Journal of Information Technology, Software Engineering and Computer Science
Website : https://ejournal.techcart-press.com/index.php/itsecs
E-ISSN 2962-0635
P-ISSN 2962-0538
Volume 3, Number 3, July 2025
DOI : **https://doi.org/10.58602/itsecs.v3i3.495**
Page 1-12

Aplikasi untuk Akuisisi Data Energi Surya Real-Time Berbasis ESP32 dan MQTT dengan Visualisasi Dashboard Web

Fauzan Natsir[1*], Abdurahman[2], Redo Abeputra Sihombing[3], Andi Dwi Pangestu[4], Triana Dewi Salma[5]
[1,2,3,4]Program Studi Teknik Informatika, Universitas Indraprasta PGRI, Indonesia
[5]Program Studi Informatika, Universitas LIA, Indonesia
[1*]fauzan.natsir@gmail.com, [2]abdjur05@gmail.com,[3]redoabe@gmail.com,
[4]andi.dwipangestu@gmail.com, [5]triana.salma@universitaslia.ac.id

Abstrak: Pemantauan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) skala kecil memerlukan akuisisi data yang kontinu agar penurunan kinerja, bayangan, dan gangguan kabel dapat dikenali lebih awal. Banyak sistem pemantauan berbiaya rendah bertumpu pada platform pihak ketiga yang membatasi kustomisasi tampilan, pengaturan alarm, dan pengolahan data turunan seperti energi dan emisi karbon. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan aplikasi akuisisi data energi surya real-time berbasis mikrokontroler ESP32 dan protokol MQTT dengan visualisasi dashboard berbasis web. Aplikasi dikembangkan dengan metode Extreme Programming melalui lima tahap: planning, design, coding, testing, dan release. Arsitektur terdiri atas sensor INA219 untuk tegangan, arus, dan daya, ESP32 sebagai penerbit data, broker MQTT, dan dashboard web yang melanggan data, dengan tujuh menu: Dashboard, Statistik, Energi & CO_2, Riwayat, Alarm, Koneksi, dan Pengaturan. Pengujian fungsional dilakukan pada mode simulasi yang membangkitkan data berformat sama dengan data perangkat. Seluruh fitur menampilkan data secara konsisten: satu sesi 17 sampel menghasilkan tegangan 14,52–15,01 V, arus 0,377–1,183 A, dan daya 5,47–17,76 W (rata-rata 11,10 W); riwayat menyimpan 127 baris; halaman koneksi mencatat latensi 28 ms dan sinyal Wi-Fi −59 dBm; alarm berstatus normal pada ambang 1–45 W. Nilai daya, energi, CO_2, dan biaya yang ditampilkan sesuai dengan hitungan ulang. Aplikasi ini memadukan statistik sesi, akumulasi energi, estimasi CO_2 dan biaya, riwayat berekspor CSV, serta diagnostik koneksi, kombinasi yang tidak dijumpai pada karya yang ditelaah. Validasi dengan perangkat keras dan panel surya di lapangan (akurasi sensor, latensi MQTT, kehilangan paket, dan kestabilan sistem), pengamanan MQTT, serta evaluasi usability menjadi tahap lanjutan.
Kata Kunci: Energi surya; ESP32; MQTT; Dashboard web; Akuisisi data real-time; Internet of Things

Abstract: Monitoring small-scale solar power plants requires continuous data acquisition so that performance degradation, shading, and cable faults can be detected early. Many low-cost monitoring systems rely on third-party platforms that limit dashboard customization, alarm configuration, and derived metrics such as energy and carbon emissions. This study designs and implements a real-time solar energy data acquisition application based on the ESP32 microcontroller and the MQTT protocol, with a web-based dashboard. The application was developed using Extreme Programming in five stages: planning, design, coding, testing, and

Fauzan Natsir : *Penulis Korespondensi
Copyright © 2025, Fauzan Natsir, Abdurahman, Redo Abeputra Sihombing, Andi Dwi Pangestu, Triana Dewi Salma.

Journal of Information Technology, Software Engineering and Computer Science
Website : https://ejournal.techcart-press.com/index.php/itsecs
E-ISSN 2962-0635
P-ISSN 2962-0538
Volume 3, Number 3, July 2025
DOI : **https://doi.org/10.58602/itsecs.v3i3.495**
Page 1-12

release. The architecture consists of an INA219 sensor for voltage, current, and power, an ESP32 as data publisher, an MQTT broker, and a web dashboard subscribing to the data through seven menus: Dashboard, Statistics, Energy & CO_2, History, Alarm, Connection, and Settings. Functional testing was carried out in a simulation mode that generates data in the same format as the device. All features displayed data consistently: one 17-sample session yielded a voltage of 14.52–15.01 V, a current of 0.377–1.183 A, and a power of 5.47–17.76 W (mean 11.10 W); the history stored 127 rows; the connection page recorded a 28 ms latency and a −59 dBm Wi-Fi signal; and the alarm stayed normal within the 1–45 W thresholds. The displayed power, energy, CO_2, and cost values matched recalculation. The application combines session statistics, energy accumulation, CO_2 and cost estimates, CSV-exportable history, and connection diagnostics, a combination not found in the reviewed works. Validation with real hardware and solar panels in the field (sensor accuracy, MQTT latency, packet loss, and system stability), MQTT security, and a usability evaluation is the next stage.
Keywords: Solar energy; ESP32; MQTT; Web dashboard; Real-time data acquisition; Internet of Things

1. PENDAHULUAN

Energi surya menjadi salah satu andalan transisi energi karena potensi radiasi matahari di wilayah tropis yang tinggi dan biaya modul fotovoltaik yang terus turun. Kebijakan Energi Nasional menargetkan porsi energi baru dan terbarukan sedikitnya 23% pada 2025 dan 31% pada 2050[1], dan pemerintah telah mengatur pemasangan PLTS atap yang terhubung dengan jaringan listrik[2]. Secara global, tenaga surya fotovoltaik menjadi penyumbang terbesar penambahan kapasitas energi terbarukan[3]. Seiring bertambahnya instalasi, kebutuhan untuk memantau kinerja pembangkit secara kontinu ikut meningkat, tidak hanya pada pembangkit besar tetapi juga pada PLTS kecil di kampus, sekolah, dan permukiman.

Kinerja PLTS dipengaruhi iradiasi, suhu, bayangan, dan kondisi kelistrikan. Gangguan seperti bayangan atau kabel terputus tampak sebagai penurunan daya yang sulit dibedakan penyebabnya tanpa data yang terekam terus-menerus[4]. Pembacaan manual pada alat ukur tidak menjawab kebutuhan ini karena tidak menyimpan riwayat dan tidak memberi peringatan dini. Selain itu, angka tegangan, arus, dan daya saja kurang bermakna bagi pengguna non-teknis; mereka lebih mudah memahami energi yang dihasilkan, penghematan biaya, dan emisi karbon yang terhindar. Dampaknya, instalasi kecil sering beroperasi tanpa pengawasan sampai penurunan hasil terlanjur besar.

Sejumlah penelitian telah membangun sistem pemantauan PLTS berbasis Internet of Things (IoT). Penulis sebelumnya memantau tegangan, arus, dan daya sistem surya dengan sensor INA219 dan ESP8266 yang mengirim data ke ThingSpeak serta mengendalikan beban melalui relai[5]. Mimouni dkk. memakai ESP32 dengan dua sensor INA219 yang mengirim data melalui MQTT ke ThingsBoard. He dkk. menerbitkan data ESP32 melalui MQTT ke broker pada Banana Pi dan menampilkannya dengan Node-RED[6], sedangkan Abu Radia dkk. memakai Mosquitto, InfluxDB, Node-RED, dan Grafana yang dilengkapi peringatan berbasis ambang[7]. Refly dkk. memakai ESP32 dengan tiga sensor INA219 dan ThingSpeak untuk memantau tiga panel secara bersamaan[8]. Evaluasi MQTT pada sistem IoT lain melaporkan latensi rata-rata sekitar 150 ms dan keberhasilan pengiriman 99,9% pada QoS 1[9].

Karya-karya tersebut menunjukkan bahwa kombinasi ESP32, INA219, dan MQTT layak dipakai untuk akuisisi data surya. Namun, visualisasinya umumnya bergantung pada platform generik yang berfokus pada grafik deret waktu. Fitur yang berguna bagi operator

Fauzan Natsir : *Penulis Korespondensi
Copyright © 2025, Fauzan Natsir, Abdurahman, Redo Abeputra Sihombing, Andi Dwi Pangestu, Triana Dewi Salma.

Journal of Information Technology, Software Engineering and Computer Science
Website : https://ejournal.techcart-press.com/index.php/itsecs
E-ISSN 2962-0635
P-ISSN 2962-0538
Volume 3, Number 3, July 2025
DOI : **https://doi.org/10.58602/itsecs.v3i3.495**
Page 1-12

PLTS kecil, yaitu ambang alarm yang dapat diatur pengguna, statistik sesi, akumulasi energi dengan estimasi emisi CO_2 dan biaya, riwayat yang dapat diekspor, serta diagnostik koneksi MQTT, tidak dilaporkan bersamaan dalam satu aplikasi pada karya yang ditelaah. Penelitian penulis sebelumnya pun masih memakai platform pihak ketiga sehingga tampilan dan pengolahan datanya terbatas pada fasilitas platform tersebut.

Penelitian ini mengusulkan aplikasi akuisisi dan visualisasi data energi surya real-time yang dibangun di atas ESP32 sebagai penerbit data dan MQTT sebagai protokol transportasi[10], dengan dashboard web yang dirancang sendiri. Kebaruannya terletak pada pemaduan tujuh menu dalam satu aplikasi: Dashboard, Statistik, Energi & CO_2, Riwayat, Alarm, Koneksi, dan Pengaturan. Aplikasi ini telah dicatatkan sebagai ciptaan [11] dan dikembangkan sebagai bagian dari prototipe sistem pemantauan energi surya yang sedang disiapkan untuk pengujian lanjutan[12].

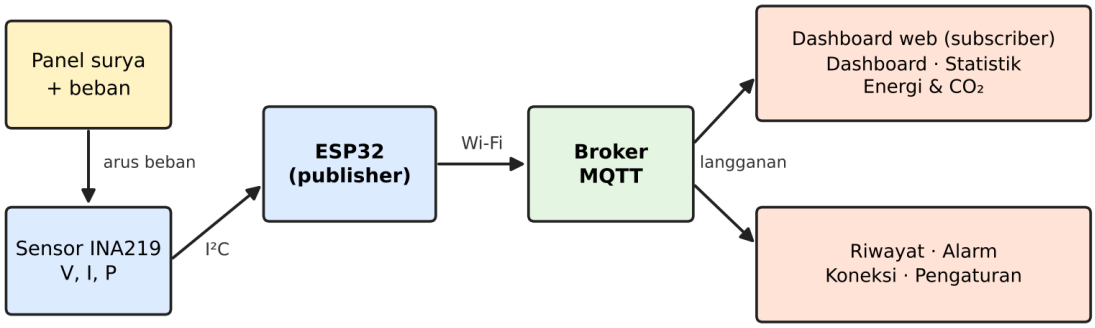
Tujuan penelitian ini adalah merancang, mengimplementasikan, dan menguji fungsi aplikasi akuisisi data energi surya real-time berbasis ESP32 dan MQTT dengan visualisasi dashboard web. Kontribusinya ada tiga: (1) arsitektur dan rancangan antarmuka yang terdokumentasi dan dapat direplikasi, (2) metode perhitungan energi, emisi CO_2, dan biaya yang transparan, dan (3) hasil verifikasi fungsional beserta batasannya sebagai dasar pengujian lapangan. Bagian berikutnya memaparkan metode, hasil dan pembahasan, serta kesimpulan.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Tahapan Penelitian

Penelitian dilakukan dalam lima tahap. Pertama, identifikasi kebutuhan melalui telaah literatur sistem pemantauan PLTS berbasis IoT [5]–[9]. Kedua, perancangan arsitektur perangkat dan aplikasi. Ketiga, implementasi firmware ESP32 dan dashboard web. Keempat, pengujian fungsional pada mode simulasi, yaitu mode aplikasi yang membangkitkan data tegangan, arus, dan daya berformat sama dengan data perangkat sehingga alur penerimaan, penyimpanan, dan penyajian data dapat diuji tanpa panel surya. Kelima, analisis hasil dan perbandingan dengan karya terdahulu.

Arsitektur sistem ditunjukkan pada Gambar 1. Sensor INA219 mengukur tegangan, arus, dan daya melalui antarmuka I²C. ESP32 [13] membaca sensor tersebut dan menerbitkan hasil ukur melalui Wi-Fi ke broker MQTT. MQTT dipilih karena merupakan protokol publish/subscribe yang ringan dan menjadi standar OASIS[14]. Dashboard web melanggan data dari broker dan menampilkannya pada tujuh menu. Pada mode simulasi, satu sampel dihasilkan sekitar setiap 2 detik, dan grafik daya menampilkan 60 sampel terakhir[15].



Gambar 1. Arsitektur sistem akuisisi dan visualisasi data energi surya

Fauzan Natsir : *Penulis Korespondensi
Copyright © 2025, Fauzan Natsir, Abdurahman, Redo Abeputra Sihombing, Andi Dwi Pangestu, Triana Dewi Salma.

Journal of Information Technology, Software Engineering and Computer Science
Website : https://ejournal.techcart-press.com/index.php/itsecs
E-ISSN 2962-0635
P-ISSN 2962-0538
Volume 3, Number 3, July 2025
DOI : **https://doi.org/10.58602/itsecs.v3i3.495**
Page 1-12

Aplikasi menghitung empat besaran turunan. Daya dihitung dari tegangan dan arus pada Persamaan (1), dengan V dalam volt, I dalam ampere, dan P dalam watt[16]. Energi sesi E (Wh) diakumulasi dari daya sampel ke-k, P_k, pada selang waktu Δt_k (detik) menurut Persamaan (2). Massa CO_2 yang terhindar, m_{CO_2} (g), dihitung pada Persamaan (3) dengan faktor emisi f_e = 0,85 kg/kWh, yang secara numerik sama dengan 0,85 g/Wh. Biaya yang terhindar B (Rp) dihitung pada Persamaan (4) dengan tarif asumsi τ = Rp1.500/kWh. Kesetaraan pohon t_{pohon} (hari) dihitung pada Persamaan (5) dengan anggapan serapan S = 21.000 g CO_2 per pohon per tahun. Parameter konfigurasi dirangkum pada Tabel 1.

$$P = V \cdot I \quad (1)$$

$$E = \frac{1}{3600}\sum_{k=1}^{n} P_k \cdot \Delta t_k \quad (2)$$

$$m_{CO_2} = E \cdot f_e \quad (3)$$

$$B = \frac{E}{1000} \cdot \tau \quad (4)$$

$$t_{pohon} = \frac{m_{CO_2}}{\frac{S}{365}} \quad (5)$$

Tabel 1. Parameter konfigurasi aplikasi

Parameter	Nilai	Keterangan
Faktor emisi f_e	0,85 kg/kWh	Persamaan (3)
Tarif listrik τ	Rp1.500/kWh	Asumsi, Persamaan (4)
Serapan CO_2 pohon S	≈21 kg/pohon/tahun	Persamaan (5)
Ambang alarm bawah	1 W	Dapat diatur pengguna
Ambang alarm atas	45 W	Dapat diatur pengguna
Grafik daya real-time	60 sampel terakhir	Menu Dashboard

Akumulasi energi pada Persamaan (2) memakai penjumlahan persegi panjang (rectangle rule): daya sampel ke-k dianggap konstan selama selang Δt_k, yaitu selisih stempel waktu antara sampel ke-k dan sampel sebelumnya. Selang ini tidak dipatok tetap, sehingga perubahan interval pengambilan sampel (sekitar 2 detik pada mode simulasi) dan keterlambatan paket tetap terhitung dalam energi. Karena daya dianggap konstan di antara dua sampel, galat integrasi membesar ketika daya berubah cepat; galat ini perlu dikuantifikasi pada pengujian perangkat keras, bersama galat sensor.

Faktor emisi f_e = 0,85 kg CO_2/kWh dipakai sebagai nilai pendekatan emisi rata-rata sistem kelistrikan interkoneksi yang masih didominasi pembangkit berbahan bakar fosil. Nilai ini merupakan nilai bawaan yang dapat diganti, bukan konstanta universal, karena faktor emisi jaringan berbeda antarsistem dan berubah dari tahun ke tahun. Tarif τ = Rp1.500/kWh adalah pembulatan dari kisaran tarif listrik golongan rumah tangga nonsubsidi dan dipakai untuk memberi gambaran nilai penghematan; pengguna dengan golongan tarif lain perlu menyesuaikannya. Serapan S = 21 kg CO_2 per pohon per tahun adalah nilai pendekatan untuk kesetaraan visual, bukan hasil pengukuran. Nilai CO_2 ditampilkan dengan satu desimal dan biaya dibulatkan ke rupiah terdekat, sehingga hasil hitung Rp2,84 tampil sebagai Rp3. [Tambahkan rujukan resmi untuk faktor emisi jaringan dan tarif listrik yang dipakai.]

Ketepatan estimasi diuji dengan enam skenario perubahan tegangan, arus, dan daya yang disajikan pada Tabel 5 di bagian Hasil Pengujian.

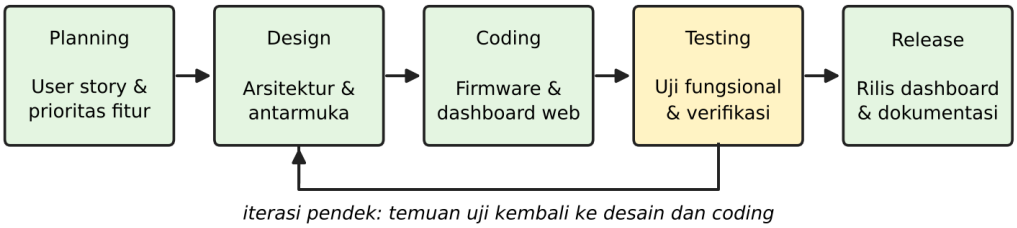
2.2. Metode Extreme Programming

Aplikasi dikembangkan dengan Extreme Programming (XP)[17]. XP dipilih karena kebutuhan fitur dapat diurutkan menurut prioritas pengguna dan diuji dalam iterasi pendek. Pada tahap planning, kebutuhan dirumuskan sebagai user story, misalnya melihat nilai terkini, melihat statistik sesi, mengetahui energi dan emisi, menelusuri riwayat, mengatur ambang peringatan, dan memeriksa koneksi[18]. Pada tahap design, user story dipetakan menjadi tujuh menu dan arsitektur pada Gambar 1. Tahap coding menghasilkan

Fauzan Natsir : *Penulis Korespondensi
Copyright © 2025, Fauzan Natsir, Abdurahman, Redo Abeputra Sihombing, Andi Dwi Pangestu, Triana Dewi Salma.

Journal of Information Technology, Software Engineering and Computer Science
Website : https://ejournal.techcart-press.com/index.php/itsecs
E-ISSN 2962-0635
P-ISSN 2962-0538
Volume 3, Number 3, July 2025
DOI : https://doi.org/10.58602/itsecs.v3i3.495
Page 1-12

firmware ESP32 dan dashboard web. Tahap testing memeriksa setiap menu terhadap user story-nya dan memverifikasi hasil hitung terhadap Persamaan (1)–(5). Pada tahap release, aplikasi dirilis sebagai versi 2.0 dan dicatatkan sebagai ciptaan[19]. Temuan pada tahap testing dikembalikan ke desain dan coding (Gambar 2).



Gambar 2. Tahapan Extreme Programming yang diterapkan

2.3. Rancangan Pengujian Perangkat Keras

Pengujian mode simulasi belum membuktikan keandalan aplikasi pada kondisi operasional nyata, sehingga disusun pengujian langsung dengan rangkaian ESP32, sensor INA219, dan panel surya yang membebani beban tetap. Sistem dioperasikan terus-menerus selama beberapa pekan pada jaringan Wi-Fi yang sama dengan penggunaan sebenarnya, dan empat metrik dievaluasi.

Pertama, akurasi pengukuran: tegangan, arus, dan daya dari INA219 dibandingkan dengan multimeter digital terkalibrasi yang dibaca bersamaan pada paling sedikit 30 titik beban berbeda, dilaporkan sebagai galat mutlak rata-rata (MAE) dan galat relatif (%). Kedua, latensi MQTT: selisih antara waktu penerbitan di ESP32 (jam disinkronkan melalui NTP) dan waktu penerimaan di dashboard, dilaporkan sebagai rata-rata, median, dan persentil ke-95 pada QoS 0 dan QoS 1. Ketiga, kehilangan paket: dihitung dari nomor urut yang disisipkan pada setiap muatan, sebagai persentase pesan yang tidak diterima terhadap pesan yang diterbitkan, termasuk saat koneksi Wi-Fi sengaja diputus dan dipulihkan. Keempat, kestabilan sistem: waktu aktif (uptime), jumlah sambung ulang otomatis ke Wi-Fi dan broker, serta penggunaan memori heap ESP32 selama periode uji. Hasilnya dibandingkan dengan nilai pada mode simulasi di makalah ini dan dengan latensi acuan sekitar 150 ms dari penelitian MQTT lain.

2.4. Keamanan Komunikasi MQTT

Rancangan keamanan komunikasi mengikuti pedoman keamanan pada spesifikasi MQTT [10] dengan tiga lapis. Pertama, autentikasi: ESP32 dan dashboard masing-masing memakai nama pengguna dan kata sandi sendiri, dan akses anonim dinonaktifkan di broker. Kedua, pengaturan hak akses: daftar kontrol akses (ACL) membatasi ESP32 hanya untuk menerbitkan (publish) pada topik datanya, sedangkan dashboard hanya boleh melanggan (subscribe) topik tersebut; penulisan pada topik konfigurasi, seperti ambang alarm, hanya diizinkan bagi akun administrator. Ketiga, enkripsi: sambungan memakai TLS versi 1.2 atau lebih baru [20] pada port 8883 untuk ESP32 dan WebSocket Secure (WSS) untuk dashboard, dengan sertifikat broker diverifikasi menggunakan sertifikat CA yang tertanam di firmware. Kredensial tidak ditanam pada kode dashboard di sisi klien dan diganti secara berkala.

Keberhasilan mekanisme ini diuji dengan memeriksa bahwa broker menolak sambungan tanpa kredensial, dengan kredensial salah, dan penerbitan ke topik yang tidak diizinkan, serta dengan menangkap lalu lintas jaringan untuk memastikan muatan tidak dapat dibaca

Fauzan Natsir : *Penulis Korespondensi
Copyright © 2025, Fauzan Natsir, Abdurahman, Redo Abeputra Sihombing, Andi Dwi Pangestu, Triana Dewi Salma.

Journal of Information Technology, Software Engineering and Computer Science
Website : https://ejournal.techcart-press.com/index.php/itsecs
E-ISSN 2962-0635
P-ISSN 2962-0538
Volume 3, Number 3, July 2025
DOI : **https://doi.org/10.58602/itsecs.v3i3.495**
Page 1-12

sebagai teks. Tambahan beban TLS pada ESP32 (waktu jabat tangan dan memori) dicatat bersama metrik pada pengujian perangkat keras. Mekanisme ini merupakan rancangan untuk tahap pengujian lapangan dan belum diverifikasi pada hasil makalah ini.

2.5. Evaluasi Usability

Evaluasi usability dirancang melibatkan 10–15 responden yang mencakup pengguna teknis (operator atau teknisi) dan pengguna nonteknis (misalnya staf kampus atau sekolah pengelola PLTS kecil). Responden menyelesaikan lima tugas: membaca daya dan energi terkini, menemukan energi dan emisi CO_2 sesi, mengubah ambang alarm, mengenali kondisi alarm melalui tombol Tes Alarm, dan mengekspor riwayat ke CSV. Data yang dikumpulkan meliputi tingkat keberhasilan tugas, waktu penyelesaian, jumlah kesalahan, dan skor System Usability Scale (SUS) 10 butir [21], dengan skor di atas 68 dianggap di atas rata-rata.

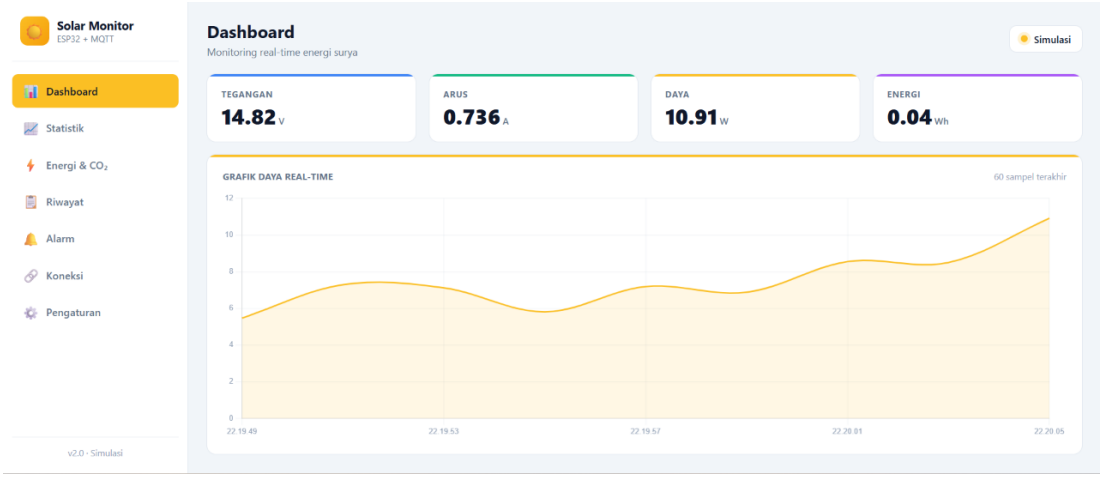
Efektivitas fitur alarm dinilai dari persentase responden yang mengenali status alarm dan menyebut tindakan yang tepat dalam batas waktu tertentu. Keterbacaan informasi bagi pengguna nonteknis dinilai melalui pertanyaan tentang pemahaman istilah (misalnya latensi dan RSSI) serta kartu energi, CO_2, dan biaya, ditambah pertanyaan terbuka tentang tampilan yang membingungkan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian disajikan dalam tiga bagian: implementasi antarmuka, hasil pengujian, dan analisis perbandingan. Semua nilai pada bagian ini berasal dari tangkapan layar aplikasi yang berjalan pada mode simulasi dan dari hitung ulang terhadap persamaan pada Bagian 2. Karena sumbernya data simulasi, hasilnya menunjukkan kebenaran fungsi aplikasi, bukan kinerja panel surya yang sebenarnya.

3.1. Hasil Penelitian

Menu Dashboard (Gambar 3) menampilkan empat kartu nilai terkini: tegangan 14,82 V, arus 0,736 A, daya 10,91 W, dan energi 0,04 Wh, serta grafik daya real-time dari 60 sampel terakhir. Rentang daya pada grafik berada di antara 5 dan 11 W. Lencana "Simulasi" di sudut kanan atas menandai mode data yang aktif.

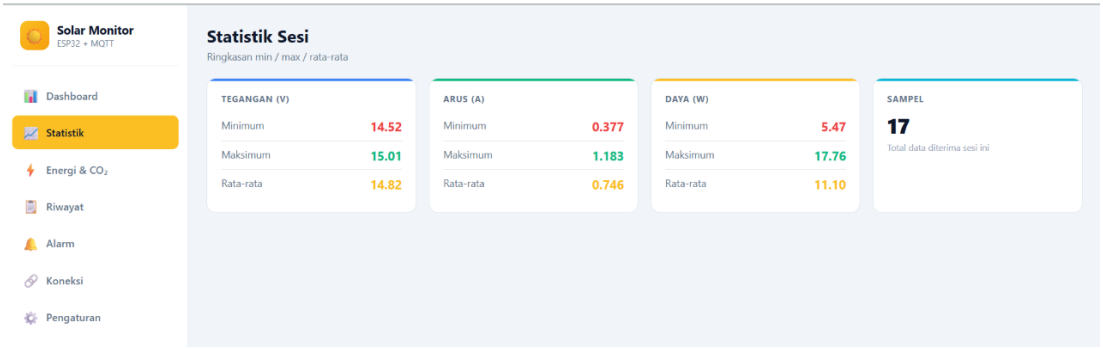


Gambar 3. Antarmuka menu Dashboard pada mode simulasi

Menu Statistik (Gambar 4) merangkum nilai minimum, maksimum, dan rata-rata selama sesi. Dengan 17 sampel, tegangan berkisar 14,52–15,01 V (rata-rata 14,82 V), arus 0,377–1,183 A (rata-rata 0,746 A), dan daya 5,47–17,76 W (rata-rata 11,10 W).

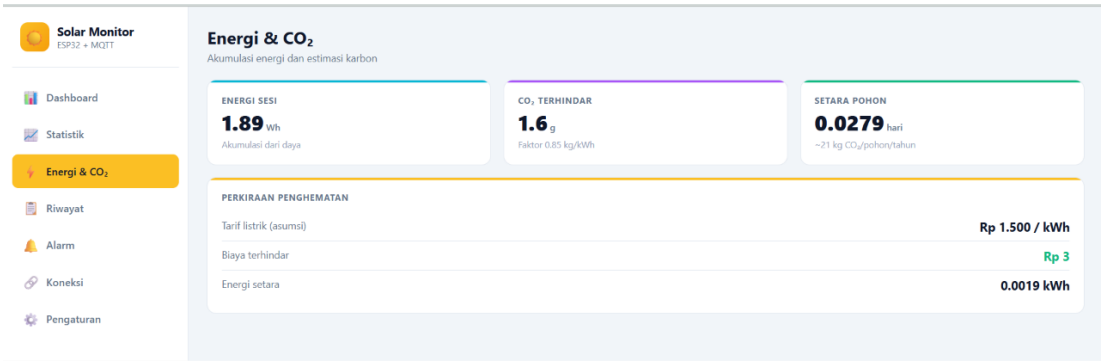
Fauzan Natsir : *Penulis Korespondensi
Copyright © 2025, Fauzan Natsir, Abdurahman, Redo Abeputra Sihombing, Andi Dwi Pangestu, Triana Dewi Salma.

Journal of Information Technology, Software Engineering and Computer Science
Website : https://ejournal.techcart-press.com/index.php/itsecs
E-ISSN 2962-0635
P-ISSN 2962-0538
Volume 3, Number 3, July 2025
DOI : **https://doi.org/10.58602/itsecs.v3i3.495**
Page 1-12



Gambar 4. Antarmuka menu Statistik

Menu Energi & CO_2 (Gambar 5) menampilkan energi sesi 1,89 Wh, CO_2 terhindar 1,6 g, dan kesetaraan 0,0279 hari serapan satu pohon. Perkiraan penghematan memakai tarif Rp1.500/kWh dengan biaya terhindar Rp3 dan energi setara 0,0019 kWh.



Gambar 5. Antarmuka menu Energi & CO_2

Menu Riwayat (Gambar 6) menyimpan 127 baris, masing-masing berisi waktu, tegangan, arus, daya, dan status. Sampel terbaru berada di baris teratas dengan selang sekitar 2 detik. Tersedia tombol Ekspor CSV dan Hapus.



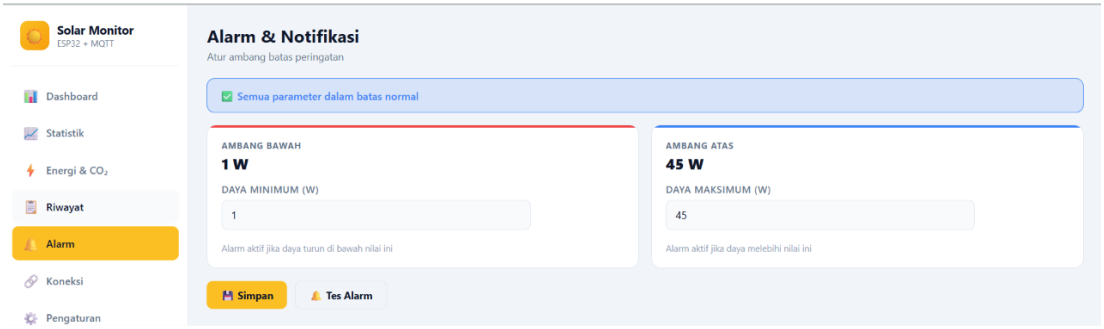
Gambar 6. Antarmuka menu Riwayat Data

Menu Alarm (Gambar 7) memuat dua ambang yang dapat diubah, yaitu daya minimum 1 W dan daya maksimum 45 W, serta tombol Simpan dan Tes Alarm. Selama sesi, daya

Fauzan Natsir : *Penulis Korespondensi
Copyright © 2025, Fauzan Natsir, Abdurahman, Redo Abeputra Sihombing, Andi Dwi Pangestu, Triana Dewi Salma.

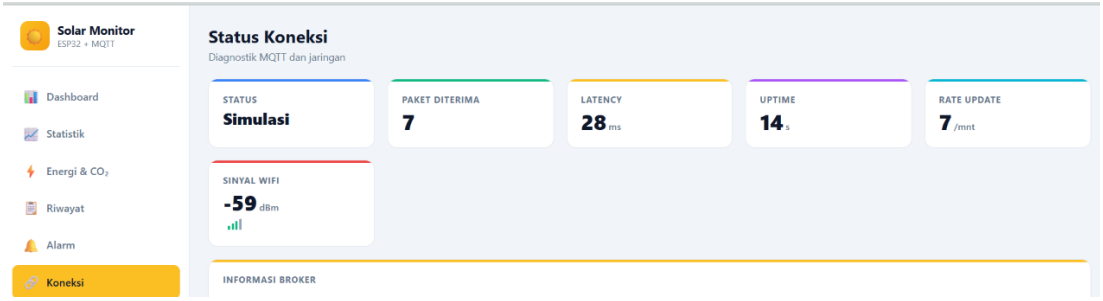
Journal of Information Technology, Software Engineering and Computer Science
Website : https://ejournal.techcart-press.com/index.php/itsecs
E-ISSN 2962-0635
P-ISSN 2962-0538
Volume 3, Number 3, July 2025
DOI : **https://doi.org/10.58602/itsecs.v3i3.495**
Page 1-12

(5,47–17,76 W) tetap di dalam ambang sehingga banner menampilkan "Semua parameter dalam batas normal".



Gambar 7. Antarmuka menu Alarm & Notifikasi

Menu Koneksi (Gambar 8) menampilkan status koneksi "Simulasi", 7 paket diterima, latensi 28 ms, waktu aktif 14 detik, laju pembaruan 7 per menit, dan kekuatan sinyal Wi-Fi −59 dBm. Menu ini juga memuat informasi broker. Angka ini diambil pada 14 detik pertama sesi sehingga belum mewakili laju pembaruan jangka panjang.



Gambar 8. Antarmuka menu Status Koneksi

Tabel 2. Ringkasan menu dan hasil pengamatan

Menu	Fungsi	Hasil pengamatan
Dashboard	Nilai terkini dan grafik daya	V, I, P, E tampil; grafik 60 sampel
Statistik	Min, maks, rata-rata sesi	Tampil untuk V, I, P; 17 sampel
Energi & CO_2	Akumulasi energi, emisi, biaya	Tampil: 1,89 Wh; 1,6 g; Rp3
Riwayat	Log data dan ekspor CSV	127 baris; status Normal
Alarm	Ambang daya min/maks	Ambang 1 W/45 W; status normal
Koneksi	Diagnostik MQTT dan jaringan	Paket, latensi, uptime, RSSI tampil

3.2. Hasil Pengujian

Pengujian meliputi pemeriksaan fungsi tiap menu (Tabel 2), statistik sesi (Tabel 3), dan verifikasi perhitungan (Tabel 4). Seluruh enam menu menampilkan data sesuai fungsinya. Pada Tabel 3, tegangan stabil pada rentang sempit 0,49 V di sekitar 14,8 V, sedangkan arus dan daya berfluktuasi lebih lebar, yang sesuai dengan pola data simulasi pada grafik Dashboard.

Tabel 3. Statistik satu sesi pengujian (n = 17 sampel)

Besaran	Minimum	Maksimum	Rata-rata
Tegangan (V)	14,52	15,01	14,82
Arus (A)	0,377	1,183	0,746
Daya (W)	5,47	17,76	11,10

Fauzan Natsir : *Penulis Korespondensi
Copyright © 2025, Fauzan Natsir, Abdurahman, Redo Abeputra Sihombing, Andi Dwi Pangestu, Triana Dewi Salma.

Journal of Information Technology, Software Engineering and Computer Science
Website : https://ejournal.techcart-press.com/index.php/itsecs
E-ISSN 2962-0635
P-ISSN 2962-0538
Volume 3, Number 3, July 2025
DOI : **https://doi.org/10.58602/itsecs.v3i3.495**
Page 1-12

Verifikasi hitung ulang pada Tabel 4 menunjukkan nilai tampil sama dengan hasil hitung setelah pembulatan. Selain dua contoh daya pada tabel, ke-12 baris riwayat yang terlihat pada Gambar 6 juga sesuai: hasil kali tegangan dan arus, dibulatkan dua desimal, sama dengan daya yang ditampilkan pada seluruh baris. Hubungan antarmenu juga konsisten: energi 1,89 Wh pada Gambar 5 memberi 1,6 g CO_2 dan Rp3 sesuai Persamaan (3) dan (4). Perlu dicatat bahwa tangkapan layar diambil pada saat berbeda dalam sesi simulasi, sehingga nilai energi antarmenu tidak untuk dibandingkan satu sama lain.

Tabel 4. Verifikasi nilai yang ditampilkan terhadap hitung ulang

Besaran	Perhitungan	Hasil hitung	Tampil
Daya, Dashboard	14,82 V × 0,736 A	10,91 W	10,91 W
Daya, Riwayat baris 1	15,03 V × 0,417 A	6,27 W	6,27 W
CO_2 terhindar	1,89 Wh × 0,85 g/Wh	1,61 g	1,6 g
Biaya terhindar	0,00189 kWh × Rp1.500	Rp2,84	Rp3
Kesetaraan pohon	1,607 g ÷ (21.000 g ÷ 365 hari)	0,0279 hari	0,0279 hari
Energi setara	1,89 Wh ÷ 1000	0,0019 kWh	0,0019 kWh

Untuk memastikan estimasi energi, penghematan biaya, dan emisi karbon tetap akurat pada kondisi yang berubah, disusun enam skenario uji dengan tegangan, arus, dan daya yang divariasikan (Tabel 5). Nilai acuan pada Tabel 5 dihitung secara analitik dari Persamaan (1)–(4) dengan f_e = 0,85 g/Wh dan τ = Rp1.500/kWh. Skenario S4 menguji perubahan daya mendadak di tengah sesi, sedangkan S5 dan S6 menguji pemicuan alarm pada ambang 45 W dan 1 W. Kolom "Tampil" diisi dengan nilai pada menu Energi & CO_2 dan Alarm setelah masukan yang sama diberikan; skenario dinyatakan lulus bila selisihnya tidak lebih dari satu satuan pembulatan terakhir. Eksekusi skenario belum dilaporkan pada versi makalah ini.

Tabel 5. Skenario uji perhitungan energi, CO_2, dan biaya (nilai acuan analitik)

Skenario	V × I	P (W)	Durasi	E (Wh)	CO_2 (g)	Biaya (Rp)	Tampil
S1 Normal, tetap	14,8 V × 0,70 A	10,36	1 jam	10,36	8,81	15,54	[diisi]
S2 Cahaya rendah	15,0 V × 0,20 A	3,00	1 jam	3,00	2,55	4,50	[diisi]
S3 Beban tinggi	14,5 V × 1,20 A	17,40	1 jam	17,40	14,79	26,10	[diisi]
S4 Daya berubah bertahap	5 W lalu 15 W	5 → 15	2 × 30 menit	10,00	8,50	15,00	[diisi]
S5 Di atas ambang atas (alarm)	15,0 V × 3,20 A	48,00	1 menit	0,80	0,68	1,20	[diisi]
S6 Di bawah ambang bawah (alarm)	14,5 V × 0,03 A	0,435	1 jam	0,435	0,37	0,65	[diisi]

3.3. Analisis Perbandingan

Tabel 6 membandingkan aplikasi ini dengan karya yang ditelaah, hanya pada aspek yang dilaporkan dalam makalah masing-masing.

Fauzan Natsir : *Penulis Korespondensi
Copyright © 2025, Fauzan Natsir, Abdurahman, Redo Abeputra Sihombing, Andi Dwi Pangestu, Triana Dewi Salma.

Journal of Information Technology, Software Engineering and Computer Science
Website : https://ejournal.techcart-press.com/index.php/itsecs
E-ISSN 2962-0635
P-ISSN 2962-0538
Volume 3, Number 3, July 2025
DOI : **https://doi.org/10.58602/itsecs.v3i3.495**
Page 1-12

Tabel 6. Perbandingan dengan karya terdahulu

Karya	Perangkat	Platform/protokol	Fitur yang dilaporkan
[5]	ESP8266, INA219	ThingSpeak	Pemantauan V, I, P; kontrol beban relai; prediksi daya Random Forest
[6]	ESP32, 2×INA219, DHT22, VEML7700	MQTT, ThingsBoard	Grafik deret waktu, kartu suhu/kelembapan, tabel data; log 15 detik
[7]	ESP32	MQTT, broker Banana Pi, Node-RED	Dashboard dapat disesuaikan; kontrol beban jarak jauh
[8]	NodeMCU, Raspberry Pi	Mosquitto, InfluxDB, Node-RED, Grafana	Peringatan dan ambang; kontrol ON/OFF dan servo; prakiraan cuaca
[9]	ESP32, 3×INA219, RTC, microSD	ThingSpeak	Pemantauan tiga panel; penyimpanan lokal; log 1 menit
[4]	ESP32, INA219, BH1750	Blynk, Google Spreadsheet	Deteksi gangguan berbasis aturan; notifikasi
Ini	ESP32, INA219	MQTT, dashboard web mandiri	Statistik sesi; energi, CO_2, biaya; riwayat + ekspor CSV; alarm berambang; diagnostik koneksi

Dibandingkan dengan karya yang memakai platform generik [5]–[9], keunggulan aplikasi ini adalah pemaduan fungsi analitik dan operasional dalam satu antarmuka: pengguna dapat mengatur ambang alarm sendiri, membaca statistik sesi, melihat energi dan estimasi emisi serta biaya, mengekspor riwayat, dan memeriksa kesehatan koneksi tanpa berpindah alat. Karya [8] dan [4] memiliki mekanisme peringatan, tetapi estimasi CO_2 dan biaya serta diagnostik koneksi tidak dijumpai pada makalah-makalah yang ditelaah. Dibandingkan dengan karya penulis sebelumnya [5], aplikasi ini beralih dari ESP8266 dan ThingSpeak ke ESP32 dan MQTT dengan dashboard sendiri.

Keterbatasannya jelas. Pertama, seluruh data pada makalah ini berasal dari mode simulasi dalam satu sesi pendek (17 sampel pada Tabel 3), sehingga akurasi sensor, kehilangan paket, dan ketahanan jangka panjang belum dievaluasi. Rancangan pengujian perangkat keras untuk mengevaluasi hal tersebut dijelaskan pada bagian Rancangan Pengujian Perangkat Keras. Kedua, latensi 28 ms dan sinyal −59 dBm berasal dari sesi simulasi dan tidak dapat disamakan dengan hasil pada jaringan nyata; sebagai pembanding, evaluasi MQTT pada ESP8266 melaporkan latensi sekitar 150 ms [10]. Ketiga, mekanisme pengamanan MQTT (autentikasi, pengaturan hak akses, dan enkripsi TLS) baru dirancang pada bagian Keamanan Komunikasi MQTT dan belum diimplementasikan atau diuji pada makalah ini, padahal pengamanan disebut sebagai tantangan adopsi oleh [10]. Keempat, tarif Rp1.500/kWh dan faktor emisi 0,85 kg/kWh adalah nilai asumsi yang perlu disesuaikan dengan tarif pengguna dan faktor emisi jaringan setempat. Skenario uji perhitungan pada Tabel 5 pun baru berupa nilai acuan analitik yang belum dibandingkan dengan tampilan aplikasi. Kelima, usability dashboard belum dievaluasi dengan pengguna; rancangannya dimuat pada bagian Evaluasi Usability. Keterbatasan ini menjadi agenda pengujian lapangan berikutnya.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menghasilkan aplikasi akuisisi data energi surya real-time berbasis ESP32 dan MQTT dengan dashboard web tujuh menu. Pengujian fungsional pada mode simulasi menunjukkan bahwa semua menu menampilkan data sesuai fungsinya, dan nilai daya, energi, CO_2, serta biaya yang ditampilkan sama dengan hitung ulang (ke-12 baris riwayat yang diperiksa memiliki selisih daya 0,00 W). Dibandingkan dengan karya yang ditelaah,

Fauzan Natsir : *Penulis Korespondensi
Copyright © 2025, Fauzan Natsir, Abdurahman, Redo Abeputra Sihombing, Andi Dwi Pangestu, Triana Dewi Salma.

aplikasi ini memadukan statistik sesi, estimasi energi–CO_2–biaya, riwayat berekspor CSV, alarm berambang yang dapat diatur, dan diagnostik koneksi dalam satu antarmuka. Hasil ini belum membuktikan kinerja pada perangkat keras dan panel surya nyata. Penelitian lanjutan perlu menguji aplikasi dengan ESP32 dan INA219 di lapangan selama beberapa pekan, mengukur ketepatan sensor, latensi, dan kehilangan paket pada jaringan nyata, menambahkan autentikasi, pengaturan hak akses, dan enkripsi TLS pada MQTT, menguji skenario perubahan tegangan, arus, dan daya terhadap perhitungan energi, CO_2, dan biaya, mengintegrasikan prediksi daya berbasis Random Forest, dan mengevaluasi usability dashboard dengan SUS pada pengguna teknis maupun nonteknis.

REFERENCES

[1] Pemerintah Republik Indonesia, "Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional." 2014.
[2] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, "Peraturan Menteri ESDM Nomor 2 Tahun 2024 tentang Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap yang Terhubung pada Jaringan Tenaga Listrik Pemegang IUPTLU untuk Kepentingan Umum." 2024.
[3] International Renewable Energy Agency, *Renewable Capacity Statistics 2025*. Abu Dhabi, UAE: IRENA, 2025.
[4] G. Alviano, J. Windarta, and Yuniarto, "Rancang bangun sistem monitoring dan deteksi dini gangguan pada panel surya berbasis Internet of Things ({IoT}) menggunakan komunikasi Blynk," *Gema Teknol.*, vol. 23, no. 2, pp. 49–55, 2025.
[5] A. Mimouni, Y. Chahet, A. El Amrani, M. El Amraoui, and L. Bejjit, "Internet of Things technology for an autonomous photovoltaic solar energy system monitoring," *E3S Web Conf.*, vol. 601, p. 56, 2025, doi: 10.1051/e3sconf/202560100056.
[6] W. He, M. J. A. Baig, and M. T. Iqbal, "An open-source supervisory control and data acquisition architecture for photovoltaic system monitoring using ESP32, Banana Pi M4, and Node-RED," *Energies*, vol. 17, no. 10, p. 2295, May 2024, doi: 10.3390/en17102295.
[7] M. A. Abu Radia, M. K. El Nimr, and A. S. Atlam, "IoT-based wireless data acquisition and control system for photovoltaic module performance analysis," *e-Prime -- Adv. Electr. Eng. Electron. Energy*, Dec. 2023.
[8] S. Refly, A. Bimajaya, and B. I. Harahap, "Multi-channel power data acquisition system for solar panel monitoring," *J. Electr. Eng. Comput.*, vol. 8, no. 1, pp. 44–55, 2026.
[9] S. Yön and A. L. N. Noutcha, "Evaluation of the MQTT protocol for IoT-based industrial automation and remote maintenance," *ABMYO Derg.*, vol. 20, no. 72, pp. 155–166, Dec. 2025, doi: 10.17932/IAU.ABMYOD.2006.005/abmyod_v20i72004.
[10] OASIS, "MQTT Version 5.0," Mar. 2019.
[11] Texas Instruments, "INA219 zero-drift, bidirectional current/power monitor with interface," Dallas, TX, USA, 2015.
[12] F. Natsir, A. Abdurahman, and R. A. Sihombing, "Prediction of Alternative Solar Energy Utilization in Internet of Things Based Systems Using Random Forest Algorithm," *Innov. Res. Informatics*, vol. 7, no. 1, 2025.
[13] Espressif Systems, "ESP32 series datasheet," Shanghai, China.
[14] A. Dharani and S. M. K.-R. Raazi, "Integrating Blockchain with IoT for Mitigating Cyber Threat In Corporate Environment," in *2022 Mohammad Ali Jinnah University International Conference on Computing (MAJICC)*, 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/MAJICC56935.2022.9994206.
[15] L. P. I. Kharisma *et al.*, *Internet of Things: Pengenalan dan Penerapan Teknologi*

Fauzan Natsir : *Penulis Korespondensi
Copyright © 2025, Fauzan Natsir, Abdurahman, Redo Abeputra Sihombing, Andi Dwi Pangestu, Triana Dewi Salma.

Journal of Information Technology, Software Engineering and Computer Science
Website : https://ejournal.techcart-press.com/index.php/itsecs
E-ISSN 2962-0635
P-ISSN 2962-0538
Volume 3, Number 3, July 2025
DOI : **https://doi.org/10.58602/itsecs.v3i3.495**
Page 1-12

IoT. PT. Sonpedia Publishing Indonesia, 2024.
[16] F. Iasha, "Perancangan Algoritma Kontrol Pada Sistem Monitoring Dan Kontrol Jembatan Berbasis Internet Of Things (IoT) Secara Real Time." Sepuluh Nopember Institute of Technology, 2020.
[17] Y. Efendi, "Internet Of Things (Iot) Sistem Pengendalian Lampu Menggunakan Raspberry Pi Berbasis Mobile," *J. Ilm. Ilmu Komput.*, vol. 4, no. 1, pp. 19–26, 2018, doi: 10.35329/jiik.v4i1.48.
[18] Y. Yudhanto and A. Azis, *Pengantar Teknologi Internet of Things (IoT)*. UNSPress, 2019.
[19] K. S. Nikhilesh, Y. H. Raaghavendra, P. J. M. Soothanan, and R. Resmi, "Low-cost IoT based weather monitoring system for smart community," in *2020 Fourth International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)*, 2020, pp. 482–486. doi: 10.1109/ICISC47916.2020.9171156.
[20] E. Rescorla, "The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.3," RFC 8446, IETF, Aug. 2018. doi: 10.17487/RFC8446.
[21] J. Brooke, "SUS: A 'quick and dirty' usability scale," in *Usability Evaluation in Industry*, P. W. Jordan, B. Thomas, B. A. Weerdmeester, and I. L. McClelland, Eds. London, U.K.: Taylor & Francis, 1996, pp. 189–194.

Fauzan Natsir : *Penulis Korespondensi
Copyright © 2025, Fauzan Natsir, Abdurahman, Redo Abeputra Sihombing, Andi Dwi Pangestu, Triana Dewi Salma.