

BAB V

PENGUJIAN DAN ANALISA ALAT

5.1 Tujuan Pengujian

Setelah sistem Monitoring Lingkungan selesai dirakit dan dijalankan, dilakukan proses pengujian untuk memastikan seluruh komponen bekerja sesuai fungsinya. Tujuan utama pengujian ini adalah mengevaluasi performa sistem secara menyeluruh, mulai dari pembacaan sensor, transmisi data, hingga penyajian informasi.

Secara Khusus, pengujian meliputi:

- Mengevaluasi kinerja sensor SEN0564 (karbon monoksida), SEN0574 (nitrogen dioksida), DHT22 (suhu & kelembapan), serta PMS5003 (partikulat/PM2.5).
- Menguji stabilitas komunikasi jarak jauh menggunakan LoRa E220-400T22D.
- Memastikan proses pengiriman data melalui HTTP GET ke server ThingSpeak berjalan dengan baik.
- Memverifikasi tampilan data real-time pada dashboard ThingSpeak.

5.2 Skema dan Lokasi Pengujian

5.2.1 Skema Lokasi Pengujian Alat

Pengujian perangkat dilakukan di area luar ruangan yang terbuka supaya semua sensor dapat bekerja secara maksimal. Pengujian dilakukan di lokasi parkir Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro



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 SEN0564 (CO), SEN0574 (NO₂), PMS5003 (PM_{2.5}), DHT22 (Temperature & Kelembapan)
- 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 dilaksanakan di area parkir depan bengkel Teknik Listrik Industri, Kampus Sekolah Vokasi Undip. Pemilihan lokasi terbuka ini bertujuan untuk mendukung pelaksanaan uji coba sistem Monitoring Lingkungan secara langsung di lapangan. Informasi detail mengenai lokasi pengujian, seperti koordinat serta kondisi lingkungan sekitar, ditampilkan pada Tabel 5.1.

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 Jakarta	07.00 – 16.00

5.3 Prosedur Pengujian

Sebelum pengujian dimulai, tahap ini difokuskan pada penyelesaian pemasangan perangkat keras (hardware setup) dari sistem monitoring lingkungan. Beberapa kegiatan penting yang dilakukan pada tahap ini antara lain:

- Pemasangan dan pengujian sensor dilakukan untuk memastikan semua komponen bekerja dengan baik, termasuk sensor karbon monoksida (SEN0564), sensor nitrogen dioksida (SEN0574), sensor suhu dan kelembapan (DHT22), serta sensor partikel udara (PMS5003).
- Penempatan transmitter dan penerima receiver dilakukan sesuai lokasi yang telah ditentukan, agar komunikasi LoRa dapat berfungsi dengan optimal dalam kondisi nyata.
- Integrasi panel surya dan sistem catu daya dilakukan untuk memastikan pasokan listrik mandiri bagi seluruh perangkat sistem monitoring lingkungan di lapangan.

Tahap ini bertujuan untuk memastikan semua komponen fisik pada sistem telah terpasang dengan tepat dan siap digunakan untuk pengujian selanjutnya.

5.31 Setup Perangkat Keras

Pada tahap ini dilakukan persiapan dan pemasangan perangkat keras (hardware setup) dari sistem monitoring lingkungan sebelum pengujian dimulai. Kegiatan meliputi penempatan sensor, instalasi unit pemancar dan penerima LoRa, serta integrasi sumber daya dari panel surya. Berikut prosedur lengkapnya:

1. Persiapan Tempat dan Penempatan Tiang
 - Menentukan lokasi pengujian di area terbuka yang representatif, seperti halaman atau area parkir, dengan sedikit hambatan dari bangunan atau pohon agar sensor udara dapat bekerja optimal.
 - Memasang sensor pada ketinggian yang sesuai agar hasil pengukuran kualitas udara, suhu, dan kelembapan akurat.
 - Memastikan sensor terlindung dari hujan langsung, debu, atau sinar matahari berlebih namun tetap memungkinkan udara masuk untuk pengukuran.
 - Menyiapkan tiang yang cukup kuat dan stabil untuk menopang sensor dan modul transmisi LoRa.
2. Pemasangan Unit Transmitter
 - Menyusun seluruh komponen seperti ESP32, modul LoRa E220-400T22D, dan LM2596 step-down converter 5V ke dalam satu sistem terintegrasi dalam wadah yang ringkas.
 - Menghubungkan panel surya 30Wp ke Aki 12V 7Ah, kemudian menyambungkannya ke step-down converter sebagai sumber daya mandiri yang menyediakan tegangan 5V untuk ESP32.
3. Pemasangan Unit Receiver
 - Menyiapkan ESP32 sebagai receiver yang sudah terpasang modul LoRa dan terkoneksi dengan jaringan WiFi.
 - Menghubungkan ESP32 receiver ke ThingSpeak sebagai platform cloud untuk menerima data dari LoRa, serta mengatur format data agar dapat dikirim sebagai payload sesuai standar ThingSpeak.
 - Menyusun alur pengiriman data agar sensor CO, NO₂, suhu, kelembapan, dan partikel udara (PM2.5) dapat ditampilkan secara real-time pada dashboard ThingSpeak.

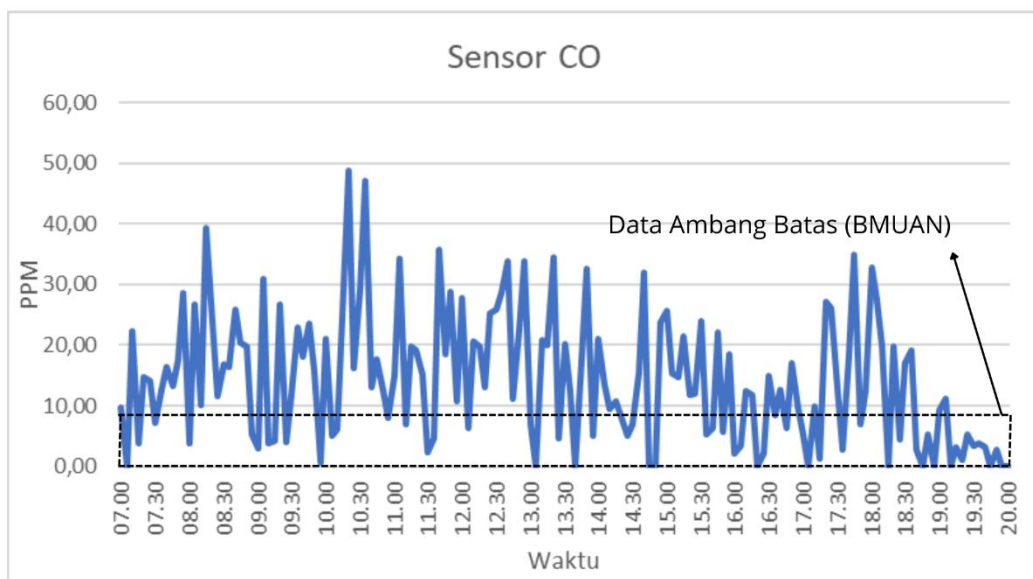
- Melakukan uji awal pengiriman data dari transmitter ke ThingSpeak, dan memastikan seluruh data sensor berhasil muncul dan diperbarui di dashboard.

5.4 Pengujian Fungsional Komponen

5.4.1 Pengujian Sensor SEN0564

Pengujian sensor SEN0564 untuk pendeteksian konsentrasi CO dilakukan pada tanggal 14 September 2025 mulai pukul 07.00 hingga 20.00 WIB di area terbuka. Sensor dihubungkan dengan ESP32 transmitter dan data dikirimkan melalui LoRa menuju receiver, kemudian diteruskan ke platform ThingSpeak secara real-time. Seluruh hasil pengukuran terekam dan tersimpan otomatis di server IoT dalam format CSV untuk kebutuhan analisis lebih lanjut.

Hasil pengujian memperlihatkan bahwa konsentrasi CO mengalami fluktuasi dengan pola penurunan dan peningkatan secara bertahap dari pagi hingga sore hari. Perubahan ini berkaitan dengan kondisi lingkungan terbuka yang dipengaruhi oleh aktivitas manusia serta intensitas radiasi matahari. Secara keseluruhan, sensor SEN0564 mampu memberikan hasil pembacaan yang stabil dan responsif terhadap variasi konsentrasi CO selama periode pengujian, sehingga dapat disimpulkan bahwa sensor berfungsi dengan baik sesuai yang diharapkan. Berikut ditampilkan grafik dari jam 07.00 sampai 20.00.



Gambar 5. 2 Grafik Konsentrasi CO

Pada Gambar 5.2 Grafik di atas memperlihatkan hasil pengukuran konsentrasi karbon monoksida (CO) menggunakan sensor SEN0564 dari pukul 07.00 hingga 20.00 WIB di area terbuka. Terlihat bahwa konsentrasi CO mengalami fluktuasi cukup signifikan sepanjang periode pengujian. Pada beberapa titik, konsentrasi mencapai nilai di atas 40 ppm, sementara pada kondisi lain cenderung stabil di kisaran 5–20 ppm. Fluktuasi ini dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti aktivitas manusia, lalu lintas kendaraan, serta kondisi atmosfer (suhu, kelembapan, dan pergerakan angin).

Garis kotak hitam pada grafik menunjukkan ambang batas yang ditetapkan oleh Baku Mutu Udara Ambien Nasional Indonesia (BMUAN) yaitu 9 ppm [22]. Dari hasil pengamatan, sebagian besar nilai konsentrasi CO pada grafik tampak berada di atas ambang batas tersebut, bahkan ada lonjakan tinggi pada beberapa waktu tertentu. Hal ini mengindikasikan adanya potensi risiko terhadap kesehatan apabila seseorang terpapar dalam waktu lama, terutama bagi kelompok rentan seperti anak-anak, lansia, dan penderita penyakit pernapasan.

Dengan demikian, analisis dari grafik ini menunjukkan bahwa meskipun sensor dapat memberikan pembacaan yang stabil dan responsif, kualitas udara di lokasi pengujian masih menunjukkan tingkat CO yang cukup tinggi melebihi standar aman WHO. Pemantauan secara berkelanjutan diperlukan agar potensi dampak kesehatan dari paparan CO dapat diminimalisir.

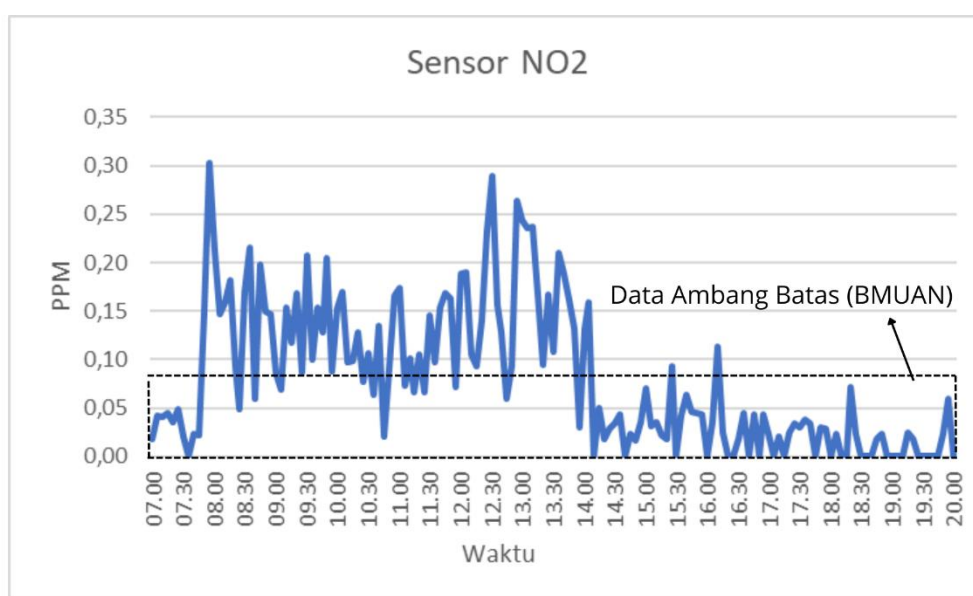
5.4.2 Pengujian Sensor SEN0574

Pengujian sensor SEN0574 untuk mendeteksi konsentrasi NO₂ dilaksanakan pada tanggal 14 September 2025 mulai pukul 07.00 hingga 20.00 WIB di area terbuka. Sensor dikoneksikan dengan ESP32 transmitter, kemudian data hasil pengukuran dikirim melalui komunikasi LoRa menuju receiver dan diteruskan secara real-time ke platform ThingSpeak. Seluruh data pengujian tersimpan otomatis di server IoT dalam format CSV sehingga dapat dimanfaatkan untuk proses analisis lebih lanjut.

Berdasarkan hasil pengamatan, konsentrasi NO₂ menunjukkan pola fluktuasi dengan nilai yang cenderung meningkat pada siang hari dan menurun menjelang sore. Variasi ini dipengaruhi oleh faktor lingkungan, seperti aktivitas

manusia, kondisi lalu lintas, serta intensitas radiasi matahari yang berperan dalam penyebaran polutan di udara terbuka.

Secara keseluruhan, sensor SEN0574 mampu memberikan hasil pengukuran yang stabil, responsif, serta mengikuti dinamika perubahan konsentrasi NO₂ di lapangan. Hal ini membuktikan bahwa sensor dapat bekerja sesuai dengan fungsi yang diharapkan sehingga layak digunakan sebagai perangkat monitoring kualitas udara berbasis IoT.



Gambar 5. 3 Grafik Konsentrasi NO₂

Grafik hasil pengukuran konsentrasi Nitrogen Dioksida (NO₂) pada tanggal 14 September 2025 menunjukkan adanya fluktuasi dari pukul 07.00 hingga 20.00 WIB. Pada pagi hingga siang hari (sekitar pukul 07.30–13.30), konsentrasi cenderung tinggi dan sempat mencapai puncak mendekati 0,30 ppm, yang berarti melebihi ambang batas BMUAN yaitu 0,08 ppm [22].

Setelah pukul 14.00, konsentrasi NO₂ mulai menurun secara bertahap hingga berada pada kisaran rendah, umumnya di bawah 0,05 ppm, sehingga relatif lebih aman dibandingkan periode pagi hingga siang hari.

Pola ini berkaitan erat dengan aktivitas transportasi pada jam sibuk pagi–siang yang meningkatkan emisi NO₂, serta kondisi atmosfer (suhu, kelembapan, dan pergerakan angin) yang memengaruhi akumulasi dan dispersi polutan.

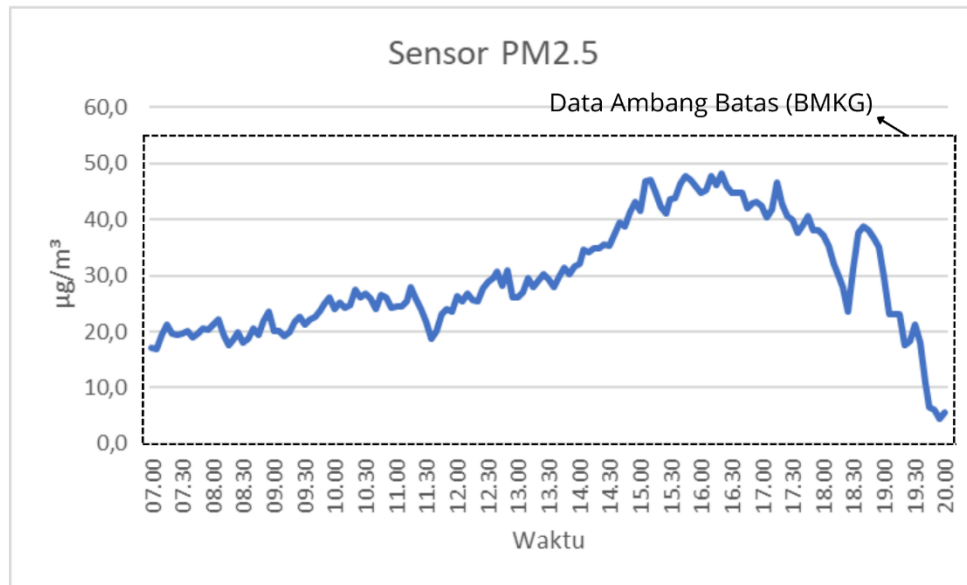
Menjelang sore hingga malam, penurunan aktivitas kendaraan dan faktor meteorologi membantu menurunkan konsentrasi polutan.

Secara keseluruhan, hasil pengukuran ini mengindikasikan bahwa kualitas udara pada periode pagi hingga siang berpotensi menimbulkan dampak kesehatan jika paparan berlangsung lama, khususnya bagi kelompok rentan seperti anak-anak, lansia, dan penderita gangguan pernapasan, karena konsentrasi rata-rata harian yang terukur melebihi ambang batas BMUAN sebesar 0,08 ppm.

5.4.3 Pengujian Sensor PMS5003

Pengujian sensor PMS5003 untuk mendeteksi konsentrasi PM2.5 dilakukan pada tanggal 14 September 2025 mulai pukul 07.00 hingga 20.00 WIB di area terbuka. Sensor dihubungkan dengan ESP32 transmitter, kemudian data dikirimkan melalui komunikasi LoRa menuju receiver dan diteruskan ke platform ThingSpeak secara real-time. Seluruh hasil pengukuran tersimpan otomatis pada server IoT dalam format CSV sehingga dapat dimanfaatkan untuk analisis serta evaluasi lebih lanjut terhadap kualitas udara berdasarkan parameter partikulat debu halus (PM2.5).

Berdasarkan hasil pengujian, konsentrasi PM2.5 menunjukkan fluktuasi dengan pola yang bervariasi sejak pagi hingga sore hari. Nilai partikulat cenderung meningkat pada siang hari yang kemungkinan dipengaruhi oleh aktivitas lingkungan sekitar serta faktor cuaca seperti suhu dan arah angin, kemudian mengalami penurunan menjelang sore. Secara umum, sensor PMS5003 memberikan hasil pembacaan yang stabil dan responsif terhadap perubahan konsentrasi PM2.5 selama periode pengujian. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa sensor bekerja dengan baik sesuai fungsi yang diharapkan. Berikut ditunjukkan grafik hasil pengukuran dari pukul 07.00 hingga 20.00 WIB.



Tabel 5. 2 Grafik Konsesntrasi PM2.5

Hasil pengujian sensor PMS5003 untuk mendeteksi konsentrasi PM2.5 pada tanggal 14 September 2025 menunjukkan adanya fluktuasi kadar partikel di udara sepanjang hari. Pada pagi hari sekitar pukul 07.00, konsentrasi PM2.5 tercatat sebesar $\pm 18\text{--}20\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$, kemudian mengalami peningkatan secara bertahap hingga mencapai kisaran $40\text{--}50\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ pada rentang waktu pukul 15.00–17.00. Nilai tertinggi terukur mendekati $50\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ pada pukul 16.30–17.00, sebelum akhirnya menurun cukup signifikan setelah pukul 18.00 hingga mencapai sekitar $10\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ pada pukul 20.00.

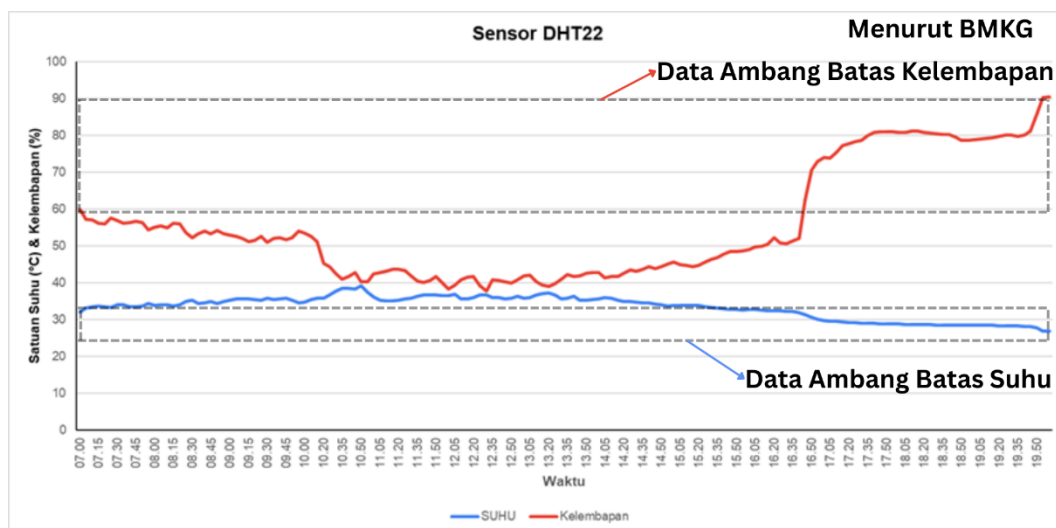
Konsentrasi PM2.5 pada rentang $0\text{--}55\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ masih termasuk kategori aman hingga sedang menurut penjelasan tingkat konsentrasi PM 2.5 di udara oleh BMKG [23] Sehingga tidak berbahaya untuk aktivitas di lingkungan terbuka sepanjang pengujian, nilai konsentrasi tidak menunjukkan lonjakan ekstrem di atas ambang batas, sehingga dapat dikatakan bahwa sensor PMS5003 bekerja dengan stabil, responsif, serta mampu merekam perubahan konsentrasi PM2.5 secara akurat sesuai dengan kondisi lingkungan nyata.

5.4.4 Pengujian Sensor DHT22

Pengujian sensor DHT22 untuk mengukur suhu dan kelembapan dilakukan pada tanggal 14 September 2025 mulai pukul 07.00 hingga 20.00 WIB di area terbuka. Sensor dihubungkan dengan ESP32 transmitter, kemudian data dikirimkan

melalui komunikasi LoRa menuju receiver dan diteruskan ke platform ThingSpeak secara real-time. Seluruh hasil pengukuran tersimpan otomatis pada server IoT dalam format CSV sehingga dapat digunakan untuk analisis serta evaluasi lebih lanjut terhadap kondisi lingkungan berdasarkan parameter suhu dan kelembapan.

Secara umum, sensor DHT22 mampu memberikan pembacaan yang stabil dan responsif terhadap perubahan suhu dan kelembapan selama periode pengujian. Dengan demikian, 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. 4 Grafik Sensor DHT22

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 .

BMKG+2BMKG+2 [24]

- 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 [25].

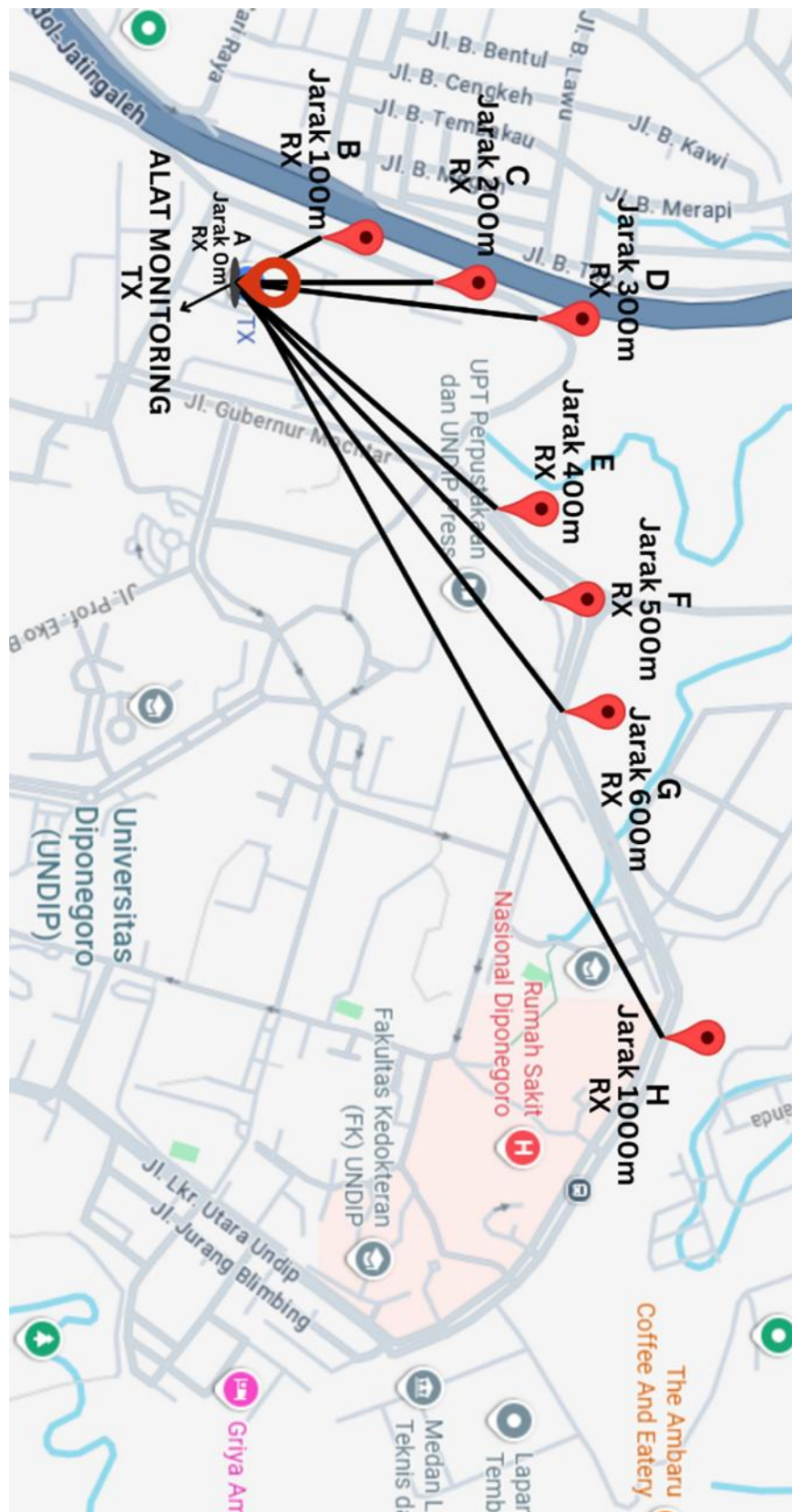
BMKG Maritim+2semarangkota.bps.go.id+2

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.

5.4.5 Pengujian Jarak Komunikasi LoRa

Pengujian dilakukan untuk mengetahui sejauh mana komunikasi LoRa E220-400T22D dapat berjalan dengan baik antara transmitter (Tx) dan receiver (Rx). Pengujian dilakukan di area kampus dengan kondisi banyak gedung yang berpotensi menjadi penghalang sinyal, menggunakan antena 433 MHz pada kedua sisi. Data dikirimkan dari ESP32 transmitter menuju receiver dengan interval tertentu, kemudian diamati apakah data berhasil diterima dan tersimpan ke platform ThingSpeak.

Pengamatan dilakukan langsung di lapangan, dan hasilnya pada table berikut:



Gambar 5. 5 Titik Kordinat LoRa

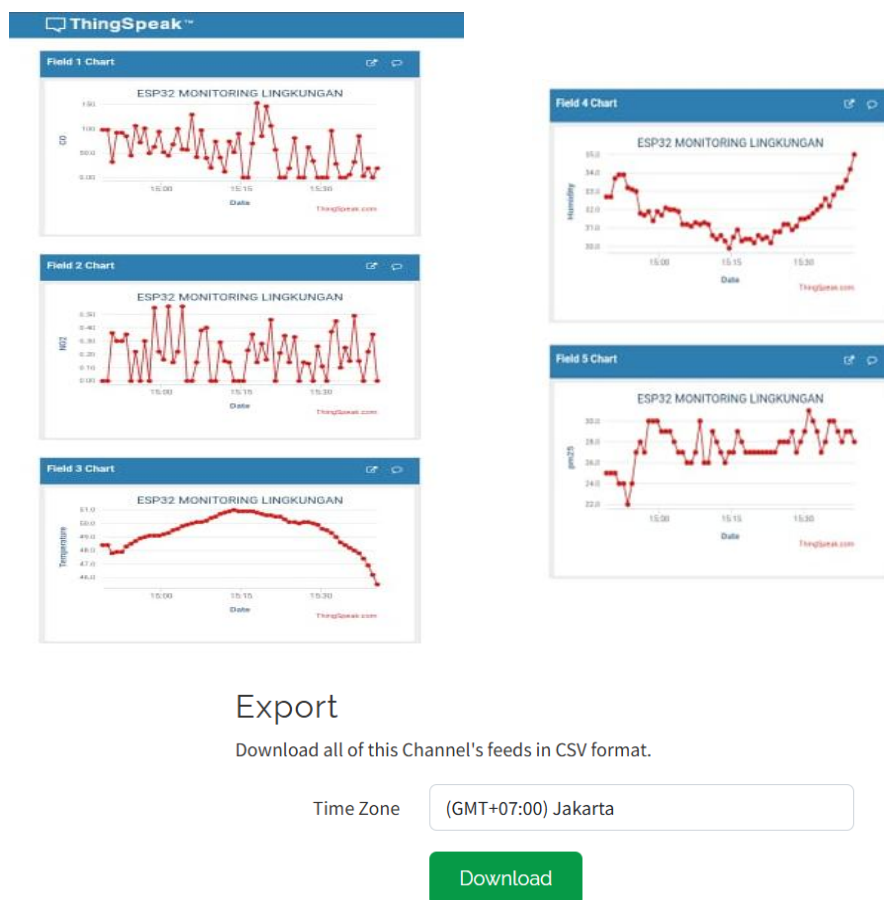
Tabel 5. 3 Koordinat dan Jarak LoRa

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 pengujian di lapangan, transmisi data dengan modul LoRa E220-400T22D mampu bekerja stabil hingga jarak kurang lebih 500 meter pada lingkungan sekitar kampus Undip Sekolah Vokasi. Pada jarak tersebut, data dapat diterima dengan baik oleh receiver, terkirim dalam format JSON, dan tampilan LCD sistem tetap menunjukkan status *Receive* (berhasil). Namun, saat jarak komunikasi diperluas melebihi 500 meter, kestabilan koneksi mulai menurun hingga akhirnya receiver tidak lagi menerima data. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa menggunakan antena standar, jangkauan komunikasi efektif LoRa E220-400T22D pada kondisi pengujian ini adalah sekitar ± 500 meter.

5.4.6 Pengujian Visualisasi Data

Uji visualisasi data dilakukan untuk memastikan hasil pembacaan sensor lingkungan yang dikirimkan transmitter dapat ditampilkan secara real-time melalui ThingSpeak. Komponen yang diuji meliputi grafik tren, tabel, serta fitur ekspor CSV. Pengujian difokuskan pada ketepatan data yang ditampilkan dan kemampuan platform dalam merespons perubahan nilai sensor secara cepat dan konsisten.

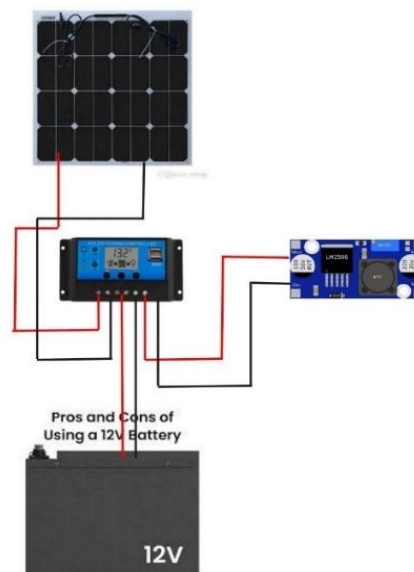


Gambar 5. 6 Tampilan Dashboard ThingSpeak

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa dashboard ThingSpeak menampilkan data sensor secara real-time dengan respons yang baik. Parameter suhu, kelembapan, serta konsentrasi polutan (CO, NO₂, dan PM_{2.5}) diperbarui otomatis sesuai interval pengiriman. Grafik mampu menggambarkan perubahan nilai dengan jelas, sementara tabel menyajikan data secara terstruktur. Fitur ekspor CSV juga berfungsi optimal, menghasilkan file yang sesuai dengan data pada dashboard.

5.4.7 Pengujian Ketahanan Panel Surya dan Aki

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui durasi operasional sistem monitoring lingkungan ketika bekerja secara mandiri dengan memanfaatkan panel surya 30 Wp dan aki 12V 7,5Ah sebagai sumber energi utama. Distribusi daya diatur melalui Solar Charge Controller (SCC) tipe PWM yang berfungsi mengendalikan proses pengisian baterai dari panel surya sekaligus menyalurkan energi listrik ke beban sistem.



Gambar 5. 7 Skematik Sistem Catu Daya

Rangkaian catu daya pada panel surya dihubungkan ke SCC serta beban, dengan pemantauan indikator berupa tegangan, arus, dan kapasitas baterai yang ditampilkan langsung melalui layar SCC. Melalui tampilan tersebut, dapat diketahui status pengisian baterai, kondisi baterai, dan beban yang sedang bekerja. Proses pengujian dilakukan dengan sistem yang dioperasikan secara terus-menerus, di mana beban utama terdiri atas rangkaian ESP32, sensor, dan modul LoRa yang berfungsi sepanjang periode pengujian. Tujuan dari pengujian ini adalah menilai kemampuan kombinasi panel surya dan baterai dalam menyuplai energi bagi sistem monitoring selama 24 jam secara real-time. Dengan konfigurasi ini, sistem diharapkan dapat berjalan secara mandiri dalam jangka panjang tanpa ketergantungan pada sumber daya listrik eksternal.

Tabel 5.4 menampilkan spesifikasi lengkap dari komponen Sistem catu daya yang digunakan dalam perancangan dan pelaksanaan perangkat monitoring lingkungan.

Tabel 5. 4 Spesifikasi Sistem Daya

Komponen	Spesifikasi
Panel Surya	30 Wp
Baterai	Aki 12V 7,5Ah
SCC	PWM Solar Charge Controller
Beban Aktif	0,6315

Tabel 5. 5 Kebutuhan Tegangan dan Arus pada Komponen

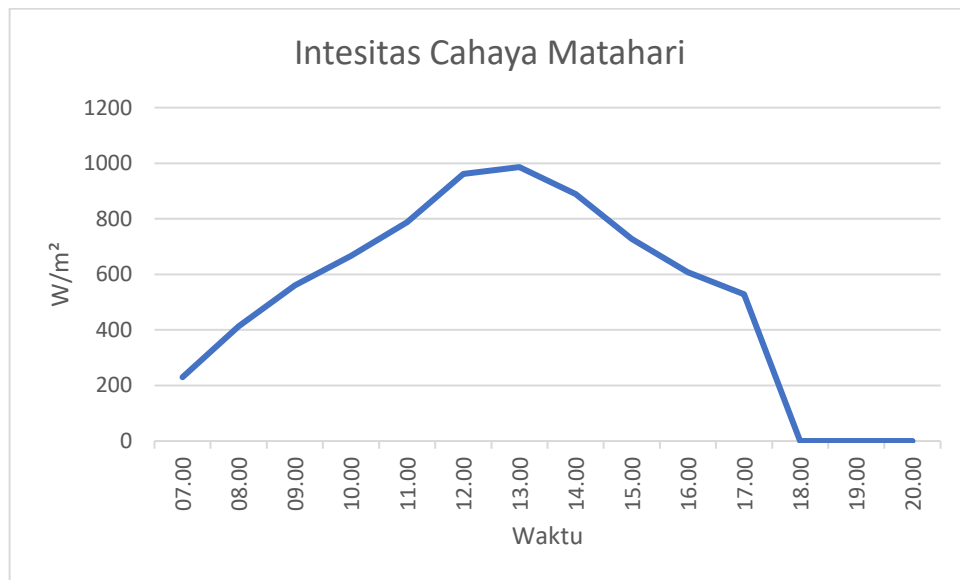
No	Komponen	Tegangan Kerja (V)	Arus Rata-rata (A)	Daya (watt)
1	ESP32 DevKit V1	5 V	0,08	0,4
2	SEN0564 (CO	5 V	0,02	0,1
3	SEN0574 (NO2)	5 V	0,02	0,1
4	DHT22 (suhu&kelembapan)	3,3 V	0,0015	0,00495
5	PMS5003 (PM2.5)	5 V	0,2	1
6	LoRa E220 400T22D	3,3 V	0,11	0,363
7	LCD I2C	5 V	0,2	1
8	TOTAL	-	0,6315	2,96

Tabel 5. 6 Hasil pengujian Ketahanan Panel Surya

No	Waktu	Intensitas Sinar Matahari W/m ²	Tegangan Baterai (V)	Arus Charging (A)	Arus Konsumsi Beban (A)	Status SCC	Cuaca
1	07.00	230	12.4	0.4	0.6	Charging	Cerah
2	08.00	413	12.7	0.7	0.8	Charging	Cerah
3	09.00	560	12.7	0.8	0.8	Charging	Cerah
4	10.00	666	12.9	1.4	0.9	Charging	Cerah
5	11.00	788	13.1	1.7	0.9	Charging	Terik
6	12.00	962	13.3	2.6	0.9	Charging	Terik
7	13.00	986	13.4	2.6	0.7	Charging	Terik
8	14.00	889	13.5	1.8	0.8	Charging	Cerah
9	15.00	727	13.1	1.6	0.6	Charging	Cerah
10	16.00	608	13.0	0.8	0.8	Charging	Cerah
11	17.00	528	12.6	0.7	0.7	Charging	Berawan
12	18.00	-	12.6	0.0	0.7	Discharging	Senja
13	19.00	-	12.6	0.0	0.6	Discharging	Malam
14	20.00	-	12.5	0.0	0.8	Discharging	Malam

Berdasarkan Tabel 5.6, terlihat bahwa intensitas sinar matahari mengalami kenaikan bertahap sejak pagi pukul 07.00 dengan nilai 230 W/m², hingga mencapai puncaknya 986 W/m² pada pukul 13.00 saat cuaca terik. Kenaikan intensitas cahaya ini berdampak langsung pada peningkatan tegangan dan arus pengisian baterai. Tegangan baterai yang awalnya 12,4 V pada pukul 07.00 naik hingga 13,4 V pada pukul 13.00, sedangkan arus pengisian bertambah dari 0,3 A pada pagi hari hingga maksimum 2,6 A pada siang hari. Hal ini menunjukkan bahwa panel surya berkapasitas 30 Wp mampu beroperasi secara optimal pada kondisi radiasi tinggi untuk mendukung sistem monitoring lingkungan.

Memasuki sore hari, tepatnya setelah pukul 17.00, intensitas cahaya matahari menurun hingga akhirnya sistem beralih ke mode discharging pada pukul 18.00, ditandai dengan tidak adanya arus masuk ke baterai. Pada kondisi ini, energi yang telah tersimpan di dalam baterai dimanfaatkan untuk menjaga suplai daya agar sistem tetap berjalan. Dengan konfigurasi baterai 12V 7,5Ah yang dikendalikan oleh SCC PWM, suplai energi terbukti stabil sepanjang hari, baik saat proses pengisian maupun pelepasan daya. Hal ini memastikan rangkaian ESP32, sensor, serta modul LoRa tetap beroperasi real-time selama 24 jam tanpa ketergantungan pada sumber listrik eksternal. Berikut ditampilkan grafik hasil pengukuran dari pukul 07.00 hingga 20.00 WIB.



Gambar 5. 8 Perubahan Intesitas Radiasi (07.00-20.00)



Gambar 5. 9 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) perhari

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

$$\begin{aligned} \text{Total} &= 0.4+0.7+0.8+1.4+1.7+2.6+2.6+1.8+1.6+0.8+0.7+0.0+0.0+0.0 \\ &= 15.1 \text{ Ah} \end{aligned}$$

2. Rata-rata arus Charging

$$\text{Rata-rata} = \frac{15.1}{14 \text{ Jam}} \approx 1.07 \text{ A}$$

3. Energi masuk (Wh)

Jika rata-rata tegangan baterai sekitar 12.4 V saat awal charging:

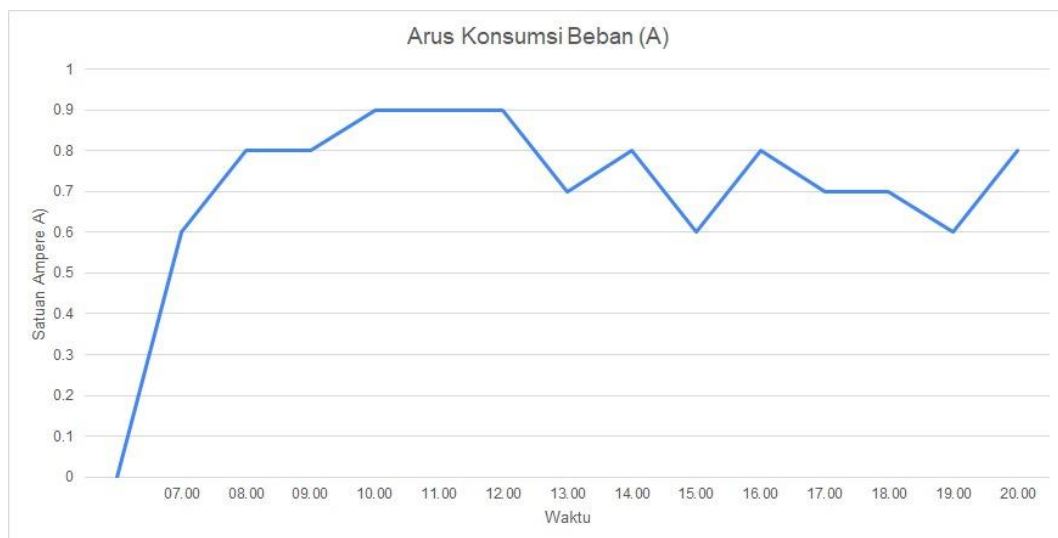
$$\text{Wh} = 15.1 \times 12.4 \approx 187,24 \text{ Wh}$$

4. Implikasi ke baterai 12 V 7 Ah

- Kapasitas nominal baterai: $12 \times 7.5 = 90 \text{ Wh}$
- Energi masuk hasil pengukuran arus charging: $\sim 187 \text{ Wh} \rightarrow$ 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 hasil pengukuran arus pengisian dari pukul 07.00 hingga 20.00 dengan kisaran antara 0,4 A hingga 2,6 A, diperoleh total muatan yang masuk ke baterai sebesar 15,1 Ah per hari dengan rata-rata arus pengisian sekitar 1,07 A. Jika tegangan rata-rata baterai selama proses pengisian diasumsikan sebesar 12,4 V, maka total energi yang berhasil disalurkan ke baterai mencapai sekitar 187 Wh. Dengan mempertimbangkan kapasitas nominal baterai aki 12 V 7,5 Ah yang setara dengan 90 Wh, hasil pengujian ini menunjukkan bahwa energi yang diperoleh dari panel surya dalam satu hari penuh hampir dua kali lipat dari kapasitas baterai. Kondisi ini mengindikasikan bahwa pada cuaca cerah, baterai dapat terisi penuh dalam waktu sekitar 6–7 jam pengisian efektif, sedangkan energi selebihnya akan dikelola oleh solar charge controller untuk menjaga keamanan pengisian baterai.



Gambar 5. 10 Perubahan Arus Konsumsi Beban (07.00 – 20.00)

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

1. Rata-rata konsumsi arus pada beban

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

$$I_{\text{avg}} = \frac{10,6}{14} \approx 0,75 \text{ A}$$

2. Konsumsi beban selama 12 jam

$$Q = I \times t$$

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

Jadi jika rata-rata arus beban 0,75 A dipakai selama 12 jam, maka:

$$Q = 0,75 \times 12 = 9 \text{ Ah}$$

3. Konsumsi energi (Wh)

$$E = Q \times V$$

- E = Energi (Wh)
- Q = Muatan Listrik (Ah)
- V = Tegangan Sistem (V)

$$E = 9 \times 5 = 45 \text{ Wh}$$

Jadi kebutuhan energi beban selama 12 jam = $\pm 45 \text{ Wh}$.

4. Implikasi dengan baterai 12 V 7,5 Ah

- Kapasitas nominal baterai: $12 \times 7,5 = 90 \text{ Wh}$
- Rata-rata beban butuh 45 Wh $\rightarrow$ hanya sekitar 53% kapasitas baterai.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa rata-rata arus yang dikonsumsi beban adalah sekitar 0,75 A. Jika beban beroperasi terus-menerus selama 12 jam, maka total konsumsi mencapai sekitar 9 ampere-jam. Dengan tegangan kerja 5 V, energi listrik yang digunakan selama periode tersebut setara dengan 45 Wh. Sementara itu, baterai berkapasitas 12 V 7,5 Ah memiliki cadangan energi sekitar 90 Wh. Perbandingan ini memperlihatkan bahwa kebutuhan energi beban hanya sekitar setengah dari kapasitas baterai, sehingga satu kali pengisian penuh mampu menopang beban 5 V selama 12 jam pemakaian, bahkan masih menyisakan cadangan energi untuk penggunaan tambahan.

Dari hasil pengukuran lebih lanjut, sistem monitoring lingkungan yang dirancang mampu beroperasi mandiri selama 24 jam penuh dengan memanfaatkan kombinasi panel surya 30 Wp dan baterai aki 12 V 7,5 Ah. Pada siang hari,

khususnya saat kondisi cuaca cerah, panel surya menghasilkan arus pengisian rata-rata sekitar 1,07 A. Hal ini menunjukkan bahwa proses pengisian berlangsung optimal sehingga baterai dapat terisi penuh untuk memenuhi kebutuhan energi pada malam hari. Energi yang tersimpan kemudian berfungsi sebagai suplai cadangan ketika intensitas radiasi matahari menurun, baik saat mendung maupun menjelang sore.

Saat malam hari, sistem tetap berjalan normal tanpa gangguan dengan rata-rata konsumsi daya sekitar 0,8 A. Kondisi ini membuktikan bahwa baterai 12 V 7,5 Ah sudah memadai untuk mendukung operasi sistem selama satu hari penuh, meskipun terjadi variasi intensitas cahaya matahari akibat perubahan cuaca. Dengan demikian, konfigurasi panel surya 30 Wp, SCC tipe PWM, dan baterai 12 V 7,5 Ah mampu menyediakan suplai daya yang stabil, efisien, serta berkesinambungan. Rangkaian ini tidak hanya memastikan perangkat dapat beroperasi secara kontinu, tetapi juga membuktikan keandalan energi terbarukan sebagai sumber daya utama dalam sistem monitoring lingkungan berbasis IoT.