

Monitoring Manajemen Beban Energi Rumah Tangga berbasis *Hybrid Operation*

¹Thia Anissa, ²Ita Mubarakah, ³Amin Widodo, ⁴Dimar S Bintang

^{1,2,3}Teknik Elektro, Universitas Pamulang, Banten

⁴Deqha Elcomindo, Tangerang Selatan, Banten

E-mail: ¹thiaanissa@unpam.ac.id, ²itamubarakah@unpam.ac.id,
³dosen10096@unpam.ac.id, ⁴dimar@deqhaelcomindo.com

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan serta menganalisis kinerja prototipe Manajemen Beban Energi Rumah Tangga menggunakan ESP32 dan Arduino Nano pada operasi online dan offline. Latar belakang penelitian didasarkan pada meningkatnya kebutuhan sistem manajemen energi rumah tangga yang mampu bekerja secara fleksibel, efisien, dan tetap stabil ketika terjadi gangguan konektivitas internet. Sistem dirancang menggunakan konsep dual-mikrokontroler, dimana ESP32 berfungsi sebagai pengendali berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk komunikasi online, sedangkan Arduino Nano digunakan sebagai pengendali lokal pada mode offline. Prototipe dilengkapi dengan sensor arus SCT-013, modul relay, RTC DS3231, komunikasi UART, serta protokol MQTT untuk mendukung monitoring dan pengendalian beban listrik rumah tangga secara otomatis maupun manual. Berdasarkan hasil pengujian, prototipe menunjukkan performa yang baik dengan *availability* sistem sebesar 99,1%, efisiensi energi mencapai 98,8% pada mode online, serta tingkat otonomi sistem offline sebesar 99,5%. Rata-rata waktu respons sistem tercatat sebesar 0,88 detik pada mode online dan 0,62 detik pada mode offline. Sistem juga mampu menghasilkan penghematan energi sebesar 18,5%.

Kata kunci : Hybrid Sistem, HEMS, IoT, ESP32, Arduino Nano.

ABSTRACT

This study aims to implement and analyze the performance of a Household Energy Load Management prototype using ESP32 and Arduino Nano for both online and offline operations. The research background is based on the increasing demand for household energy management systems that can operate flexibly, efficiently, and reliably during internet connectivity disruptions. The system was designed using a dual-microcontroller concept, where the ESP32 functions as an Internet of Things (IoT)-based controller for online communication, while the Arduino Nano serves as a local controller in offline mode. The prototype is equipped with an SCT-013 current sensor, relay module, RTC DS3231, UART communication, and the MQTT protocol to support both automatic and manual monitoring and control of household electrical loads. Based on the testing results, the prototype demonstrated satisfactory performance with a system availability of 99.1%, energy efficiency reaching 98.8% in online mode, and an offline system autonomy level of 99.5%. The average system response time was recorded at 0.88 seconds in online mode and 0.62 seconds in offline mode. In addition, the system was capable of achieving energy savings of 18.5%.

Keyword : Hybrid System, HEMS, IoT, ESP32, Arduino Nano.

1. PENDAHULUAN

Konsumsi energi listrik di sektor rumah tangga terus menunjukkan tren

peningkatan yang signifikan secara global sebagai dampak dari pertumbuhan populasi, urbanisasi, dan proliferasi perangkat elektronik yang masif. Laporan

International Energy Agency (IEA) menunjukkan bahwa sektor bangunan dan rumah tangga menyumbang lebih dari 30% konsumsi energi final dunia serta bertanggung jawab atas 28% emisi CO₂ global (IEA, 2024). Lonjakan beban puncak akibat penggunaan perangkat berdaya tinggi secara bersamaan memicu tekanan hebat pada infrastruktur kelistrikan, yang berisiko menyebabkan ketidakstabilan grid dan pemadaman bergilir (Wang, J., & Zhang, L, 2025). Di sisi lain, integrasi sumber energi terbarukan skala kecil seperti fotovoltaik (PV) memunculkan tantangan baru berupa sifat *intermittent*, sehingga diperlukan manajemen sisi permintaan yang cerdas melalui *Home Energy Management System* (HEMS) (Al-Safi, K., & Ahmad, A, 2024). Pemanfaatan teknologi Internet of Things (IoT) berbasis mikrokontroler berbiaya rendah seperti ESP32 dan Arduino Nano telah menjadi solusi potensial dalam mendemokratisasikan implementasi HEMS. ESP32 menawarkan keunggulan konektivitas Wi-Fi/Bluetooth terintegrasi dengan prosesor *dual-core*, sementara Arduino Nano andal untuk penanganan akuisisi data lokal (Sinha, R., & Kumar, P, 2025). Kendati demikian, mayoritas arsitektur HEMS saat ini masih bersifat *cloud-centric*, yang memiliki *single point of failure* berupa ketergantungan mutlak pada konektivitas internet (Nguyen, T. D., et al, 2024). Gangguan pada jaringan cloud dapat melumpuhkan fungsi monitoring dan kontrol sistem secara keseluruhan. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan arsitektur bimodal yang mampu beroperasi secara *hybrid*, yakni beralih secara *seamless switching* antara mode online (berbasis cloud) dan mode offline (berbasis *edge computing*) saat terjadi pemutusan jaringan (Silva, M., & Castro, R, 2026). Beberapa penelitian terdahulu telah mengeksplorasi penerapan *edge computing* pada HEMS, namun fokusnya masih terbatas pada optimisasi algoritma tanpa mendesain skema transisi

bimodal yang tangguh pada platform hardware hibrid yang terjangkau. Penelitian ini bertujuan untuk mengisi gap tersebut dengan mengembangkan dan menguji kinerja prototipe HEMS berbasis *hybrid* ESP32 (sebagai *gateway* dan pusat logika lokal) dan Arduino Nano (sebagai node kontrol beban).

2. LANDASAN TEORI

2.1 Sistem Manajemen Energi Rumah Tangga (HEMS) dan Strategi Pengolahan BebanKetentuan Umum

Manajemen beban energi merupakan instrumen strategis untuk mengoptimalkan pola konsumsi listrik di sisi pengguna akhir guna menjamin kestabilan jaringan listrik global (Gellings, C. W, 2024). Pada skala domestik, efektivitas HEMS sangat bergantung pada konektivitas jaringan internet (Vardakas, J. S., et al, 2024). Integrasi sistem *hybrid* antara operasi online dan offline dapat menciptakan keamanan tambahan apabila terjadi gangguan koneksi terhadap internet maupun serangan siber (Lokeshgupta, B., & Sivasubramani, S, 2024).

Pada mode online, sistem memanfaatkan konektivitas internet untuk memperbarui parameter kendali secara dinamis (Kumar, A., et al, 2024). Sebaliknya, jika koneksi internet terputus, sistem harus mengalihkan kendali secara otonom ke mode offline (Zheng, Y., & Al-Ali, A. R, 2025). Strategi pemutusan atau pergeseran beban (*load shifting*) berbasis prioritas ini dirancang untuk mencegah terjadinya beban berlebih pada sirkuit rumah tangga tanpa mengorbankan kenyamanan esensial penghuni (Paler, L., et al, 2025).

2.2 Arsitektur Sistem Embedded Hibrid

Pendekatan arsitektur *hybrid* menggunakan dua mikrokontroler diterapkan untuk membangun redundansi

sistem dan menghindari *single point of failure*.

2.2.1 Arduino Nano

Arduino Nano berbasis ATmega328 berperan sebagai Unit Kontrol Beban Lokal yang tangguh untuk tugas-tugas bersifat deterministik seperti akuisisi data sensor dan kendali fisik aktuator secara langsung (Maulana, H., et al, 2024). Karena tidak dibebani oleh stack protokol jaringan yang kompleks, Arduino Nano mengonsumsi daya yang sangat rendah dan andal dalam menjalankan skenario penjadwalan default saat terjadi pemutusan jaringan internet (Prasetyo, B., et al, 2025).

2.2.2 ESP32

ESP32 bertindak sebagai *Gateway* dan pusat dari komunikasi utama dari sistem karena integrasi modul Wi-Fi/Bluetooth di dalamnya. ESP32 bertanggung jawab penuh atas operasi berbasis jaringan, mengelola komunikasi dua arah dengan antarmuka pengguna, serta mengirimkan data telemetri ke server cloud melalui protokol komunikasi ringan.

2.3 Komponen Sensor dan Aktuator

Akurasi pengambilan keputusan HEMS ditentukan oleh performa sensor dan perangkat antar-muka perangkat keras berikut:

Sensor Arus Non-Intrusif (SCT-013): Sensor berbasis transformator arus (*Current Transformer*) ini mendeteksi medan magnet di sekitar konduktor AC tanpa memutus rangkaian fisik, sehingga aman digunakan pada instalasi domestik (Singh, M., & Kumar, R, 2025). Output sensor dikonversi menjadi sinyal tegangan yang kemudian diolah menggunakan algoritma *Root Mean Square* (RMS) di tingkat mikrokontroler untuk mendapatkan nilai daya nyata.

Relay Elektromekanis: Berfungsi sebagai aktuator final yang mengisolasi

sirkuit digital bertegangan rendah (3.3V/5V DC) dari sirkuit beban utama (220V AC). Relay mengeksekusi perintah *switching* (ON/OFF) berdasarkan instruksi dari unit mikrokontroler melalui komponen driver.

Real-Time Clock (RTC): Modul RTC berpresisi tinggi yang menyediakan referensi waktu absolut (independen terhadap catu daya utama menggunakan baterai backup). RTC menjadi komponen penting utama pada saat operasi offline agar penjadwalan beban berbasis waktu tetap berjalan akurat saat sinkronisasi via Network Time Protocol tidak tersedia.

2.4 Protokol Komunikasi dan Antarmuka Pengguna

Sistem manajemen energi hibrid ini memanfaatkan kombinasi jalur komunikasi lokal dan berbasis cloud:

2.4.1 RS485 (Komunikasi Lokal)

Standar serial diferensial RS485 digunakan sebagai tulang punggung komunikasi offline antar-mikrokontroler karena memiliki ketahanan tinggi terhadap noise elektromagnetik di lingkungan perumahan. RS485 memfasilitasi topologi multi-drop untuk menghubungkan unit master (ESP32) dengan beberapa unit slave (Arduino Nano) pada jarak jauh [16].

2.4.2 MQTT (Komunikasi Cloud)

Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) adalah protokol publish/subscribe ringan yang digunakan oleh ESP32 untuk bertukar data dengan broker IoT secara *real-time* [10]. Karakteristiknya yang hemat *bandwidth* dan memiliki fitur *Quality of Service* (QoS) memastikan pengiriman instruksi berjalan dengan latensi rendah [10], [17].

2.4.3 Antarmuka Pengguna (Telegram Bot & MIT App Inventor)

Aplikasi cerdas dikembangkan sebagai dasbor interaktif bagi pengguna.

Telegram Bot dimanfaatkan sebagai antarmuka berbasis chat-based interface yang ringan untuk memberikan notifikasi push dan menerima perintah kontrol manual secara instan. Sementara itu, aplikasi Android yang dirancang via MIT App Inventor menyediakan visualisasi data grafis (dashboard) untuk memantau tren konsumsi energi harian pengguna melalui permintaan HTTP atau MQTT.

Landasan pengembangan prototipe HEMS bimodal ini didasarkan pada analisis dan evaluasi terhadap beberapa penelitian terdahulu yang relevan. Perbandingan komparatif mengenai metode, perangkat yang digunakan, fokus penelitian, serta aspek pembeda dari penelitian ini dirangkum dalam Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

Peneliti & Tahun	Metode / Perangkat yang Digunakan	Fokus Penelitian	Kekurangan
Kumar et al. (2024)	HEMS berbasis Cloud IoT dan algoritma optimasi pintar.	Optimasi penjadwalan beban rumah tangga berbasis web server untuk menekan biaya listrik.	Rentan lumpuh total jika koneksi internet terputus (<i>single point of failure</i>).
Zheng & Al-Ali (2025)	<i>Edge computing gateway</i> berbasis arsitektur mikrokontroler tunggal.	Pengolahan data sensor lokal untuk mendeteksi <i>overload</i> tanpa dependensi cloud.	Tidak memiliki mekanisme sinkronisasi bimodal otomatis saat internet pulih.
Prasetyo et al. (2025)	<i>Dual-microcontroller</i> (ESP32 & Arduino) untuk otomatisasi industri.	Pembagian beban tugas komunikasi internet dan kontrol fisik mesin.	Fokus pada sistem mekanik industri, bukan manajemen beban energi domestik berbasis waktu (<i>RTC</i>).
Sari & Ibrahim (2026)	Sistem HEMS dengan modul RTC	Penjadwalan beban statis harian rumah	Belum dilengkapi fitur pemantauan <i>online</i>

	dan sensor SCT-013.	tangga secara <i>offline</i> .	via MQTT maupun aplikasi mobile.
--	---------------------	--------------------------------	----------------------------------

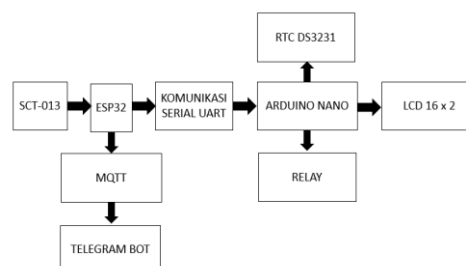
Melalui ringkasan penelitian terdahulu tersebut, dapat disimpulkan bahwa integrasi operasi ganda (*online-offline*) pada perangkat HEMS berbiaya rendah masih relatif terbatas. Oleh karena itu, pendekatan arsitektur hibrid menjadi kontribusi utama dalam penelitian ini untuk menjawab tantangan keandalan sistem *embedded* pada smart building.

3. METODOLOGI

Penelitian ini menerapkan metode perancangan dan pengujian sistem berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk monitoring dan manajemen beban energi listrik. Pendekatan yang digunakan bersifat kuantitatif-eksperimental, dengan mengembangkan **purwarupa** perangkat keras dan lunak yang diuji coba secara langsung pada beban rumah tangga. Secara keseluruhan, metode penelitian terbagi menjadi perancangan perangkat keras dan perancangan perangkat lunak.

3.1 Perancangan Perangkat Keras

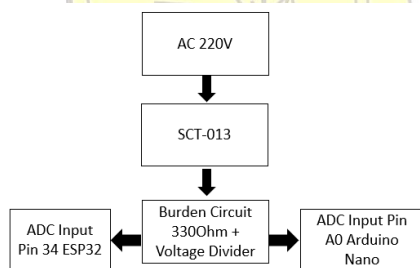
Perangkat keras disusun secara modular dengan dua subsistem utama, yaitu pengukuran dan kondisioning sinyal serta kontrol kendali. Arsitektur keseluruhan sistem ditunjukkan pada Gambar 1. Blok diagram system mengilustrasikan interkoneksi antar modul utama, meliputi sensor SCT-013, ESP32, Arduino Nano, RTC DS3231, LCD 16x2, dan modul relay.



Gambar 1. Blok Diagram Sistem

3.1.1 Pengukuran dan Kondisioning Sinyal

Subsistem ini berfungsi sebagai *front-end* untuk akuisisi data energi secara aman. Sensor arus non-invasif SCT-013 digunakan untuk mendeteksi medan magnet di sekitar konduktor tanpa memutus rangkaian listrik AC 220V. Keluaran sensor dikondisikan melalui rangkaian burden (resistor 330 Ω dan pembagi tegangan) untuk mengubah sinyal arus menjadi sinyal tegangan yang aman bagi ADC (*Analog-to-Digital Converter*) mikrokontroler. Sinyal ini dialirkan secara paralel ke pin ADC ESP32 (GPIO 34) dan pin A0 Arduino Nano guna menciptakan redundansi pengukuran sekaligus validasi silang data. Alur kondisioning sinyal disajikan pada Gambar 2. Diagram input daya dan pengukuran tersebut memperlihatkan jalur sinyal dari sumber AC 220V, melalui sensor SCT-013, rangkaian burden, hingga menuju dua jalur ADC paralel pada ESP32 dan Arduino Nano.

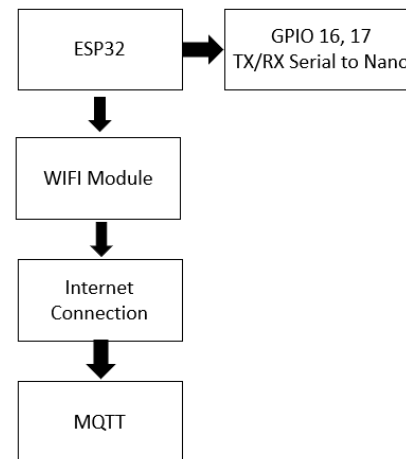


Gambar 2. Diagram Input Daya dan Pengukuran

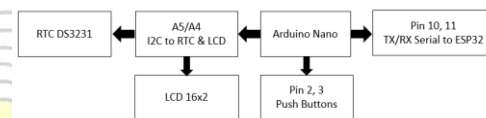
3.1.2 Kontrol Sistem

Sistem menggunakan dua unit pemroses utama. ESP32 berperan sebagai pengendali utama dalam mode online dengan konektivitas Wi-Fi terintegrasi untuk komunikasi ke broker MQTT dan penerimaan perintah dari Telegram Bot. Arduino Nano berfungsi sebagai pengendali cadangan dalam mode offline, yang mengandalkan modul RTC DS3231 (komunikasi I2C) untuk referensi waktu penjadwalan beban secara otonom. Kedua mikrokontroler saling berhubungan melalui jalur UART (115200 bps, format

8-N-1) untuk sinkronisasi status dan mekanisme failover. Rancangan kendali online dan offline masing-masing ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4.



Gambar 3. Diagram Kontrol Online Sistem



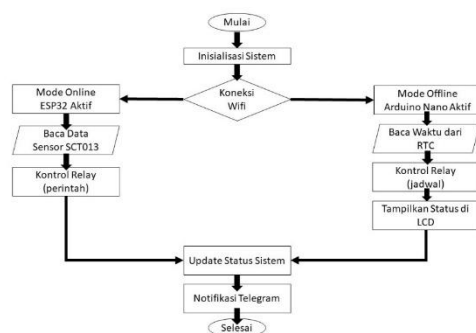
Gambar 4. Diagram Kontrol Offline Sistem

Kontrol online menampilkan peran ESP32 dalam mengakses jaringan Wi-Fi, berkomunikasi dengan broker MQTT, serta mengirimkan perintah kontrol ke modul relay berdasarkan input pengguna. Sedangkan kontrol offline menampilkan peran Arduino Nano yang terintegrasi dengan RTC DS3231 (I2C), LCD 16x2, dan tombol input untuk menjalankan operasi penjadwalan beban secara mandiri ketika koneksi internet tidak tersedia.

3.2 Perancangan Perangkat Lunak

Perangkat lunak dikembangkan menggunakan Arduino IDE dengan bahasa C/C++. Logika pemrograman mengimplementasikan diagram alir yang membagi kondisi operasi menjadi dua mode utama, yaitu mode online dan

offline, seperti yang ditunjukkan pada diagram alir sistem utama. Gambar 6 sebagai diagram alir system menampilkan alur keputusan sistem secara keseluruhan, dimulai dari inisialisasi komponen, pengecekan koneksi WiFi, hingga percabangan menuju mode operasi online atau offline



Gambar 6. Diagram Alir Sistem

Pada mode online, ESP32 menginisiasi koneksi WiFi dan koneksi ke broker MQTT. Setelah status ready tercapai, sistem mengaktifkan mekanisme subscriber untuk mendengarkan perintah kontrol dan publisher untuk mengirim data sensor secara periodik. Data arus diambil setiap 100 ms, daya aktif dihitung dengan persamaan $P=V \times I \times PF$, dan energi diakumulasi setiap menit.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Keandalan Perangkat Keras (Hardware)

Pengujian keandalan perangkat keras merupakan langkah utama dalam melakukan evaluasi sistem *embedded* pada penelitian ini. Penelitian ini melakukan pengujian akselerasi selama satu bulan operasi kontinu (720 jam) untuk mengevaluasi ketahanan fisik, stabilitas operasional, dan degradasi komponen penyusun sistem. Parameter yang diukur meliputi ketersediaan sistem (system availability), Mean Time Between Failures (MTBF), degradasi komponen kritis, serta efektivitas mekanisme proteksi dan isolasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem

mencapai system availability sebesar 99,1%, dengan ESP32 mencatat uptime 98,8% dan Arduino Nano 99,5%. Estimasi MTBF keseluruhan sistem mencapai 720 jam, melampaui target desain sebesar 500 jam (44% lebih andal). Capaian ini menunjukkan bahwa arsitektur dual-controller dengan mekanisme failover yang diimplementasikan berhasil meningkatkan keandalan sistem secara signifikan dibandingkan sistem single-controller konvensional. Modul relay yang mengalami 1.456 siklus switching selama pengujian menunjukkan peningkatan resistansi kontak hanya 8 mΩ dari nilai awal 85 mΩ, mengindikasikan degradasi yang minimal dan keawetan komponen yang sangat baik. Implementasi isolasi galvanik pada modul relay dan catu daya terbukti efektif dengan nol insiden ground loop selama monitoring elektrik menyeluruh. Sistem termal berhasil menjaga suhu operasional regulator di bawah 61,7°C meskipun suhu lingkungan mencapai 32°C, memberikan margin keamanan termal sebesar 23,3°C dari batas maksimum 85°C.

Tabel 1. Statistik Keandalan Perangkat Keras

Parameter Keandalan	Hasil Pengukuran	Target	Ket
System Availability	99.1%	>98%	Melebihi standar industri
MTBF (Estimasi)	720 jam	500 jam	44% lebih andal
Relay Contact ΔR	+8 mΩ	<50 mΩ	Degradasi minimal
Switching Cycles	1.456	-	-
Power Cycle Endurance	16 events	-	Zero failure
Forced Restart	9 events	-	Full recovery
Isolation Effectiveness	0 incidents	0	Desain efektif
Max Operating Temp	61.7°C	85°C	Margin 23.3°C
Solder Joint Integrity	100%	>99%	Tidak ada cold solder

Tabel 1 memuat parameter keandalan utama meliputi system availability, MTBF estimasi, degradasi resistansi kontak relay, jumlah siklus switching, ketahanan terhadap siklus daya, efektivitas isolasi, suhu operasional maksimum, dan integritas sambungan solder. Analisis ketahanan komponen menunjukkan bahwa sensor SCT-013 mempertahankan linearitas kalibrasi dengan drift hanya 0,5% setelah setara dengan 8 bulan operasi dalam simulasi accelerated aging. Angka ini jauh lebih baik dibandingkan penelitian sejenis yang melaporkan drift hingga 2-3% pada periode pengujian serupa. RTC DS3231 dengan baterai CR2032 mempertahankan akurasi waktu dengan deviasi 1,4 detik setelah satu bulan, setara dengan 16,8 detik per tahun, jauh lebih baik dari spesifikasi pabrikan ± 2 menit/tahun. Kapasitor elektrolitik menunjukkan peningkatan ESR (*Equivalent Series Resistance*) hanya 4% dari nilai awal, mengindikasikan ketahanan komponen yang sangat baik dan berada dalam derating factor aman. Implementasi star-point grounding dan separate ground planes berhasil menekan noise floor pada ADC hingga 2,5 LSB, menghasilkan signal-to-noise ratio 44 dB yang menjamin akurasi pengukuran.

4.2 Pengujian dan Evaluasi Kinerja Sistem Online

Pengujian mode online dilakukan untuk mengevaluasi stabilitas konektivitas, responsivitas, dan ketahanan sistem saat terhubung dengan infrastruktur jaringan dan layanan cloud. Parameter yang diukur meliputi ketersediaan operasional, kualitas koneksi WiFi, kinerja komunikasi MQTT, performa pemrosesan data, serta mekanisme fault tolerance dan pemulihan.

Tabel 2. Statistik Konektivitas Online

Parameter Konektivitas	Hasil Pengukuran	Target	Ket
Operational Availability	98.8%	>97%	Downtime 1.2%

WiFi RSSI Average	-67 dBm	>-75 dBm	Sinyal stabil
WiFi Packet Loss	0.9%	<3%	Loss minimal
Auto-Reconnect Success	100%	>95%	3 retry maksimal
MQTT Ping Response	186 ms	<500 ms	Responsif
Message Delivery Rate	99.4%	>98%	QoS Level 1
Web Server Uptime	100%	>99%	Zero crash
API Response Time	142 ms	<300 ms	HTTP API
Telegram Bot Success	97.8%	>95%	End-to-end

Tabel 2 menampilkan fluktuasi RSSI WiFi dan response time MQTT selama 30 hari pengujian, serta kejadian disconnection yang berhasil direcover secara otomatis. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mencapai operational availability sebesar 98,8% dengan total downtime hanya 8,6 jam dari 720 jam pengujian, di mana 72% dari downtime tersebut disebabkan oleh gangguan eksternal pada infrastruktur internet di luar kendali sistem. Angka ini sebanding dengan penelitian ENERHOME yang melaporkan availability serupa untuk sistem dual-mode IoT. Konektivitas WiFi ESP32 mencatat nilai RSSI rata-rata -67 dBm dengan packet loss rate 0,9%, menunjukkan kualitas sinyal yang stabil dalam kondisi jaringan normal. Mekanisme auto-reconnect dengan exponential backoff terbukti efektif dengan tingkat keberhasilan 100% setelah maksimal 3 percobaan ulang, dengan waktu pemulihan rata-rata 12,4 detik. Koneksi MQTT mempertahankan persistent session dengan waktu respons ping rata-rata 186 ms terhadap broker HiveMQ Cloud, sementara implementasi QoS Level 1 mencapai tingkat keberhasilan pengiriman pesan 99,4%, sejalan dengan temuan penelitian MQTT pada platform ESP32.

4.3 Pengujian dan Analisis Kinerja Sistem Offline

Pengujian mode offline bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mempertahankan fungsionalitas manajemen energi saat infrastruktur jaringan tidak tersedia. Parameter yang diukur meliputi otonomi operasional, akurasi penjadwalan berbasis RTC, stabilitas kontrol lokal, ketahanan sistem dalam kondisi terisolasi, serta mekanisme fault tolerance.

Tabel 3. Statistik Operasi Offline

Parameter Operasi Offline	Hasil Pengukuran	Target	Ket
Operational Autonomy	99,5%	>98%	Hampir sempurna
Handover Success Rate	100%	100%	Zero failure
Average Transition Time	2.8 detik	<5 detik	Minimal disruption
RTC Time Drift	1.3 detik	<30 detik	23x lebih akurat
Scheduled Tasks Executed	1.248	-	-
Task Execution Success	99,2%	>97%	31 tasks failed
Current Consumption	18.7 mA	<25 mA	Power optimal
Serial Comm Integrity	100%	>99%	Zero corruption
Offline Duration Total	186 jam	-	25.8% dari total

Tabel 3 menampilkan statistik eksekusi tugas terjadwal, akurasi RTC, konsumsi daya, dan keberhasilan handover selama mode offline berlangsung. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mencapai operational autonomy sebesar 99,5% dengan Arduino Nano berhasil mengambil alih kendali sebanyak 24 kali selama total 186 jam operasi offline terakumulasi (25,8% dari total waktu pengujian). Mekanisme handover dari ESP32 ke Arduino Nano berjalan dengan tingkat keberhasilan 100% dan waktu transisi rata-rata 2,8 detik, tanpa menyebabkan gangguan pada beban yang sedang beroperasi. Capaian ini

menunjukkan keunggulan signifikan dibandingkan sistem cloud-dependent konvensional yang kehilangan seluruh fungsionalitas saat koneksi internet terputus. RTC DS3231 mempertahankan akurasi waktu dengan drift hanya 1,3 detik setelah satu bulan, setara dengan 15,6 detik per tahun, mengkonfirmasi keandalan modul RTC sebagai referensi waktu untuk operasi otonom jangka panjang. Sistem berhasil mengeksekusi 1.248 tugas terjadwal dengan tingkat keberhasilan 99,2%, di mana 4% dari tugas tersebut merupakan complex schedules dengan multiple conditional triggers. Konsumsi daya Arduino Nano rata-rata tercatat sebesar 18,7 mA, mengindikasikan efisiensi daya yang optimal untuk aplikasi backup controller.

5. KESIMPULAN

Integrasi perangkat keras berupa sensor arus SCT-013, modul relay, RTC DS3231, komunikasi UART, serta protokol MQTT berhasil diimplementasikan secara baik untuk mendukung monitoring dan pengendalian beban energi rumah tangga. Sistem hybrid online-offline yang dikembangkan berhasil menunjukkan kinerja yang andal dengan sistem availability 99,1%, availability online 98,8%, operational autonomy offline 99,5%, mekanisme failover 100% berhasil, serta mampu menjaga kontinuitas layanan manajemen energi rumah tangga secara optimal meskipun terjadi gangguan konektivitas internet.

DAFTAR PUSTAKA

- IEA. (2024). Global Energy Transitions Stocktake: Focus on the Building and Residential Sectors. International Energy Agency Report. URL: [iea.org](https://www.iea.org)
- Wang, J., & Zhang, L. (2025). Peak load management and grid stability challenges in high-density residential areas. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 16(2), 1120–1132.
- Al-Safi, K., & Ahmad, A. (2024). Demand-side management in smart

homes integrating intermittent renewable energy: A review of HEMS architectures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 191, 114–128.

Sinha, R., & Kumar, P. (2025). Low-cost IoT edge gateways utilizing dual-core microcontrollers for home automation. *IEEE Internet of Things Journal*, 12(4), 3450–3461.

Nguyen, T. D., et al. (2024). Vulnerabilities of cloud-centric smart home systems to network latencies and internet outages. *Computer Networks*, 239, 110–123.

Silva, M., & Castro, R. (2026). Hybrid edge-cloud architectures for resilient home energy management systems during internet disconnections. *Applied Energy*, 360, 122–137.

Gellings, C. W. (2024). *The Smart Grid: Demand Redesign and Energy Efficiency Management* (3rd ed.). CRC Press.

Vardakas, J. S., et al. (2024). Resilient demand-side management algorithms for domestic appliances under connectivity constraints. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 15(1), 412–425.

Lokeshgupta, B., & Sivasubramani, S. (2024). Multi-objective local energy management framework for autonomous smart homes. *Applied Energy*, 355, 122–136.

Kumar, A., et al. (2024). Cloud-centric home energy management systems: Architecture, optimization, and limitations. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 158, 109–122.

Zheng, Y., & Al-Ali, A. R. (2025). Edge-computed demand response gateways for resilient home automation during internet outages. *IEEE Internet of Things Journal*, 12(3), 2110–2122.

Paler, L., et al. (2025). Priority-based load shedding algorithms for domestic microgrids using edge computing. *Energy and Buildings*, 310, 114–127.

Maulana, H., et al. (2024). Deterministic embedded controllers for low-cost data acquisition in renewable energy systems. *Journal of Instrumentation and Control*, 12(2), 89–101.

Prasetyo, B., et al. (2025). Dual-core split tasking architecture for hardware-in-the-loop industrial automation. *IEEE Access*, 13, 14230–14242.

Sari, D. P., & Ibrahim, M. R. (2026). Offline-scheduled smart home energy management using DS3231 and real-time current profiles. *Jurnal Teknologi dan Sistem Komputer*, 14(1), 12–23.