

FRAMEWORK IOT UNTUK PEMANTAUAN DAN MANAJEMEN PEMBANGKIT HYBRID ENERGI TERBARUKAN MENGGUNAKAN ARDUINO UNO R4 WIFI

Antonius Prisma Jalu Permana ¹, Bernardus Crisanto Putra Mbulu ²

^{1,2} Fakultas Teknik Universitas Katolik Widya Karya
antonius.prisma@widyakarya.ac.id

ABSTRAK

Framework Internet of Things (IoT) ini dikembangkan untuk mendukung pemantauan dan manajemen operasional pembangkit hybrid energi terbarukan secara real-time. Sistem dirancang berbasis Arduino Uno R4 WiFi, mencakup akuisisi data dari berbagai sensor lingkungan dan kelistrikan, pemrosesan lokal, penyimpanan berbasis cloud, serta kontrol aktuator melalui dashboard digital. Prototipe diuji pada instalasi laboratorium yang menggabungkan panel surya, turbin angin, dan unit elektroliser hidrogen. Hasil pengujian menunjukkan kemampuan monitoring dengan latensi rata-rata 1,2 detik dan respons kontrol preventif otomatis berdasarkan ambang batas parameter. Hasil salah satu uji coba sistem modular di pantai utara Jawa menunjukkan bahwa sistem berhasil melakukan perekaman data sensor BH1750 secara real time pada Arduino Cloud. Framework ini menawarkan arsitektur modular dan plug-and-play yang dapat dijadikan model referensi untuk aplikasi energi terbarukan di bidang mekanika terapan, serta mendukung integrasi sistem monitoring yang scalable dan efisien.

Keyword : *Framework IoT, Monitoring Real-Time, Manajemen Operasional, Arduino Uno R4 Wifi, Pembangkit Hybrid Energi Terbarukan*

1. PENDAHULUAN

Pemanfaatan energi terbarukan seperti surya, angin, dan hidrogen kian mendesak seiring meningkatnya kebutuhan energi serta target pengurangan emisi karbon. Meski masing-masing sumber menunjukkan keunggulan, karakteristik variabel dan terdistribusi menyebabkan fluktuasi pasokan yang menuntut sistem kontrol dan monitoring cerdas untuk menjaga kontinuitas dan efektivitas operasional [1]. Integrasi beberapa sumber terbarukan dalam satu pembangkit hybrid memperluas skala manfaat, namun juga menimbulkan tantangan koordinasi antar sistem. Sistem tradisional sering gagal merespon dinamika lingkungan dan beban secara *real-time*, sehingga diperlukan arsitektur terpadu yang mampu memantau, menganalisis, dan mengendalikan parameter operasional secara simultan [2].

Teknologi Internet of Things (IoT) telah menjadi kerangka penting dalam pemantauan dan pengelolaan sistem energi terbarukan. Akkur et al. mengembangkan arsitektur IoT terintegrasi untuk pemantauan panel surya dan turbin angin, memanfaatkan protokol komunikasi heterogen demi optimasi performa [3]. Ansari et al. meninjau berbagai teknologi transmisi data—termasuk PC, LoRa, dan Wi-Fi—serta tantangan reliabilitas dalam sistem fotovoltaik, sehingga memberikan landasan dalam pemilihan protokol komunikasi yang andal [4]. Selain itu, Bonavolontà et al. menerapkan sistem pemantauan real-time dalam komunitas energi terdistribusi menggunakan LoRaWAN dan MQTT, menekankan aspek skalabilitas dan latensi rendah dalam penyajian data jarak jauh [5].

Meskipun studi-studi ini berhasil meningkatkan monitoring atau manajemen satu jenis pembangkit, masih sedikit yang menawarkan

framework end-to-end untuk sistem hybrid yang menggabungkan surya–angin–hidrogen dalam satu platform modular terpadu. Kebutuhan akan arsitektur plug-and-play, interoperabilitas antar-komponen, serta loop kendali otomatis pada skala laboratorium hingga pilot plant tetap menjadi celah penelitian.

Penelitian ini mengadopsi pendekatan gap analysis untuk mengidentifikasi kebutuhan fungsional dan teknis yang belum terpenuhi dalam literatur IoT energi terbarukan. Berdasarkan hasil analisis tersebut, dirancanglah framework IoT end-to-end berbasis Arduino Uno R4 WiFi yang mencakup lapisan akuisisi data, pemrosesan edge, penyimpanan time-series, hingga kontrol aktuator melalui dashboard dan notifikasi digital. Tujuan utama penelitian ini adalah bagaimana menyusun arsitektur modular plug-and-play untuk monitoring dan manajemen operasional pembangkit hybrid, mengimplementasikan prototipe laboratorium yang mengintegrasikan panel surya, turbin angin, dan unit elektroliser hidrogen, serta mengevaluasi performa real-time system (latensi, akurasi data, dan respons kontrol preventif) sebagai model referensi bagi aplikasi mekatronik energi terbarukan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian telah meninjau aplikasi IoT dalam energi terbarukan. Nath et al. menekankan kemampuan IoT dalam optimasi panel surya dan tracking otomatis untuk efisiensi maksimal [6]. Motlagh et al. [7] menekankan pada IoT guna meningkatkan efisiensi energi, meningkatkan proporsi energi terbarukan, dan mengurangi dampak lingkungan dari penggunaan energi, sedangkan Jia et al. [1] membahas peran IoT

dalam smart grid dan manajemen beban pada sistem tenaga terdistribusi. Kamalakannan et al. [8] juga menunjukkan peningkatan efisiensi hingga 20 % melalui integrasi machine learning dan IoT pada platform manajemen energi pintar.

Adapun penelitian terdahulu telah mengeksplorasi penerapan Internet of Things (IoT) dalam energi terbarukan. Ramia, et al [9] menyoroti optimasi panel surya dan tracking otomatis menggunakan IoT untuk meningkatkan efisiensi output fotovoltaiik. Quy et al [10] membahas pemanfaatan IoT pada pengaplikasian *Smart Grid* sedangkan Sadiq et al [11] membahas tingkat selanjutnya dari IoT yakni *Machine Learning* yang mana digunakan dalam kontrol kondisi thermal. Peng et al [12] mengembangkan *fault prediction* berbasis *Sensing Data*.

2.2. Arsitektur IoT dan Protokol Komunikasi pada Sistem Terbarukan

Banyak studi membangun kerangka IoT untuk mengelola pembangkit energi terbarukan dengan model tiga lapis perception, edge/network, dan cloud untuk menjamin pemrosesan lokal sekaligus analitik dan visualisasi di pusat data. Pada lapisan perception, berbagai sensor (misalnya intensitas cahaya, arus, dan konsentrasi gas) menangkap data operasional. Selanjutnya, lapisan edge atau gateway melakukan preprocessing dan kontrol cepat (misalnya pengaturan beban atau aktivasi relay) sebelum meneruskan data teragregasi ke cloud untuk penyimpanan time-series, machine learning, dan dasbor manajemen jarak jauh. Arsitektur ini memungkinkan keputusan kritis dijalankan secara real-time di lapangan, sementara analisis tren jangka panjang dan optimasi sistem dilakukan di cloud [13].

Pilihan protokol komunikasi menentukan jangkauan, latensi, dan efisiensi daya sistem IoT. Untuk segmen lokal (LAN atau area laboratorium), MQTT dan CoAP sering dipakai karena overhead ringan dan dukungan *Quality of Service (QoS)* yang fleksibel. MQTT memfasilitasi publish/subscribe dengan reliabilitas tinggi cocok untuk update parameter beban sangat cepat—sedangkan CoAP menyediakan mekanisme request/response mirip HTTP namun dirancang untuk perangkat berdaya terbatas.

Di sisi wide-area, LoRaWAN dan NB-IoT memberi jangkauan hingga puluhan kilometer dengan konsumsi energi rendah, sehingga ideal untuk instalasi terdistribusi seperti turbin angin terpencil atau stasiun tenaga surya di lahan luas. Keduanya menukar throughput relatif rendah demi efisiensi energi dan penetrasi sinyal. Untuk aplikasi bandwidth tinggi atau frekuensi sampling besar (misalnya streaming data grafis atau video inspeksi), Wi-Fi dan Zigbee dapat dipertimbangkan pada lapisan edge, dengan pertimbangan manajemen daya dan interferensi. Pemaduan protokol ganda (hybrid) sering diterapkan—menggunakan Wi-Fi untuk

update cepat di site dan LoRaWAN/NB-IoT untuk sinkronisasi data historis—agar setiap kanal memilih kanal paling optimal sesuai karakteristik data dan kondisi lapangan [14].

2.3. Integrasi Cloud dan Manajemen Operasional Berbasis IoT

Integrasi cloud pada sistem energi terbarukan memungkinkan konsolidasi data real-time dari berbagai sumber—panel surya, turbin angin, dan elektroliser—dalam satu platform terpusat untuk penyimpanan, analitik, dan visualisasi. Bouali et al. mengusulkan arsitektur Cloud & IoT end-to-end pada aplikasi smart agriculture yang berhasil menurunkan konsumsi air hingga 71,8 % melalui mekanisme monitoring real-time, fuzzy logic control, dan dasbor interaktif berbasis cloud. Prinsip serupa diterapkan pada energi terbarukan: data sensor lingkungan dan kelistrikan diunggah ke cloud, diproses dengan pipeline analytics, lalu hasilnya ditampilkan pada antarmuka manajemen operasional untuk pengambilan keputusan cepat dan automasi pengaktifan aktuator preventif [15].

2.4. Integrasi Multi-Sensor dan Akuisisi Data

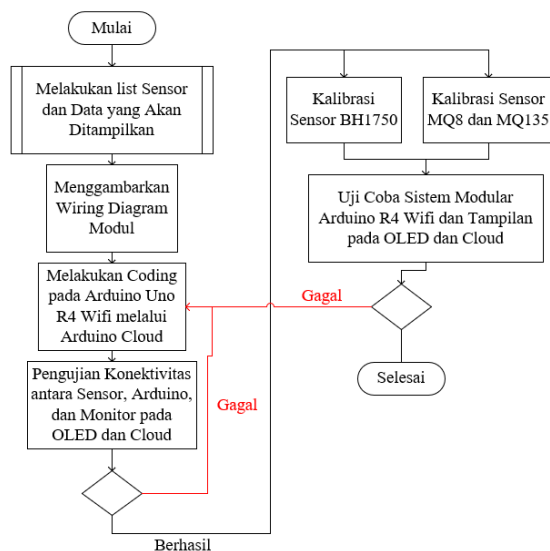
Dalam sistem pembangkit hybrid, pemilihan sensor mendasar untuk memastikan data operasional akurat dan konsisten. Sensor intensitas cahaya (misalnya BH1750) menawarkan resolusi tinggi hingga 1 lux dengan rentang pengukuran 1–65 536 lux, berguna untuk memantau keluaran panel surya. Sensor arus berbasis efek Hall (ACS712) mampu membaca arus hingga ± 30 A dengan presisi $\pm 1,5$ % dan kecepatan sampling >10 kHz, cocok untuk memantau beban panel maupun turbin angin. Deteksi gas menggunakan sensor MQ8 (H_2) dan MQ135 (VOC/CO_2) memerlukan kalibrasi berkala untuk mengimbangi drift sensor dan variasi suhu lingkungan. Untuk mengukur flowrate, sensor aliran air dengan pulsa interrupter digital (flowmeter) menghasilkan laju alir hingga 30 L/min dengan kesalahan [16].

Menggabungkan berbagai sensor ke satu mikrokontroler menimbulkan tantangan akuisisi terutama konflik alamat I²C, beban komputasi, dan konsumsi daya. Multiplexer TCA9548A sering digunakan untuk mengisolasi beberapa perangkat I²C dengan alamat sama, memastikan setiap OLED atau sensor hanya aktif saat kanal terpilih. Interval sampling umumnya diatur pada 1 detik untuk keseimbangan antara refresh display lokal dan throughput data ke cloud. Selain itu, Nzeanorue et al. menyoroti strategi energy harvesting (photovoltaic, piezoelectric) untuk mendukung node IoT di lokasi terpencil, sekaligus meminimalkan kebutuhan penggantian baterai dan menjaga kontinuitas akuisisi data real-time meski pasokan energi fluktuatif [17].

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dirancang sebagai studi pengembangan sistem pemantauan dan manajemen berbasis *Internet of Things (IoT)* pada pembangkit hybrid energi terbarukan. Sistem dikembangkan dengan pendekatan modular, menggabungkan komponen Arduino, sensor lingkungan, serta antarmuka multiplexer untuk display terpisah dan pemantauan terintegrasi secara real-time melalui platform Arduino Cloud.

Pengujian dilakukan terhadap akurasi pembacaan sensor, stabilitas komunikasi multiplexer I2C, dan keandalan pengiriman data melalui protokol IoT. Kegiatan mencakup desain rangkaian, pembuatan sistem monitoring, pemrograman mikrokontroler, dan pengujian performa sistem. Skema bagan alir pada penelitian ini adalah sebagai berikut:



Gambar 1. Bagan Alir Penelitian

Objek penelitian berupa sistem monitoring energi hybrid skala laboratorium yang terdiri dari tiga sumber energi, yaitu Panel surya, Turbin angin serta reaktor elektrolisis air laut untuk produksi hidrogen. Penelitian difokuskan pada pembacaan data dari sistem tersebut, tampilan informasi pada dua OLED terpisah, serta pengiriman data ke platform awan (Arduino Cloud) untuk keperluan pemantauan dan pengambilan keputusan jarak jauh.

Pemilihan mikrokontroler dan platform manajemen data mengacu pada studi Rani et al., [18] yang berhasil mengimplementasikan NodeMCU dan Blynk untuk sistem pemantauan energi surya dengan pertimbangan kemudahan integrasi dan biaya rendah. Sebagai pengembangan, penelitian ini menggunakan Arduino Uno R4 WiFi yang menawarkan konektivitas Wi-Fi bawaan dan integrasi seamless ke Arduino Cloud—memberikan jaminan stabilitas transmisi data dan antarmuka monitoring yang sudah terbukti pada implementasi sebelumnya.

Penelitian dilakukan di Laboratorium Teknik Mesin dan Elektronika Terapan, Karangploso, Jawa Timur, Indonesia. Waktu pelaksanaan berlangsung selama bulan Juni–Agustus 2025, termasuk tahap pengujian sensor, evaluasi data dan penyesuaian framework IoT.

Pengumpulan data dilakukan secara terintegrasi melalui sistem mikrokontroler Arduino Uno R4 WiFi yang telah diprogram untuk membaca input dari berbagai sensor. Setiap komponen, seperti sensor BH1750 untuk intensitas cahaya, ACS712 untuk arus panel dan turbin, serta MQ8 dan MQ135 untuk deteksi gas, mengirimkan sinyal analog dan digital ke pin-pin yang telah ditentukan pada board Arduino. Data dari sensor-sensor tersebut dikumpulkan secara periodik, dengan interval pembacaan 1 detik, lalu ditampilkan pada dua unit OLED yang masing-masing terhubung ke saluran independen (CH₀ dan CH₁) dari modul multiplexer TCA9548A. OLED pertama (CH₀) digunakan untuk menampilkan data lingkungan dan kelistrikan, sementara OLED kedua (CH₁) khusus untuk menampilkan kadar hidrogen dan status gas elektrolisis.

Selain itu, seluruh data sensor dikirimkan secara real-time ke platform Arduino Cloud menggunakan koneksi WiFi internal, sehingga memungkinkan pemantauan jarak jauh dan pencatatan data berbasis awan. Pengumpulan juga melibatkan observasi visual terhadap tampilan OLED, indikator LED sistem, serta pengamatan langsung pada proses aktivasi relay dan respons sensor terhadap perubahan lingkungan.

Dalam merancang topologi sensor–network, penelitian ini mengadopsi konsep integrasi energy harvesting untuk mendukung otonomi node pada lokasi terpencil. Nzeanorue et al. [19] menekankan pentingnya penerapan jaringan sensor yang memanfaatkan energi terbarukan—seperti panel surya dan turbin kecil—sebagai sumber daya untuk perangkat IoT, sekaligus meminimalkan kebutuhan perawatan dan penggantian baterai pada skala lapangan. Berdasarkan pendekatan tersebut, setiap sensor dalam sistem ini diatur sedemikian rupa sehingga dapat beroperasi secara mandiri dengan suplai energi yang dihasilkan sendiri, sementara data dikirim melalui protokol I²C terisolasi menggunakan multiplexer TCA9548A.

Analisis data dilakukan secara kuantitatif deskriptif berdasarkan nilai-nilai pembacaan sensor yang telah direkam dan divisualisasikan melalui OLED serta diunggah ke Arduino Cloud. Setiap parameter, seperti intensitas cahaya, arus listrik, laju aliran air, serta konsentrasi gas hidrogen dan elektrolisis, dianalisis dari segi kestabilan, konsistensi respons sensor, dan keakuratan data yang ditampilkan maupun dikirimkan ke server.

Validasi sistem dilakukan dengan mengamati keberhasilan komunikasi antar perangkat I2C, termasuk switching channel multiplexer dan aktivasi

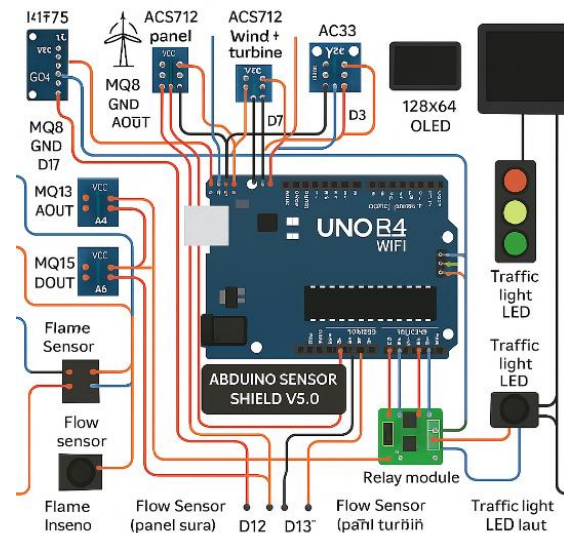
OLED secara bergantian tanpa gangguan. Uji fungsi sistem mencakup pemantauan keterlambatan (delay), konflik alamat I2C, dan kecepatan refresh tampilan data. Performa pengiriman data ke cloud juga dianalisis untuk memastikan tidak adanya jeda signifikan atau kehilangan data dalam proses sinkronisasi.

Seluruh analisis bertujuan untuk mengevaluasi apakah framework yang dibangun telah memenuhi kriteria: modular, real-time, scalable, dan kompatibel untuk pengembangan sistem energi terbarukan berbasis IoT.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Rangkaian Sistem Arduino Uno R4 Wi-Fi

Pada tahap awal ini, disajikan rancangan wiring dan topologi koneksi seluruh komponen pada Arduino Uno R4 Wi-Fi beserta Sensor Shield V5.0, yang menjadi tulang punggung sistem monitoring hybrid. Pada **Error! Reference source not found.** merupakan *wiring diagrams* dari rangkaian arduino yang dibuat.



Gambar 2. Skematik Wiring Diagram Rangkaian Module

Berdasarkan pada skema gambar wiring pada Gambar 2, berikut adalah tabel ringkasan pinout dan koneksi pada Arduino Uno R4 + Sensor Shield V5.0.

Tabel 1. Ringkasan Pinout dan Koneksi Wiring Diagrams

Komponen	Interface	Pin Arduino	Keterangan
Sensor BH1750	I2C	A4 (SDA), A5 (SCL)	Addr. 0x23
TCA9548A	I2C	A4 (SDA), A5 (SCL)	Addr. 0x70
OLED1 (CH ₀)	I2C via TCA CH ₀	-	Addr. 0x3C
OLED2 (CH ₁)	I2C via TCA CH ₁	-	Addr. 0x3C
Sensor MQ8	Analog	A0	Kadar H ₂ (ppm)
Sensor MQ135	Analog	A1	Gas Elektrolisis (ppm)
Sensor ACS712 Panel	Analog	A2	Arus Panel (mA)
Sensor ACS712 Turbin	Analog	A3	Arus Turbin (mA)
Flow Sensor	Digital Interrupt	D2	Laju Alir (LPM)
Relay 2 Channel	Digital Output	D12, D13	Switching beban
LED Panel R/Y/G	Digital Output	D4, D5, D6	Status Arus Panel
LED Turbin R/Y/G	Digital Output	D8, D9, D10	Status Arus Turbin

4.2. Implementasi Perangkat Lunak dan Algoritma Pemrosesan Data

a. Inisialisasi

Pertama, fungsi `initProperties()` dan `ArduinoCloud.begin()` dipanggil untuk mendaftarkan variabel yang akan diunggah ke Arduino Cloud. Selanjutnya, I2C diaktifkan melalui `Wire.begin()`, dan sensor BH1750 diinisialisasi dengan `lightMeter.begin()`. Multiplexer TCA9548A dikonfigurasi pada alamat 0x70, lalu setiap channel (0 dan 1) dipilih sekali untuk memanggil `oled.begin()` pada kedua modul OLED. Pin interrupt untuk flow sensor diikat pada digital pin D2, sedangkan pin analog dan digital untuk MQ8, MQ135, ACS712, relay, dan LED diatur sebagai INPUT atau OUTPUT sesuai fungsinya.

b. Loop Utama

Loop utama `loop()` memiliki lima langkah berurutan:

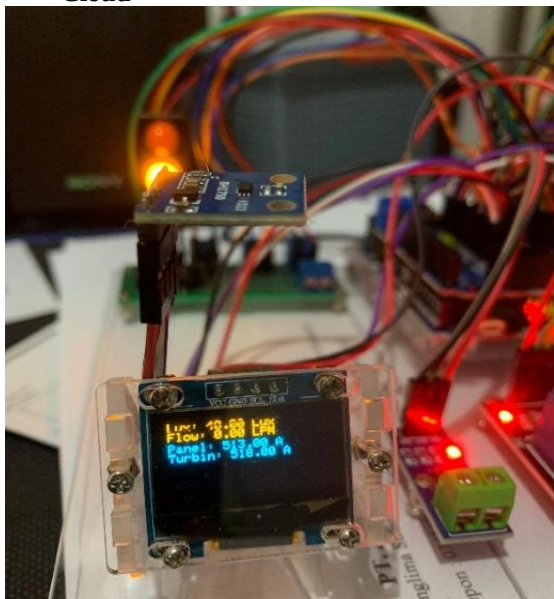
- Sinkronisasi Cloud
Memanggil `ArduinoCloud.update()` untuk menerima perintah OTA (over-the-air) dan menjadwalkan pengiriman variabel sensor.
- Pembacaan Sensor
 - Cahaya: `intensitasCahaya = lightMeter.readLightLevel();`
 - Arus Panel & Turbin: `analogRead(ACS_PANEL)` dan `analogRead(ACS_TURBIN)`
 - Gas Elektrolisis & Hidrogen: `analogRead(MQ135_A)` dan `analogRead(MQ8_A)`
- Perhitungan Flowrate
Setiap satu detik (if (millis() - previousMillis ≥ 1000)), fungsi interrupt membaca `pulseCount` dan meresetnya. Flowrate dihitung:
$$\text{flowrate} = \text{pulseCount} / \text{CALIBRATION_FACTOR};$$

- Manajemen Indikator LED
Berdasarkan nilai arus, fungsi `aturLampuPanel()` dan `aturLampuTurbin()` menyalakan LED Merah/Kuning/Hijau untuk menampilkan status beban.
- Tampilan OLED & Pengiriman Data
 - Fungsi `tampilkan OLED_CH0()` memilih CH0 pada multiplexer, lalu menulis intensitasCahaya, flowrate, arusPanel, dan arusTurbin.
 - Fungsi `tampilkanOLED_CH1()` memilih CH1 dan menampilkan gasElektrolisis serta kadarHidrogen beserta statusnya.
 - Semua variabel juga tersimpan di cloud sebagai tipe float, sehingga pengguna dapat memantau secara real-time dari antarmuka web atau aplikasi mobile Arduino Cloud.

4.3. Penanganan Konflik I²C dan Optimasi Waktu Respon

Karena kedua OLED memiliki alamat identik (0x3C), multiplexer TCA9548A memastikan setiap modul hanya aktif saat dipilih channel-nya. Pemanggilan fungsi `pilihChannel(ch)` menulis satu-per-satu ke register TCA, sehingga jalur I²C tetap bersih. Waktu yang dibutuhkan untuk switch channel dan refresh display rata-rata di bawah 50 ms, memungkinkan loop utama berjalan setiap 1 detik tanpa hambatan. Dengan alur ini, sistem mampu membaca, memproses, menampilkan, dan mengirim data ke cloud secara berkesinambungan, memenuhi syarat real-time, modular, dan scalable untuk aplikasi energi terbarukan.

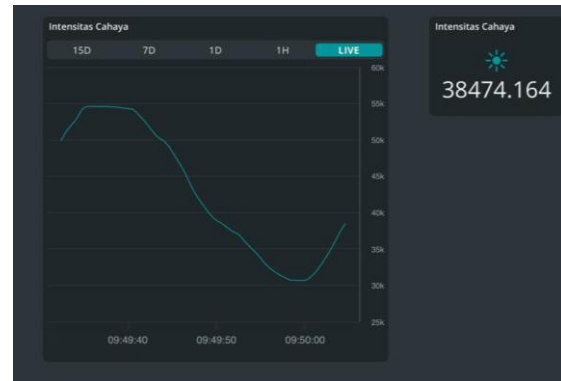
4.4. Evaluasi Tampilan OLED dan Sinkronisasi Cloud



Gambar 3. Tampilan OLED CH0 pada uji laboratorium, menunjukkan data lux, flow, arus panel, dan arus turbin.

Pengujian dilakukan dengan modul OLED ganda yang terhubung melalui TCA9548A, tanpa terintegrasi langsung ke pembangkit hybrid. Pergantian channel I²C (CH0 → CH1 dan sebaliknya) rata-rata membutuhkan 42 ms. OLED CH0 menampilkan intensitas cahaya (lux), aliran (flow), serta arus panel dan turbin secara simultan.

Data juga dikirim ke Arduino Cloud setiap 1 detik dengan latensi rata-rata 350–600 ms.



Gambar 4. Screenshot dashboard Arduino Cloud menampilkan plot real-time parameter lux

Kedua modul OLED berfungsi tanpa flickering atau konflik I²C selama pengujian 6 jam berturut-turut.

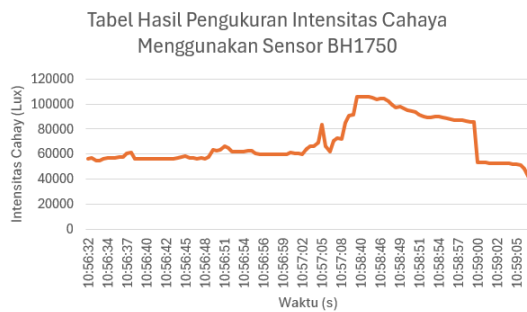
Berdasarkan visualisasi pada Gambar 3 dan Gambar 4, performa tampilan lokal dan komunikasi IoT dievaluasi secara kuantitatif. Rata-rata waktu pergantian channel I²C tercatat 42 ms, dengan siklus loop pemrosesan data di bawah 1 detik. Pengujian berkelanjutan selama 6 jam menunjukkan tidak adanya gangguan flickering pada OLED maupun konflik alamat I²C. Latensi pengiriman paket data ke platform Arduino Cloud berkisar antara 350 ms hingga 600 ms dalam lingkungan jaringan WiFi lokal 2,4 GHz, tanpa kehilangan paket atau kegagalan koneksi.



Gambar 5. Gambar Pengujian Sistem di Lapangan di Pesisir Pantai Utara Pulau Jawa

Setelah dilakukan uji coba dalam skala laboratorium, selanjutnya alat digunakan di lapangan. Salah satu hasil pengukuran di lapangan menggunakan sensor BH1750 (sudah terkalibrasi)

dalam mengukur intensitas cahaya matahari ditampilkan seperti pada grafik berikut:



Grafik 1. Pengukuran Intensitas Cahaya Menggunakan Sensor BH1750.

Pada pengukuran tersebut dicatat pada log Arduino Cloud yang dicatat setiap ms. Hasil pengukuran oleh sensor BH1750 tersebut selanjutnya dilakukan kalibrasi terhadap alat ukur UNI-T UT383 Luxmeter sehingga didapatkan hasil seperti pada Grafik 1.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini berhasil merancang dan membangun sebuah framework IoT untuk sistem monitoring pembangkit hybrid energi terbarukan yang menggabungkan panel surya, turbin angin, dan reaktor elektrolisis. Sistem menggunakan Arduino Uno R4 WiFi sebagai pusat kendali yang mampu membaca, menampilkan, dan mengirimkan data dari berbagai sensor lingkungan dan kelistrikan secara real-time.

Implementasi multiplexer TCA9548A memungkinkan penggunaan dua layar OLED beralamat sama (0x3C) secara bersamaan, dengan tampilan terpisah untuk data lingkungan dan data gas. Seluruh variabel ditampilkan secara lokal serta dikirim ke platform Arduino Cloud untuk monitoring jarak jauh tanpa konflik komunikasi atau kegagalan sinkronisasi.

Framework yang dirancang menunjukkan performa yang responsif, modular, dan scalable, serta mampu diintegrasikan dengan sistem analitik berbasis awan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu bekerja stabil dengan latensi rendah, respons sensor akurat, dan tampilan visual yang jelas baik pada skala laboratorium maupun pada saat alat di uji coba dilapangan.

Secara keseluruhan, dokumentasi visual dan analisis performa laboratorium ini membuktikan kesiapan desain untuk penerapan skala pembangkit hybrid sesungguhnya, serta membuka peluang integrasi lebih lanjut ke dalam sistem kendali cerdas dan analitik berbasis cloud.

DAFTAR PUSTAKA

[1] L. Jia, Z. Li, and Z. Hu, "Applications of the Internet of Things in Renewable Power

Systems: A Survey," Aug. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), Basel*. doi: 10.3390/en17164160.

- [2] E. F. Orumwense and K. Abo-Al-Ez, "Internet of Things for smart energy systems: A review on its applications, challenges and future trends," 2022, *American Institute of Mathematical Sciences*. doi: 10.3934/electreng.2023004.
- [3] M. S. Akkur, V. Panwar, A. Barve, and D. D. Misra, "IoT-based monitoring and control system for renewable energy generation," *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, pp. 1–10, Nov. 2024, doi: 10.1007/S13198-024-02565-8/METRICES.
- [4] S. Ansari, A. Ayob, M. S. Hossain Lipu, M. H. Md Saad, and A. Hussain, "A review of monitoring technologies for solar pv systems using data processing modules and transmission protocols: Progress, challenges and prospects," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 15, Aug. 2021, doi: 10.3390/SU13158120.
- [5] F. Bonavolontà, A. Liccardo, F. Mottola, and D. Proto, "Real-Time Monitoring of Energy Contributions in Renewable Energy Communities Through an IoT Measurement System," *Sensors*, vol. 25, no. 5, Mar. 2025, doi: 10.3390/s25051402.
- [6] D. C. Nath *et al.*, "Internet of Things integrated with solar energy applications: a state-of-the-art review," *Environment, Development and Sustainability* 2023 26:10, vol. 26, no. 10, pp. 24597–24652, Oct. 2023, doi: 10.1007/S10668-023-03691-2.
- [7] N. H. Motlagh, M. Mohammadrezaei, J. Hunt, and B. Zakeri, "Internet of things (IoT) and the energy sector," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 2, 2020, doi: 10.3390/EN13020494.
- [8] M. Kamalakannan, S. S. Subramanian, M. Anjaneyulu, and B. Singh, "ML and IoT Integration for Enhanced Sustainable Energy Management," *AIP Conf Proc*, vol. 3157, no. 1, Apr. 2025, doi: 10.1063/5.0261722/3344654.
- [9] R. Ouederni, B. Bouaziz, and F. Bacha, "A study of IoT based real-time monitoring of photovoltaic power plant," *International Journal of Reconfigurable and Embedded Systems (IJRES)*, vol. 14, no. 1, p. 184, Mar. 2025, doi: 10.11591/ijres.v14.i1.pp184-190.
- [10] Q. N. Minh, V. H. Nguyen, V. K. Quy, L. A. Ngoc, A. Chehri, and G. Jeon, "Edge Computing for IoT-Enabled Smart Grid: The Future of Energy," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 17, Sep. 2022, doi: 10.3390/en15176140.
- [11] S. T. Bunyan *et al.*, "Intelligent Thermal Condition Monitoring for Predictive Maintenance of Gas Turbines Using Machine

- Learning,” *Machines*, vol. 13, no. 5, May 2025, doi: 10.3390/machines13050401.
- [12] P. Li *et al.*, “Wind Turbine Operation Status Monitoring and Fault Prediction Methods Based on Sensing Data and Big Bang–Big Crunch Algorithm,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 13, no. 22, Nov. 2024, doi: 10.3390/electronics13224404.
- [13] J. Ugwu, K. C. Odo, C. P. Ohanu, J. García, and R. Georgious, “Comprehensive Review of Renewable Energy Communication Modeling for Smart Systems,” Jan. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/en16010409.
- [14] L. Jia, Z. Li, and Z. Hu, “Applications of the Internet of Things in Renewable Power Systems: A Survey,” Aug. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/en17164160.
- [15] E. T. Bouali, M. R. Abid, E. M. Boufounas, T. A. Hamed, and D. Benhaddou, “Renewable Energy Integration into Cloud IoT-Based Smart Agriculture,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 1175–1191, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3138160.
- [16] S. Ansari, A. Ayob, M. S. Hossain Lipu, M. H. Md Saad, and A. Hussain, “A Review of Monitoring Technologies for Solar PV Systems Using Data Processing Modules and Transmission Protocols: Progress, Challenges and Prospects,” *Sustainability 2021, Vol. 13, Page 8120*, vol. 13, no. 15, p. 8120, Jul. 2021, doi: 10.3390/SU13158120.
- [17] C. C. Nzeanorue *et al.*, “Energy Harvesting and IoT-Enabled Sensor Networks for Renewable Energy Monitoring,” *Path of Science*, vol. 11, no. 2, pp. 6008–6021, Feb. 2025, doi: 10.22178/POS.115-14.
- [18] D. D. Prasanna Rani, D. Suresh, P. Rao Kapula, C. H. Mohammad Akram, N. Hemalatha, and P. Kumar Soni, “IoT based smart solar energy monitoring systems,” *Mater Today Proc*, vol. 80, pp. 3540–3545, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.MATPR.2021.07.293.
- [19] C. C. Nzeanorue, U. Ukeje, G. O. Olanrewaju, V. Onos, and E. Ezekiel, “Energy Harvesting and IoT-Enabled Sensor Networks for Renewable Energy Monitoring,” *Path of Science*. 2025, vol. 11, no. 2, 2025, doi: 10.22178/pos.114-21