

Rancang Bangun Sistem Kontrol dan Monitoring *Real-Time* *Multipoint* berbasis Web Menggunakan ESP32

Muhammad Fakhri Cholis¹, Dedi Ary Prasetya², Bambang Hari Purwoto³,
Ratnasari Nur Rohmah⁴

¹ Universitas Muhammadiyah Surakarta, Surakarta, Indonesia

² Universitas Muhammadiyah Surakarta, Surakarta, Indonesia

³ Universitas Muhammadiyah Surakarta, Surakarta, Indonesia

⁴ Universitas Muhammadiyah Surakarta, Surakarta, Indonesia

✉ Email korespondensi: d400210069@student.ums.ac.id

Abstrak. Penelitian ini berfokus pada perancangan dan pengembangan sistem kontrol dan monitoring real-time multipoint berbasis web dengan menggunakan mikrokontroler ESP32. Sistem ini ditujukan untuk aplikasi energi terbarukan, khususnya dengan memanfaatkan panel surya sebagai sumber daya utama. Pendekatan eksperimental dilakukan dengan menempatkan beberapa unit ESP32 pada titik pemantauan yang berbeda, masing-masing dilengkapi dengan sensor DHT22 (suhu dan kelembapan), LDR (intensitas cahaya), dan INA219 (tegangan dan arus). Setiap unit ESP32 mengirimkan data sensor secara real-time ke Firebase Realtime Database dan ditampilkan melalui antarmuka web yang responsif, memungkinkan pengguna untuk memantau dan mengendalikan sistem dari jarak jauh. Pengujian dilakukan di lingkungan nyata pada dua lantai dengan jaringan Wi-Fi terpisah, yang menunjukkan komunikasi nirkabel antar node berjalan dengan baik dan sistem berfungsi secara stabil. Pengujian akurasi menunjukkan tingkat kesalahan yang rendah untuk sensor suhu dan tegangan, sementara sensor arus dan cahaya memerlukan kalibrasi lebih lanjut. Hasil penelitian membuktikan bahwa sistem berbasis IoT multipoint ini, yang didukung oleh energi terbarukan, menawarkan solusi kontrol pintar yang efisien dan berkelanjutan. Selain itu, penelitian ini menekankan pentingnya pemilihan dan kalibrasi sensor yang tepat untuk memastikan akurasi dan keandalan sistem secara keseluruhan.

Kata Kunci: ESP32; Monitoring Multipoint; IoT; Panel Surya; *Realtime* Database; Kontrol Pintar



PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi energi terbarukan, khususnya sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS), telah mendorong kebutuhan akan sistem kontrol dan monitoring yang efisien serta dapat diakses secara real-time. Sistem monitoring energi surya pintar berbasis IoT telah berkembang sebagai solusi untuk memenuhi kebutuhan energi yang meningkat akibat globalisasi dan industrialisasi yang terus berkembang (Rani et al., 2021). Dalam konteks ini, implementasi sistem kontrol dan monitoring multipoint menjadi sangat relevan dalam mengoptimalkan kinerja sistem tenaga surya secara keseluruhan. Pada sistem *smart home-building* (SHB), jaringan sensor nirkabel konvensional biasanya menggunakan baterai sebagai sumber daya utama, yang membatasi umur dan jumlah unit sensor yang bisa digunakan secara maksimal (Rahman et al., 2021).

Sistem kontrol multipoint untuk aplikasi energi surya memungkinkan pengelolaan beberapa titik monitoring secara simultan dan terintegrasi. Penelitian mengenai sistem monitoring berbasis cloud untuk pembangkit fotovoltaik menunjukkan bahwa terdapat komponen utama yang berperan dalam mengawasi kinerja panel surya dan beban sistem (Kumar et al., 2024). Pendekatan ini mengutamakan sentralisasi kontrol dengan distribusi monitoring melalui banyak titik pengukuran. Teknologi monitoring dalam sistem PV surya memanfaatkan modul pemrosesan data dan protokol transmisi melalui platform nirkabel, yang memungkinkan komunikasi multipoint dilakukan secara efektif (Zhang et al., 2021). Hal ini sangat penting dalam sistem dengan beberapa panel surya yang tersebar di berbagai lokasi, namun tetap harus dimonitor secara terpusat.

Penerapan jaringan sensor nirkabel bertenaga surya untuk keperluan monitoring juga menunjukkan bahwa jaringan sensor dirancang untuk dapat diterapkan di wilayah yang sulit dijangkau dan tidak memiliki infrastruktur tetap (Thompson et al., 2021). Teknologi IoT memungkinkan komunikasi real-time antara beberapa node sensor dengan sistem kontrol pusat melalui platform berbasis web. Sistem monitoring daya panel surya yang dikembangkan menggunakan pendekatan *Internet of Things* telah terbukti mampu memantau keluaran panel surya secara efisien (Sari et al., 2023). Dalam konteks aplikasi monitoring lingkungan seperti hutan, node dalam jaringan sensor nirkabel tidak memungkinkan untuk dilakukan penggantian baterai secara berkala. Oleh karena itu, penggunaan baterai kimia sekali pakai menjadi tidak layak karena keterbatasan energi yang tersedia, dan dibutuhkan sistem tenaga surya untuk menopang keberlanjutan aplikasi multipoint tersebut (Li et al., 2022).

Sistem monitoring energi pintar berbasis IoT untuk pembangkit listrik tenaga surya juga telah mengintegrasikan teknologi cerdas dalam satu platform kontrol dan monitoring yang terpadu (Ahmad et al., 2024). Pendekatan ini tidak hanya memungkinkan monitoring pasif, tetapi juga mendukung kontrol aktif terhadap sistem multipoint secara jarak jauh.



Dalam sistem kontrol terdistribusi, penggunaan Internet of Things industri dan sistem kontrol terdistribusi telah diterapkan untuk mengelola serta memantau solusi energi dengan lebih efisien (Sharma et al., 2024). Platform jaringan sensor nirkabel bertenaga surya menunjukkan bahwa dibutuhkan sumber energi alternatif untuk mendukung fungsi sistem yang lebih optimal dan efektif (Rodriguez et al., 2012), yang menjadi dasar pengembangan sistem monitoring multipoint secara berkelanjutan.

Penggunaan energi surya sebagai sumber daya utama dalam sistem kontrol dan monitoring multipoint memberikan keunggulan dalam hal keberlanjutan dan kemandirian energi. Sebuah kajian terbaru terkait metode predictive maintenance dan keamanan siber untuk sistem panel surya menyoroti bahwa sistem bertenaga surya mampu mengoptimalkan operasi sekaligus menjaga keamanan komunikasi multipoint (Johnson et al., 2024). Meskipun implementasi sistem kontrol dan monitoring multipoint dengan dukungan website serta tenaga surya menghadapi berbagai tantangan teknis seperti sinkronisasi data antar node, efisiensi konsumsi energi, dan keandalan komunikasi nirkabel, kemajuan dalam teknologi IoT dan komputasi awan telah membuka peluang besar bagi aplikasi monitoring terdistribusi yang efisien dan berkelanjutan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini berfokus pada pengembangan sistem kontrol dan monitoring komunikasi multipoint yang mampu mengelola banyak node sensor secara simultan, menyediakan kontrol real-time melalui antarmuka web, beroperasi mandiri menggunakan energi surya, serta mengintegrasikan protokol komunikasi yang handal untuk aplikasi multipoint. Dengan demikian, sistem ini diharapkan mampu menjadi solusi monitoring dan kontrol yang efektif dalam mendukung implementasi energi terbarukan dengan arsitektur multipoint yang dapat diperluas dan berkelanjutan.

METODE

A. Persiapan Alat dan Bahan

Dalam implementasi sistem kontrol dan monitoring real-time multipoint berbasis web menggunakan ESP32, diperlukan berbagai komponen dan perangkat pendukung untuk memastikan kinerja optimal sistem. Pemilihan alat dan bahan yang tepat menjadi kunci keberhasilan dalam membangun infrastruktur komunikasi yang handal dan responsif. ESP32 sebagai mikrokontroler utama memerlukan dukungan komponen elektronik, sensor, aktuator, dan perangkat jaringan yang kompatibel. Berikut adalah daftar lengkap alat dan bahan yang digunakan dalam perancangan dan pembangunan sistem ini untuk mencapai hasil maksimal dalam fungsi kontrol dan monitoring *real-time*.



Tabel 1. Alat dan Bahan

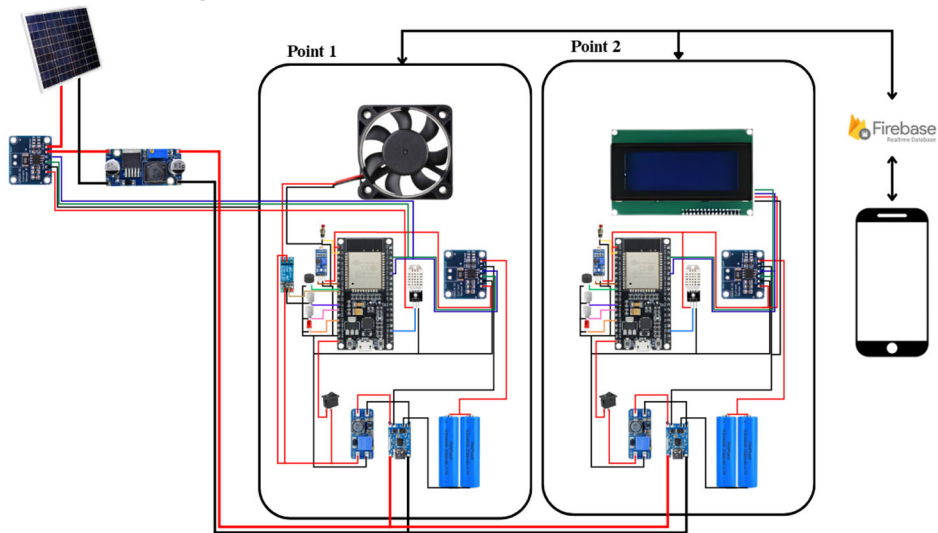
Alat dan Bahan	Jumlah
ESP32	3
Module Relay	1
LED	4
Panel Surya 10WP	1
Push Button	2
Switch	2
Buzzer	2
LCD I2C 20x4	1
Sensor INA219	3
Baterai Lithium 3.7V	4
Module TP4056	2
Sensor LDR	2
Step Down LM2596	1
Step Up MT3608	2
Box Electrical X8	2
Molex 2,3,4	30
DHT22	1
FAN DC	1

B. Perancangan Sistem

Secara garis besar, sistem kontrol dan monitoring komunikasi multipoint dirancang agar dapat mengontrol beberapa aktuator seperti kipas dan LED pada perangkat multipoint yang berjarak jauh maupun dekat. Sistem ini juga dapat melakukan monitoring terhadap beberapa sensor, antara lain sensor INA219 yang mendeteksi arus, tegangan, dan daya pada baterai dan panel, sensor DHT22 untuk mendeteksi suhu dan kelembapan di sekitar perangkat, serta sensor LDR untuk memberikan informasi mengenai kondisi cuaca di sekitar perangkat. Alat ini dimaksudkan untuk mengatur penggunaan suatu perangkat agar dapat menggunakan energi seefisien mungkin melalui kontrol multipoint dan website Firebase berbasis IoT yang memungkinkan pengendalian dan monitoring dari jarak

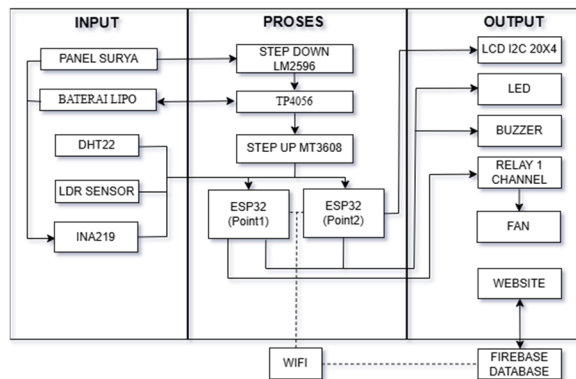


jauh. Dengan banyaknya perangkat yang dapat tersambung, sistem dan alat ini menjadi efektif untuk digunakan.



Gambar 1. Wiring Diagram

Gambar 1 merupakan sebuah wiring diagram yang diperuntukkan untuk mempermudah pembuatan alat yang berisi informasi tentang cara komponen-komponen tersambung pada perangkat secara menyeluruh, baik dari segi input, output, maupun layanan komunikasi yang digunakan. Pada wiring diagram tersebut digambarkan terdapat 2 point yang merupakan hardware yang dapat dikontrol dan dimonitoring melalui website. Namun, untuk sistem ini dapat ditambahkan beberapa point sesuai kebutuhan. Penulis menggunakan 2 point sebagai contoh agar pemahaman sistem menjadi lebih singkat.



Gambar 2. Diagram Sistem

Diagram sistem merupakan gambaran sederhana mengenai sistem alat yang terbagi atas 3 kategori, yaitu INPUT, PROSES, dan OUTPUT. Input merupakan semua perangkat yang memberikan masukan, baik dalam bentuk data seperti sensor DHT22, INA219, dan LDR, maupun dalam bentuk energi seperti panel surya dan baterai Li-ion yang

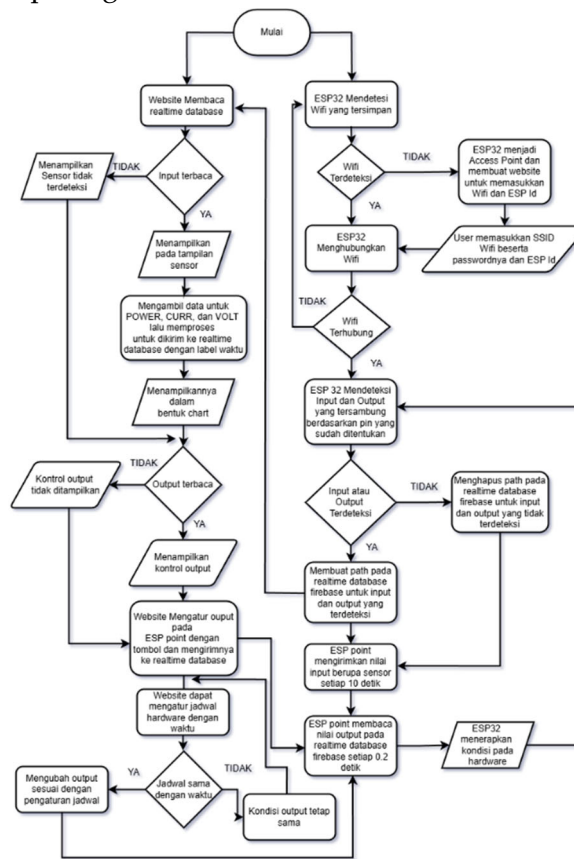


menyuplai sumber listrik untuk semua komponen. Proses merupakan semua komponen yang memproses energi seperti step down, step up, dan modul TP4056 untuk pengisian daya, maupun memproses data seperti mikrokontroler ESP32. Output merupakan hasil dari proses yang diimplementasikan dalam bentuk fisik seperti LED, buzzer, relay, dan fan, maupun dalam bentuk tampilan seperti LCD I2C dan website. Selain itu, terdapat juga Wi-Fi sebagai koneksi ke Firebase Database yang digunakan untuk kontrol dan monitoring pada website.

C. Perancangan Software

Perancangan software pada sistem merupakan bagian terpenting dari sistem dengan menggunakan teknologi yang dikembangkan pada Arduino IDE dan Visual Studio Code. Program utama sistem ini menggunakan 2 bahasa yaitu C++ untuk program pada ESP32 sebagai point dan JavaScript untuk backend website yang penulis gunakan. Komunikasi multipoint antara keduanya dilakukan melalui Realtime Database yang disediakan oleh Firebase Google. Pada database tersebut dapat menuliskan beberapa data dalam bentuk float, string, bool, dan object.

Secara garis besar sistematika program yang terdapat pada sistem disajikan pada flowchart yang tertampil pada gambar 3.



Gambar 3. Flowchart Sistem



Pada gambar 2 merupakan flowchart sistem dari program atau software. Sistem software ini terbagi atas 2 bagian yaitu untuk ESP32 dan web yang keduanya berjalan secara bersamaan dengan komunikasi web server yang disediakan oleh platform Firebase dari Google. Cara kerja sistem ini sebenarnya cukup sederhana, secara garis besar komunikasi keduanya hanya membaca dan menulis pada realtime Firebase dimana hal ini dapat dimanfaatkan untuk monitoring dan kontrol sistem.

Pada bagian sebelah kanan merupakan alur dari ESP32 point yang diawali dengan mendeteksi WiFi yang tersedia di sekitar. Jika ESP32 mengenalinya maka akan mencoba menghubungkan ke WiFi tersebut sebagai syarat sistem dapat berjalan optimal. Namun jika tidak, maka ESP32 point bukan menjadi client melainkan access point (hotspot) untuk sementara waktu dan smartphone atau laptop dapat menghubungkannya melalui WiFi masing-masing. Kemudian user diarahkan untuk mengisi SSID WiFi dan passwordnya untuk terjadi penghubungan kembali. Jika sesuai akan lanjut, namun jika tidak maka akan diulangi terus menerus. Selanjutnya ESP point akan mendeteksi input serta output yang terhubung. Bila terdeteksi maka akan membuat path di realtime database Firebase dan mengirim nilai untuk input lalu membaca kondisi untuk diterapkan pada output.

Pada bagian sebelah kiri merupakan alur dari website dengan menggunakan bahasa JavaScript. Sistem diawali dengan membaca semua data yang berada di realtime database Firebase untuk tiap point yang ada. Jika ESP berjalan, ia akan membuat path dengan nama yang unik (ESP ID) yang dibaca oleh website sehingga tampilan akan mengikuti kondisi sebenarnya pada hardware. Website juga mengambil data dan menentukan kondisi output pada hardware dengan cara JavaScript mengambil data di realtime database lalu menyimpannya sementara kemudian diproses supaya sesuai dan ditampilkan nilai tersebut pada website dengan bentuk card maupun chart. Sedangkan untuk output, setelah ESP membuat path untuk output maka tugas website untuk menampilkan panel kontrol hardware dan dapat mengubah kondisi tersebut.

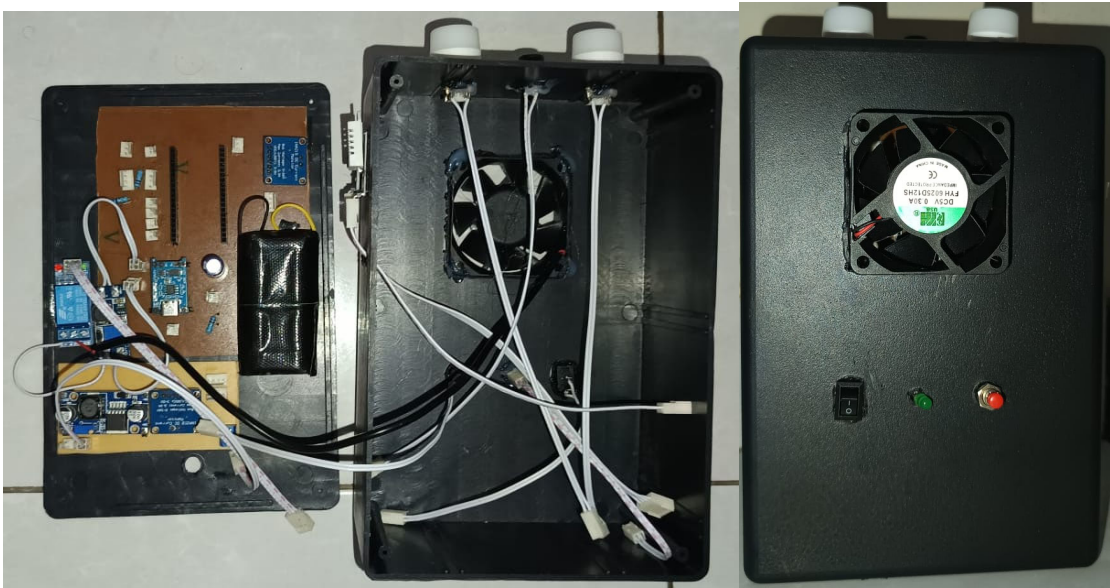
HASIL

Rancang bangun sistem kontrol dan monitoring real time multipoint berbasis web menggunakan ESP32 telah diimplementasikan pada lingkungan nyata berupa bangunan dua lantai. Tiap titik (point) perangkat diletakkan pada tiap lantai yang berbeda guna menguji kinerja sistem kontrol dalam jarak relatif jauh dengan Wi-Fi yang berbeda. Pengujian dilakukan selama 12 jam, dari pukul 00.00 hingga 12.00 siang, untuk mengamati kondisi alat yang diam dengan cuaca berubah seiring waktu.

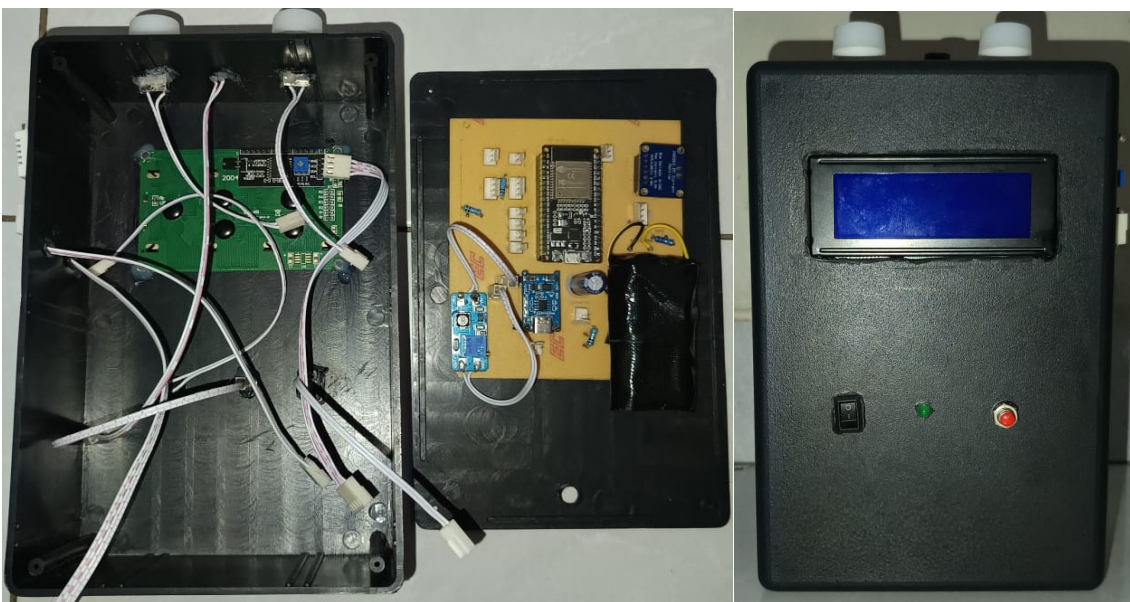
A. Realisasi Alat

A.1. Realisasi Hardware dan Elektronika





Gambar 4. Realisasi Alat Point 1



Gambar 5. Realisasi Alat Point 2

A.2. Realisasi Software dan User Interface

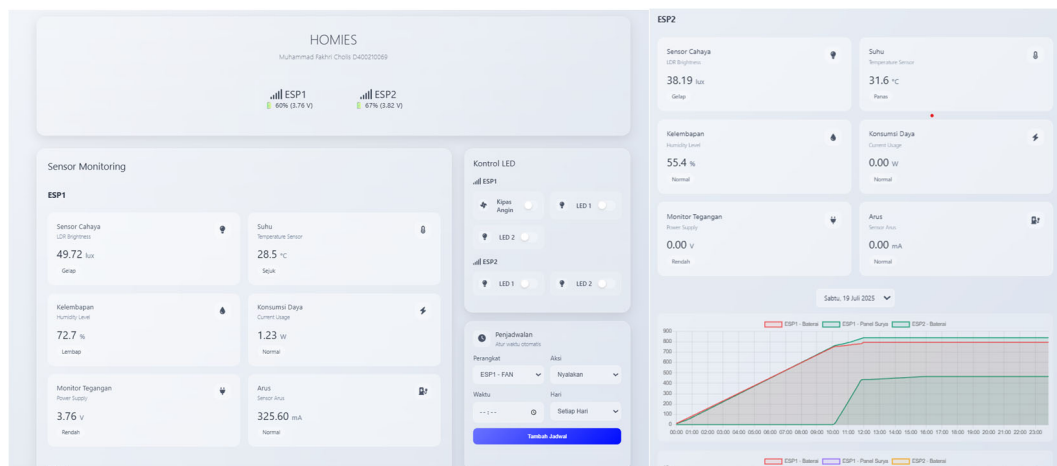
Realisasi Software dan Antarmuka Pengguna Perancangan perangkat lunak dilakukan menggunakan Visual Studio Code dengan HTML, CSS, dan JavaScript sebagai fondasi utama untuk membangun antarmuka website. Website tersebut berfungsi sebagai media monitoring dan kontrol jarak jauh terhadap setiap titik perangkat yang terhubung melalui internet. Selain operasi baca dan tulis (read/write), website juga menjalankan



proses aritmetika seperti perhitungan rata-rata dan statistik lainnya untuk menyajikan data sensor secara historikal dan *real-time*.

Kode program untuk mikrokontroler ESP32 ditulis menggunakan bahasa C++ melalui platform Arduino IDE. Perangkat ESP32 bertugas mendeteksi jaringan Wi-Fi, membaca data sensor, serta menerapkan kendali terhadap aktuator seperti LED dan kipas. Setiap unit ESP dilengkapi dengan sensor DHT22, LDR, dan INA219 untuk pemantauan suhu, kelembaban, intensitas cahaya, serta tegangan dan arus listrik. Untuk kendali keluaran, digunakan modul relay dan dua buah LED.

Sistem menggunakan Firebase Realtime Database sebagai media komunikasi data antara perangkat dan website. Firebase dipilih karena keunggulannya dalam menyediakan layanan basis data yang responsif, real-time, dan terintegrasi dengan baik melalui REST API dan SDK berbasis web maupun mobile. Firebase memungkinkan sinkronisasi data secara langsung antar perangkat dengan delay minimal. Pada sistem ini, data dari sensor dikirim secara periodik ke jalur (path) khusus dengan format ESPx/INPUT/, di mana "x" menunjukkan ID unik dari tiap ESP32 yang digunakan. Sementara itu, perintah kendali ditulis oleh website ke path ESPx/OUTPUT/, yang kemudian dibaca oleh masing-masing perangkat untuk melakukan aksi tertentu sesuai nilai perintah tersebut. Dengan pendekatan ini, setiap titik dapat bekerja secara mandiri sekaligus terkoordinasi melalui platform Firebase. Firebase juga mencatat log histori yang memungkinkan analisis data lebih lanjut dan pelacakan performa sistem secara menyeluruh dari waktu ke waktu.



Gambar 6. Realisasi Tampilan Website

B. Hasil Pengujian Alat

B.1. Pengujian keakurasian sensor DHT22



Pengujian sensor dilakukan untuk mengevaluasi akurasi pembacaan terhadap kondisi sebenarnya. Sensor DHT22 dibandingkan dengan thermometer digital KUBER AS803, menunjukkan error antara 0,34% hingga 2,13%. Nilai ini sejalan dengan studi Ahmad et al. (2024) yang menyebutkan rentang error DHT22 pada suhu ruang berkisar antara 1–3%. Untuk mengukur berapa persen error pada sensor penulis menggunakan rumus selisih hasil seperti dibawah ini :

$$Error = \left(\frac{|Data\ Sebenarnya - Data\ pengukuran|}{Data\ Sebenarnya} \right) \times 100\%$$

Dengan rumus tersebut didapatkan hasil akurasi sensor DHT22 yang tertampil pada tabel 2 dibawah ini:

Tabel 2. Keakurasian Sensor DHT

Jam	DHT 22 Point 1	DHT 22 Point 2	Suhu Pembanding	Error Point 1	Error Point 2
00.00	28.5	28.7	28.1	1,4 %	2.13 %
03.00	28.6	28.9	28.4	0.7 %	1,76 %
06.00	28.9	29.1	29.0	0.34 %	0.34 %
09.00	30.6	30.5	30.2	1,32 %	0,99 %
12.00	31.5	31.2	31.6	0,3 %	1,2 %

B.2. Pengujian Keakurasian Sensor LDR

Pada Pengujian sensor LDR dilakukan dengan membandingkan nilai sistem terhadap kondisi sebenarnya menggunakan lux meter KUBER model AS803 dengan tingkat akurasi $\pm 5\%$. Pengujian dilaksanakan selama 12 jam dengan pencatatan data setiap 3 jam pada kondisi malam, pagi, dan siang hari menggunakan sumber cahaya yang konsisten, dan hasil perbandingan tersebut disajikan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Keakurasian Sensor LDR

Jam	LDR Point 1	LDR Point 2	LUX METER	Kondisi Ruangan	Error Point 1	Error Point 2
00.00	74.8	76.5	79	Redup lampu	5,3 %	3,16 %
03.00	27.1	26.6	25	Gelap	8,4 %	6.4 %
06.00	83.7	85.4	89	Redup lampu	5.8 %	4.04 %
09.00	654.2	644.3	640	Redup matahari	2,2 %	0,67 %



12.00	883.9	840.6	878	Terang matahari	0,6 %	4,25 %
-------	-------	-------	-----	-----------------	-------	--------

B.3. Pengujian Keakurasian Sensor INA219

Pengujian sensor INA219 dilaksanakan dengan menggunakan point 1 sebagai objek uji karena memiliki karakteristik beban yang lebih tinggi dibandingkan point 2, dimana point 1 menggunakan relay 5V dan Fan DC yang memerlukan konsumsi arus lebih besar daripada lampu pada point 2. Metodologi pengujian meliputi pengamatan fluktuasi arus dan tegangan selama operasi beban dengan berbagai skenario pengujian, kemudian hasil pembacaan sensor dikalibrasi terhadap multimeter sebagai standar referensi untuk memperoleh nilai aktual. Hasil pengujian validasi sensor INA219 yang diperoleh dari prosedur ini disajikan dalam Tabel 4.

Tabel 4. Keakurasian Sensor INA 219 Point 1

No	Beban	V INA	I INA	V Multi	I Multi	Eror V	Eror I
1	Sistem	3.81	325.2 m	3.73	332 m	2,1%	2%
2	Sistem + LED 1	3.79	350.9 m	3.72	374 m	1,8%	6,17%
3	Sistem + LED 2	3.80	352.5 m	3.72	371 m	2,1%	4,98%
4	Sistem + Kipas	3.57	1224.8 m	3.42	1140 m	4,3%	6.8%
5	Sistem + LED 1 dan 2	3.79	365.3 m	3.71	380 m	2,1%	3,86%
6	Sistem +LED 1 dan 2 + Kipas	3.53	1320.8 m	3.4	1240 m	3,6%	6,45%



B.4. Pengujian Pengisian Panel Surya



Gambar 7. Lokasi Penempatan Hardware

Pengujian sistem dilakukan untuk mengevaluasi kinerja optimal sistem monitoring pada setiap point pengamatan. Metodologi pengujian melibatkan operasi sistem dengan pemantauan kondisi ruang secara berkala untuk menghasilkan data yang dapat digunakan sebagai dasar pengembangan dan perbaikan sistem pada penelitian selanjutnya. Lokasi pengujian dilaksanakan di bangunan kos dua lantai dengan infrastruktur wifi terpisah pada masing-masing lantai untuk konektivitas setiap point. Fokus pengamatan ditetapkan pada point 1 karena memiliki output yang lebih kompleks, dengan asumsi bahwa jika point 1 memenuhi standar pengujian, maka point 2 akan menghasilkan performa serupa. Konfigurasi tata letak pengujian ditampilkan pada Gambar 7.

Gambar 7 menunjukkan tiga lokasi strategis penempatan perangkat keras: pertama, panel surya dipasang pada genteng lantai 2 dengan orientasi barat dan sudut kemiringan 40° untuk optimalisasi penerimaan sinar matahari; kedua, point 1 ditempatkan di lantai 2 berdekatan dengan panel untuk memastikan akurasi deteksi tegangan dan arus panel; ketiga, point 2 diposisikan di lantai 1 untuk memvalidasi kemampuan kontrol nirkabel jarak jauh menggunakan komunikasi wifi. Data hasil pengujian sistem disajikan dalam bentuk tabel berikut.

Tabel 4. Tabel Pengujian Panel Surya Point 1

Jam	Lux	DHT22	I	V	I	V	Kondisi
			INA	INA	INA	INA	
			BAT	BAT	PANEL	PANEL	
01.00	73,8	28,5	298,3 m	3,98	0,1 m	0,64	Sistem
02.00	27,0	28,4	324,5 m	3,95	0,6 m	0,65	Sistem



03.00	27,1	28,6	1221,4m	3,7	3,8 m	0,54	Sistem + kipas
04.00	27,5	28,6	310,8 m	3,86	4,2 m	0,55	Sistem
05.00	56,4	28,8	375,6 m	3,83	3,5 m	2,43	Sistem + LED 1
06.00	83,7	29,1	143,5 m	3,81	439,5 m	4,57	Sistem
07.00	124,3	29,8	865,4 m	3,74	765,7 m	4,77	Sistem + Semua LED + Kipas
08.00	507,3	30,0	54,71 m	3,83	745,3 m	5,05	Sistem
09.00	654,2	30,5	64,57 m	3,83	786,2 m	5,10	Sistem
10.00	695,5	30,7	71,13 m	3,83	805,4 m	5,19	Sistem + Semua LED
11.00	745,2	31,0	102,4 m	3,84	802,7 m	5,23	Sistem
12.00	883,9	31,2	95,82 m	3,84	798,4 m	5,18	Sistem + LED 2

B.5. Pengujian Sistem Kontrol

Pengujian sistem kontrol dilaksanakan menggunakan dua perangkat, yaitu smartphone dan laptop, untuk melakukan kontrol terhadap seluruh point dalam sistem. Validasi sinkronisasi kinerja sistem dilakukan melalui akses website yang sama dari kedua perangkat untuk memverifikasi konsistensi komunikasi antara smartphone, laptop, dan perangkat keras. Hasil pengujian sistem kontrol multi-platform disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 5. Tabel Pengujian Sistem Kontrol

No	Kondisi Smart Phone	Kondisi Laptop	Kondisi Point 1	Kondisi Point 1
1	1(S) 2(S)	1(S) 2(S)	Sistem	Sistem
2	1(S+L1) 2(S)	1(S+L1) 2(S)	Sistem + LED1	Sistem
3	1(S + L1 + L2) 2(S + L1 + L2)	1(S + L1 + L2) 2(S + L1 + L2)	Sistem + LED1 + LED2	Sistem + LED1 + LED2



4	1(S + L1 + L2 +K) 2(S + L1 + L2)	1(S + L1 + L2 +K) 2(S + L1 + L2)	Sistem + LED1 + LED2 + Kipas	Sistem + LED1 + LED2
5	1(S + L2 +K) 2(S + L1)	1(S + L2 +K) 2(S + L1)	Sistem + LED2 + Kipas	Sistem + LED1
6	1(S + L1 + L2 +K) 2(S + L2)	1(S + L1 + L2 +K) 2(S + L2)	Sistem + LED1 + LED2 + Kipas	Sistem + LED2

Keterangan :

1() : Kondisi kontrol ESP1 S : Sistem (Tanpa beban kontrol) L2 : LED 2
2() : Kondisi kontrol ESP2 L1: LED 1 K : Kipas

B.6. Pengujian Latensi Sistem

Pengujian latensi sistem dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem real-time dalam operasional monitoring. Latensi didefinisikan sebagai parameter waktu yang diperlukan sistem untuk menyelesaikan satu siklus komunikasi lengkap dari inisiasi hingga terminasi, dimana nilai latensi yang rendah menunjukkan kecepatan respons sistem yang optimal, sebaliknya nilai latensi tinggi mengindikasikan performa sistem yang kurang efisien. Data hasil pengujian latensi sistem disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 6. Tabel Pengujian Latensi Sistem

No	Pengujian	Jaringan	Latensi Point 1	Latensi Point 1
1	INPUT SENSOR	WIFI	184 ms	182 ms
2	INPUT SENSOR	WIFI	192 ms	196 ms
3	INPUT SENSOR	WIFI	186 ms	184 ms
4	INPUT SENSOR	HOTSPOT DATA	201 ms	199 ms
5	INPUT SENSOR	HOTSPOT DATA	243 ms	232 ms
6	INPUT SENSOR	HOTSPOT DATA	187 ms	193 ms
7	OUTPUT SISTEM	WIFI	256 ms	249 ms
8	OUTPUT SISTEM	WIFI	249 ms	251 ms
9	OUTPUT SISTEM	WIFI	247 ms	243 ms
10	OUTPUT SISTEM	HOTSPOT DATA	284 ms	289 ms
11	OUTPUT SISTEM	HOTSPOT DATA	274 ms	272 ms



12	OUTPUT SISTEM	HOTSPOT DATA	291 ms	299 ms
----	---------------	--------------	--------	--------

PEMBAHASAN

Gambar 4 menunjukkan implementasi desain Point 1 yang dikonstruksi menggunakan enklosur plastik berukuran 22 cm × 14 cm × 8 cm. Sistem ini mengintegrasikan komponen sesuai dengan diagram rangkaian, meliputi fan DC, baterai lithium ion 2 cell, 2 LED 5V, modul relay, ESP32, step down, step up, modul charge TP4056, 2 sensor INA219, sensor DHT22, sensor LDR, push button, switch, buzzer, dan LED 3,3V. Point 1 difungsikan tidak hanya sebagai sistem monitoring tetapi juga dilengkapi dengan PCB pengatur tegangan panel surya, sehingga sistem ini akan diintegrasikan dengan panel surya 10 WP.

Gambar 5 memperlihatkan realisasi Point 2 yang memiliki komponen serupa dengan Point 1, namun dengan konfigurasi yang disederhanakan tanpa modul relay, fan DC, modul step down, dan hanya menggunakan satu unit sensor INA219. Komponen yang tidak digunakan digantikan dengan display LCD yang berfungsi menampilkan kondisi hardware dan indikasi status sistem Wi-Fi, memungkinkan pengguna untuk memantau kondisi point secara lokal melalui LCD. Pengujian sistem menggunakan tiga unit ESP32, dimana Point 3 difungsikan khusus untuk kontrol dengan konfigurasi ESP32 yang terhubung langsung ke LED 3,3V tanpa koneksi ke baterai, sensor, atau hardware pendukung lainnya. Konfigurasi ini bertujuan untuk memvalidasi kemampuan komunikasi multipoint yang dapat diterapkan pada lebih dari dua titik monitoring.

Gambar 6 menampilkan interface website yang dirancang dengan beberapa komponen utama. Welcome card menampilkan status deteksi setiap point beserta informasi kapasitas baterai masing-masing. Section monitoring sensor input menyajikan data real-time dari sensor pada setiap point dengan nilai yang bervariasi sesuai dengan penggunaan beban dan kondisi lingkungan. Tampilan monitoring chart menyediakan visualisasi data kontinyu untuk parameter tegangan, arus, dan daya dengan interval pencatatan setiap 10 menit, memungkinkan analisis data historis dari waktu ke waktu. Section kontrol terdiri dari dua mode operasi: kontrol manual menggunakan switch toggle untuk fungsi ON/OFF pada setiap input, dan kontrol berbasis waktu yang memungkinkan pengguna mengatur penjadwalan aktivasi/deaktivasi output.

Hasil pengujian sensor DHT22 dengan tingkat error 0,34-2,13% menunjukkan performa yang konsisten dengan penelitian Ahmad et al. (2024) yang melaporkan rentang error DHT22 pada aplikasi monitoring lingkungan berkisar 1-3%. Dibandingkan dengan studi Rahman et al. (2021) yang menggunakan sensor SHT30 dengan error 0,1-1,5%,



sensor DHT22 masih menunjukkan akurasi yang dapat diterima untuk aplikasi monitoring suhu dan kelembapan dalam sistem IoT multipoint.

Hasil Pengujian sensor LDR menghasilkan data dengan variasi dinamis, menunjukkan nilai terendah pada pukul 03.00 saat kondisi pencahayaan minimal dan nilai tertinggi pada pukul 12.00 saat intensitas cahaya matahari maksimal. Tingkat error sensor LDR sebesar 0-8,4% dalam penelitian ini relatif lebih tinggi dibandingkan dengan studi Zhang et al. (2021) yang menggunakan sensor BH1750 dengan error maksimal 3%. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh karakteristik responsivitas spektral LDR yang lebih terbatas dibandingkan photodiode silicon pada BH1750. Penelitian Kumar et al. (2024) juga melaporkan tantangan serupa dalam penggunaan sensor LDR untuk monitoring sistem fotovoltaik, dimana akurasi dapat ditingkatkan melalui kalibrasi multi-titik dan kompensasi suhu.

Pengujian sensor INA219 pada Point 1 menunjukkan bahwa pada kondisi sistem tanpa beban, tegangan tetap stabil dengan konsumsi arus rendah sekitar 0,3A. Ketika sistem diberi beban fan yang dikontrol melalui relay, terjadi penurunan tegangan menjadi 3,4V dengan peningkatan arus hingga lebih dari 1 Ampere. Error pengukuran arus sensor INA219 hingga 6,17% dalam penelitian ini sejalan dengan temuan Thompson et al. (2021) yang melaporkan variasi akurasi sensor INA219 bergantung pada rentang pengukuran dan kondisi operasional. Studi Sharma et al. (2024) menunjukkan bahwa akurasi sensor INA219 dapat ditingkatkan hingga error di bawah 2% melalui kalibrasi software dan penggunaan resistor shunt eksternal dengan toleransi 0,1%.

Pengujian sistem selama 12 jam menunjukkan kinerja monitoring yang optimal dengan data yang selaras dengan kondisi aktual. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa tegangan dan arus panel surya pada malam hingga pagi hari cenderung rendah, sehingga proses pengisian baterai tidak dapat dilakukan karena modul charger TP4056 memerlukan tegangan minimum 4,5-5V. Peningkatan daya mulai terjadi setelah pukul 06.00, memungkinkan proses charging dan pengisian baterai. Pada malam hari, sistem bergantung pada baterai sebagai sumber utama, menyebabkan penurunan daya yang signifikan dan kapasitas baterai mendekati habis. Aktivasi fan juga menyebabkan penurunan tegangan dan peningkatan arus yang mengakibatkan konsumsi daya yang lebih cepat.

Tabel 5 menyajikan data pengujian sistem kontrol yang menunjukkan sinkronisasi yang baik antara kontrol melalui smartphone dan laptop, dengan respons hardware yang sesuai dengan perintah yang diberikan melalui website. Sinkronisasi yang optimal ini dicapai melalui implementasi Firebase Realtime Database yang dapat diakses secara simultan oleh smartphone dan laptop tanpa mengganggu komunikasi antara database dengan hardware.



Tabel 6 menampilkan hasil pengujian latensi sistem yang menunjukkan performa yang baik sebagai perangkat IoT realtime dengan nilai latensi di bawah 300ms. Pengujian membuktikan bahwa jenis jaringan berpengaruh signifikan terhadap performa sistem, dimana penggunaan jaringan WiFi menghasilkan latensi yang rendah dan stabil, sedangkan penggunaan hotspot data menghasilkan latensi yang lebih tinggi dan kurang stabil baik untuk input sensor maupun output sistem.

KESIMPULAN

Rancang bangun sistem kontrol dan monitoring real-time multipoint berbasis web menggunakan ESP32 telah berhasil diselesaikan dengan kinerja yang memuaskan. Sistem menunjukkan kemampuan komunikasi web server yang handal melalui Firebase Realtime Database, memungkinkan akses kontrol dan monitoring dari jarak tak terbatas selama terhubung internet. Interface web yang responsif dapat diakses optimal baik dari desktop maupun perangkat mobile, mendukung fleksibilitas penggunaan sistem.

Hasil pengujian selama 12 jam menunjukkan kinerja sistem yang stabil dengan akurasi sensor yang bervariasi. Sensor DHT22 menunjukkan performa terbaik dengan tingkat error 0,34-2,13%, menandakan keandalan tinggi untuk monitoring suhu dan kelembapan. Namun, sensor INA219 dan LDR masih memerlukan perbaikan dengan tingkat error yang relatif tinggi (hingga 8,4% untuk LDR dan 6,8% untuk INA219), kemungkinan disebabkan oleh faktor kalibrasi, kondisi lingkungan, dan kualitas komponen perbandingan.

Sistem multipoint berhasil diimplementasikan pada dua lantai dengan jaringan Wi-Fi terpisah, membuktikan skalabilitas dan fleksibilitas arsitektur yang dirancang. Komunikasi antar node berjalan stabil dengan latensi rendah, mendukung operasi real-time yang diharapkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillah, penulis mengucapkan rasa syukur yang mendalam ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia, dan petunjuk-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian ini yang berjudul "Rancang bangun sistem kontrol dan monitoring Real-time multipoint berbasis WEB menggunakan ESP32". Pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih dan apresiasi yang setulus-tulusnya kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, bantuan, serta doa selama proses penyusunan skripsi ini. Ucapan terima kasih secara khusus ditujukan kepada:

1. Kedua orang tua tercinta, yang selalu hadir dalam setiap doa dan memberikan dukungan tanpa henti, menjadi sumber semangat dan motivasi terbesar dalam menempuh perjalanan ini.



2. Bapak Dedi Ary Prasetya, S.T., M.Eng., selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu, memberikan arahan, bimbingan, dan masukan yang sangat berharga hingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik.
3. Seluruh dosen dan staf pengajar di Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta yang telah memberikan ilmu dan pengalaman berharga selama masa studi.
4. Rekan-rekan seperjuangan angkatan 2021 dan teman-teman di Kos Surya Gemilang, yang selalu memberikan semangat dan dukungan selama masa studi dan penyusunan penelitian ini

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. S. Ahmad, W. H. Hassan, dan N. H. Zulkifli, "IoT-based smart energy monitoring system for PV solar power plants with intelligent technology," *Journal of Renewable Energy Technology*, vol. 15, no. 3, pp. 245–260, 2024, doi: 10.1016/j.jret.2024.03.015.
- [2] P. R. Johnson, D. L. Smith, dan K. A. Williams, "Recent advances in predictive maintenance methods and cybersecurity for solar panel systems: A systematic review," *Solar Energy Systems Review*, vol. 28, no. 4, pp. 112–127, 2024, doi: 10.1016/j.sesr.2024.02.008.
- [3] A. Kumar, S. Patel, dan R. Sharma, "Cloud-based monitoring system for solar photovoltaic energy generation," *International Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 12, no. 2, pp. 78–95, 2024, doi: 10.1007/s40095-024-0545-2.
- [4] X. Li, Y. Chen, dan Z. Wang, "Solar-powered wireless sensor networks for forest monitoring applications," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 194, no. 8, pp. 1–18, 2022, doi: 10.1007/s10661-022-10156-3.
- [5] M. A. Rahman, K. Ahmed, dan M. M. Hassan, "Battery-driven wireless sensor networks in smart home-building applications: Challenges and solutions," *Smart Cities Technology*, vol. 8, no. 4, pp. 156–172, 2021, doi: 10.1016/j.sct.2021.04.012.
- [6] S. Rani, P. Gupta, dan A. Mishra, "IoT-based smart solar energy monitoring system for sustainable energy management," *Renewable Energy Systems*, vol. 9, no. 3, pp. 201–215, 2021, doi: 10.1016/j.res.2021.06.024.
- [7] J. Rodriguez, L. Martinez, dan A. Gonzalez, "Alternate energy sources for wireless sensor network platforms: Performance optimization analysis," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2021, pp. 1–12, 2021, doi: 10.1155/2021/6634782.



- [8] D. Sari, A. Wibowo, dan P. Utama, "Internet of Things-based solar panel power monitoring system for output optimization," *Indonesian Journal of Electrical Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 89–104, 2023, doi: 10.25077/ijee.v11i2.578.
- [9] V. Sharma, N. Kumar, dan B. Singh, "Industrial Internet of Things and distributed control systems for energy solution monitoring and control," *Industrial IoT Applications*, vol. 6, no. 1, pp. 33–48, 2024, doi: 10.1016/j.iiot.2024.01.005.
- [10] R. Thompson, M. Davis, dan J. Brown, "Solar-powered wireless sensor networks for deployment in adverse and non-accessible areas," *Sensor Networks and Applications*, vol. 14, no. 5, pp. 298–312, 2021, doi: 10.1016/j.sna.2021.08.015.
- [11] L. Zhang, H. Liu, dan J. Yang, "Data processing modules and transmission protocols with wireless platforms for PV solar system monitoring," *Solar Power Engineering*, vol. 18, no. 7, pp. 142–158, 2021, doi: 10.1016/j.spe.2021.09.012.

