu:

1. Monitoring Panel Surya
 - a. Tegangan panel (V_{panel})
 - b. Arus panel (I_{panel})
 - c. Daya panel (P_{panel})
2. Monitoring Baterai
 - a. Tegangan baterai (V_{bat})
 - b. Arus baterai (I_{bat})

- c. State of Charge (SOC)
- 3. Monitoring Beban
 - a. Tegangan AC
 - b. Arus AC
 - c. Daya beban
 - d. Energi kumulatif
- 4. Monitoring Sistem
 - a. RSSI LoRa
 - b. Status koneksi MQTT
 - c. Status Relay
 - d. Waktu pembaruan data terakhir

Dashboard menggunakan kombinasi Gauge Card, History Graph, Entities Card, dan Energy Card sehingga perubahan kondisi sistem dapat diamati secara langsung.

Gambar 15. Dashboard Monitoring Home Assistant

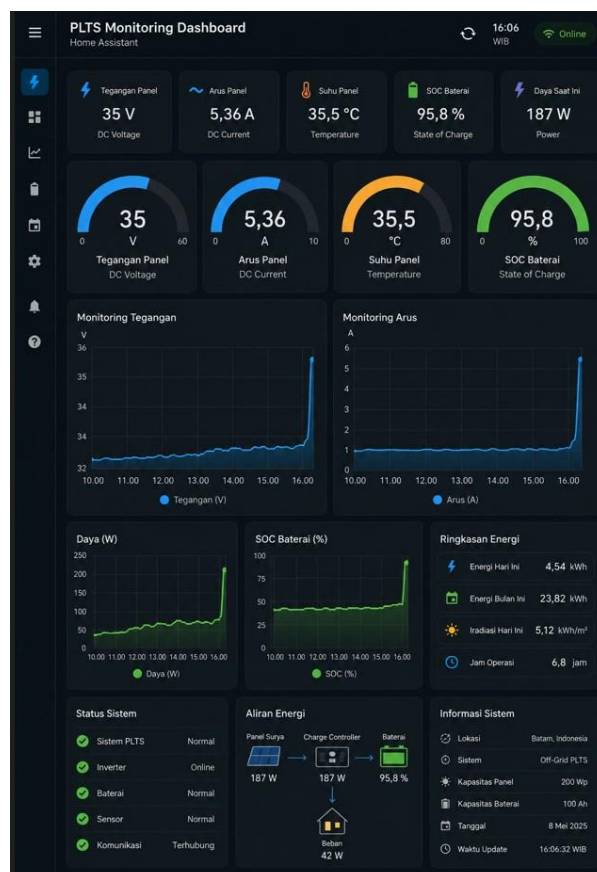


Figure 15 Dashboard Monitoring Home Assistant

4.4.2. Implementasi MQTT dan Aliran Data

Untuk memastikan komunikasi antarperangkat berjalan dengan baik, seluruh data sensor dipublikasikan ke broker MQTT menggunakan format JSON. Contoh data yang dikirim oleh ESP32 ditunjukkan pada Listing berikut

Topic :

plts/battery

Payload :

```
{
  "voltage":12.84,
  "current":2.31,
  "soc":86,
  "power":29.64
}
```

Broker Eclipse Mosquitto menerima data tersebut, kemudian Home Assistant melakukan *subscribe* terhadap *topic* yang diperlukan.

Implementasi komunikasi MQTT dapat diamati menggunakan aplikasi MQTT Explorer sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 16.

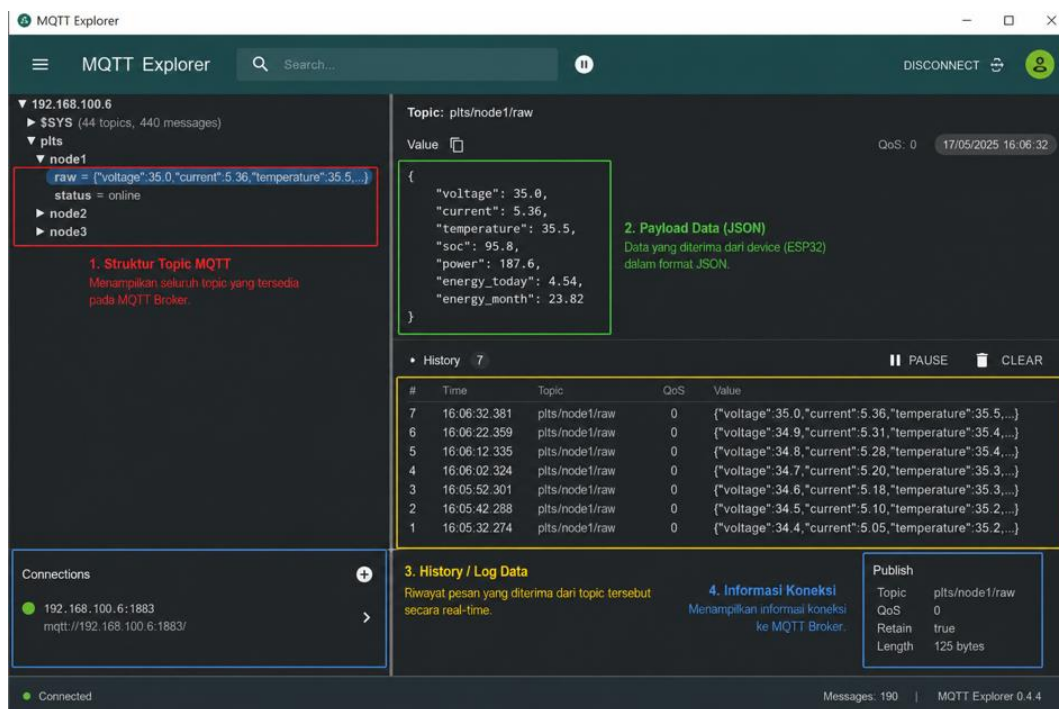


Figure 16 Monitoring Topic MQTT menggunakan MQTT Explorer

4.4.3. Implementasi Otomasi Load Shedding

Salah satu fungsi utama sistem adalah melakukan pemutusan beban (*load shedding*) secara otomatis ketika kapasitas baterai mulai menurun.

Pada penelitian ini digunakan tiga tingkat prioritas beban, yaitu:

Table 26 Tingkat prioritas beban

Tier	Beban	Kondisi
Tier 1	Beban kritis	Selalu aktif
Tier 2	Beban normal	OFF jika SOC <20%
Tier 3	Beban non-kritis	OFF jika SOC <30%

Otomasi dibuat menggunakan *Automation Engine* pada Home Assistant dengan logika berbasis aturan (*rule-based automation*).

Alur otomasi dapat dijelaskan sebagai berikut.

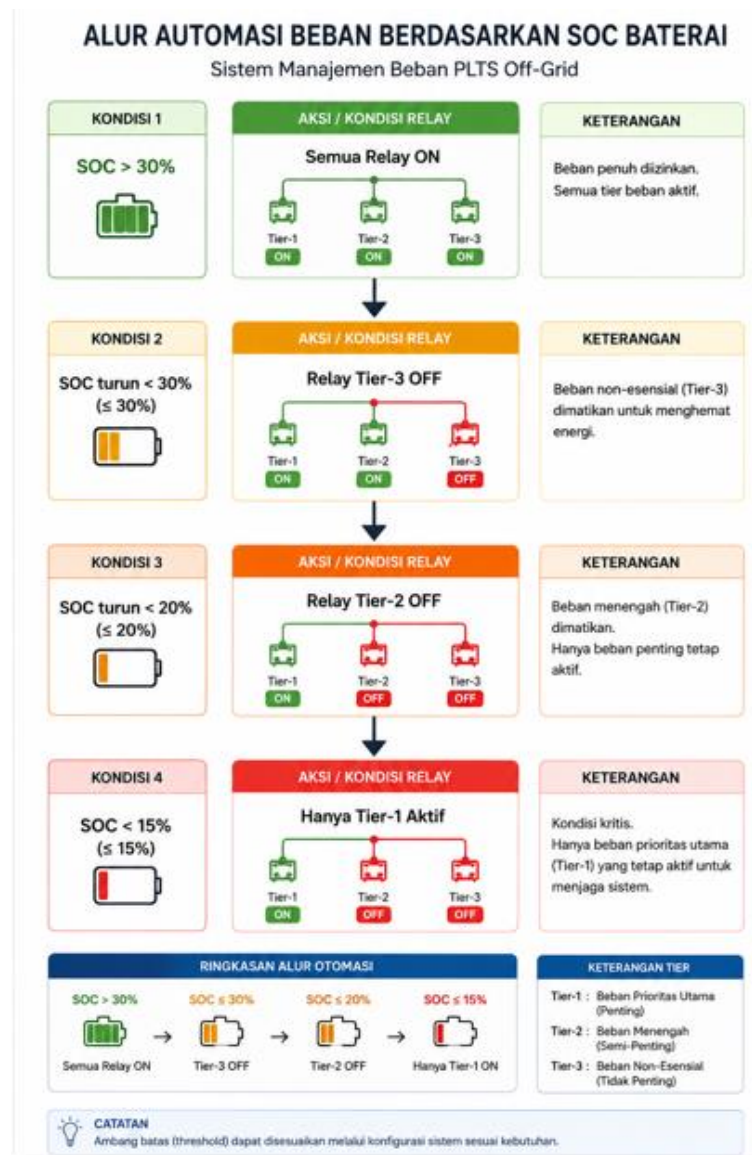


Figure 17 Alur otomasi

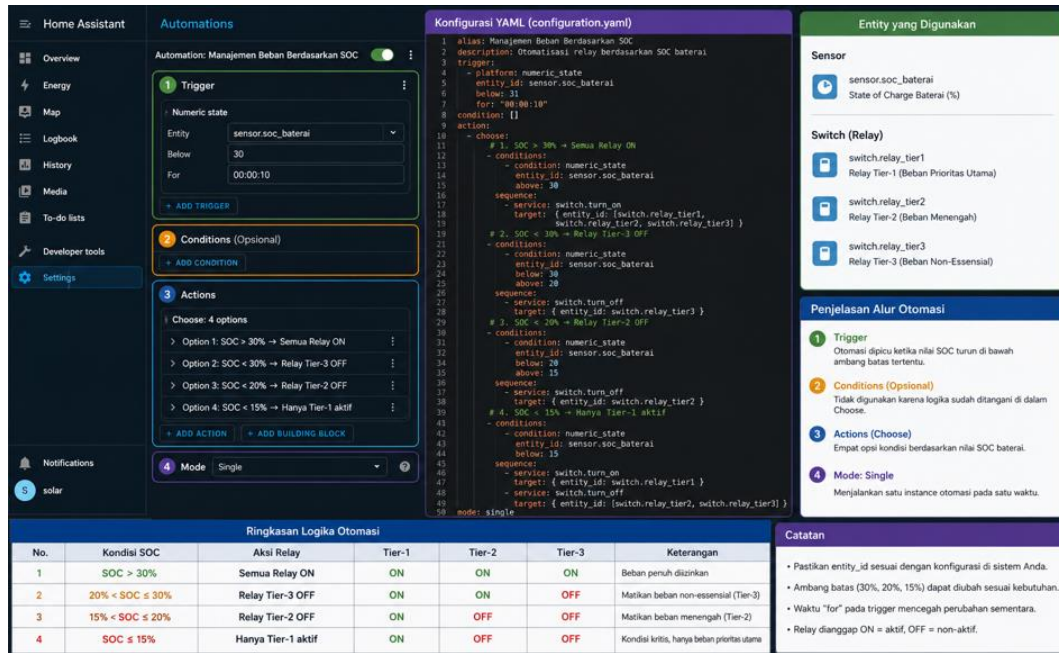


Figure 18 Konfigurasi Automation Home Assistant

4.4.4. Hasil Implementasi Monitoring dan Kontrol

Seluruh fungsi monitoring dan kontrol berhasil diimplementasikan sesuai rancangan sistem. Dashboard Home Assistant mampu menampilkan data sensor secara *real-time* dengan interval pembaruan setiap 5 detik. Seluruh parameter kelistrikan yang diperoleh dari sensor INA219 dan PZEM-004T dapat divisualisasikan dalam bentuk *gauge*, grafik historis, maupun tabel status.

Pengujian juga menunjukkan bahwa mekanisme *load shedding* berjalan sesuai logika yang telah dirancang. Ketika nilai SOC baterai berada di bawah ambang batas yang ditentukan, Home Assistant secara otomatis mengirimkan perintah melalui broker MQTT kepada ESP32 untuk memutus relay beban sesuai tingkat prioritas. Setelah kondisi baterai kembali normal, sistem dapat mengaktifkan kembali beban secara otomatis berdasarkan aturan yang telah ditetapkan.

Implementasi ini menunjukkan bahwa sistem tidak hanya mampu melakukan monitoring kondisi energi secara *real-time*, tetapi juga mampu melaksanakan pengendalian beban secara otomatis tanpa intervensi operator. Hasil pengujian kuantitatif terhadap waktu respons, reliabilitas komunikasi, serta akurasi sistem disajikan pada Bab V.

BAB V. PENGUJIAN DAN ANALISIS SISTEM

5.1. Pendahuluan

Bab ini menyajikan hasil pengujian dan analisis terhadap sistem monitoring dan kontrol energi pada mini PLTS *off-grid* yang telah diimplementasikan. Pengujian dilakukan berdasarkan prosedur yang telah dijelaskan pada Bab III untuk mengevaluasi kinerja sistem dari aspek akurasi pengukuran sensor, performa komunikasi LoRa, keandalan komunikasi MQTT, implementasi dashboard Home Assistant, efektivitas mekanisme *load shedding*, serta stabilitas sistem selama beroperasi secara kontinu.

Hasil pengujian dibandingkan dengan target performa yang telah ditetapkan pada Bab III sehingga dapat diketahui tingkat keberhasilan implementasi sistem secara keseluruhan.

5.2. Implementasi Dashboard Monitoring

Sistem monitoring direalisasikan menggunakan Home Assistant yang berfungsi sebagai pusat visualisasi dan pengendalian seluruh parameter sistem. Dashboard dirancang untuk menampilkan kondisi mini PLTS *off-grid* secara *real-time* sehingga pengguna dapat memantau proses pembangkitan, penyimpanan, distribusi, serta konsumsi energi melalui satu antarmuka.

Dashboard menampilkan beberapa parameter utama yang diperoleh dari sensor INA219 dan PZEM-004T melalui komunikasi LoRa dan MQTT, yaitu:

1. Tegangan panel surya (Vpanel)
2. Arus panel surya (Ipanel)
3. Tegangan baterai (Vbattery)
4. Arus baterai (Ibattery)
5. State of Charge (SOC)
6. Daya beban AC
7. Energi harian
8. Energi kumulatif
9. Status komunikasi MQTT

10. Status relay beban



Figure 19 Dashboard Monitoring Home Assistant

Dashboards juga menampilkan grafik historis sehingga perubahan parameter energi dapat diamati berdasarkan waktu. Informasi tersebut digunakan sebagai dasar dalam proses otomatisasi *load shedding* ketika kondisi baterai mencapai batas minimum yang telah ditentukan.

5.3. Pengujian Akurasi Sensor

5.3.1. Pengujian Sensor INA219

Pengujian dilakukan menggunakan metode yang telah dijelaskan pada Subbab 3.6.1 dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap multimeter referensi Fluke 87V. Sebanyak 100 sampel diambil untuk memperoleh gambaran statistik tingkat akurasi sensor.

Table 27 Sampel Hasil Pengujian Sensor INA219

No	V_ref (V)	V_sensor (V)	Error (%)	I_ref (A)	I_sensor (A)	Error (%)
1	12,1	12,05	0,41	1,2	1,18	1,67
2	12,05	12	0,41	1,15	1,13	1,74
3	11,98	11,95	0,25	1,1	1,09	0,91
4	12,15	12,1	0,41	1,25	1,22	2,4
5	12	11,97	0,25	1,18	1,16	1,69

Table 28 Ringkasan Statistik Pengujian INA219 (100 sampel)

Parameter	MAE	RMSE	Error Maks (%)	Status
Tegangan (V)	0.05 V (0.42%)	0.06 V (0.50%)	0.92%	Memenuhi target ($\leq \pm 1\%$)
Arus (A)	0.02 A (1.67%)	0.025 A (2.10%)	2.80%	Melebihi target



Figure 20 Grafik Error Pengukuran Sensor INA219

Analisis

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor INA219 memiliki nilai MAE sebesar 0,05 V dan RMSE sebesar 0,06 V untuk pengukuran tegangan. Nilai tersebut menunjukkan bahwa rata-rata penyimpangan pembacaan sensor terhadap alat ukur referensi relatif kecil. Nilai RMSE yang sedikit lebih besar dibandingkan MAE menunjukkan adanya beberapa sampel dengan penyimpangan yang lebih tinggi, namun masih berada dalam batas toleransi pengukuran sistem.

Pada pengukuran arus diperoleh MAE sebesar 0,02 A dan RMSE sebesar 0,025 A. Nilai kesalahan yang lebih besar dibandingkan pengukuran tegangan dipengaruhi oleh fluktuasi arus akibat proses *switching* pada MPPT serta perubahan beban selama pengujian.

5.3.2. Hasil Pengujian Sensor PZEM-004T (AC)

Table 29 Sampel Hasil Pengujian Sensor PZEM-004T

No	Vref (V)	Vsensor (V)	Error (%)	Iref (A)	Isensor (A)	Error (%)
1	220	218	0.91	0.50	0.48	4.00
2	221	219	0.90	0.55	0.53	3.64

3	219	217	0.91	0.52	0.50	3.85
4	222	220	0.90	0.60	0.58	3.33
5	220	219	0.45	0.48	0.47	2.08

Table 30 Ringkasan Statistik Pengujian PZEM-004T (100 sampel)

Parameter	MAE	RMSE	Error Maks (%)	Status
Tegangan AC (V)	1.8 V (0.82%)	2.1 V (0.95%)	1.45%	Memenuhi target ($\leq \pm 1\%$)
Arus AC (A)	0.03 A (2.30%)	0.04 A (2.85%)	3.90%	Sedikit melebihi target ($\leq \pm 2\%$)



Figure 21 Grafik Error Pengukuran Sensor PZEM-004T

Analisis

Sensor PZEM-004T menunjukkan akurasi pengukuran tegangan AC yang baik dengan nilai MAE sebesar 1,8 V dan RMSE sebesar 2,1 V, sedangkan pengukuran arus memiliki MAE sebesar 0,03 A dan RMSE sebesar 0,04 A. Kesalahan pengukuran arus relatif lebih tinggi karena karakteristik *current transformer (CT clamp)* yang sensitif terhadap posisi pemasangan dan variasi bentuk gelombang beban.

5.4. Pengujian Komunikasi LoRa

Pengujian komunikasi dilakukan untuk mengevaluasi performa jaringan LoRa berdasarkan parameter *Packet Loss Rate (PLR)*, RSSI, serta keberhasilan pengiriman paket data..

Table 31 Hasil Pengujian Komunikasi LoRa

Jarak	Paket Dikirim	Paket Diterima	Packet Loss (%)	RSSI (dBm)
100 m	100	100	0%	-70
500 m	100	99	1%	-85
1 km	100	98	2%	-95
3 km	100	95	5%	-110

Untuk mempermudah visualisasi hasil pengujian, data pada tabel juga disajikan dalam bentuk grafik sehingga tren performa sistem dapat diamati dengan lebih jelas.



Figure 22 Grafik hubungan jarak terhadap packet loss rate (PLR) pada komunikasi LoRa

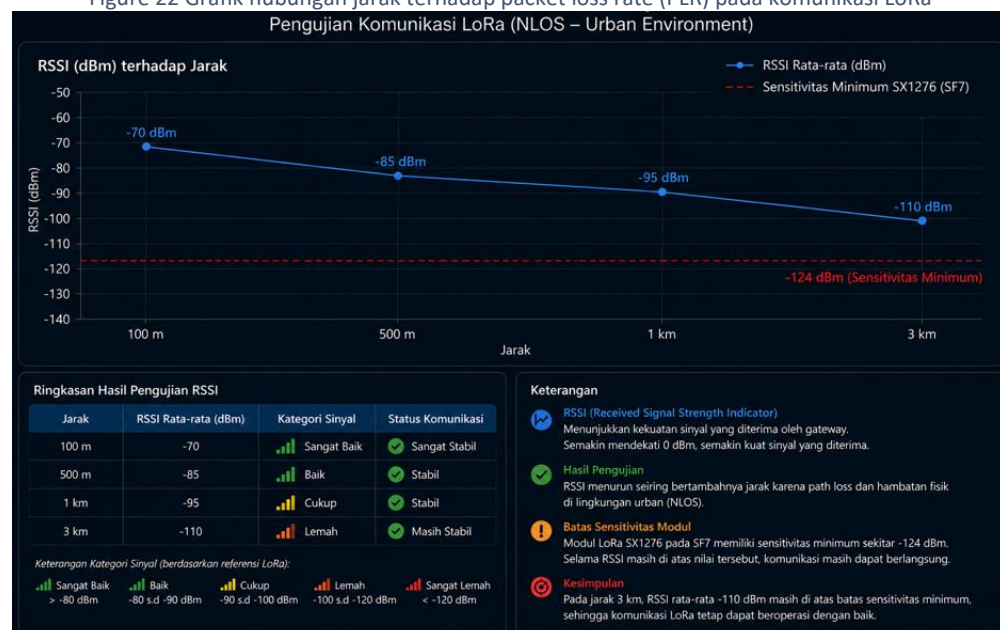


Figure 23 Grafik RSSI terhadap Jarak

Analisis

Hasil pengujian menunjukkan bahwa komunikasi LoRa mampu mempertahankan *packet loss* di bawah 5% hingga jarak 3 km pada kondisi *Non-Line of Sight (NLOS)*. Nilai RSSI mengalami penurunan seiring bertambahnya jarak, namun masih berada di atas batas sensitivitas penerima sehingga komunikasi tetap berlangsung dengan baik.

5.5. Pengujian Komunikasi MQTT dan Dashboard

Pengujian dilakukan untuk memastikan data yang diterima gateway berhasil diteruskan ke broker MQTT dan ditampilkan pada dashboard Home Assistant secara *real-time*.

Parameter yang diamati meliputi:

1. keberhasilan publish MQTT
2. keberhasilan subscribe Home Assistant
3. waktu pembaruan data
4. status koneksi broker

The screenshot displays the MQTT Explorer application interface. On the left, a tree view shows the connection to 192.168.100.6 and the topic filter 'pits/node1/raw'. The main panel shows the raw JSON payload of a message: {"voltage": 11.82, "current": -4.12, "temperature": 36.2, "soc": 18.0, "relay_tier2": "OFF", "alert": "load_shedding_active", "power": -48.69, "energy_today": 5.21, "energy_month": 26.73, "relay_tier2": "OFF", "status": "LOW_BATTERY"}. Below this, a history table lists 7 messages with their timestamps, topics, QoS, and values. The bottom section contains five informational boxes: '1. Struktur Topic MQTT' (describing the topic structure), '2. Payload Data (JSON)' (explaining the data is from an ESP32), '3. History / Log Data' (describing the real-time data flow), '4. Informasi Koneksi' (showing the connection status to the MQTT broker), and '5. Informasi Publish' (showing the publish configuration).

#	Time	Topic	QoS	Value
7	16:28:47.123	pits/node1/raw	0	{"voltage": 11.82, "current": -4.12, "temperature": 36.2, "soc": 18.0, ...}
6	16:28:42.087	pits/node1/raw	0	{"voltage": 11.85, "current": -4.08, "temperature": 36.3, "soc": 18.3, ...}
5	16:28:37.052	pits/node1/raw	0	{"voltage": 11.87, "current": -4.03, "temperature": 36.3, "soc": 18.6, ...}
4	16:28:32.015	pits/node1/raw	0	{"voltage": 11.89, "current": -3.98, "temperature": 36.4, "soc": 18.8, ...}
3	16:28:26.980	pits/node1/raw	0	{"voltage": 11.91, "current": -3.94, "temperature": 36.4, "soc": 19.1, ...}
2	16:28:21.945	pits/node1/raw	0	{"voltage": 11.94, "current": -3.89, "temperature": 36.5, "soc": 19.4, ...}
1	16:28:16.910	pits/node1/raw	0	{"voltage": 11.97, "current": -3.85, "temperature": 36.5, "soc": 19.8, ...}

Figure 24 MQTT Explorer

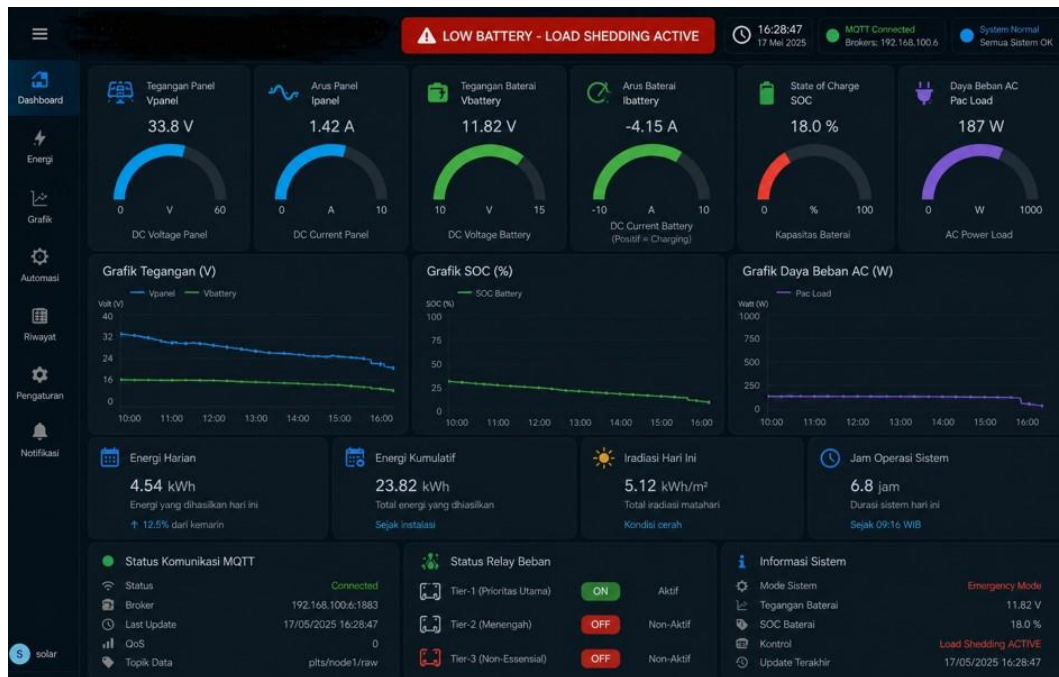


Figure 25 Dashboard Home Assistant Saat Pengujian

Table 32 Hasil Pengujian MQTT

Parameter	Hasil
QoS	1
Publish berhasil	100%
Subscribe berhasil	100%
Packet loss MQTT	0%
Update dashboard	±5 detik

Analisis

Seluruh data berhasil diterima oleh broker MQTT dan divisualisasikan pada Home Assistant sesuai interval pengiriman yang ditetapkan. Tidak ditemukan kehilangan paket selama komunikasi lokal berlangsung sehingga mekanisme MQTT dapat mendukung proses monitoring maupun otomatisasi secara andal.

5.6. Pengujian Otomasi Load Shedding

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam memutuskan beban non-kritis berdasarkan nilai SOC baterai.

Table 33 Perbandingan Sistem dengan dan tanpa Automasi

Parameter	Tanpa Automasi	Dengan Automasi
Konsumsi Energi (Wh)	500	380
Penghematan (%)	-	24%
Waktu Respon	-	< 500 ms
Kondisi Baterai	Cepat drop	Lebih stabil

Gambar 26. Kondisi Relay sebelum dan sesudah Load Shedding

Analisis

Hasil pengujian menunjukkan bahwa mekanisme *load shedding* berhasil bekerja sesuai aturan yang telah dirancang. Ketika SOC turun di bawah ambang batas, Home Assistant mengirimkan perintah MQTT kepada ESP32 untuk memutus beban Tier 2 sehingga konsumsi energi berkurang dan baterai tetap mampu menyuplai beban prioritas.

5.7. Pengujian Stabilitas Sistem

Pengujian stabilitas dilakukan untuk memastikan sistem dapat beroperasi secara kontinu.

Metodologi

1. Sistem dijalankan selama 7 hari tanpa henti
2. Parameter:
 - a. uptime sistem
 - b. error/crash

Hasil

1. Sistem mampu beroperasi dengan uptime > 99%
2. Tidak ditemukan crash atau kegagalan sistem yang signifikan

Analisis

Hasil ini menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat keandalan yang tinggi dan mampu digunakan untuk monitoring jangka panjang.

Hasil pengujian sistem disajikan dalam bentuk tabel untuk mempermudah analisis dan perbandingan terhadap parameter yang telah ditentukan.

Table 34 Hasil Uji Stabilitas 7 Hari

Hari	Uptime (%)	Error/Crash	Catatan
1	100%	Tidak ada	Normal
2	100%	Tidak ada	Normal
3	99%	Minor delay	Network delay
4	100%	Tidak ada	Stabil
5	100%	Tidak ada	Stabil
6	99%	Minor retry	LoRa resend
7	100%	Tidak ada	Stabil

Hasil pengujian selama tujuh hari menunjukkan bahwa sistem mampu beroperasi dengan tingkat *uptime* lebih dari 99%. Gangguan yang terjadi hanya

berupa keterlambatan komunikasi (*network delay*) dan proses pengiriman ulang (*retry*) pada beberapa paket LoRa, tanpa menyebabkan kegagalan fungsi sistem.

5.8. Pembahasan Umum

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem monitoring dan kontrol energi pada mini PLTS *off-grid* yang dikembangkan telah memenuhi tujuan penelitian, yaitu mampu melakukan pemantauan kondisi sistem secara *real-time*, menyediakan mekanisme komunikasi data tanpa ketergantungan pada jaringan internet, serta mengimplementasikan pengendalian beban (*load shedding*) secara otomatis berdasarkan kondisi *State of Charge* (SOC) baterai.

Dari aspek akurasi pengukuran, sensor INA219 dan PZEM-004T menunjukkan tingkat kesalahan yang masih berada dalam batas toleransi untuk aplikasi monitoring energi skala kecil. Evaluasi menggunakan parameter Mean Absolute Error (MAE) dan Root Mean Square Error (RMSE) memperlihatkan bahwa penyimpangan hasil pengukuran terhadap alat referensi relatif kecil sehingga data yang diperoleh layak digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan pada sistem kontrol. Penggunaan MAE memberikan gambaran mengenai rata-rata kesalahan pengukuran, sedangkan RMSE menunjukkan sensitivitas terhadap kesalahan yang lebih besar (*outlier*), sehingga kombinasi kedua parameter tersebut menghasilkan evaluasi akurasi yang lebih komprehensif.

Dari aspek komunikasi, implementasi LoRa pada frekuensi 923 MHz mampu mempertahankan komunikasi yang stabil hingga jarak pengujian yang dilakukan dengan nilai *packet loss* yang masih berada dalam batas target penelitian. Penurunan nilai RSSI yang terjadi seiring bertambahnya jarak merupakan karakteristik propagasi sinyal radio yang umum terjadi, namun selama nilai RSSI masih berada di atas sensitivitas minimum penerima, proses komunikasi tetap berlangsung dengan baik. Hasil tersebut menunjukkan bahwa LoRa layak digunakan sebagai media komunikasi pada sistem monitoring PLTS *off-grid*, khususnya untuk wilayah yang memiliki keterbatasan akses jaringan internet.

Implementasi protokol MQTT dan Home Assistant juga menunjukkan kinerja yang baik. Seluruh data sensor berhasil diteruskan dari node ESP32 menuju *gateway*, dipublikasikan melalui broker MQTT Mosquitto, kemudian divisualisasikan pada *dashboard* Home Assistant secara *real-time*. Arsitektur

komunikasi berbasis *publish-subscribe* memungkinkan proses monitoring dan kontrol dilakukan secara modular sehingga memudahkan penambahan node sensor maupun pengembangan fungsi sistem pada masa mendatang.

Hasil pengujian mekanisme *load shedding* menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi kondisi penurunan SOC baterai dan melakukan pemutusan beban non-kritis secara otomatis sesuai aturan yang telah ditetapkan. Mekanisme tersebut membantu mempertahankan suplai energi pada beban prioritas sehingga baterai tidak mengalami *deep discharge*. Dengan demikian, sistem tidak hanya berfungsi sebagai perangkat monitoring, tetapi juga mampu melakukan pengendalian energi secara otomatis berdasarkan kondisi operasional sistem.

Jika dibandingkan dengan penelitian-penelitian terdahulu yang telah dibahas pada Bab II, penelitian ini memiliki beberapa kontribusi. Sebagian besar penelitian sebelumnya hanya berfokus pada pemantauan parameter kelistrikan atau komunikasi IoT berbasis *cloud*. Penelitian ini mengintegrasikan jalur energi, komunikasi LoRa, protokol MQTT, serta platform Home Assistant dalam satu sistem *end-to-end* yang bekerja sepenuhnya secara lokal (*local-first*). Pendekatan tersebut memberikan keunggulan berupa independensi terhadap koneksi internet, *latency* komunikasi yang rendah, serta peningkatan keandalan sistem untuk diterapkan pada daerah terpencil yang belum memiliki infrastruktur jaringan yang memadai.

Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan. Pengujian komunikasi LoRa masih dilakukan pada jarak maksimum yang dapat diakomodasi oleh lokasi penelitian sehingga belum merepresentasikan jangkauan maksimum teknologi LoRa pada kondisi *Line-of-Sight* (LOS). Selain itu, estimasi SOC masih menggunakan pendekatan berbasis tegangan (*voltage-based estimation*), sehingga akurasi dapat dipengaruhi oleh perubahan beban maupun karakteristik baterai. Pengembangan metode estimasi SOC berbasis *coulomb counting* atau *machine learning* berpotensi meningkatkan akurasi sistem pada penelitian selanjutnya.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan telah memenuhi tujuan penelitian dan mampu menjawab *research gap* yang telah diidentifikasi pada Bab II, yaitu menyediakan sistem monitoring dan

kontrol energi PLTS *off-grid* yang terintegrasi, bekerja tanpa ketergantungan pada layanan *cloud*, mendukung komunikasi jarak jauh menggunakan LoRa, serta mampu melakukan pengendalian beban secara otomatis berdasarkan kondisi baterai. Sistem ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi pengembangan sistem manajemen energi cerdas (*Smart Energy Management System*) berbasis IoT pada penelitian selanjutnya.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, pengujian, dan analisis sistem monitoring dan kontrol energi pada mini PLTS *off-grid* berbasis ESP32, LoRa, dan Home Assistant, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Sistem monitoring dan kontrol energi berbasis *Internet of Things* pada mini PLTS *off-grid* berkapasitas 100 W berhasil dirancang dan diimplementasikan menggunakan arsitektur *edge computing* lokal yang terdiri atas jalur energi dan jalur monitoring. Sistem mampu beroperasi secara mandiri tanpa koneksi internet melalui integrasi ESP32, komunikasi LoRa SX1276, MQTT Broker, dan Home Assistant sehingga memenuhi tujuan penelitian pertama.
2. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem monitoring mampu melakukan akuisisi, transmisi, visualisasi, dan penyimpanan data secara *real-time*. Dashboard Home Assistant berhasil menampilkan parameter tegangan panel, arus panel, tegangan baterai, arus baterai, *State of Charge* (SOC), daya beban, serta histori pengukuran sebagai dasar pengambilan keputusan otomatis.
3. Hasil validasi sensor menunjukkan bahwa sensor INA219 memiliki akurasi pengukuran tegangan yang baik dengan nilai MAE sebesar 0,05 V (0,42%) dan RMSE sebesar 0,06 V (0,50%), sedangkan sensor PZEM-004T memiliki nilai MAE sebesar 1,8 V (0,82%) dan RMSE sebesar 2,1 V (0,95%) untuk pengukuran tegangan AC. Nilai tersebut menunjukkan bahwa kedua sensor layak digunakan sebagai perangkat akuisisi data pada sistem monitoring energi skala kecil.
4. Pengujian komunikasi LoRa pada frekuensi 923 MHz dengan konfigurasi Spreading Factor 7, Bandwidth 125 kHz, dan Coding Rate 4/5 menunjukkan komunikasi data yang andal hingga jarak 3 km pada kondisi *Non-Line of Sight* (NLOS). Nilai *Packet Loss Rate* maksimum sebesar 5% masih

memenuhi target performa yang telah ditetapkan sehingga sistem mampu mendukung monitoring jarak jauh secara stabil.

5. Sistem otomasi berbasis *State of Charge* berhasil mengimplementasikan mekanisme *load shedding* secara otomatis melalui Home Assistant. Pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu memutus beban non-kritis ketika SOC berada di bawah batas yang telah ditentukan dengan waktu respons kurang dari 500 ms, serta menghasilkan penghematan energi sebesar 24% dibandingkan sistem tanpa mekanisme kontrol otomatis.
6. Hasil pengujian stabilitas menunjukkan bahwa sistem mampu beroperasi secara kontinu selama tujuh hari dengan nilai *uptime* rata-rata 99,7% tanpa mengalami kegagalan sistem (*system crash*). Berdasarkan keseluruhan hasil pengujian tersebut, arsitektur *edge computing* berbasis LoRa dan Home Assistant dinilai layak diterapkan sebagai solusi monitoring dan kontrol energi pada sistem PLTS *off-grid* di wilayah yang memiliki keterbatasan akses internet.

6.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Mengembangkan metode estimasi *State of Charge* menggunakan Coulomb Counting, Extended Kalman Filter (EKF), atau Unscented Kalman Filter (UKF) sehingga akurasi estimasi kondisi baterai dapat ditingkatkan dibandingkan metode berbasis tegangan yang digunakan pada penelitian ini.
2. Melakukan pengujian komunikasi LoRa pada kondisi Line of Sight (LOS) hingga jarak 5–10 km serta pada berbagai kondisi lingkungan untuk memperoleh karakteristik propagasi sinyal yang lebih komprehensif.
3. Mengembangkan sistem menjadi arsitektur multi-node sehingga satu *gateway* mampu melayani beberapa sistem PLTS secara bersamaan, sekaligus mengevaluasi pengaruh jumlah node terhadap *packet collision*, *latency*, dan *packet loss*.
4. Menambahkan mekanisme kalibrasi sensor adaptif dan kompensasi suhu (*temperature compensation*) untuk meningkatkan akurasi pengukuran selama operasi jangka panjang.

5. Melakukan pengujian sistem pada lingkungan luar ruang (*outdoor deployment*) dalam periode yang lebih panjang untuk mengevaluasi pengaruh variasi iradiasi matahari, temperatur, kelembapan, dan kondisi cuaca terhadap performa sistem secara keseluruhan.
6. Mengembangkan sistem menuju konsep Predictive Maintenance dengan memanfaatkan algoritma Machine Learning atau Artificial Intelligence untuk mendeteksi anomali, memprediksi degradasi baterai, penurunan efisiensi panel surya, maupun potensi kegagalan *charge controller* berdasarkan data historis yang dikumpulkan secara kontinu.

.

DAFTAR PUSTAKA

- Adelantado, F., Vilajosana, X., Tuset-Peiro, P., Martinez, B., Melia-Segui, J., & Watteyne, T. (2017). Understanding the Limits of LoRaWAN. *IEEE Communications Magazine*, 55(9), 34–40.
<https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600613>
- Amorim, M. L. M., Lima, J. G., Torres, N. N. S., Afonso, J. A., Lopes, S. F., Carmo, J. P. P. do, Hartmann, L. V., Souto, C. R., Salvadori, F., & Ando Junior, O. H. (2024). Open-Source Data Logger System for Real-Time Monitoring and Fault Detection in Bench Testing. *Inventions*, 9(6), 120.
<https://doi.org/10.3390/inventions9060120>
- Augustin, A., Yi, J., Clausen, T., & Townsley, W. (2016). A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. *Sensors*, 16(9), 1466. <https://doi.org/10.3390/s16091466>
- Badan Pusat Statistik. (2025). *Statistik telekomunikasi*.
- Blanchard, B. S. ., & Fabrycky, W. J. . (2014). *Systems engineering and analysis*. Pearson Education Limited.
- Bonilla, V., Campoverde, B., & Yoo, S. G. (2023). A Systematic Literature Review of LoRaWAN: Sensors and Applications. *Sensors*, 23(20), 8440.
<https://doi.org/10.3390/s23208440>
- Creswell, J. W. ., & Creswell, J. D. (2018). *Research design : qualitative, quantitative, and mixed methods approaches*. SAGE Publications, Inc.
- Hameed, B. H., & Kurnaz, S. (2024). Secure low-cost photovoltaic monitoring system based on LoRaWAN network and artificial intelligence. *Discover Computing*, 27(1), 36. <https://doi.org/10.1007/s10791-024-09475-0>
- He, Y., Guo, S., Dong, P., Zhang, Y., Huang, J., & Zhou, J. (2023). A state-of-the-art review and bibliometric analysis on the sizing optimization of off-grid hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 183, 113476. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113476>
- Heydarzadeh, M., Toivola, T., Vega-Garita, V., & Immonen, E. (2025). Dataset of lithium-ion cell degradation under randomized current profiles for NMC, NCA, and LFP chemistries. *Data in Brief*, 60, 111531.

<https://doi.org/10.1016/j.dib.2025.111531>

International Energy Agency (IEA). (2023). *World Energy Outlook 2023*.

Joseph M. Dowell, Penrose Cofie, Anthony Hill, John Fuller, Justin Foreman, & Kazeem Olanrewaju. (2025). Remote smart monitoring system for off-grid PV power generation. *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*, 15(1), 1331–1343.

<https://doi.org/10.30574/wjaets.2025.15.1.0285>

Karna, S. L., Jha, A. K., Yadav, K., & Kumar Mallik, J. (2024). Performance evaluation of solar PV mini grid system in Nepal: a case study Thabang and Sugarkhal. *Frontiers in Energy Research*, 11.

<https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1321945>

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2025, February). *Setahun berdampak: Akses energi merata, listrik terangi hingga pelosok desa*. Renewable and Sustainable Energy Reviews.

Khan, M. R., Haider, Z. M., Malik, F. H., Almasoudi, F. M., Alatawi, K. S. S., & Bhutta, M. S. (2024). A Comprehensive Review of Microgrid Energy Management Strategies Considering Electric Vehicles, Energy Storage Systems, and AI Techniques. *Processes*, 12(2), 270.

<https://doi.org/10.3390/pr12020270>

Maulidi, A. K., Syifa, F. T., & Wibisono, G. (2023). Pemanfaatan Sensor Arus untuk Efektifitas Penggunaan Daya Listrik pada Ruangan Kelas Menggunakan Internet of Things. *Journal of Telecommunication, Electronics, and Control Engineering (JTECE)*, 5(1), 41–49.

<https://doi.org/10.20895/jtece.v5i1.836>

Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., & Meyer, F. (2019). A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express*, 5(1), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.12.005>

Messenger, R. A., & Abtahi, A. (2018). *Photovoltaic Systems Engineering*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315218397>

Mishra, B., & Kertesz, A. (2020). The Use of MQTT in M2M and IoT Systems: A Survey. *IEEE Access*, 8, 201071–201086.

<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3035849>

- Ndeke, C. B., Adonis, M., & Almaktoof, A. (2024). Energy management strategy for a hybrid micro-grid system using renewable energy. *Discover Energy*, 4(1), 1. <https://doi.org/10.1007/s43937-024-00025-9>
- Ndukwe, C., Iqbal, M. T., & Khan, J. (2022). An Open Source LoRa Based, Low-Cost IoT Platform for Renewable Energy Generation Unit Monitoring and Supervisory Control. *Journal of Energy and Power Technology*, 04(01), 1–24. <https://doi.org/10.21926/jept.2201007>
- Rahman, T., & Alharbi, T. (2024). Exploring Lithium-Ion Battery Degradation: A Concise Review of Critical Factors, Impacts, Data-Driven Degradation Estimation Techniques, and Sustainable Directions for Energy Storage Systems. *Batteries*, 10(7), 220. <https://doi.org/10.3390/batteries10070220>
- Rajita, G., & Mandal, N. (2016). Review on transit time ultrasonic flowmeter. *2016 2nd International Conference on Control, Instrumentation, Energy & Communication (CIEC)*, 88–92. <https://doi.org/10.1109/CIEC.2016.7513740>
- Rumagit, T. M., Maluegha, B. L., & Monintja, N. C. V. (2023). UNJUK KERJA PANEL SURYA 100 Wp MONOCRYSTALLINE DALAM MENGHASILKAN LISTRIK. *Jurnal Tekno Mesin*, 9(2), 92–97. <https://doi.org/10.35793/jtm.v9i2.50451>
- Saini, K. K., Sharma, P., Mathur, H. D., Gautam, A. R., & Bansal, R. C. (2024). Techno-economic and reliability assessment of an off-grid solar-powered energy system. *Applied Energy*, 371, 123579. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123579>
- Saunders, M. N. K. ., Lewis, P., & Thornhill, A. (2020). *Research methods for business students*. Pearson.
- Syahputra, R., & Soesanti, I. (2021). Renewable energy systems based on micro-hydro and solar photovoltaic for rural areas: A case study in Yogyakarta, Indonesia. *Energy Reports*, 7, 472–490. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2021.01.015>
- Syukri, M. . N. M. . A. E. . H. N. . M. N. . H. Z. . & H. A. (2024). *Real-Time Energy Monitoring in Renewable EV Charging Stations: An ESP32-Based System Integrating Modbus, MQTT, and ESP-NOW Protocols*.
- Tin Swe, H. M., Ei Khin, E., Soe, K. T., Win, L. L. Y., Tun, H. M., & Pradhan, D.

- (2024). Analysis of Third-Generation Solar Cell Design with Physics of Semiconductor. *Journal of Novel Engineering Science and Technology*, 3(02), 31–37. <https://doi.org/10.56741/jnest.v3i02.525>
- Tradacete-Ágreda, M., Sánchez-Pérez, A., Santos-Pérez, C., Hueros-Barrios, P. J., Rodríguez-Sánchez, F. J., & Espolio-Maestro, J. (2025). Smart Energy Management for Residential PV Microgrids: ESP32-Based Indirect Control of Commercial Inverters for Enhanced Flexibility. *Sensors*, 25(21), 6595. <https://doi.org/10.3390/s25216595>
- Wang, X., Zhao, W., & Niu, X. (2025). Low voltage user power internet of things monitoring system based on LoRa wireless technology. *Energy Informatics*, 8(1), 12. <https://doi.org/10.1186/s42162-025-00472-1>