Implementasi dan Monitoring Panel Surya Off-Grid Berbasis Internet of Things untuk Irigasi di Wilayah Pertanian

Aditia Sami Halim[1]
Program Studi S1 Teknik Komputer
Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
aditiasamihalim10@gmail.com

Abdurasyid Ridho[2]
Program Studi S1 Teknik Komputer
Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
abdurrasyidridho2@gmail.com

Muhammad Alfath Hakim[3]
Program Studi S1 Teknik Komputer
Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
alfathhakim9@gmail.com

***Abstrak* — Air irigasi merupakan penopang utama ketahanan pangan nasional, tetapi petani di wilayah *off-grid* masih terkendala tingginya biaya operasional pompa dan keterbatasan jaringan listrik PLN. Penelitian ini berfokus pada perancangan dan perakitan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *off-grid* sebagai sumber daya pompa irigasi sekaligus perancangan alur kerja monitoring berbasis Internet of Things (IoT) dari perangkat keras hingga dashboard. Sub-sistem catu daya dibangun dari tujuh panel surya 50 Wp (total 350 Wp), Solar Charge Controller, baterai LiFePO4, dan inverter untuk menyuplai pompa *submersible* 125 W. Mikrokontroler Arduino Uno R3 dikonfigurasi bersama sensor arus ACS712, sensor tegangan FZ0430, dan RTC DS3231, sedangkan modul LoRa diatur pada frekuensi 433 MHz, *spreading factor* 12, dan *bandwidth* 62,5 kHz. Gateway ESP32 menghubungkan perangkat keras ke broker HiveMQ Cloud melalui protokol MQTT, gateway ESP32 menghubungkan perangkat keras ke broker HiveMQ Cloud melalui protokol MQTT sehingga data dapat diteruskan ke server dan ditampilkan pada aplikasi monitoring. Pengujian white-box, black-box, akurasi sensor, keamanan, beban pompa, dan User Acceptance Test menunjukkan seluruh jalur logika dieksekusi 100%, seluruh skenario berstatus "OK", akurasi sensor tegangan 92,98% dan sensor arus 92,96%, serta rantai komunikasi berjalan utuh dan mampu mengoperasikan pompa air 125 W.**

***Kata kunci*— PLTS *off-grid*; pompa air irigasi; internet of things; konfigurasi LoRa; gateway MQTT; integrasi perangkat keras**

I. PENDAHULUAN

Ketahanan pangan nasional Indonesia sangat bergantung pada ketersediaan air irigasi yang memadai, sementara kebijakan pangan nasional masih menghadapi kendala akibat pandangan *import minded* yang tinggi dan lemahnya strategi portofolio yang sistematis [1]. Ketersediaan air menjadi elemen krusial bagi produktivitas pertanian karena pertumbuhan tanaman sangat bergantung pada kecukupan air di dalam tanah; ketika pasokannya menurun, aktivitas fisiologis tanaman terganggu dan berujung pada terhentinya pertumbuhan [2]. Pada wilayah yang sering mengalami kekeringan, teknologi sumur bor menjadi solusi strategis untuk mengatasi kekurangan air pada lahan tadah hujan [3], [4].

Permasalahan utama yang dihadapi petani di wilayah *off-grid* adalah tingginya beban biaya operasional untuk memperoleh air irigasi, baik menggunakan pompa diesel maupun listrik token PLN. Sebagai gambaran, petani di Desa Simo, Boyolali, Jawa Tengah, mengoperasikan pompa berdaya awal 750 VA untuk lahan seluas kurang lebih 2.000 m² dan harus membeli voucher token listrik senilai Rp350.000 untuk kebutuhan irigasi 24 jam per hari selama 3–4 hari, yang hanya cukup untuk 14–20 hari kebutuhan irigasi dalam sebulan. Selain itu, biaya investasi penarikan kabel PLN ke lokasi sumur yang jauh dari jaringan utama seringkali dianggap tidak ekonomis oleh petani kecil, sementara pompa diesel menghadapi kendala fluktuasi harga bahan bakar serta dampak emisi dan kebisingan [6], [12].

Permasalahan ini tergolong permasalahan rekayasa kompleks (*complex engineering problem*) karena melibatkan aspek teknis (kapasitas sistem, efisiensi energi, tipe pompa), aspek ekonomi (biaya investasi dan operasional), aspek lingkungan (dampak emisi dan polusi), serta aspek tata ruang dan sosial (konflik penggunaan lahan, penerimaan masyarakat), sehingga interaksi dan saling ketergantungan antar aspek tersebut tidak memungkinkan solusi tunggal yang sederhana.

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa PLTS merupakan alternatif yang menjanjikan untuk kebutuhan irigasi di wilayah yang belum terjangkau listrik. Kusuma dkk. [5] merancang sistem pompa tenaga surya untuk Subak Semaagung di Bali dan menunjukkan bahwa sistem tersebut hemat energi dan mampu beroperasi secara stabil, sedangkan Rahman dkk. [6] dan Kumar dkk. [7] menemukan bahwa meskipun investasi awal PLTS tinggi, biaya siklus hidupnya (*life cycle cost*) jauh lebih rendah dibanding pompa diesel untuk pemakaian jangka panjang. Meski demikian, penerapan PLTS murni tetap menyisakan tantangan berupa ketergantungan terhadap kondisi cuaca dan besarnya biaya investasi pada tahap awal [8], [9], sehingga diperlukan sistem pemantauan energi yang efektif untuk menjaga efisiensi penggunaan daya dan mendukung keberlanjutan operasional irigasi berbasis PLTS.

Di sisi lain, penerapan IoT pada sistem pemantauan energi surya telah banyak dikaji, misalnya sistem irigasi pintar berbasis IoT dan tenaga surya [17], [18], serta pemantauan sistem fotovoltaik jarak jauh menggunakan komunikasi LoRa [27]–[30]. Namun, kajian yang secara khusus mengintegrasikan PLTS *off-grid* berskala kecil (di bawah 500 Wp) dengan sistem monitoring berbasis LoRa–MQTT dan aplikasi mobile untuk konteks lahan pertanian sempit di Indonesia masih relatif jarang dilakukan, sehingga menyisakan ruang kebaruan bagi penelitian ini.

Berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu, sebagian besar penelitian berfokus pada implementasi PLTS atau sistem monitoring secara terpisah. Beberapa penelitian telah memanfaatkan teknologi IoT untuk pemantauan PLTS, namun integrasi komunikasi data menggunakan LoRa, gateway ESP32, dan MQTT pada sistem monitoring PLTS untuk wilayah pertanian *off-grid* masih terbatas

sehingga diperlukan suatu pendekatan yang mampu mengintegrasikan komunikasi data secara andal. Selain itu, implementasi alur komunikasi yang menghubungkan perangkat keras, server/cloud, dan aplikasi monitoring secara *real-time* belum banyak dibahas. Oleh karena itu, penelitian ini mengimplementasikan sistem monitoring berbasis IoT yang mengintegrasikan seluruh rantai komunikasi dari perangkat keras hingga aplikasi monitoring.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) merancang dan merakit sistem PLTS *off-grid* modular hemat lahan berkapasitas 350 Wp sebagai sumber daya pompa irigasi; (2) merancang arsitektur perangkat keras dan perangkat lunak sistem monitoring berbasis Internet of Things; (3) merancang serta mengonfigurasi komunikasi LoRa dan gateway ESP32; (4) mengintegrasikan gateway ESP32 dengan server/cloud melalui protokol MQTT sehingga data monitoring dapat diteruskan ke server/cloud dan ditampilkan pada aplikasi monitoring secara *real-time*; serta (5) mengevaluasi kinerja sistem melalui pengujian white-box, black-box, akurasi sensor, keamanan perangkat lunak, pengujian beban pompa, dan User Acceptance Test bersama mitra petani.

Kontribusi utama penelitian ini adalah implementasi sistem PLTS *off-grid* sebagai sumber daya pompa irigasi yang dipadukan dengan sistem monitoring berbasis Internet of Things. Penelitian ini mencakup perancangan arsitektur perangkat keras dan perangkat lunak sistem monitoring, perancangan serta implementasi komunikasi data berbasis LoRa antara node sensor dan gateway ESP32, serta integrasi gateway ESP32 dengan server/cloud melalui protokol MQTT sehingga parameter listrik dapat dipantau secara *real-time* melalui aplikasi monitoring.

II. KAJIAN TEORI

A. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Off-Grid

PLTS *off-grid* merupakan sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan modul *photovoltaic* untuk mengonversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik arus searah (DC) tanpa terhubung ke jaringan distribusi listrik utama PLN [13], [16]. Energi yang dihasilkan panel surya disimpan sementara pada baterai melalui Solar Charge Controller (SCC), yang mengatur arus pengisian agar baterai terlindungi dari kondisi *overcharge* maupun *overdischarge* [31]. Untuk menyuplai beban arus bolak-balik (AC) seperti pompa air, tegangan DC dari baterai dikonversi oleh inverter menjadi tegangan AC sesuai kebutuhan beban [31]. Baterai LiFePO4 dipilih pada penelitian ini karena memiliki siklus hidup yang lebih panjang, keamanan termal yang lebih baik, dan kurva pengosongan yang lebih stabil dibandingkan baterai *lead-acid* konvensional [10], [11].

B. Sensor Pengukuran Arus dan Tegangan

Pengukuran arus pada penelitian ini menggunakan sensor ACS712, yaitu sensor berbasis efek Hall yang mengonversi medan magnet di sekitar konduktor berarus menjadi tegangan keluaran analog yang proporsional terhadap besar arus yang mengalir [14], [15]. Pengukuran tegangan menggunakan modul FZ0430 yang bekerja berdasarkan prinsip pembagi tegangan, sehingga tegangan baterai yang relatif tinggi dapat diturunkan ke level yang aman dibaca oleh pin analog mikrokontroler [14], [15]. Kedua sensor dipilih karena kemudahan integrasinya dengan Arduino, biaya yang terjangkau, serta akurasi yang memadai untuk kebutuhan pemantauan energi skala kecil.

C. Komunikasi LoRa dan Protokol MQTT untuk IoT

LoRa merupakan teknologi modulasi radio berbasis *Chirp Spread Spectrum* yang memungkinkan transmisi data jarak jauh dengan konsumsi daya rendah, sehingga sesuai untuk aplikasi IoT di area terbuka dan minim infrastruktur jaringan seperti lahan pertanian [22], [27]–[30]. Data yang diterima gateway selanjutnya dipublikasikan menggunakan protokol MQTT, yaitu protokol komunikasi ringan berbasis model *publish-subscribe* yang dirancang untuk perangkat dengan sumber daya terbatas dan koneksi jaringan yang tidak selalu stabil [23], [24]. Kombinasi arsitektur LoRa untuk komunikasi jarak jauh dan MQTT untuk publikasi data ke cloud banyak diterapkan pada sistem monitoring fotovoltaik jarak jauh karena efisiensinya dalam konsumsi daya dan *bandwidth* [28], [29].

Teknologi LoRa dipilih karena memiliki jangkauan komunikasi yang luas dengan konsumsi daya rendah sehingga sesuai untuk wilayah pertanian yang memiliki keterbatasan infrastruktur jaringan. ESP32 digunakan sebagai gateway karena mendukung komunikasi Wi-Fi dan MQTT sehingga memudahkan integrasi dengan server/cloud.

III. METODE

A. Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui empat tahapan utama: (1) analisis kebutuhan dan penentuan spesifikasi sistem berdasarkan survei dan wawancara dengan mitra petani serta studi literatur; (2) perancangan solusi, mencakup perancangan perangkat keras PLTS, alur kerja perangkat monitoring IoT, perancangan perangkat keras PLTS, arsitektur sistem monitoring berbasis IoT, komunikasi LoRa, gateway ESP32, dan integrasi perangkat keras dengan server/cloud; (3) implementasi, yaitu perakitan perangkat keras, konfigurasi mikrokontroler dan modul komunikasi, serta pengembangan perangkat lunak sesuai rancangan; serta (4) pengujian dan evaluasi, mencakup pengujian white-box, black-box, akurasi sensor, keamanan, beban pompa, dan UAT. Pembahasan pada makalah ini menitikberatkan pada perancangan dan perakitan sub-sistem PLTS, perancangan alur kerja monitoring, konfigurasi mikrokontroler dan modul komunikasi, serta penghubungan perangkat keras dengan server dan cloud, sedangkan pengembangan backend dan aplikasi mobile dibahas secara ringkas sebagai bagian dari integrasi sistem.

B. Analisis Kebutuhan dan Spesifikasi Sistem

Survei dan wawancara bersama mitra petani dan teknisi pada 7 November 2025 mengidentifikasi bahwa penarikan kabel PLN menuju sumur *submersible* yang jauh dari jaringan utama tidak efisien dari sisi biaya, waktu, maupun risiko gangguan teknis, sehingga energi alternatif berbasis

panel surya dinilai lebih efektif [26]. Perancangan spesifikasi mengacu pada standar IEC 61724-1:2021 [13], Permen ESDM No. 49 Tahun 2018 [19], dan Manual Teknis PLTS Kementerian ESDM. Penentuan spesifikasi mempertimbangkan kebutuhan daya pompa (750 VA), topografi lahan (*total dynamic head* 20–25 m), potensi radiasi matahari Indonesia 4,5–5,5 kWh/m²/hari [20], serta pertimbangan ekonomi jangka panjang [6], [7]. Ringkasan spesifikasi ditunjukkan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

TABEL 1

SPESIFIKASI KEBUTUHAN FUNGSIONAL

Kode	Kebutuhan Fungsional	Prior.
FR-01	Sistem membaca data tegangan dan arus dari sensor.	1
FR-02	Sistem menghitung nilai daya (P = V × I).	1
FR-02.01	Sistem membaca parameter lengkap sensor.	1
FR-02.02	Dashboard menampilkan data *real-time* tiap 5 detik.	1

TABEL 2

SPESIFIKASI KEBUTUHAN NON-FUNGSIONAL

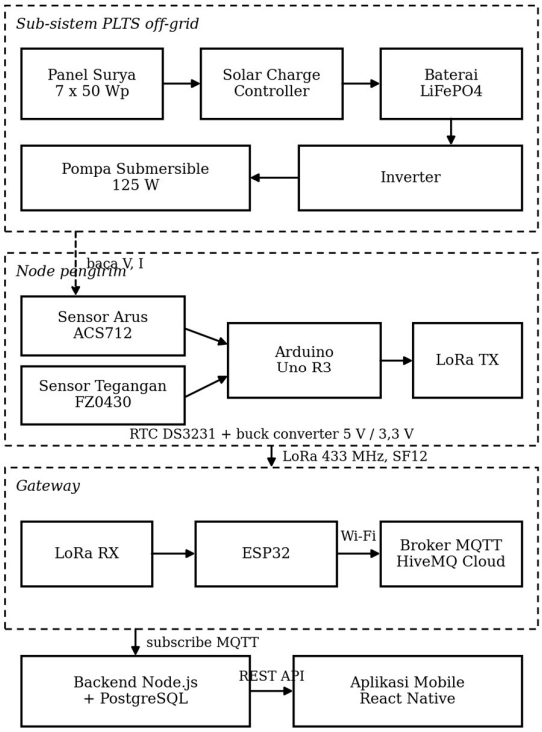
Kode	Kategori	Kebutuhan Non-Fungsional	P.
NFR-01	Kinerja	Proses data sensor < 10 detik.	1
NFR-02	Efisiensi	Konsumsi daya monitoring ≤ 10 W.	1
NFR-03	Ketersediaan	Tetap berfungsi saat koneksi terputus sementara.	1
NFR-04	Portabilitas	Dapat dipindah tanpa konfigurasi ulang.	2
NFR-05	Keandalan	Tahan panas, hujan, kelembapan tinggi.	1
NFR-06	Interoperabilitas	LoRa (node–gateway), MQTT (gateway–server).	1

C. Perancangan dan Perakitan Perangkat Keras PLTS Off-Grid

Sub-sistem catu daya dirancang mengikuti urutan konversi energi panel surya – SCC – baterai – inverter – pompa. Larik panel surya terdiri atas tujuh modul 50 Wp (total 350 Wp) yang dipasang dengan kemiringan 10–15° menghadap utara agar penerimaan radiasi harian optimal [21]. Keluaran panel dialirkan ke Solar Charge Controller yang mengatur arus pengisian sekaligus melindungi baterai dari kondisi *overcharge* dan *overdischarge* [31]. Energi disimpan pada baterai LiFePO4 yang dipilih karena siklus hidup panjang dan kurva pengosongan yang stabil [10], [11], kemudian diubah menjadi tegangan AC oleh inverter untuk menyuplai pompa air *submersible* 125 W. Perakitan dilakukan bertahap, dimulai dari pemasangan dan pengabelan larik panel, penyambungan SCC dan baterai dengan memperhatikan polaritas serta proteksi jalur, pemasangan inverter, hingga pengujian penyalaan pompa. Catu daya perangkat monitoring diambil dari sisi baterai melalui *buck converter* yang menurunkan tegangan ke level 5 V dan 3,3 V sesuai kebutuhan mikrokontroler dan modul pendukung. Konfigurasi ini dirancang untuk mendukung operasional pompa 4 jam per hari dengan target efisiensi sistem minimal 75% [25].

D. Perancangan Alur Kerja Monitoring dan Konfigurasi Mikrokontroler serta Modul Komunikasi

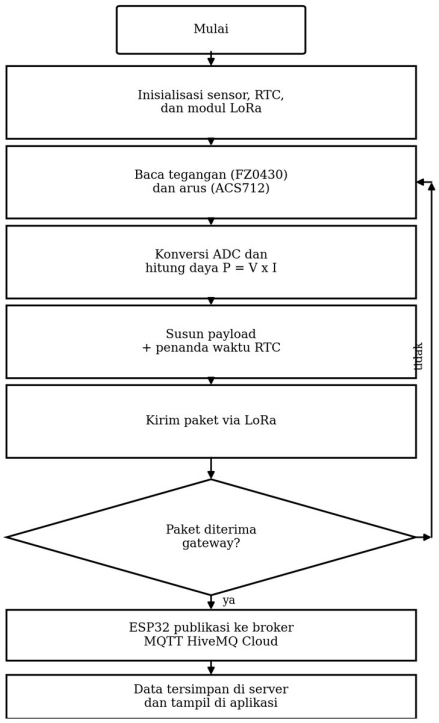
Alur kerja sistem monitoring dirancang menjadi rantai akuisisi–transmisi–publikasi–visualisasi: pembacaan sensor pada node pengirim, transmisi nirkabel LoRa menuju node penerima, publikasi data oleh gateway ke broker MQTT, penyimpanan pada basis data, hingga penyajian pada dashboard aplikasi. Node pengirim menggunakan mikrokontroler Arduino Uno R3 yang dipilih karena ketersediaan pin analog, kestabilan operasi 5 V, dan kompatibilitas langsung dengan LoRa Shield. Mikrokontroler diintegrasikan dengan sensor arus ACS712 (dipasang seri pada jalur pengisian), sensor tegangan FZ0430 (dipasang paralel), modul RTC DS3231 sebagai penanda waktu setiap data, dan modul LoRa Dragino melalui antarmuka SPI [32]. Nilai analog hasil pembacaan dikonversi menjadi besaran tegangan dan arus melalui persamaan kalibrasi, kemudian daya dihitung dengan P = V × I dan seluruh parameter disusun sebagai payload string berdelimiter agar ringan diuraikan node penerima. Modul LoRa dikonfigurasi pada mode *long range* dengan frekuensi 433 MHz, *spreading factor* 12, *bandwidth* 62,5 kHz, *coding rate* 4/8, daya pancar 20 dBm, panjang preamble 12, dan *sync word* 0xF3; kombinasi ini memaksimalkan sensitivitas penerima untuk jangkauan jauh dengan konsekuensi laju transmisi rendah, sehingga interval pengiriman ditetapkan 10 detik [24]. LoRa dipilih karena hemat daya dan mendukung *sleep mode* hingga 35% lebih hemat dibanding Wi-Fi [30]. Komunikasi dirancang satu arah (*uplink only*) tanpa *downlink* maupun *retry* otomatis. Arsitektur sistem secara keseluruhan, mulai dari sub-sistem PLTS hingga aplikasi mobile, ditunjukkan pada Gambar 1.



GAMBAR 1
ARSITEKTUR SISTEM PLTS OFF-GRID DAN MONITORING BERBASIS IoT

E. Penghubungan Perangkat Keras dengan Server dan Cloud

Node penerima berperan sebagai gateway yang menjembatani perangkat keras dengan infrastruktur server. Modul LoRa RX meneruskan paket yang diterima ke ESP32 melalui antarmuka SPI; ESP32 kemudian melakukan koneksi otomatis ke jaringan Wi-Fi yang telah dikonfigurasi pada firmware, dilanjutkan koneksi ke broker HiveMQ Cloud menggunakan protokol MQTT [27]–[30]. Setiap paket yang diterima divalidasi, dilengkapi indikator kualitas sinyal RSSI dan SNR, lalu dipublikasikan ke topik MQTT yang telah ditentukan sehingga pengguna tidak memerlukan konfigurasi tambahan di lapangan. Pada sisi server, backend Node.js yang berjalan pada VPS (PM2) berlangganan topik tersebut, memvalidasi dan menyimpan data ke basis data PostgreSQL, serta menyediakan REST API dengan filter tanggal dan pembatasan 500 titik data [24]. Data selanjutnya divisualisasikan pada aplikasi mobile React Native yang menampilkan Dashboard (pembaruan ≈ 5 detik), Riwayat (Hari Ini/7 Hari/30 Hari), dan Notifikasi tiga tingkat tegangan (<10 V kritis, 10–12 V peringatan, >12 V normal). Alur kerja sistem mulai dari inisialisasi perangkat hingga data tampil pada aplikasi ditunjukkan pada Gambar 2.



GAMBAR 2
ALUR KERJA AKUISISI DAN PENGIRIMAN DATA MONITORING

F. Metode Pengujian Sistem

Evaluasi menggunakan lima metode: (1) white-box testing pada 11 modul aplikasi mobile dan firmware IoT (Arduino dan ESP32); (2) black-box testing pada lima halaman aplikasi serta perangkat IoT, termasuk verifikasi rantai komunikasi LoRa dan MQTT; (3) pengujian akurasi sensor dibandingkan multimeter, dihitung dengan:

$$Error = |Referensi - Sensor| / Referensi \times 100\% \quad (1)$$

$$Akurasi = 100\% - Error \quad (2)$$

(4) pengujian keamanan menggunakan npm audit; dan (5) User Acceptance Test (UAT) bersama mitra petani.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Implementasi Perangkat Keras PLTS dan Node Monitoring

Sub-sistem PLTS berhasil dirakit sesuai rancangan, meliputi larik panel surya 350 Wp, Solar Charge Controller, baterai LiFePO4, inverter, dan pompa *submersible* 125 W, dengan pengabelan dan proteksi yang telah diverifikasi sebelum sistem dinyalakan. Node pengirim berhasil dibangun dari Arduino Uno R3 beserta sensor ACS712, sensor tegangan FZ0430, RTC DS3231, dan modul LoRa Dragino, dengan catu daya diambil dari sisi baterai melalui *buck converter*. Setelah dinyalakan, node pengirim melakukan inisialisasi seluruh sensor dan modul komunikasi secara otomatis, membaca parameter kelistrikan, menghitung daya, dan mentransmisikan payload melalui LoRa pada interval yang ditetapkan.

B. Hasil Penghubungan Perangkat Keras dengan Server dan Cloud

Node penerima berhasil menerima paket LoRa dari node pengirim beserta informasi RSSI dan SNR, kemudian terhubung otomatis ke jaringan Wi-Fi dan broker HiveMQ Cloud melalui MQTT tanpa memerlukan konfigurasi tambahan dari pengguna. Gateway ESP32 berhasil menghubungkan jaringan LoRa dengan server/cloud melalui protokol MQTT. Data yang diterima dari node pengirim berhasil dipublikasikan ke broker HiveMQ Cloud dan diteruskan ke server sehingga dapat ditampilkan pada aplikasi monitoring. Hasil tersebut menunjukkan bahwa integrasi komunikasi dari perangkat keras hingga server berjalan sesuai rancangan. Dengan demikian rantai integrasi sensor – Arduino – LoRa – ESP32 – MQTT – backend – aplikasi terbukti berjalan utuh dan seluruh komponen perangkat keras maupun perangkat lunak bekerja sesuai rancangan.

C. Hasil Pengujian White-Box dan Black-Box

White-box testing menunjukkan seluruh alur instruksi pada aplikasi mobile maupun firmware (Arduino, ESP32) berhasil dieksekusi 100% tanpa kecacatan logika. Black-box testing pada lima halaman aplikasi dan perangkat IoT menunjukkan seluruh fungsionalitas responsif terhadap berbagai skenario, termasuk validasi input kosong dan kredensial salah.

D. Hasil Pengujian Akurasi Sensor

Pengujian akurasi dilakukan 20 kali pengambilan data untuk tiap sensor. Ringkasan ditunjukkan pada Tabel 3.

TABEL 3

RINGKASAN PENGUJIAN AKURASI SENSOR (n = 20)

Sensor	Rentang Ref.	Error	Akurasi
Tegangan	12,2–13,8 V	7,02%	92,98%
Arus	≈ 6,34 A	7,94%	92,96%

Kedua sensor memberikan akurasi rata-rata di atas 92%, meskipun pada beberapa titik pengukuran arus ditemukan penyimpangan signifikan (error hingga 98,90%, kemungkinan akibat noise sesaat), yang mengindikasikan kalibrasi dan filtering sinyal masih dapat ditingkatkan.

E. Hasil Pengujian Keamanan

Pengujian npm audit mengidentifikasi 29 kerentanan pustaka pihak ketiga (1 backend, 28 mobile): 1 Critical (shell-quote), 4 High (WebSocket dan xmldom, berisiko DoS), dan 23 Moderate. Temuan level High dan Critical mengindikasikan perlunya pembaruan pustaka berkala sebelum implementasi skala luas.

F. Hasil User Acceptance Test (UAT)

UAT bersama mitra petani terhadap lima skenario menghasilkan status "OK" pada seluruh skenario (Tabel 4), tanpa keluhan fungsional.

TABEL 4

RINGKASAN HASIL USER ACCEPTANCE TEST

No	Skenario	Hasil	Sts.
1	Kemudahan penggunaan	Mudah dioperasikan mitra.	OK
2	Kejelasan informasi	Informasi mudah dipahami.	OK
3	Manfaat operasional	Bermanfaat untuk operasional harian.	OK
4	Kesesuaian kebutuhan	Fungsi sesuai kebutuhan mitra.	OK
5	Keandalan aplikasi	Digunakan baik selama pengujian.	OK

G. Hasil Pengujian Beban Pompa Air 125 W

Pengujian lapangan dengan pompa air 125 W menunjukkan sistem berhasil menyuplai daya untuk mengoperasikan pompa, membuktikan prototipe secara nyata mendukung pemanfaatan energi surya untuk operasional irigasi di wilayah *off-grid*.

H. Penyesuaian Teknis dan Penanganan Kendala Komunikasi Data

Selama implementasi dilakukan sejumlah penyesuaian teknis terhadap rancangan awal. Konfigurasi sensor terintegrasi INA219 yang direncanakan sebelumnya menghasilkan pembacaan kurang stabil, sehingga fungsi pengukuran dipisahkan menjadi sensor arus ACS712 dan sensor tegangan FZ0430 agar masing-masing bekerja optimal. Pada sisi komunikasi, parameter LoRa disetel pada *spreading factor* 12 dan *bandwidth* 62,5 kHz untuk memaksimalkan sensitivitas penerima, dengan konsekuensi laju data rendah yang dikompensasi melalui interval pengiriman 10 detik dan payload berformat ringkas. Kendala lain yang ditangani meliputi kebutuhan penyelarasan inisialisasi RTC saat modul kehilangan daya, pemulihan koneksi Wi-Fi dan MQTT pada gateway ketika jaringan terputus sementara, serta penempatan antena untuk menghindari penghalang fisik yang menurunkan RSSI dan SNR sehingga berpotensi meningkatkan *packet loss*.

I. Pembahasan

Faktor pendukung keberhasilan sistem lebih dominan dibanding faktor penghambat. Arsitektur komunikasi yang mengintegrasikan LoRa, gateway ESP32, MQTT, dan server/cloud memungkinkan data hasil monitoring dikirim secara otomatis hingga dapat ditampilkan pada aplikasi monitoring [27]–[30].

Meski demikian, ditemukan faktor penghambat: ketergantungan pada koneksi internet di sisi gateway, potensi *packet loss* akibat penghalang fisik pada LoRa, akurasi sensor yang masih dapat ditingkatkan melalui kalibrasi lanjutan, serta performa PLTS yang secara alami dipengaruhi cuaca.

Dibandingkan penelitian Kusuma dkk. [5] yang berfokus pada sistem berkapasitas besar (1.000 Wp), penelitian ini menunjukkan pendekatan modular berkapasitas lebih kecil (350 Wp) tetap fungsional untuk skala lahan yang lebih terbatas, sejalan dengan temuan Rahman dkk. [6] mengenai keunggulan efisiensi biaya PLTS jangka panjang. Kontribusi utama penelitian ini adalah perancangan dan integrasi sistem PLTS *off-grid* dengan arsitektur monitoring berbasis IoT, komunikasi

LoRa, gateway ESP32, dan konektivitas MQTT yang memungkinkan data dikirim dari perangkat keras hingga server secara *real-time*.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan merakit prototipe PLTS *off-grid* 350 Wp sebagai sumber daya pompa air irigasi, merancang arsitektur perangkat keras dan perangkat lunak sistem monitoring berbasis IoT, mengonfigurasi komunikasi LoRa antara node sensor dan gateway ESP32, serta mengintegrasikan gateway ESP32 dengan server/cloud melalui protokol MQTT sehingga data monitoring dapat ditampilkan pada aplikasi secara *real-time*. Rantai komunikasi dari perangkat keras hingga server terbukti berjalan sesuai rancangan sehingga parameter tegangan, arus, dan daya dapat dipantau secara *real-time* selama koneksi internet tersedia. Pengujian white-box menunjukkan 100% jalur logika berhasil dieksekusi, seluruh skenario black-box testing dan User Acceptance Test (UAT) berstatus "OK", serta akurasi pengukuran mencapai 92,98% untuk tegangan dan 92,96% untuk arus. Pengembangan selanjutnya disarankan mencakup penambahan Battery Management System (BMS), Automatic Transfer Switch (ATS), optimalisasi komunikasi LoRa, penambahan sensor lingkungan, penerapan analitik prediktif berbasis *machine learning*, integrasi notifikasi pesan instan, serta pembaruan keamanan perangkat lunak secara berkala.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ir. Agus Virgono, M.T. dan Randy Erfa Saputra, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing, Program Studi S1 Teknik Komputer Universitas Telkom, serta mitra petani yang berpartisipasi dalam survei dan UAT penelitian ini.

REFERENSI

[1] M. Miyasto, "Strategi ketahanan pangan nasional guna meningkatkan kemandirian dan daya saing ekonomi dalam rangka ketahanan nasional," *Jurnal Kajian Lemhannas RI*, vol. 17, pp. 17–30, Mar. 2014.

[2] A. K. Sari, "Analisis kebutuhan air irigasi untuk lahan persawahan Dusun To'pongo Desa Awo Gading Kecamatan Lamasi," *PENA TEKNIK: Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Teknik*, vol. 4, no. 1, pp. 47–51, Mar. 2019.

[3] R. Rahmansah dan B. Rauf, "Penerapan sumur bor sistem pipa konservasi air tanah (pipa imbuh)," *Seminar Nasional Fakultas Teknik Universitas Negeri Makassar*, 2024.

[4] S. Sulkarnain, Z. Zulkieflimansyah, dan A. Yamin, "Implementasi kebijakan pemanfaatan sumur bor sebagai upaya mengatasi gagal panen," *JIIP – Jurnal Ilmiah Ilmu Pendidikan*, vol. 7, no. 10, pp. 12309–12319, 2024.

[5] I. K. B. Kusuma, C. G. I. Partha, dan I. W. Sukerayasa, "Perancangan sistem pompa irigasi PLTS untuk Subak Semaagung," *Jurnal SPEKTRUM*, vol. 6, no. 3, pp. 102–109, 2019.

[6] M. A. Rahman, M. S. Islam, dan M. R. Karim, "Life cycle costs comparison between solar, diesel and grid powered irrigation pumps," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 54, 2022.

[7] N. Kumar, A. Singh, dan R. K. Sharma, "Economic viability of solar irrigation pumps," *Educational Administration: Theory and Practice*, vol. 30, no. 4, 2024.

[8] C. S. Guno dan C. B. Agaton, "Socio-economic and environmental analyses of solar irrigation systems," *Sustainability*, vol. 14, no. 11, 2022.

[9] L. Qomaria dan Sudarti, "Optimalisasi sistem solar cell untuk pompa air pertanian," *Jurnal Penelitian Fisika dan Terapannya (Jupiter)*, vol. 2, no. 2, pp. 58–65, 2021.

[10] N. Akhiriyanto, "Rancang bangun sistem pemanenan energi terbarukan off-grid," *Jurnal Cahaya Mandalika*, 2023.

[11] D. Sahidin et al., "Perancangan dan pemodelan PLTS off-grid dengan penyimpanan energi hibrida," *Jurnal Riset Rekayasa Elektro*, vol. 7, no. 1, 2023.

[12] E. Prasetio, "Analisis operasional pompa air sentrifugal dengan suplai diesel dan tenaga surya," Skripsi, Politeknik Negeri Bali, 2025.

[13] International Electrotechnical Commission, *IEC 61724-1: Photovoltaic System Performance Monitoring*, 2021.

[14] M. Mahalakshmi, *8051 Microcontroller Architecture, Programming and Application*, 1st ed., 2012.

[15] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors*, 5th ed., Springer, 2016.

[16] E. H. Ibraheam dan S. R. Aslan, "Solar photovoltaic water pumping system: A review," *Diagnostyka*, vol. 24, no. 2, 2023.

[17] M. M. Haque dan M. Ashik-E-Rabbani, "IoT-enabled solar-powered smart irrigation," 2025.

[18] A. R. Al-Ali, "IoT-solar energy powered smart farm irrigation system," *Alexandria Engineering Journal*, 2019.

[19] Kementerian ESDM RI, *Peraturan Menteri ESDM Nomor 49 Tahun 2018 tentang Penggunaan Sistem PLTS Atap oleh Konsumen PT PLN (Persero)*. Jakarta: KESDM, 2018.

[20] N. A. Handayani and D. Ariyanti, "Potency of Solar Energy Applications in Indonesia," *Int. J. Renew. Energy Dev.*, vol. 1, no. 2, pp. 33–38, 2012.

[21] K. H. Khwee, "Pengaruh temperatur terhadap kapasitas daya panel surya (Studi kasus: Pontianak)," *J. ELKHA*, vol. 5, no. 2, pp. 23–25, 2013.

[22] V.-V. Stoica, A.-V. Pălăcean, D.-C. Trancă, and F.-A. Stancu, "Open-Source Smart Wireless IoT Solar Sensor," *Applied Sciences*, vol. 15, no. 11059, pp. 1–33, 2025.

[23] J. Li, B. Moeini, S. Nejati, M. Sabetzadeh, and M. McCallen, "A Lean Simulation Framework for Stress Testing IoT Cloud Systems," *IEEE Transactions on Software Engineering*, pp. 1–20, 2024.

[24] M. Stefancich, L. Simpson, and M. Chiesa, "Automatic outdoor monitoring system for photovoltaic panels," *Review of Scientific Instruments*, vol. 87, no. 055104, pp. 1–9, 2016.

[25] A. Fennessy et al., "Suitability of Existing Photovoltaic Degradation Models for Agrivoltaic Systems," *Energies*, vol. 18, no. 1937, 2025.

[26] A. Sudarmaji, A. Margiwiyatno, P. H. Kuncoro, and Saparso, "Listrik Tenaga Surya Mandiri (Off-Grid) untuk Kontrol Irigasi Tetes pada Budidaya Sayuran di Desa Sirau," *JPKMI*, vol. 3, no. 2, 2022.

[27] N. Kumar, N. Akkamahadevi, S. Kumar, and Harish, "LoRa Based Photovoltaic Solar Energy Monitoring System," *IJERT*, vol. 11, no. 3, 2022.

[28] Q. Ziyuan, D. R. Thinesh, V. Ayyalusamy, B. Sivaneasan, K. T. Tan, and K. J. Tseng, "A LoRaWAN-based Solar PV Condition Monitoring System," *Singapore Institute of Technology*, 2023.

[29] B. H. Hameed and S. Kurnaz, "Secure Low-Cost Photovoltaic Monitoring System Based on LoRaWAN Network and Artificial Intelligence," *Discov Computing*, vol. 27, no. 36, 2024.

[30] Z. E. Dallalbashi, S. Alhayali, M. J. Mnati, and A. A. Alhayali, "Low-cost battery monitoring circuit for a photovoltaic system based on LoRa/LoRaWAN network," *IJEECS*, 2023.

[31] B. Dilla, B. Widi, S. Wilyanti, A. Jaenul, Z. M. Antono, and A. Pangestu, "Implementasi Solar Charge Controller untuk Pengisian Baterai Menggunakan Sumber Energi Hybrid pada Sepeda Motor Listrik," *Jurnal Edukasi Elektro*, vol. 6, no. 2, pp. 128–135, Nov. 2022.

[32] H. Pepliński, *Ship and Mobile Offshore Unit Automation*, 2019.