

BAB V

PENGUJIAN ALAT DAN ANALISA SISTEM

5.1 Tujuan Pengujian

Setelah sistem monitoring lingkungan berhasil dirakit dan dijalankan, dilakukan pengujian untuk memastikan semua komponen bekerja sesuai fungsinya. Tujuan utama pengujian ini adalah mengevaluasi performa sistem secara menyeluruh, mulai dari sensor, transmisi data, hingga tampilan informasi. Secara khusus, pengujian mencakup:

- Menilai kinerja sensor MH-Z19 (CO₂), ZH03B (PM2.5), DHT22 (kelembapan), dan LM2904 (kebisingan).
- Menguji stabilitas komunikasi jarak jauh menggunakan modul LoRa E220 400T22D.
- Memastikan proses pengiriman data dari ESP32 ke platform ThingSpeak berjalan baik dan akurat.
- Memverifikasi tampilan data real-time di dashboard ThingSpeak.
- Mengevaluasi fungsi LoRa sebagai penanda status sistem (data berhasil masuk, tidak ada data, atau terjadi error).

5.2 Skema dan Lokasi Pengujian

5.2.1 Skema Lokasi Pengujian Alat

Pengujian alat dilakukan secara outdoor di area yang terbuka agar seluruh sensor dapat beroperasi dengan optimal. Skema penempatan alat ditunjukkan pada Gambar 5.1 berikut:



Gambar 5. 1 Skema Penempatan Alat Transmitter dan Receiver

Keterangan Skema:

- Tiang utama: sebagai dudukan penyangga panel surya, tempat box sensor, dan tempat box panel Rangkaian Transmitter.
- Box sensor terdapat sensor MHZ19 (CO₂), ZH03B (PM_{2.5}), DHT22 (Temperature & Kelembapan), Grove Sensor LM2904 (Kebisingan).
- Unit Transmitter: ditempatkan di box panel, terdiri dari rangkaian ESP32, LCD I2C, LoRa Transmitter, Stepdown, SCC, dan Baterai AKI.
- Unit Receiver: berada ± 500 meter dari transmitter, terdiri dari ESP32, LCD I2C, LoRa Receiver dan Koneksi WiFi.
- Sumber daya: Transmitter menggunakan sistem PLTS solar panel dan ditampung Baterai AKI 12V 7,5Ah, sedangkan Receiver menggunakan adaptor DC 5V.

5.2.2 Deskripsi Lokasi Pengujian

Pengujian dilakukan di lokasi Kampus Sekolah Vokasi Undip, di area parkir depan *bengkel* Teknik Listrik Indutri. Untuk *mendukung* proses pengujian sistem Monitoring Lingkungan secara langsung di lapangan, diperlukan pemilihan lokasi yang terbuka. Tabel 5.1 berikut menyajikan informasi lengkap mengenai lokasi pengujian yang digunakan, termasuk koordinat dan kondisi lingkungan sekitar.

Tabel 5. 1 Data Lokasi Pengujian

Parameter	Data
Koordinat Lokasi	7°03'01.8"S 110°26'04.3"E
Lingkungan Sekitar	Padat Penduduk
Jarak Transmitter - Receiver	±500 meter
Cuaca saat pengujian	Cerah
Waktu cirebon	07.00 – 16.00

5.3 Prosedur Pengujian

Sebelum proses pengujian dilakukan, tahap ini difokuskan pada penyelesaian instalasi perangkat keras (hardware setup) dari sistem monitoring lingkungan. Beberapa kegiatan penting yang dilakukan pada tahap ini meliputi:

- Pemasangan dan pengujian deteksi sensor, seperti sensor MH-Z19B (CO₂), sensor ZH03B (PM2.5), sensor DHT22 (kelembapan), serta sensor kebisingan berbasis LM2904.
- Penempatan unit transmitter (ESP32 + sensor + LoRa E220 400T22D) dan receiver pada lokasi yang telah direncanakan, untuk memastikan komunikasi LoRa dapat berjalan dengan baik dalam kondisi sebenarnya.
- Integrasi sistem catu daya, baik melalui adaptor maupun sumber dari panel surya, guna menjamin perangkat dapat beroperasi secara stabil selama proses pengujian.

Tahapan ini bertujuan untuk memastikan bahwa seluruh komponen fisik sistem telah terpasang dengan benar, berfungsi sesuai spesifikasi, serta siap digunakan dalam proses pengujian berikutnya.

5.3.1 Setup Perangkat Keras

Pada tahap ini dilakukan persiapan dan pemasangan perangkat keras (hardware setup) dari *sistem* monitoring lingkungan sebelum proses pengujian dimulai. Kegiatan ini mencakup penempatan sensor MH-Z19B (CO₂), ZH03B (PM2.5), DHT22 (kelembapan), dan LM2904 (kebisingan), pemasangan unit transmitter (ESP32 + sensor + LoRa E220 400T22D) dan receiver pada lokasi yang ditentukan, serta integrasi sistem catu daya untuk memastikan perangkat dapat beroperasi secara stabil. Berikut adalah prosedur lengkapnya:

1. Persiapan Tempat dan Alat Transmitter

- Menentukan lokasi pengujian di area terbuka dengan sirkulasi udara yang baik dan minim gangguan lingkungan, seperti halaman luas atau lapangan terbuka.
- Memastikan sambungan kabel untuk sensor MH-Z19B (CO₂), ZH03B/PMS5003 (PM2.5), DHT22 (kelembapan), dan LM2904 (kebisingan) secara aman agar pengukuran data bisa berjalan lebih akurat.
- Mengatur posisi sensor agar tidak saling menghalangi dalam menangkap data lingkungan, serta melindungi sensor dari paparan langsung hujan menggunakan pelindung box tanpa mengurangi sensitivitas pengukuran.

Gambar lokasi dan posisi tiang sensor yang digunakan dalam proses pengujian ditunjukkan pada Gambar 5.1 Skema Penempatan Alat. Posisi tersebut dijaga tetap konsisten selama pengujian untuk memastikan keakuratan dan konsistensi data yang diperoleh.

2. Pemasangan Sensor

- Memasang sensor MH-Z19 (CO₂) pada kotak box pelindung yang memiliki ventilasi udara agar sensor tetap terlindungi dari hujan langsung namun tetap dapat mendeteksi kadar gas secara optimal.
- Menempatkan sensor ZH03B (PM2.5) pada kotak box pelindung yang memiliki ventilasi udara agar sensor tetap terlindungi untuk mencegah debu kasar atau air masuk ke dalam sensor.
- Memasang sensor DHT22 (kelembapan) pada bagian sisi box dengan pelindung radiasi untuk mengurangi pengaruh panas langsung dari sinar matahari, sehingga pembacaan kelembapan lebih akurat.
- Menempatkan sensor LM2904 (kebisingan) pada kotak box pelindung yang memiliki ventilasi udara, agar mikrofon elektret dapat menangkap gelombang suara lingkungan secara optimal.
- Mengatur dan merapikan kabel sensor menggunakan cable ties serta memastikan seluruh koneksi ke ESP32 transmitter sesuai dengan skematik rangkaian sistem.



Gambar 5. 2 Posisi Sensor Dalam Box Pelindung

3. Pemasangan Unit Transmitter

- Menyusun seluruh komponen utama seperti ESP32, modul LoRa E220 400T22D, serta DC-DC step-down converter LM2596 dan LCD I2C ke dalam satu box agar membentuk sistem terintegrasi.
- Menghubungkan panel surya 30 Wp dengan baterai AKI 12V, lalu menyambungkannya ke step-down converter untuk menghasilkan suplai tegangan 5V sebagai sumber daya mandiri bagi ESP32 dan sensor.
- Menyambungkan sensor MH-Z19B (CO₂), ZH03B (PM2.5), DHT22 (kelembapan), dan LM2904 (kebisingan) ke ESP32 sesuai dengan skematik wiring, serta memastikan tidak ada kesalahan pada sambungan pinout.
- Seluruh rangkaian transmitter ditempatkan dalam box pelindung tahan air dan panas, lalu dipasang di bawah bagian panel surya untuk perlindungan dari hujan maupun panas matahari.
- Setelah dihidupkan, sistem transmitter akan membaca data sensor dan mengirimkannya secara nirkabel melalui LoRa E220 400T22D menuju unit receiver.

4. Pemasangan Unit Receiver

- Menyusun komponen ESP32, modul LoRa E220 400T22D, dan LCD I2C ke dalam wadah khusus untuk unit penerima.
- Unit receiver ditempatkan di area yang memiliki koneksi internet stabil (Wi-Fi) agar dapat terhubung dengan platform IoT Thingspeak.
- Menyambungkan modul LoRa pada receiver ke ESP32 dengan konfigurasi pin sesuai skematik agar mampu menerima data dari transmitter dengan benar.
- Menyediakan sumber daya menggunakan adaptor DC 5V atau catu daya USB untuk menjamin kestabilan suplai tegangan pada unit penerima.
- Memastikan proses parsing data dari format serial LoRa ke format JSON/CSV berjalan dengan baik sebelum dikirimkan ke Thingspeak.
- Unit receiver kemudian meneruskan data sensor yang diterima ke dashboard Thingspeak secara real-time, sehingga data dapat dipantau melalui laptop atau smartphone.

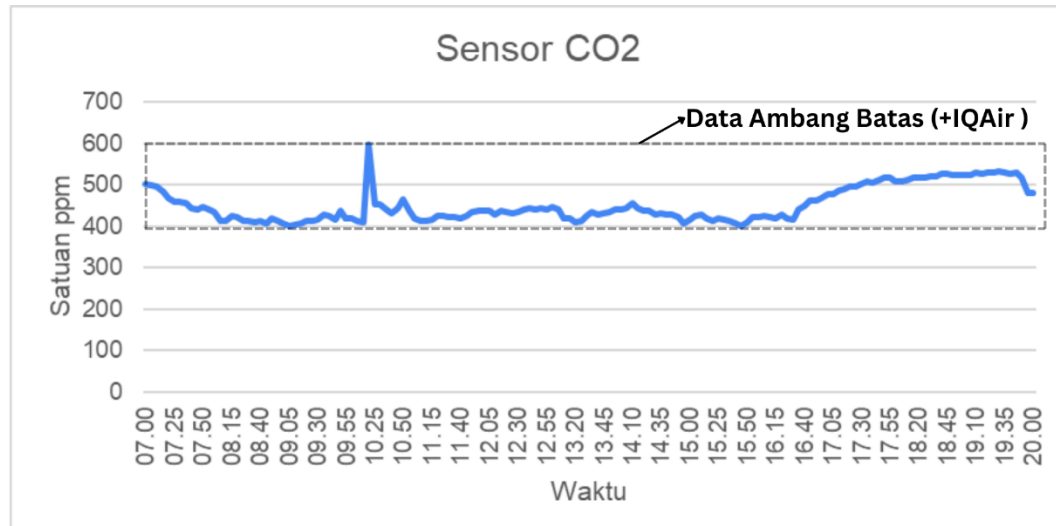
5.4 Pengujian dan Analisa Alat

Pengukuran dan pengujian alat pada sistem monitoring lingkungan dilakukan di area terbuka, yaitu halaman parkir Sekolah Vokasi, agar sensor dapat bekerja secara optimal tanpa terhalang oleh bangunan atau objek lain. Tujuan utama pengujian ini adalah mengevaluasi kinerja dan keandalan perangkat yang telah dirancang dalam kondisi lapangan. Karena sensor yang saya gunakan sudah terkalibrasi dari modul sensor, pengujian difokuskan pada validasi pembacaan data serta kestabilan sistem secara keseluruhan. Proses pengujian dilakukan dengan memberikan variasi kondisi lingkungan, seperti paparan asap kendaraan atau asap buatan sebagai sumber CO₂ dan PM2.5, pengujian pada kondisi kelembapan udara alami di lingkungan terbuka untuk sensor DHT22, serta variasi tingkat kebisingan dari aktivitas kendaraan dan sumber suara buatan untuk sensor LM2904.

5.4.1 Pengujian Sensor MHZ19 (CO₂)

Pengujian sensor MH-Z19 untuk pendeteksian konsentrasi CO₂ dilakukan pada tanggal 14 September 2025 mulai pukul 07.00 hingga 20.00 WIB di area terbuka. Sensor dikoneksikan dengan ESP32 transmitter dan data dikirim melalui LoRa menuju receiver, kemudian diteruskan ke platform ThingSpeak secara real-time. Seluruh data pengukuran terekam dan tersimpan otomatis di server IoT dalam bentuk CSV untuk kebutuhan analisis lebih lanjut.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa konsentrasi CO₂ mengalami penurunan dan peningkatan secara bertahap dari pagi hingga sore hari. Fluktuasi ini sejalan dengan kondisi lingkungan terbuka yang dipengaruhi aktivitas manusia dan intensitas radiasi matahari. Secara keseluruhan, sensor MH-Z19 mampu memberikan pembacaan yang stabil dan responsif terhadap perubahan konsentrasi CO₂ selama periode pengujian, sehingga dapat disimpulkan bahwa sensor bekerja dengan baik sesuai fungsi yang diharapkan. Berikut tampilan grafik dari jam 07.00 sampai 20.00.



Gambar 5. 3 Perubahan Gas CO₂ (07.00-20.00)

Dapat kita analisis mengenai pengujian sensor MH-Z19 CO₂ pada tanggal 14 September 2025 dengan hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai konsentrasi CO₂ mengalami peningkatan dan penurunan secara bertahap sejak pagi hari, yaitu sebesar 503 ppm pada pukul 07.00, hingga mencapai puncaknya 599 ppm pada pukul 10.20 siang. Rentang konsentrasi CO₂ yang terukur masih berada dalam

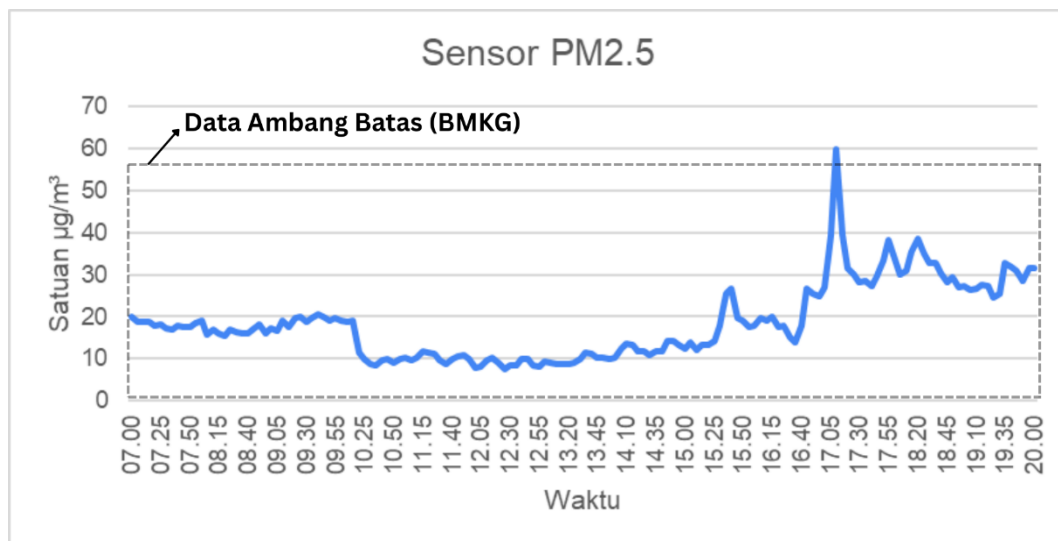
kategori normal, karena Menurut +IQAir ambang batas kadar CO₂ di udara lingkungan terbuka umumnya berkisar antara 400 hingga 600 ppm [11].

Dengan demikian, hasil pengukuran ini menunjukkan bahwa kondisi udara selama pengujian masih termasuk aman dan sesuai dengan standar kualitas udara normal di lingkungan terbuka. Setelah itu, konsentrasi CO₂ mulai stabil secara perlahan hingga sore hari seiring dengan aktivitas lingkungan dan perubahan kondisi atmosfer. Rentang konsentrasi yang terbaca tetap berada pada nilai wajar untuk lingkungan terbuka, serta tidak menunjukkan adanya lonjakan ekstrem yang dapat mengindikasikan kesalahan sensor. Secara umum, sensor MH-Z19 bekerja stabil dan akurat selama periode pengujian, serta mampu merekam perubahan konsentrasi CO₂ sesuai kondisi nyata di lapangan.

5.4.2 Pengujian Sensor ZH03B (PM2.5)

Pengujian sensor ZH03B untuk pendeteksian konsentrasi PM2.5 dilakukan pada tanggal 14 September 2025 mulai pukul 07.00 hingga 20.00 WIB di area terbuka. Sensor dikoneksikan dengan ESP32 transmitter, kemudian data dikirim melalui komunikasi LoRa menuju receiver dan diteruskan ke platform ThingSpeak secara real-time. Seluruh hasil pengukuran terekam dan tersimpan otomatis pada server IoT dalam format CSV, sehingga dapat digunakan untuk proses analisis dan evaluasi lebih lanjut terhadap kualitas udara berdasarkan parameter partikulat debu halus (PM2.5).

Hasil pengujian menunjukkan bahwa konsentrasi PM2.5 mengalami fluktuasi yang bervariasi sejak pagi hingga sore hari. Kadar partikulat cenderung meningkat pada siang hari, yang kemungkinan dipengaruhi oleh aktivitas lingkungan sekitar serta perubahan kondisi cuaca seperti suhu dan arah angin, kemudian menurun menjelang sore. Secara keseluruhan, sensor ZH03B mampu memberikan pembacaan yang stabil dan responsif terhadap perubahan konsentrasi PM2.5 selama periode pengujian, sehingga dapat disimpulkan bahwa sensor bekerja dengan baik sesuai fungsi yang diharapkan. Berikut ditampilkan grafik hasil pengukuran dari pukul 07.00 hingga 20.00 WIB.



Gambar 5. 4 Perubahan Partikel Debu PM2.5 (07.00-20.00)

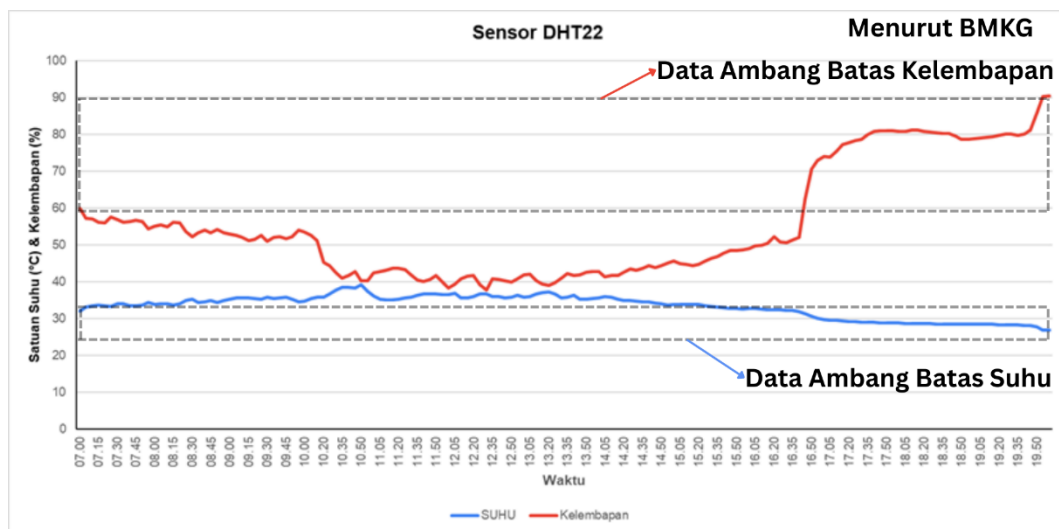
Dapat kita analisis mengenai pengujian sensor ZH03B PM2.5 pada tanggal 14 September 2025 dengan hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai konsentrasi PM2.5 mengalami peningkatan dan penurunan secara bertahap sejak pagi hari, yaitu sebesar 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pada pukul 07.00, hingga mencapai puncaknya 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pada pukul 17.10. Berdasarkan standar ambang batas kualitas udara, konsentrasi PM2.5 pada rentang 0 – 55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ masih tergolong dalam kategori aman hingga sedang menurut penjelasan tingkat konsentrasi PM 2.5 di udara oleh BMKG [13]. Rentang konsentrasi yang terbaca tetap berada pada nilai aman untuk lingkungan terbuka, serta tidak menunjukkan adanya lonjakan ekstrem yang dapat mengindikasikan kesalahan sensor. Secara umum, sensor ZH03B bekerja stabil dan akurat selama periode pengujian, serta mampu merekam perubahan konsentrasi PM2.5 sesuai dengan kondisi nyata di lapangan.

5.4.3 Pengujian Sensor DHT22

Pengujian sensor DHT22 untuk pendeteksian suhu dan kelembapan udara dilakukan pada tanggal 14 September 2025 mulai pukul 07.00 hingga 20.00 WIB di area terbuka. Sensor dikoneksikan dengan ESP32 transmitter, kemudian data dikirim melalui komunikasi LoRa menuju receiver dan diteruskan ke platform ThingSpeak secara real-time. Seluruh hasil pengukuran terekam dan tersimpan otomatis pada server IoT dalam format CSV, sehingga dapat dimanfaatkan untuk

proses analisis dan evaluasi lebih lanjut terhadap kondisi lingkungan berdasarkan parameter suhu dan kelembapan udara.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa suhu dan kelembapan udara mengalami peningkatan secara bertahap sejak pagi hari, dengan nilai tercatat pada pukul 07.00, kemudian mencapai puncaknya pada siang hari seiring dengan intensitas radiasi matahari yang semakin tinggi. Setelah itu, suhu mulai menurun kembali menjelang sore. Sementara itu, kelembapan udara menunjukkan pola yang berlawanan, yaitu relatif tinggi pada pagi hari, menurun ketika suhu udara meningkat di siang hari, lalu kembali naik pada sore hari. Secara keseluruhan, sensor DHT22 mampu memberikan pembacaan yang stabil dan konsisten terhadap perubahan suhu serta kelembapan udara selama periode pengujian, sehingga dapat disimpulkan bahwa sensor berfungsi dengan baik sesuai yang diharapkan. Berikut ditampilkan grafik hasil pengukuran dari pukul 07.00 hingga 20.00 WIB.



Gambar 5. 5 Perubahan Suhu dan Kelembapan (07.00-20.00)

Dapat kita analisis mengenai pengujian sensor DHT22 pada tanggal 14 September 2025 dengan hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai suhu udara mengalami peningkatan secara bertahap sejak pagi hari, yaitu sebesar 32 °C pada pukul 07.00, hingga mencapai puncaknya 37 °C pada pukul 13.30. Setelah itu, suhu menurun kembali sebesar 27 °C pada pukul 20.00 seiring berkurangnya intensitas radiasi matahari. Sementara itu, kelembapan udara menunjukkan pola berlawanan,

yaitu relatif tinggi pada pagi hari sebesar 60%, kemudian menurun hingga mencapai nilai terendah sekitar 40% pada siang hari, lalu kembali meningkat pada sore hari.

Tapi ada data yang bisa dijadikan acuan:

- BMKG prakiraan cuaca Semarang menunjukkan suhu normal berkisar sekitar 26-33 °C, tergantung waktu dan cuaca [44].

BMKG+2BMKG+2

- Untuk kelembapan, data BMKG atau stasiun klimatologi di Semarang menunjukkan nilai rata-rata antara 60-90 % pada pagi/siang tergantung cuaca, dan kadang turun lebih rendah menjelang sore [45].

BMKG Maritim+2semarangkota.bps.go.id+2

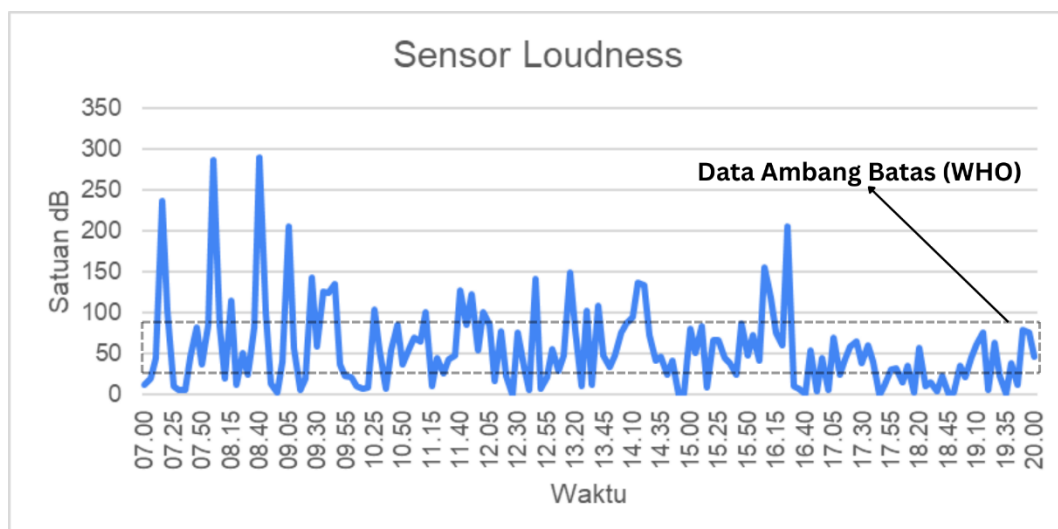
Jika dibandingkan dengan ambang batas suhu normal menurut BMKG yang berada pada kisaran 26–33 °C, maka suhu maksimum yang tercatat sebesar 37 °C telah melebihi batas atas, yang menandakan kondisi udara cukup panas di siang hari. Sementara itu, kelembapan udara yang tercatat berada pada rentang 40–60% hingga 60–90%, di mana nilai 40% pada siang hari berada sedikit di bawah ambang batas normal (60–90%), sedangkan nilai kelembapan pada pagi dan sore hari masih berada dalam kategori wajar. Secara keseluruhan, pengujian ini menunjukkan bahwa sensor DHT22 bekerja dengan baik dalam mendeteksi variasi suhu dan kelembapan, serta mampu merepresentasikan kondisi lingkungan nyata dibandingkan dengan standar ambang batas normal BMKG.

5.4.4 Pengujian Sensor LM2904 (Kebisingan)

Pengujian sensor LM2904 untuk pendeteksian tingkat kebisingan lingkungan dilakukan pada tanggal 14 September 2025 mulai pukul 07.00 hingga 20.00 WIB di area terbuka. Sensor dikoneksikan dengan ESP32 transmitter, kemudian data dikirim melalui komunikasi LoRa menuju receiver dan diteruskan ke platform ThingSpeak secara real-time. Seluruh hasil pengukuran terekam dan tersimpan otomatis pada server IoT dalam format CSV, sehingga dapat dimanfaatkan untuk proses analisis dan evaluasi lebih lanjut terhadap kondisi lingkungan berdasarkan parameter tingkat kebisingan suara (dB).

Hasil pengujian menunjukkan bahwa tingkat kebisingan lingkungan mengalami fluktuasi sejak pagi hingga sore hari. Nilai kebisingan relatif rendah

pada pagi hari, kemudian meningkat secara bertahap menjelang siang hingga sore seiring dengan bertambahnya aktivitas manusia dan kendaraan di sekitar area pengujian. Setelah itu, tingkat kebisingan mulai menurun kembali menjelang malam ketika aktivitas lingkungan berkurang. Secara keseluruhan, sensor LM2904 mampu memberikan pembacaan yang stabil dan responsif terhadap perubahan intensitas suara selama periode pengujian, sehingga dapat disimpulkan bahwa sensor berfungsi dengan baik sesuai yang diharapkan. Berikut ditampilkan grafik hasil pengukuran dari pukul 07.00 hingga 20.00 WIB.



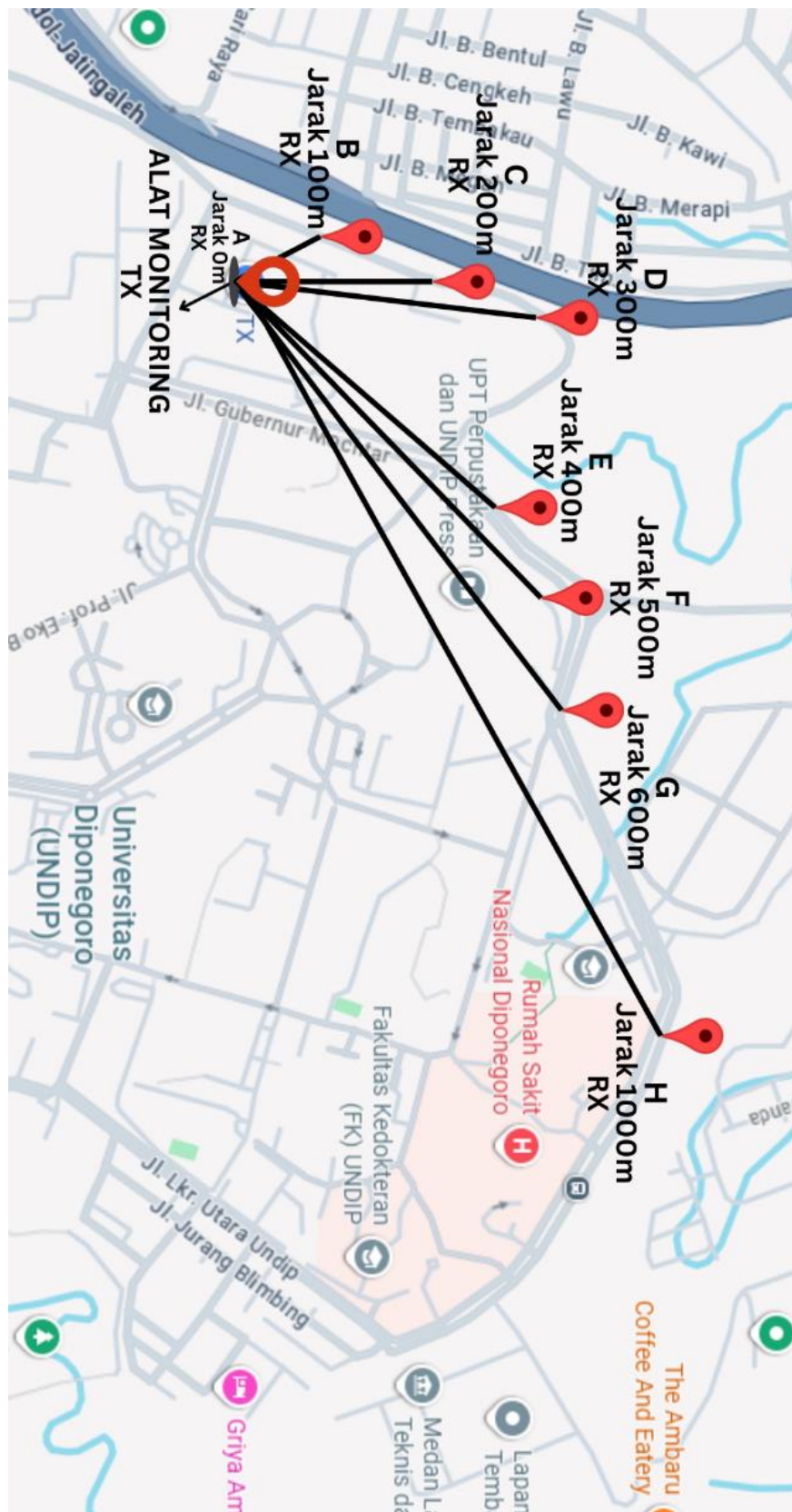
Gambar 5. 6 Perubahan Suara Kebisingan (07.00-20.00)

Dapat kita analisis mengenai pengujian sensor LM2904 kebisingan pada tanggal 14 September 2025 dengan hasil pengujian menunjukkan bahwa tingkat kebisingan lingkungan mengalami peningkatan dan penurunan secara bertahap sejak pagi hari, yaitu sebesar 12 dB pada pukul 07.00, kemudian terus meningkat hingga mencapai puncaknya sekitar 290 dB pada pukul 08.40 seiring dengan meningkatnya aktivitas manusia dan kendaraan di sekitar area pengujian. Setelah itu, tingkat kebisingan mulai menurun secara perlahan dan tercatat sebesar 46 dB pada pukul 20.00 ketika aktivitas lingkungan berkurang. Berdasarkan standar ambang batas kebisingan lingkungan yang umum digunakan, tingkat kebisingan yang masih dapat diterima berada pada rentang 40–85 dB, di mana nilai di atas 85 dB berkelanjutan berpotensi mengganggu kesehatan, terutama pada pendengaran manusia menurut World Health Organization (WHO) [16].

Dengan demikian, hasil pengujian menunjukkan adanya data yang jauh melebihi batas wajar (290 dB), yang kemungkinan disebabkan oleh kebisingan tempat atau gangguan teknis pada proses pengukuran, karena secara ilmiah nilai kebisingan maksimum di lingkungan sehari-hari umumnya tidak melebihi 120–130 dB. Sementara itu, nilai lainnya yang berada pada kisaran 46 dB hingga sekitar 85 dB masih termasuk dalam kategori aman.

5.4.5 Pengujian Jarak Komunikasi Lora E220 400T22D

Pengujian dilakukan untuk mengetahui sejauh mana komunikasi LoRa dapat berjalan dengan baik antara transmitter (Tx) dan receiver (Rx). Pengujian dilaksanakan di area terbuka Sekolah Vokasi sampai area sekitar kampus undip, menggunakan modul LoRa E220-400T22D yang dikoneksikan pada ESP32. Antena eksternal dengan spesifikasi bawaan digunakan pada kedua sisi untuk memastikan kualitas transmisi. Data dikirimkan secara berkala dari ESP32 transmitter menuju receiver dengan interval tertentu, kemudian diamati apakah data berhasil diterima, terparse dalam format JSON, serta apakah indikator LCD pada sistem menunjukkan masih menerima data atau tidak. Pengamatan dilakukan secara langsung, dan hasil pengujian dicatat secara rinci pada gambar dan tabel berikut.



Gambar 5. 7 Pengujian Jarak Komunikasi LoRa

Tabel 5. 2 Data Pengujian Jarak Komunikasi Lora E220

Titik	Jarak (m)	Data Masuk	Titik Koordinat	Keterangan
A	0 Meter	Sukses	7°03'01.1"S 110°26'04.7"E	Pengujian awal data masuk
B	100 Meter	Sukses	7°02'58.3"S 110°26'03.2"E	Pengiriman data stabil (Receive)
C	200 Meter	Sukses	7°02'54.5"S 110°26'04.6"E	Pengiriman data stabil (Receive)
D	300 Meter	Sukses	7°02'51.1"S 110°26'05.5"E	Pengiriman data stabil (Receive)
E	400 Meter	Sukses	7°02'51.8"S 110°26'13.5"E	Pengiriman data stabil (Receive)
F	500 Meter	Sukses	7°02'50.1"S 110°26'16.7"E	Pengiriman data stabil (Receive)
G	600 Meter	Gagal	7°02'49.5"S 110°26'20.6"E	Timeout data tidak diterima
H	1000 Meter	Gagal	7°02'46.0"S 110°26'33.6"E	Timeout data tidak diterima

Berdasarkan hasil pengamatan di lapangan, transmisi data menggunakan modul LoRa E220-400T22D menunjukkan kinerja yang stabil hingga jarak sekitar 500 meter dalam kondisi area di sekitar kampus undip sekolah vokasi. Pada jarak tersebut, data berhasil diterima dengan baik oleh receiver, terkirim dalam format JSON, serta LCD sistem tetap menunjukkan Receive (berhasil). Namun, ketika jarak diperluas lebih dari 500 meter, koneksi mulai tidak stabil hingga akhirnya tidak ada data yang diterima oleh receiver. Hal ini menunjukkan bahwa dengan konfigurasi antena standar yang digunakan, jarak komunikasi efektif LoRa E220-400T22D dalam kondisi uji ini adalah ± 500 meter.

5.4.6 Pengujian Visualisasi Data

Pengujian visualisasi data dilakukan untuk memastikan bahwa data hasil pengukuran dari sensor MH-Z19 (CO₂), ZH03B (PM2.5), DHT22 (suhu dan kelembapan), serta LM2904 (kebisingan) yang dikirimkan melalui transmitter dapat ditampilkan secara real-time dan akurat pada dashboard IoT ThingSpeak. Elemen visualisasi yang diuji meliputi grafik tren setiap parameter yang memperlihatkan perubahan nilai dari waktu ke waktu, indikator nilai numerik, serta fitur penyimpanan data otomatis dalam format CSV.

Pengujian ini tidak hanya berfokus pada tampilan antarmuka ThingSpeak, tetapi juga pada kesesuaian isi data dengan hasil pengukuran di lapangan serta responsivitas dashboard dalam memperbarui nilai secara berkala sesuai dengan interval pengiriman data.



Gambar 5. 8 Tampilan Dashboard Sistem Monitoring di ThingSpeak

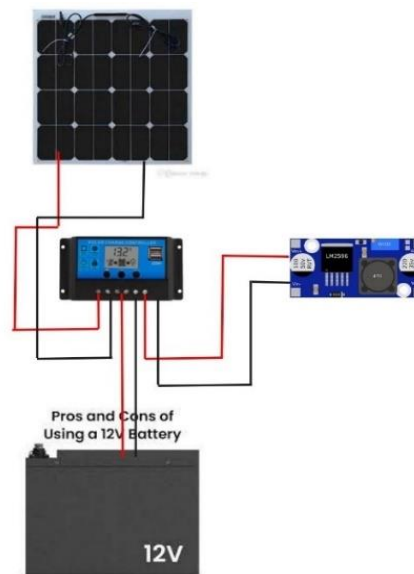
Gambar 5.9 menunjukkan bahwa dashboard pada platform ThingSpeak bekerja secara responsif dan informatif sesuai dengan data yang diterima dari sistem transmitter. Berdasarkan hasil pengamatan, seluruh parameter lingkungan yang dipantau, yaitu kebisingan, PM2.5, konsentrasi CO₂, suhu, dan kelembapan, berhasil ditampilkan dalam bentuk grafik tren secara real-time. Setiap grafik diperbarui secara otomatis sesuai interval pengiriman data, sehingga pola perubahan nilai sensor dari waktu ke waktu dapat diamati dengan jelas.

Data kebisingan menampilkan fluktuasi yang cukup signifikan sesuai aktivitas lingkungan, sedangkan grafik PM2.5 menunjukkan variasi konsentrasi partikulat debu halus dari pagi hingga sore. Konsentrasi CO₂ terlihat meningkat secara bertahap dengan sesekali terjadi lonjakan singkat, sementara suhu menunjukkan tren penurunan secara perlahan dari siang menuju sore hari. Sebaliknya, kelembapan udara mengalami kenaikan bertahap, mengikuti pola perubahan suhu yang berlawanan.

Selain itu, fitur penyimpanan data otomatis ke dalam format CSV berfungsi dengan baik, di mana file yang dihasilkan sesuai dengan data pada dashboard. Hal ini membuktikan bahwa sistem monitoring berbasis LoRa dan IoT dapat berjalan dengan baik, serta mampu memberikan data yang akurat dan stabil untuk kebutuhan analisis lebih lanjut.

5.4.7 Pengujian Ketahanan Panel Surya dan Baterai

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui seberapa lama sistem monitoring lingkungan dapat beroperasi secara mandiri menggunakan panel surya 30 Wp dan baterai aki 12V 7,5Ah sebagai sumber daya utama. Pengaturan distribusi daya dilakukan melalui Solar Charge Controller (SCC) tipe PWM yang berfungsi mengatur proses pengisian baterai dari panel surya sekaligus menyalurkan daya ke beban sistem.



Gambar 5. 9 Skematik Sistem Catu Daya

Gambar 5.9 menunjukkan rangkaian catu daya pada panel surya ke SCC dan beban. Pengukuran Indikator tegangan, arus, serta level baterai diamati secara langsung melalui tampilan SCC, yang menunjukkan status pengisian (charging), kondisi baterai, serta beban yang sedang digunakan. Pengujian dilakukan dengan sistem menyala secara kontinu dan beban utama berupa rangkaian ESP32, sensor, serta modul LoRa yang beroperasi selama periode uji. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengevaluasi kemampuan suplai daya dari kombinasi panel surya dan baterai terhadap kebutuhan energi sistem monitoring selama 24 jam secara real-time. Dengan konfigurasi ini, diharapkan sistem mampu beroperasi mandiri dalam jangka waktu panjang tanpa ketergantungan pada sumber listrik eksternal.

Tabel berikut menyajikan spesifikasi lengkap dari komponen sistem daya yang digunakan dalam perancangan dan implementasi perangkat monitoring lingkungan.

Tabel 5. 3 Spesifikasi Sistem Daya

Komponen	Spesifikasi
Panel Surya	30 Wp
Baterai	Aki 12V 7,5Ah
SCC	PWM Solar Charge Controller
Beban Aktif	0,5307 A

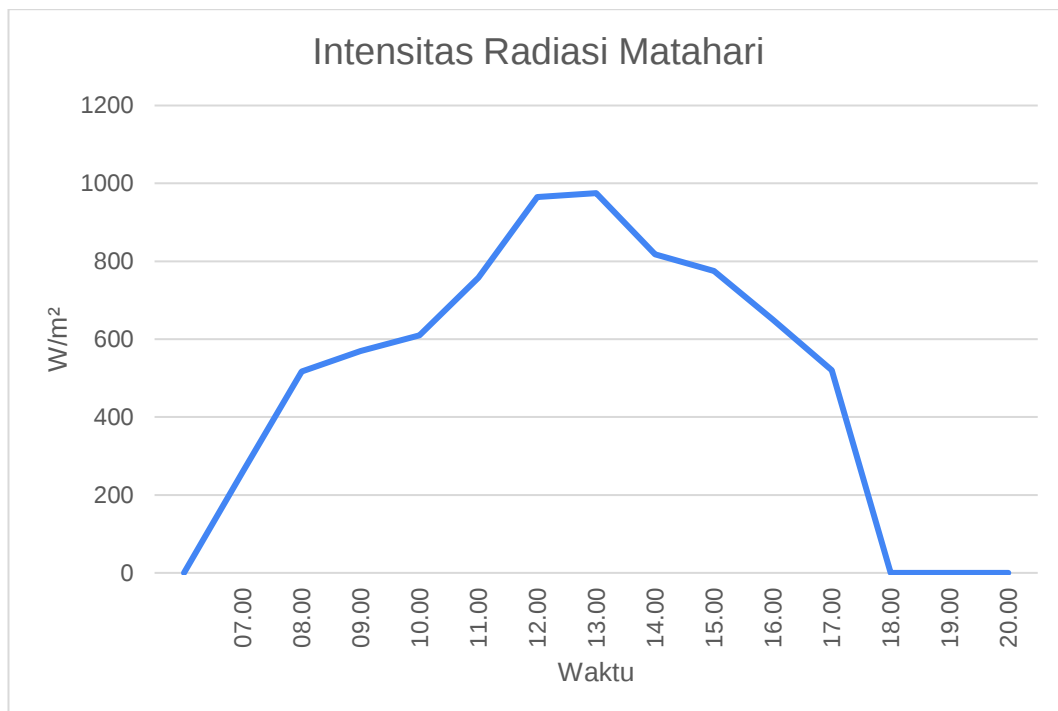
Tabel 5. 4 Kebutuhan Tegangan dan Arus pada Komponen

No	Komponen	Tegangan Kerja (V)	Arus Rata-rata (A)	Daya (watt)
1	ESP 32 WROOM	5 V	0,08	0,4
2	ZH03B (PM2.5)	5 V	0,12	0,6
3	MHZ19 (CO2)	5 V	0,018	0,09
4	DHT22 (suhu&kelembapan)	3,3 V	0,0015	0,00495
5	LM2904 (kebisingan)	5 V	0,0012	0,006
6	LoRa E220 400T22D	3,3 V	0,11	0,363
7	LCD I2C	5 V	0,2	1
8	TOTAL	-	0,5307	2,47

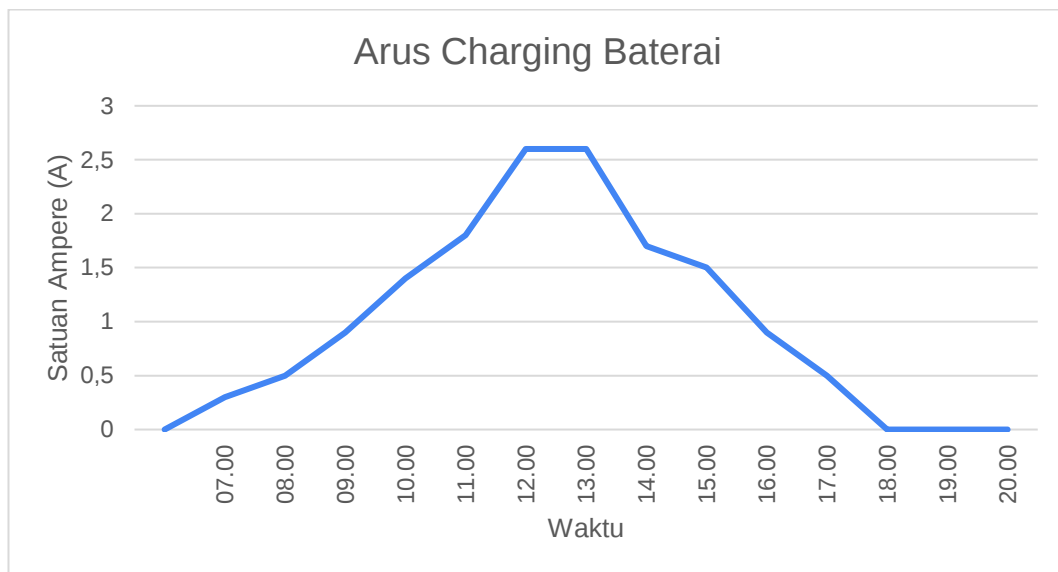
Tabel 5. 5 Hasil Pengukuran Panel Surya Charging Baterai

No	Waktu	Intensitas Radiasi Matahari (W/m ²)	Tegangan Baterai (V)	Arus Charging (A)	Arus Konsumsi Beban (A)	Status SCC	Cuaca
1	07.00	260	12.4	0.3	0.8	Charging	Berawan
2	08.00	517	12.5	0.5	0.8	Charging	Mendung
3	09.00	570	12.7	0.9	0.9	Charging	Cerah
4	10.00	610	12.8	1.4	0.8	Charging	Cerah
5	11.00	758	12.9	1.8	0.9	Charging	Terik
6	12.00	965	13.1	2.6	0.9	Charging	Terik
7	13.00	975	13.4	2.6	0.8	Charging	Terik
8	14.00	818	13.4	1.7	0.8	Charging	Cerah
9	15.00	775	13.2	1.5	0.7	Charging	Cerah
10	16.00	650	13.0	0.9	0.7	Charging	Cerah
11	17.00	520	12.9	0.5	0.6	Charging	Berawan
12	18.00	-	12.9	0.0	0.6	Discharging	Senja
13	19.00	-	12.8	0.0	0.7	Discharging	Malam
14	20.00	-	12.8	0.0	0.8	Discharging	Malam

Berdasarkan Tabel 5.5, dapat diamati bahwa intensitas radiasi matahari meningkat secara bertahap sejak pagi hari pukul 07.00 dengan nilai 260 W/m², kemudian mencapai nilai maksimum sebesar 975 W/m² pada pukul 13.00 ketika kondisi cuaca terik. Peningkatan intensitas cahaya matahari ini berbanding lurus dengan tegangan dan arus pengisian yang masuk ke baterai. Tegangan baterai yang semula 12.4 V pada pukul 07.00 meningkat hingga 13.4 V pada pukul 13.00, sedangkan arus pengisian juga meningkat dari 0.3 A pada pagi hari menjadi puncaknya 2.6 A pada siang hari. Hal ini menunjukkan bahwa panel surya 30 Wp mampu bekerja secara optimal pada kondisi radiasi matahari yang tinggi. Setelah pukul 17.00, intensitas cahaya matahari mulai menurun hingga sistem beralih ke mode discharging pada pukul 18.00, dimana tidak ada lagi arus masuk ke baterai. Energi yang telah tersimpan pada baterai kemudian dimanfaatkan untuk menjaga kontinuitas suplai daya hingga malam hari. Dengan demikian, hasil pengujian membuktikan bahwa sistem panel surya dengan baterai 12V 7,5Ah yang dikontrol oleh SCC PWM mampu menyediakan energi secara stabil sepanjang hari untuk mendukung operasional sistem monitoring lingkungan. Berikut ditampilkan grafik hasil pengukuran dari pukul 07.00 hingga 20.00 WIB.



Gambar 5. 10 Perubahan Intensitas Radiasi (07.00-20.00)



Gambar 5. 11 Perubahan Arus saat Charging (07.00-20.00)

Berikut penjelasan hasil perhitungan dari data pengukuran uji yang saya lakukan sebagai berikut:

1. Total Muatan (Ah) per hari

Total Ah = Jumlah arus x lama waktu (1 jam)

$$\begin{aligned} \text{Total Ah} &= 0.3 + 0.5 + 0.9 + 1.4 + 1.8 + 2.6 + 2.6 + 1.7 + 1.5 + 0.9 + 0.5 + 0 + 0 + 0 \\ &= 14.7 \text{ Ah} \end{aligned}$$

2. Rata-rata arus Charging

$$\text{Rata-rata} = \frac{14.7}{14 \text{ jam}} \approx 1.05 \text{ A}$$

3. Energi masuk (Wh)

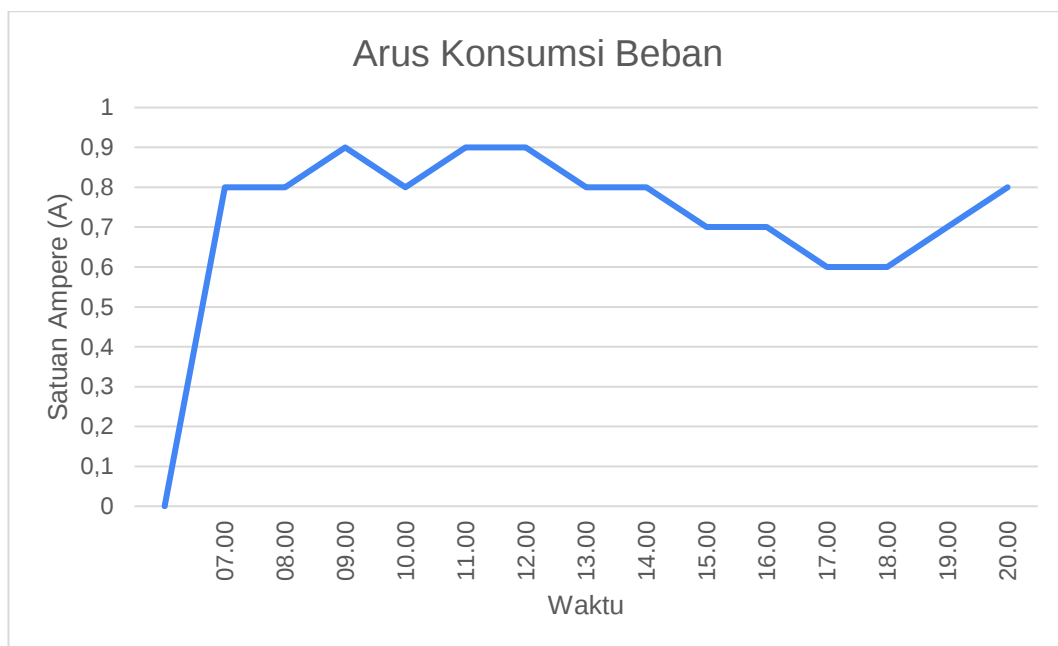
Jika rata-rata tegangan baterai sekitar 12.2 V saat awal charging:

$$\text{Wh} = 14.7 \times 12.2 \approx 179.3 \text{ Wh}$$

4. Implikasi ke baterai 12 V 7,5 Ah

- Kapasitas nominal baterai: $12 \times 7.5 = 90 \text{ Wh}$
- Energi masuk hasil pengukuran arus charging: $\sim 179 \text{ Wh} \rightarrow$ setara dengan $2 \times$ kapasitas baterai.
- Dalam praktik, baterai akan penuh sebelum seluruh energi masuk (sisanya akan dibatasi oleh SCC).
- Jadi dalam pengukuran ini, baterai 7,5 Ah bisa terisi penuh dalam 1 hari cerah.

Berdasarkan data arus pengisian yang diukur mulai pukul 07.00 hingga 20.00 dengan variasi arus antara 0,3 A hingga 2,6 A, diperoleh total muatan yang masuk ke baterai sebesar 14,7 Ah per hari dengan rata-rata arus pengisian sekitar 1,05 A. Jika tegangan rata-rata baterai saat proses pengisian diasumsikan 12,2 V, maka total energi yang berhasil dialirkan ke baterai mencapai kurang lebih 179 Wh. Dengan kapasitas nominal baterai aki 12 V 7,5 Ah yang setara dengan 90 Wh, hasil pengujian menunjukkan bahwa energi yang diterima dari panel surya dalam satu hari penuh mencapai sekitar dua kali kapasitas baterai. Hal ini berarti dalam kondisi cerah, baterai dapat terisi penuh dalam waktu sekitar 6–7 jam efektif pengisian, sementara energi selebihnya akan diatur oleh solar charge controller sebagai pengamanan pengisian baterai.



Gambar 5. 12 Pengukuran Konsumsi Arus Beban

Berikut penjelasan hasil perhitungan dari data pengukuran konsumsi beban yang saya lakukan sebagai berikut:

1. Rata-rata konsumsi arus pada beban

$$I_{\text{avg}} = \frac{0.8+0.8+0.9+0.8+0.9+0.9+0.8+0.8+0.7+0.7+0.6+0.6+0.7+0}{14}$$

$$I_{\text{avg}} = \frac{11}{14} \approx 0.79 \text{ A}$$

2. Konsumsi Beban selama 12 jam

$$Q = I \times t$$

- Q = jumlah muatan listrik (Ah)
- I = arus (A)
- t = waktu (jam)

Jadi kalau rata-rata arus beban 0,79 A dipakai selama 12 jam, maka:

$$Q = 0,79 \times 12 = 9,5 \text{ Ah}$$

3. Konsumsi energi (Wh)

$$E = Q \times V$$

- E = energi (Wh)
- Q = muatan listrik (Ah)
- V = tegangan sistem (V)

$$E = 9,5 \times 5 = 47,5 \text{ Wh}$$

Jadi kebutuhan energi beban selama 12 jam = $\pm 47,5 \text{ Wh}$.

4. Implikasi dengan baterai 12 V 7,5 Ah

- Kapasitas nominal baterai: $12 \times 7,5 = 90 \text{ Wh}$
- Rata-rata beban butuh 47,5 Wh $\rightarrow$ hanya sekitar 53% kapasitas baterai.

Berdasarkan hasil pengujian, rata-rata beban mengkonsumsi arus sekitar 0,79 ampere. Jika digunakan secara terus-menerus selama 12 jam, maka total konsumsi arus mencapai sekitar 9,5 ampere-jam. Dengan tegangan kerja beban sebesar 5 volt, energi listrik yang digunakan selama 12 jam adalah kurang lebih 47,5 watt-jam. Sementara itu, baterai dengan kapasitas 12 volt 7,5 Ah memiliki total energi sekitar 90 watt-jam. Artinya, kebutuhan energi beban hanya sekitar setengah dari kapasitas baterai. Kondisi ini membuktikan bahwa satu baterai penuh mampu menopang beban 5 volt selama 12 jam pemakaian, bahkan masih menyisakan cadangan energi untuk keperluan tambahan.

Berdasarkan hasil pengamatan dan pengukuran, sistem monitoring lingkungan yang dirancang mampu beroperasi secara mandiri selama 24 jam penuh dengan memanfaatkan sumber daya dari panel surya 30 Wp dan baterai aki 12V 7,5Ah. Pada siang hari, khususnya saat kondisi cuaca cerah, panel surya menghasilkan arus pengisian rata-rata sekitar 1,05A. Nilai ini menunjukkan bahwa

proses pengisian baterai berlangsung dengan baik, sehingga kapasitas baterai dapat terisi secara optimal untuk menyuplai energi pada malam hari. Energi yang tersimpan pada baterai kemudian berfungsi menjaga kestabilan suplai daya ketika intensitas radiasi matahari menurun, baik pada saat mendung maupun menjelang sore hari.

Pada malam hari, sistem tetap bekerja dengan normal tanpa adanya gangguan, dengan rata-rata konsumsi daya sekitar 0,8A. Hal ini memperlihatkan bahwa kapasitas baterai 12V 7,5Ah yang digunakan sudah memadai untuk menopang kinerja sistem dalam satu hari penuh, bahkan dengan adanya variasi cuaca yang mempengaruhi intensitas cahaya matahari. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa konfigurasi panel surya 30 Wp, SCC tipe PWM, serta baterai aki 12V 7,5Ah terbukti mampu menyediakan suplai daya yang stabil, efisien, dan berkesinambungan. Sistem ini tidak hanya mendukung operasional perangkat secara kontinu, tetapi juga membuktikan kehandalan penggunaan energi terbarukan sebagai sumber daya utama dalam mendukung aplikasi monitoring lingkungan berbasis IoT.