

BAB V

HASIL DAN ANALISIS

5.1 Hasil Pengujian dan Analisis Sistem

Pengujian sistem *Monitoring* baterai lithium-ion pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) berbasis IoT menggunakan komunikasi LoRa ini dilakukan untuk mengetahui kinerja alat secara keseluruhan. Pengujian meliputi pengamatan kondisi baterai LiFePO₄ saat proses *charging* pada siang hari ketika panel surya aktif mengisi baterai melalui SCC, serta kondisi *discharging* pada malam hari ketika baterai menyuplai beban lampu. Parameter yang diukur selama pengujian mencakup *Shunt Voltage*, *Battery Voltage*, *Current*, *Power*, *Load Voltage*, *State of Charge (Soc)*, *RSSI* dan *State of Health (SoH)* serta suhu permukaan baterai yang direkam secara otomatis setiap interval 5 menit melalui sensor INA219 dan DS18B20 pada unit *transmitter*, kemudian dikirimkan ke unit *receiver* melalui komunikasi nirkabel LoRa SX1278 Ra-02 untuk ditampilkan pada LCD I2C 16x2 dan pada Blynk serta disimpan ke *Google Sheets*. Selain pengujian *Monitoring* baterai, dilakukan pengujian jangkauan komunikasi LoRa SX1278 Ra-02 antara unit *transmitter* dan unit *receiver* pengujian dilakukan sesuai dengan mata arah angin di titik lokasi yang berbeda-beda untuk mencari jarak maksimal pada tiap lokasi dengan mengukur nilai parameter Received Signal Strength Indicator (RSSI).

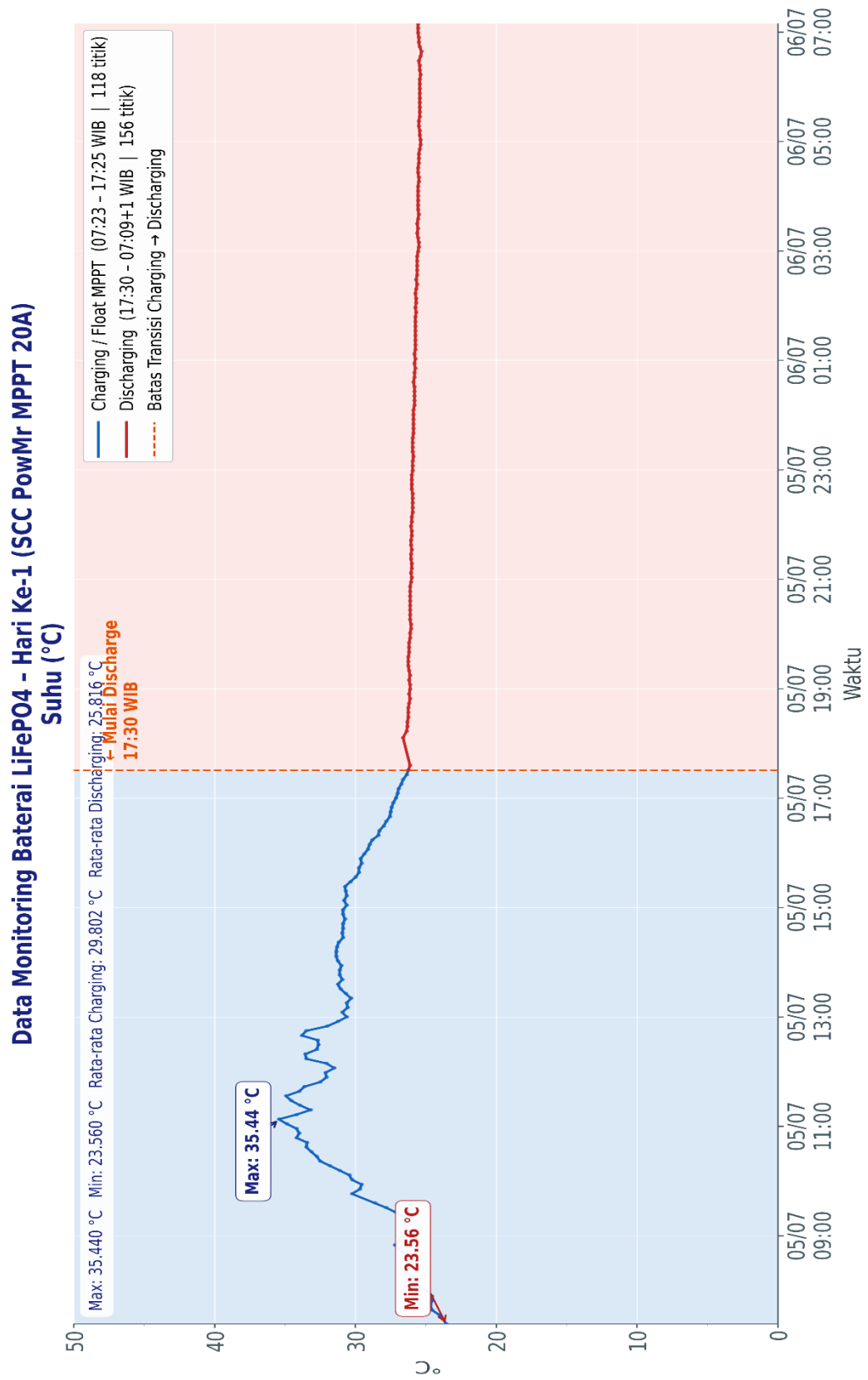
5.2 Pengujian *Monitoring* Baterai LiFePO₄

Pengujian *Monitoring* baterai LiFePO₄ menggunakan *Solar Charge Controller* (SCC) PowMr MPPT 20A Keeper 1220 dilakukan selama dua hari, yaitu pada tanggal 5 Juli 2026 dan 6 Juli 2026, SCC PowMr MPPT 20A dilengkapi dengan mode pengisian khusus untuk baterai LiFePO₄ dengan tegangan boost sebesar 14,2 V dan tegangan *float* sebesar 13,6 V, sesuai dengan profil pengisian baterai LiFePO₄ 4S. Selain itu, SCC jenis MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) mampu mengekstraksi daya maksimum dari panel surya dengan cara melacak titik daya maksimum (MPPT) secara dinamis, sehingga. Parameter yang dipantau meliputi suhu (°C), *Shunt Voltage* (mV), *Battery*

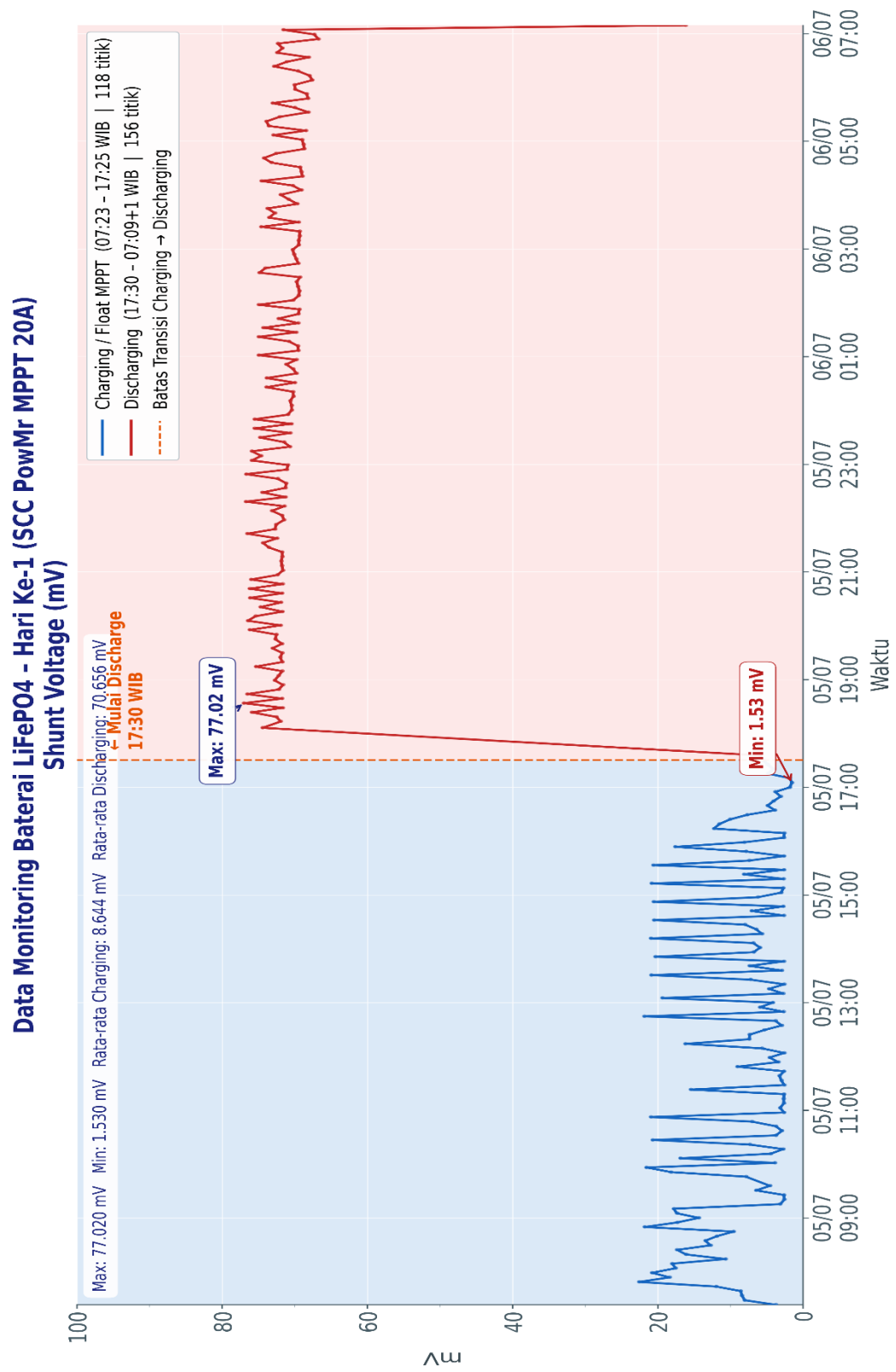
Voltage (V), arus/*Current (mA)*, daya/*Power (mW)*, *Load Voltage (V)*, *State of Charge*, *State of Health (SoH)* yang dikirimkan secara nirkabel melalui komunikasi LoRa setiap lima menit dan dicatat pada *Google Sheets*.

5.2.1 Hasil Pengujian Sistem Monitoring Hari ke-1 (05 Juli 2026)

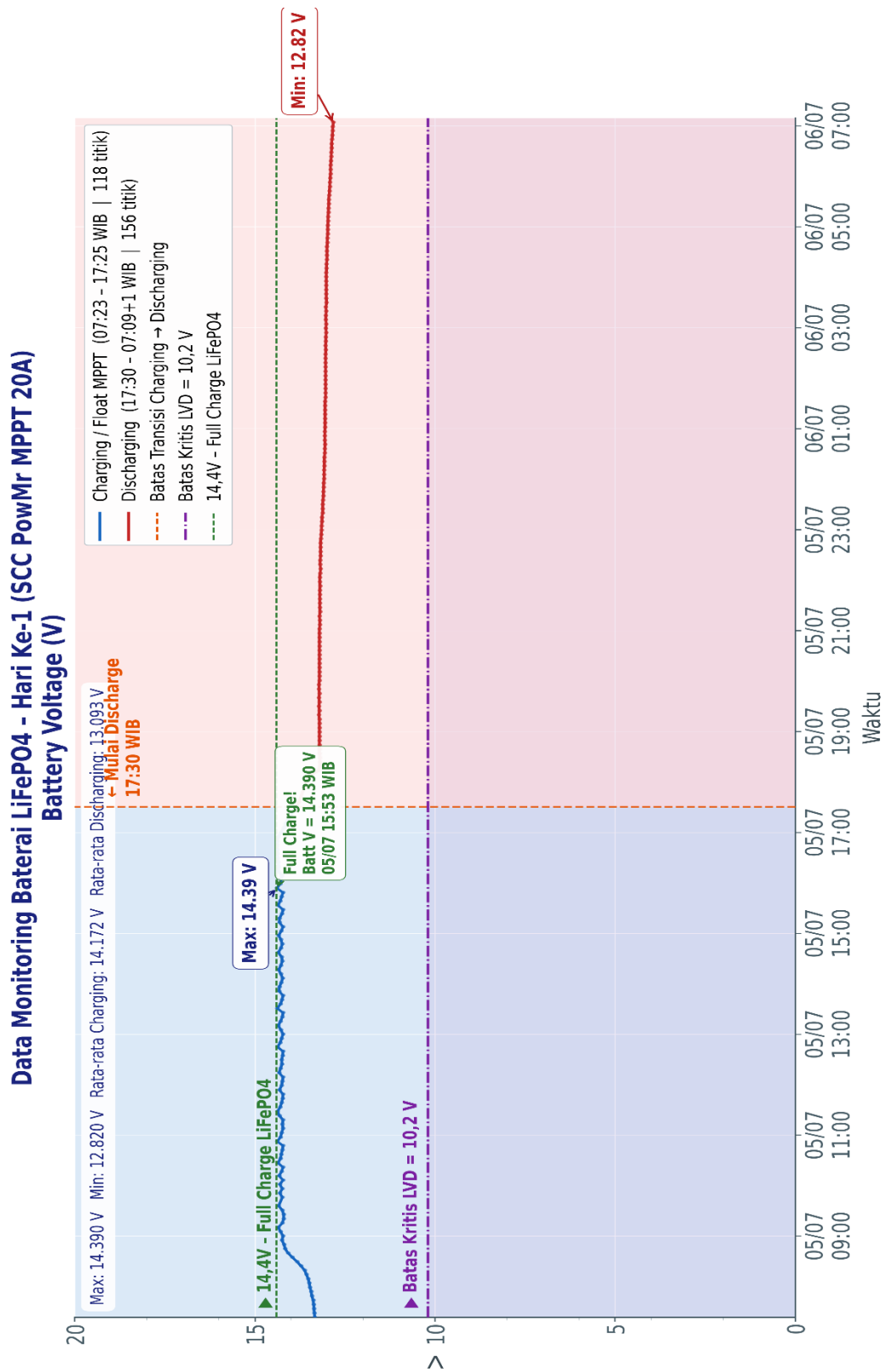
Pengujian MPPT hari ke-1 dilakukan pada tanggal 05 Juli 2026 hingga 06 Juli 2026 dengan total 274 titik data. Periode *charging* berlangsung pukul 07:23–17:25 WIB (10,04 jam, 118 titik) dan *discharging* pukul 17:30–07:09 WIB (13,65 jam, 156 titik). Hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 5.49 – Gambar 5.54.



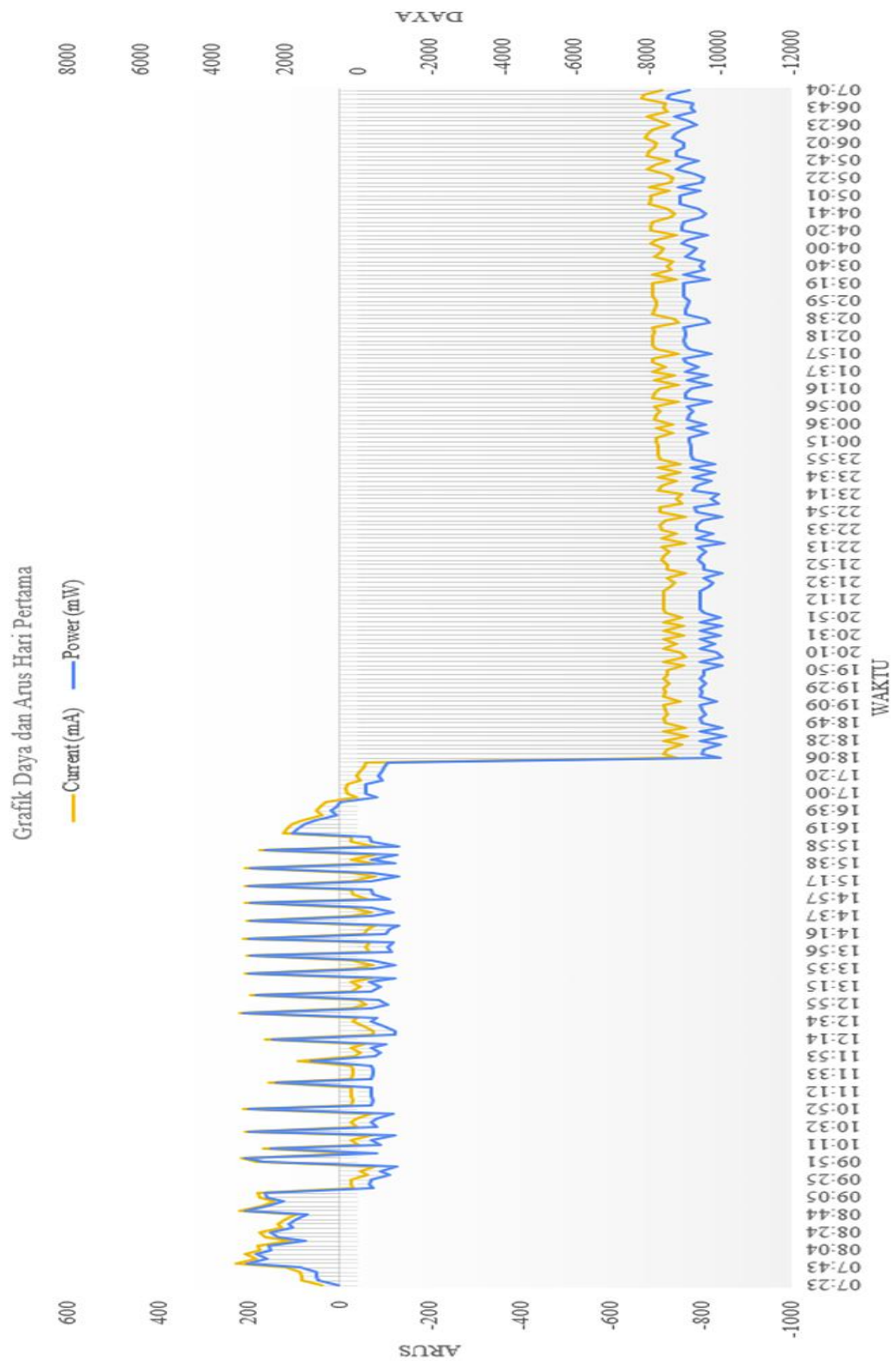
Gambar 5.1 Grafik *Monitoring* Baterai LiFePO4 SCC MPPT Suhu Hari Ke-1



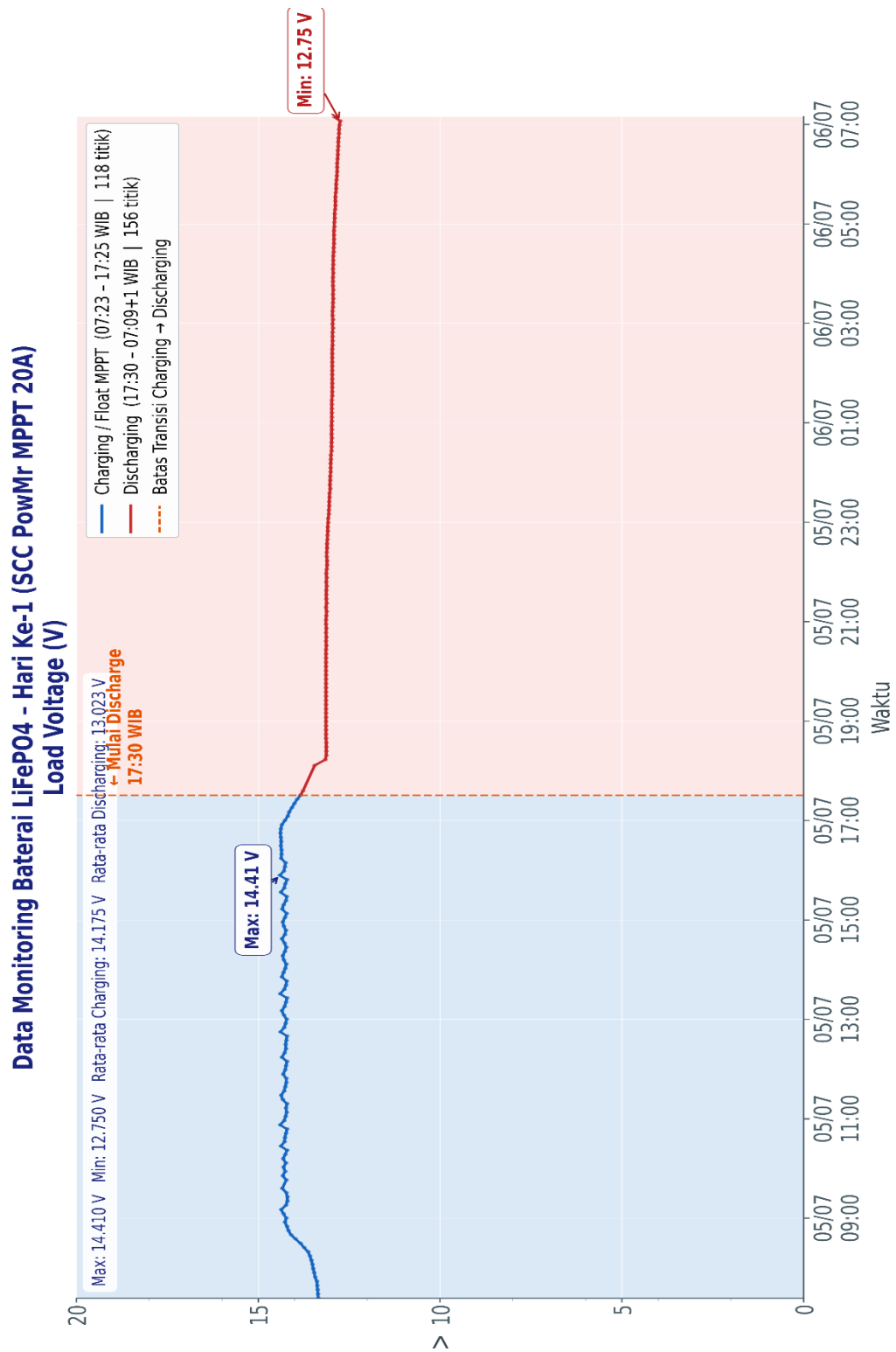
Gambar 5.2 Grafik *Monitoring Baterai LiFePO4 SCC MPPT Shunt Voltage Hari Ke-1*



Gambar 5.3 Grafik *Monitoring Baterai LiFePO4 SCC MPPT Battery Voltage*
Hari Ke-1



Gambar 5.4 Grafik *Monitoring* Baterai LiFePO4 SCC MPPT *Current* dan *Power* Hari Ke-1



Gambar 5. 5 Grafik *Monitoring* Baterai LiFePO4 SCC MPPT *Load Voltage* Hari

Ke-1

1. Suhu (°C)

Suhu pada periode *charging* berada pada rentang 23,56°C hingga 35,44°C dengan rata-rata 29,83°C. Pada periode *discharging*, suhu sangat stabil berada pada rentang 25,31°C hingga 26,62°C dengan rata-rata 25,82°C.

2. *Shunt Voltage* (mV)

Shunt Voltage pada periode *charging* menunjukkan nilai yang sangat kecil dengan maksimum hanya 22,57 mV dan rata-rata 8,67 mV. Nilai yang sangat kecil ini mencerminkan arus *charging* yang sangat rendah karena SCC MPPT beroperasi dalam mode CV (Constant Voltage) dan Float setelah baterai mencapai kondisi *full charge* pada pukul 15:53 WIB arus pengisian dibatasi secara otomatis untuk mencegah overcharge. Pada periode *discharging*, *Shunt Voltage* stabil dengan rata-rata 70,66 mV dan nilai maksimum 77,02 mV.

3. *Battery Voltage* (V)

Battery Voltage pada periode *charging* meningkat bertahap dari awal pengujian hingga mencapai nilai maksimum 14,39 V, dengan rata-rata *charging* 14,175 V. Nilai maksimum tersebut mendekati tegangan full charge LiFePO₄ 4S (14,4 V), menunjukkan bahwa SCC PowMr MPPT 20A mampu mengisi baterai hingga hampir penuh. Setelah mencapai tegangan full charge, SCC beralih ke mode Float sehingga *Battery Voltage* stabil di sekitar 14,4 V pada pukul 15:53 WIB tanggal 05 Juli 2026. Pada periode *discharging*, *Battery Voltage* menunjukkan pola plateau yang khas untuk baterai LiFePO₄ penurunan yang sangat landai dan stabil sepanjang malam dengan rata-rata 13,093 V dan nilai minimum 12,82 V.

4. *Current* (mA)

Arus pengisian pada periode *charging* sangat kecil dengan maksimum hanya 225,70 mA dan rata-rata 86,71 mA. Nilai arus yang sangat rendah ini disebabkan oleh SCC MPPT yang beroperasi dalam mode *Float* setelah baterai penuh arus dibatasi hanya untuk mempertahankan tegangan baterai tanpa risiko overcharge. Arus *discharging* lebih besar dengan rata-rata 706,56 mA dan maksimum 770,20 mA.

5. *Power (mW)*

Daya *charging* maksimum yang tercatat adalah 3.139,41 mW (3,14 W) dengan rata-rata 1.225,39 mW nilai yang sangat kecil karena SCC berada dalam mode Float sehingga daya dibatasi secara signifikan. Daya *discharging* maksimum sebesar 10.172,80 mW (10,17 W) dengan rata-rata 9.246,99 mW.

6. *Load Voltage (V)*

Load Voltage pada periode charging meningkat hingga mencapai nilai maksimum 14,41 V, dengan rata-rata 14,178 V. Nilai ini telah melampaui tegangan full charge baterai LiFePO4 4S (14,2 V), membuktikan bahwa baterai berhasil mencapai kondisi fully charged selama pengujian hari ke-1 menggunakan SCC PowMr MPPT 20A . Pada periode discharging, *Load Voltage* turun secara landai dengan rata-rata 13,023 V dan nilai minimum 12,75 V, mencerminkan tegangan sisi SCC yang masih tinggi karena baterai masih memiliki kapasitas yang cukup hingga akhir periode pengujian.

7. *State of Charge (Soc)*

Berdasarkan perhitungan SoC menggunakan metode *Voltage-Based* dengan rumus SoC (%), sisa kapasitas baterai pada akhir pengujian ditunjukkan pada perhitungan berikut.

$$SOC = \frac{Battery\ Voltage - Vmin}{Vmax - Vmin} \times 100\%$$

$$SOC = \frac{12,82 - 10}{14,4 - 10} \times 100\%$$

$$SOC = \frac{2,75}{4,4} \times 100\%$$

$$SOC = 64,09\%$$

8. *State of Health (SoH)*

Berdasarkan perhitungan SoH menggunakan metode *Internal Resistance-Based State of Health Estimation*, Kondisi kapasitas baterai pada akhir pengujian ditunjukkan pada perhitungan berikut.

$$SOH = \frac{R_{ref}}{R_{internal}} \times 100\%$$

$$SOH = \frac{100}{99,99} \times 100\%$$

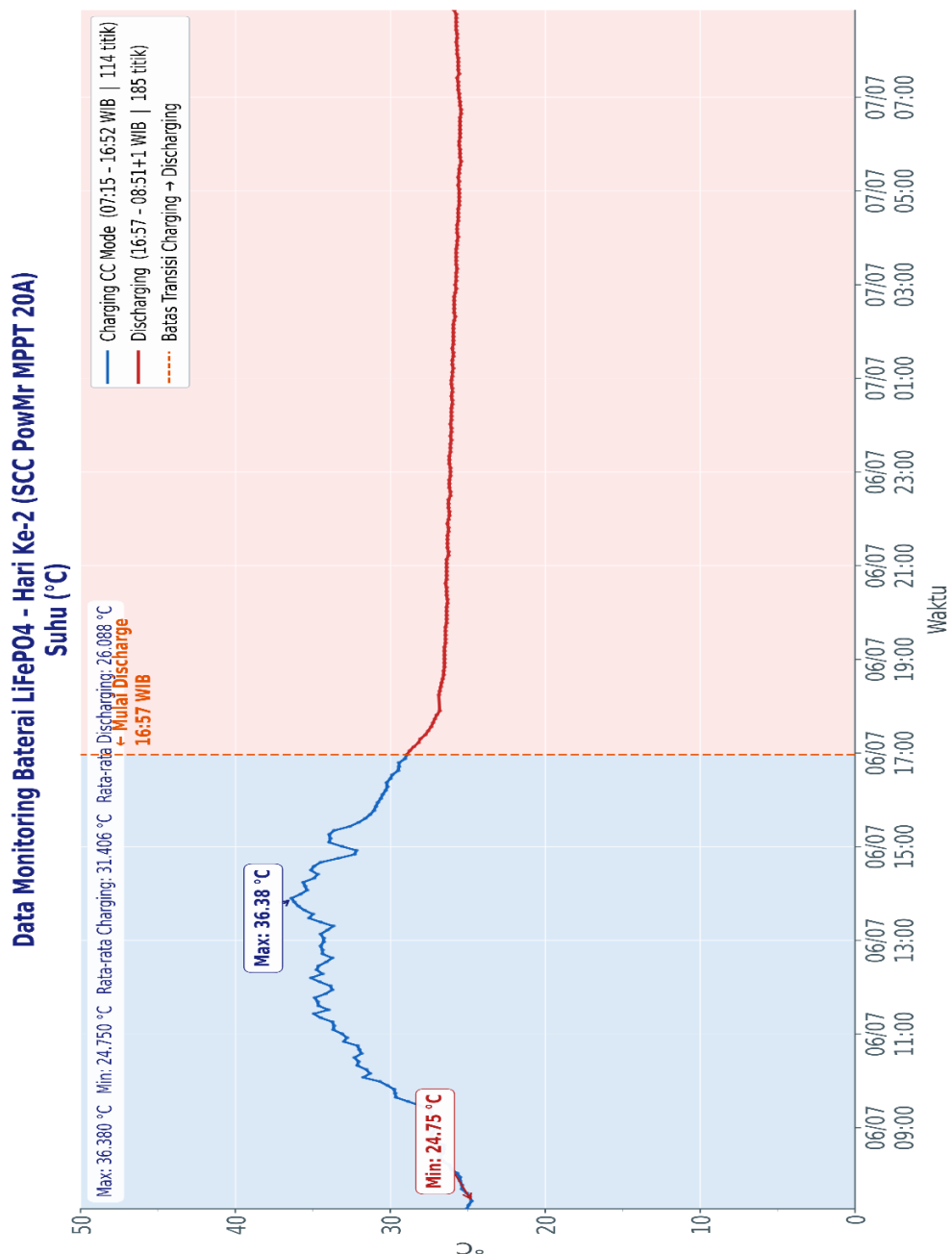
$$SOH = 100 \%$$

Tabel 5-1 Rekapitulasi Data MPPT Hari Ke-1

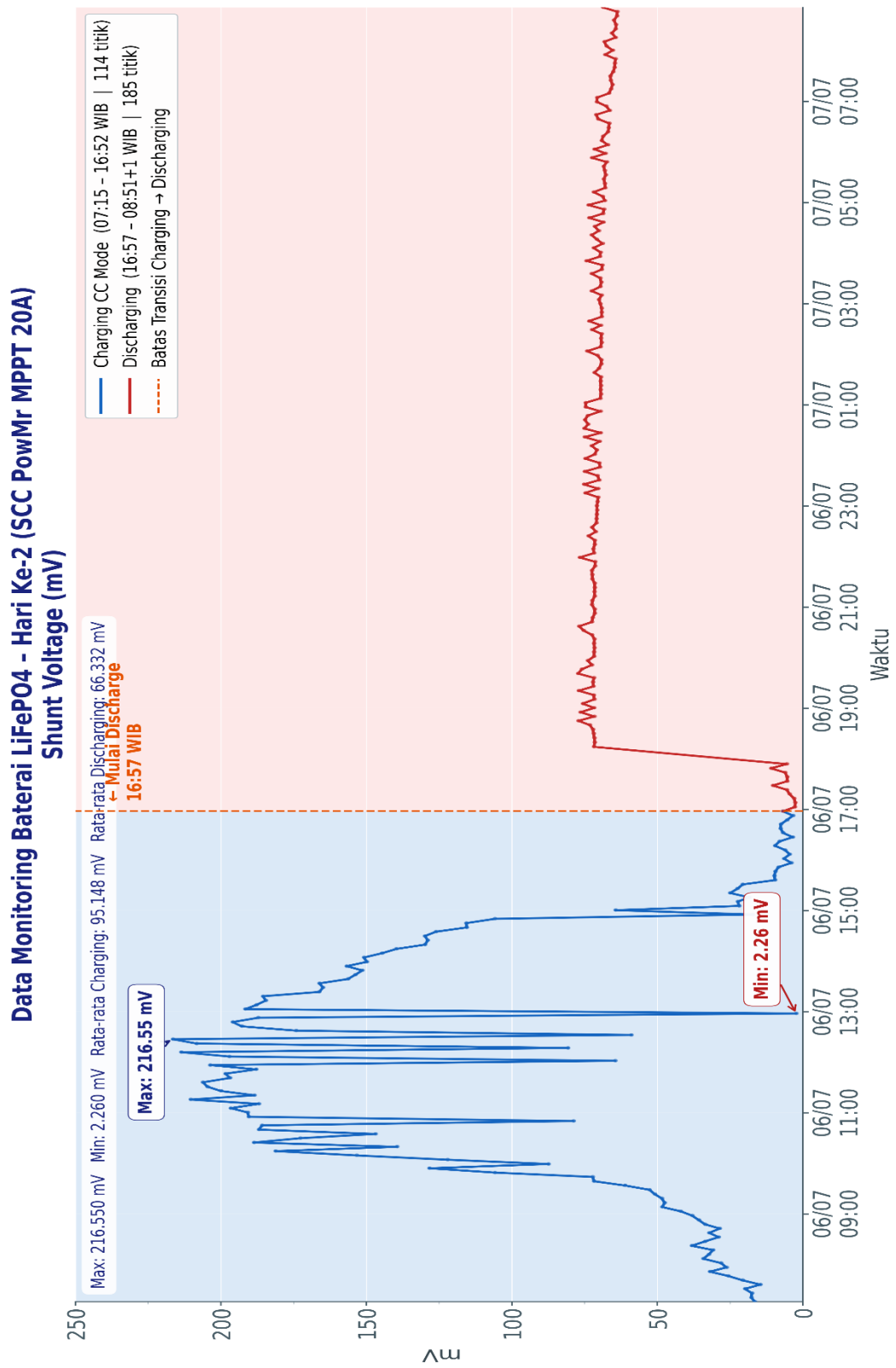
No	Parameter	Satuan	Maks (Charging)	Min (Charging)	Rata-rata (Charging)	Maks (Discharging)	Min (Discharging)	Rata-rata (Discharging)
1	Suhu	°C	35,44	23,56	29,83	26,62	25,31	25,82
2	<i>Shunt Voltage</i>	mV	22,57	1,53	8,67	77,02	5,49	70,66
3	<i>Battery Voltage</i>	V	14,390	13,340	14,175	13,850	12,820	13,093
4	<i>Arus / Current</i>	mA	225,70	15,30	86,71	770,20	54,90	706,56
5	<i>Daya / Power</i>	mW	3.139,41	217,20	1.225,39	10.172,80	760,26	9.246,99
6	<i>Load Voltage</i>	V	14,410	13,350	14,178	13,840	12,750	13,023

5.2.2 Hasil Pengujian Sistem Monitoring Hari Ke-2 (06 Juli 2026)

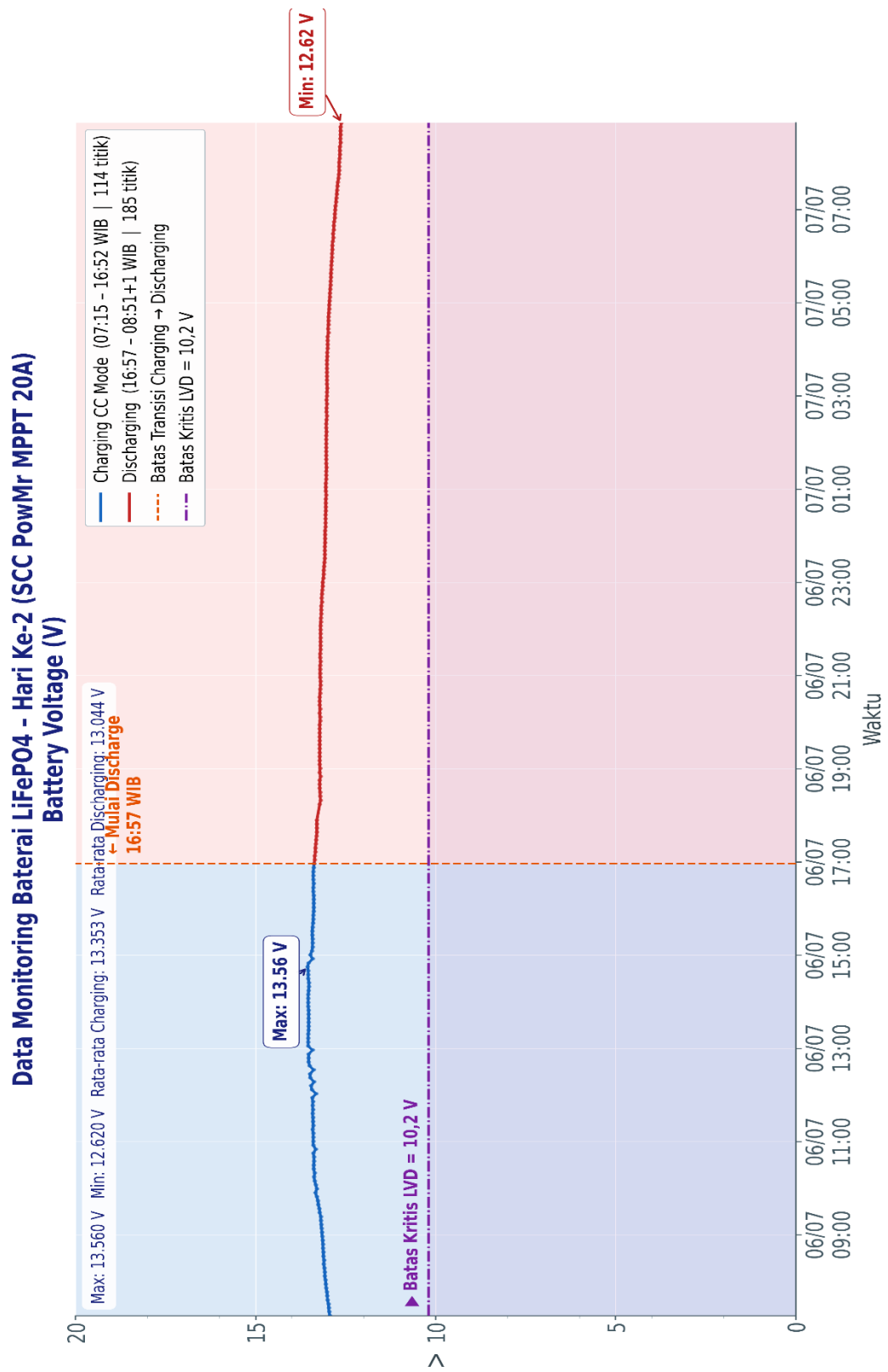
Pengujian MPPT hari ke-2 dilakukan pada tanggal 06 Juli 2026 hingga 07 Juli 2026 dengan total 299 titik data. Periode *charging* berlangsung pukul 07:15–16:52 WIB (9,61 jam, 114 titik) dan *discharging* pukul 16:57–08:51 WIB (15,90 jam, 185 titik). Hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 5.55 – Gambar 5.60.



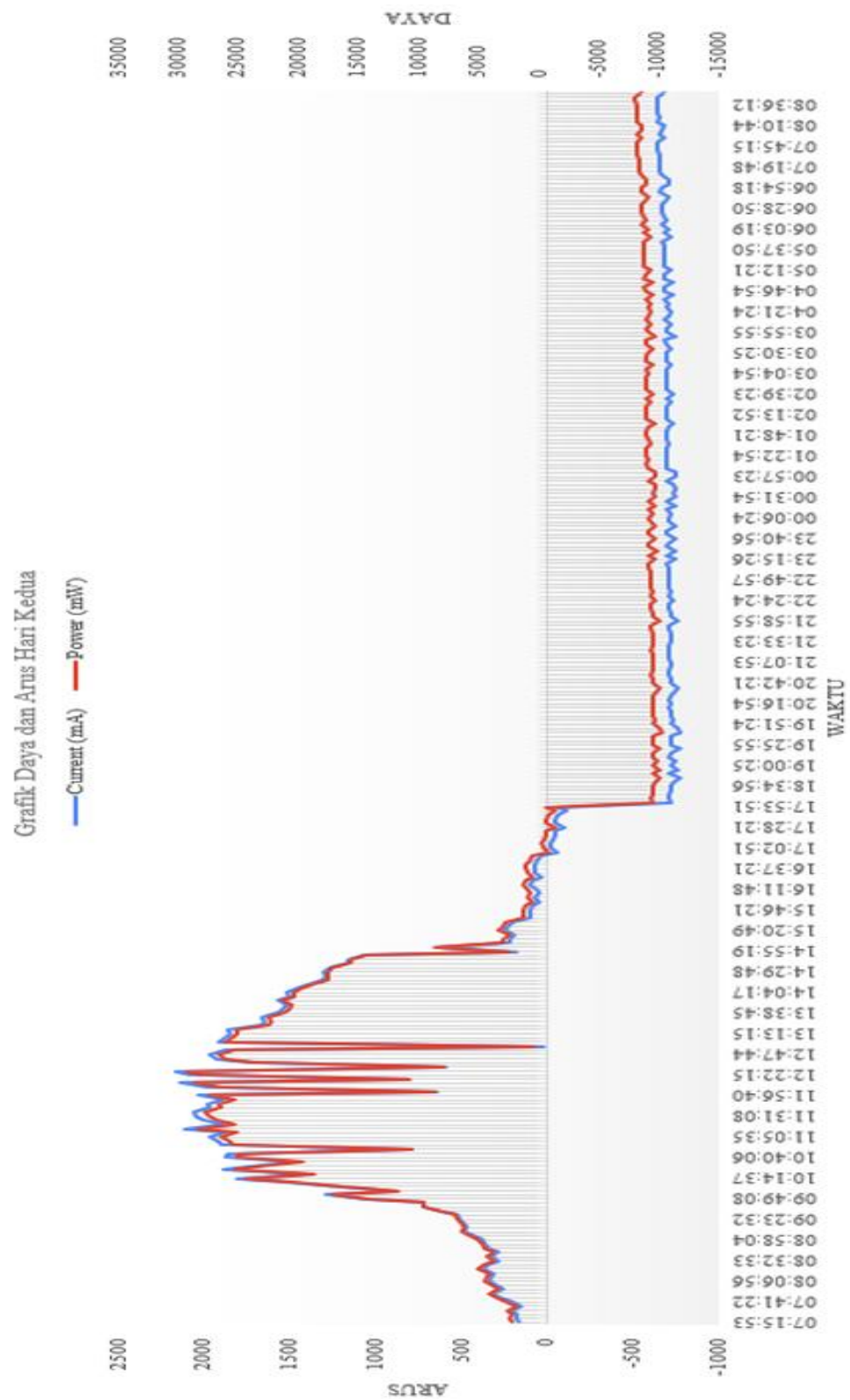
Gambar 5.6 Grafik *Monitoring* Baterai LiFePO4 SCC MPPT Suhu Hari Ke-2



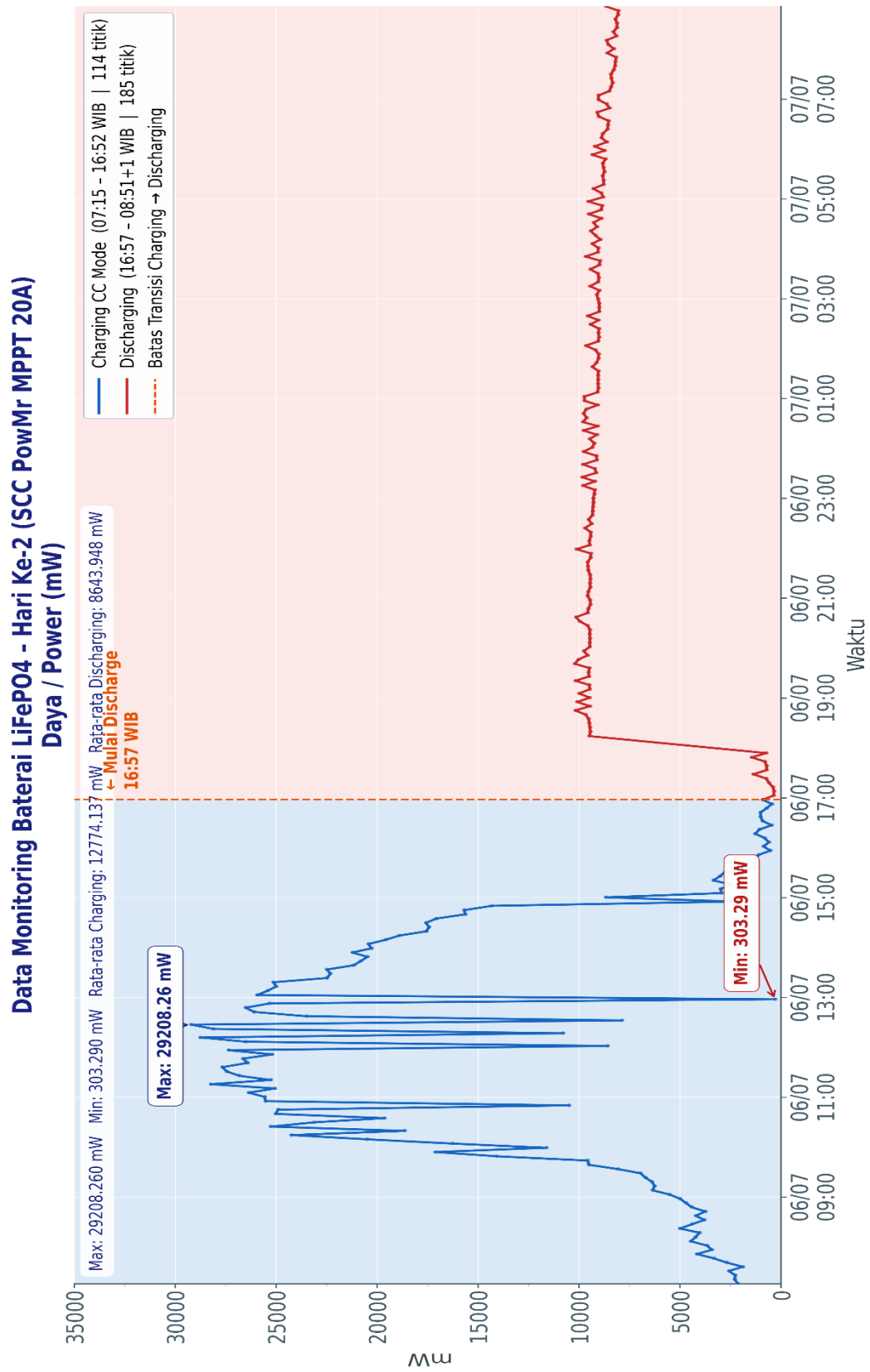
Gambar 5.7 Grafik *Monitoring Baterai LiFePO4 SCC MPPT Shunt Voltage* Hari Ke-2



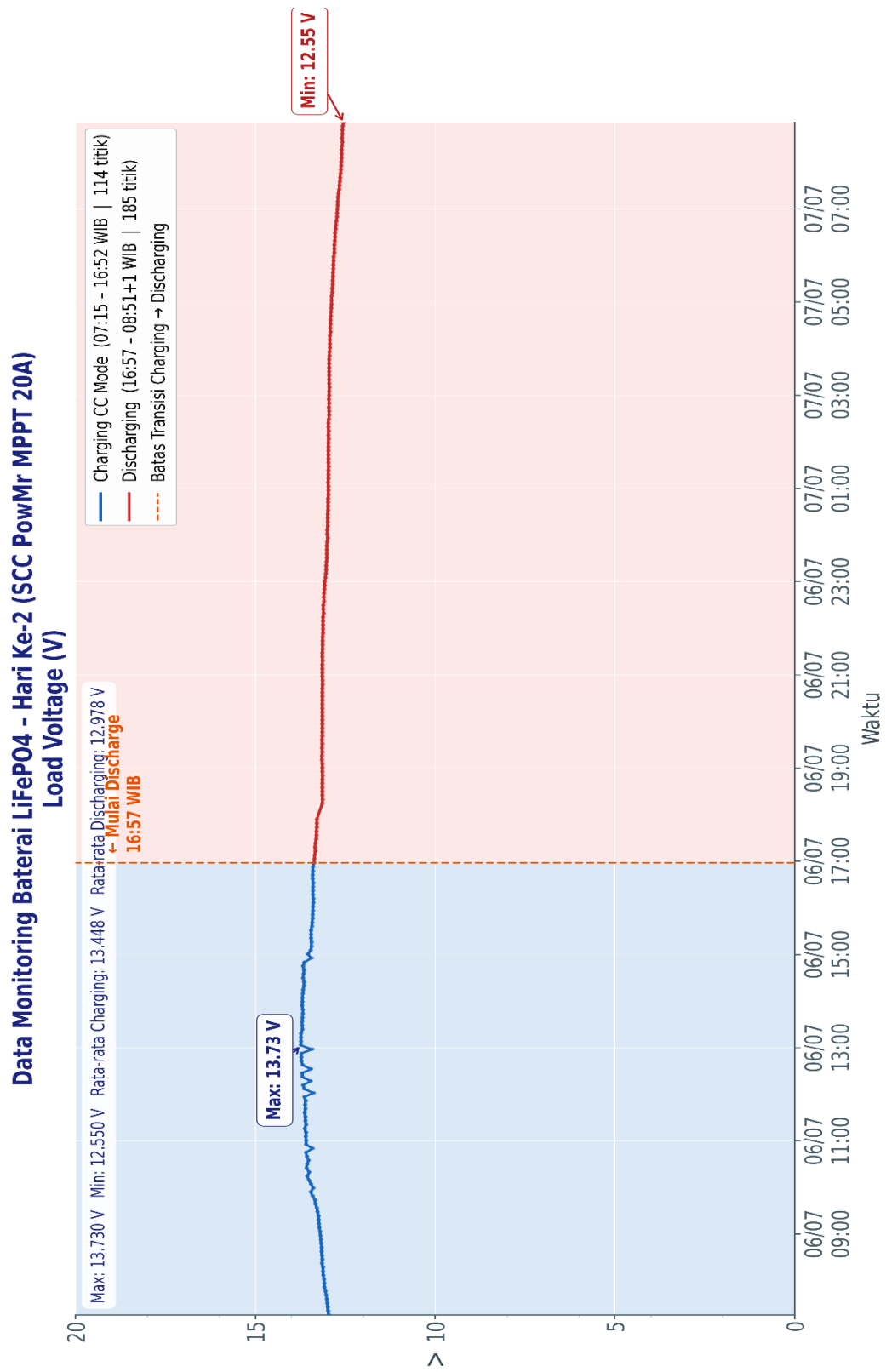
Gambar 5.8 Grafik *Monitoring Baterai LiFePO4 SCC MPPT Battery Voltage*
 Hari Ke-2



Gambar 5.9 Grafik *Monitoring* Baterai LiFePO₄ SCC MPPT *Current* dan *Power* Hari Ke-2



Gambar 5.10 Grafik *Monitoring Baterai LiFePO4 SCC MPPT Power* Hari Ke-2



Gambar 5. 11 Grafik *Monitoring Baterai LiFePO4 SCC MPPT Load Voltage* Ke-

1. Suhu (°C)

Suhu pada periode *charging* berada pada rentang 24,75°C hingga 36,38°C dengan rata-rata 31,43°C, suhu berada pada rentang 25,44°C hingga 28,94°C dengan rata-rata 26,09°C.

2. *Shunt Voltage* (mV)

Shunt Voltage pada periode *charging* mencapai nilai maksimum 216,55 mV dengan rata-rata 95,92 mV. Nilai ini jauh lebih besar dibandingkan MPPT hari ke-1 (maks 22,57 mV, rata-rata 8,67 mV) karena pada hari ke-2 SCC MPPT beroperasi dalam mode CC (*Constant Current*) dengan arus penuh baterai belum terisi penuh sehingga SCC mengalirkan arus maksimum. Pada periode *discharging*, *Shunt Voltage* stabil dengan rata-rata 66,33 mV dan nilai maksimum 77,25 mV.

3. *Battery Voltage* (V)

Battery Voltage pada periode *charging* meningkat bertahap dari awal pengujian hingga mencapai nilai maksimum 13,56 V pada pukul 14:45 WIB tanggal 06 Juli 2026, dengan rata-rata *charging* 13,353 V. Nilai maksimum tersebut masih berada di bawah tegangan full charge LiFePO4 4S (14,4 V), menunjukkan bahwa SCC PowMr MPPT 20A beroperasi dalam mode CC (*Constant Current*) dan baterai belum berhasil mencapai kondisi fully charged pada hari ke-2. Pada periode *discharging*, *Battery Voltage* menunjukkan pola plateau yang khas untuk baterai LiFePO4 penurunan yang sangat landai dan stabil sepanjang malam dengan rata-rata 13,044 V dan nilai minimum 12,62 V.

4. *Current* (mA)

Arus pengisian mencapai nilai maksimum 2.165,50 mA dengan rata-rata 959,23 mA. Nilai ini jauh lebih besar dari MPPT hari ke-1 (maks 225,70 mA) karena SCC beroperasi dalam mode CC mengalirkan arus pengisian penuh karena baterai masih memiliki kapasitas yang besar untuk diisi. Nilai ini masih di bawah batas maksimum sensor INA219 (3.200 mA). Arus *discharging* stabil dengan rata-rata 663,32 mA dan maksimum 772,50 mA.

5. *Power (mW)*

Daya *charging* maksimum yang tercatat adalah 29.208,26 mW (29,21 W), dengan rata-rata 12.878,23 mW. Nilai ini jauh lebih besar dari MPPT hari ke-1 (maks 3.139,41 mW) karena mode CC yang mengalirkan daya penuh. Daya *discharging* maksimum 10.209,36 mW (10,21 W) dengan rata-rata 8.643,95 mW.

6. *Load Voltage (V)*

Load Voltage pada periode charging meningkat hingga mencapai nilai maksimum 13,73 V, dengan rata-rata 13,449 V. Nilai ini masih berada di bawah tegangan full charge baterai LiFePO4 4S (14,2 V), membuktikan bahwa baterai tidak mencapai kondisi fully charged selama pengujian hari ke-2 menggunakan SCC PowMr MPPT 20A karena SCC masih beroperasi dalam mode CC. Pada periode discharging, *Load Voltage* turun secara landai dengan rata-rata 12,978 V dan nilai minimum 12,55 V, mencerminkan tegangan sisi SCC yang masih tinggi karena baterai masih memiliki kapasitas yang cukup hingga akhir periode pengujian.

7. *State of Charge (Soc)*

Berdasarkan perhitungan SoC menggunakan metode *Voltage-Based* dengan rumus SoC(%), sisa kapasitas baterai pada akhir pengujian ditunjukkan pada perhitungan berikut.

$$SOC = \frac{Battery\ Voltage - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \times 100\%$$

$$SOC = \frac{12,62 - 10}{14,4 - 10} \times 100\%$$

$$SOC = \frac{2,62}{4,4} \times 100\%$$

$$SOC = 59,55\%$$

8. *State of Health (SoH)*

Berdasarkan perhitungan SoH menggunakan metode *Internal Resistance-Based State of Health Estimation*, Kondisi kapasitas baterai pada akhir pengujian ditunjukkan pada perhitungan berikut.

$$SOH = \frac{R_{ref}}{R_{internal}} \times 100\%$$

$$SOH = \frac{100}{100,00} \times 100\%$$

$$SOH = 100 \%$$

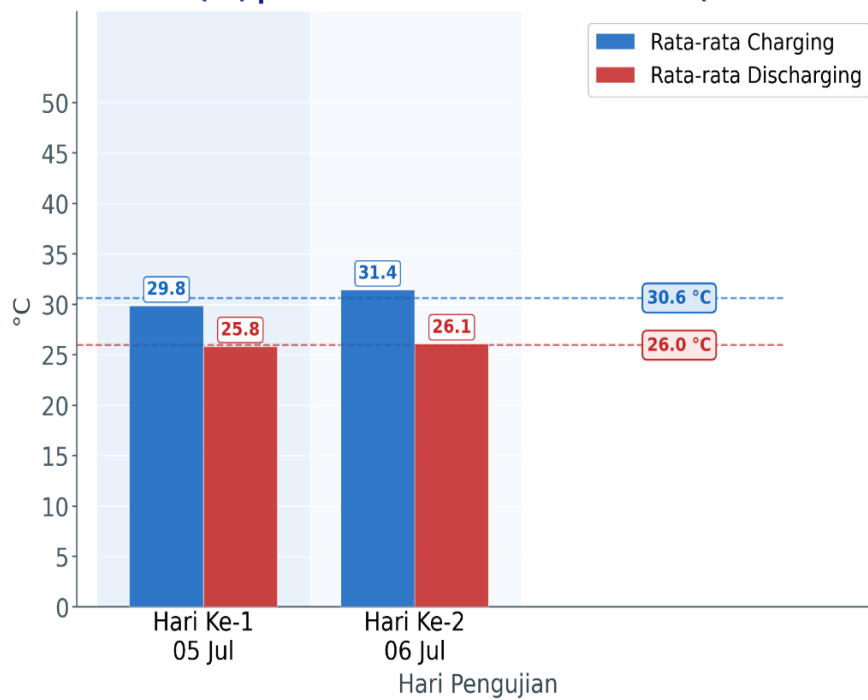
Tabel 5-2 Rekapitulasi Data MPPT Hari Ke-2

No	Parameter	Satuan	Maks (Charging)	Min (Charging)	Rata-rata (Charging)	Maks (Discharging)	Min (Discharging)	Rata-rata (Discharging)
1	Suhu	°C	36,38	24,75	31,43	28,94	25,44	26,09
2	<i>Shunt Voltage</i>	mV	216,55	2,26	95,92	77,25	2,56	66,33
3	<i>Battery Voltage</i>	V	13,560	12,940	13,353	13,380	12,620	13,044
4	Arus / <i>Current</i>	mA	2.165,50	22,60	959,23	772,50	25,60	663,32
5	Daya / <i>Power</i>	mW	29.208,26	303,29	12.878,23	10.209,36	341,91	8.643,95
6	<i>Load Voltage</i>	V	13,730	12,960	13,449	13,370	12,550	12,978

5.2.3 Rekapitulasi dan Analisis pengujian

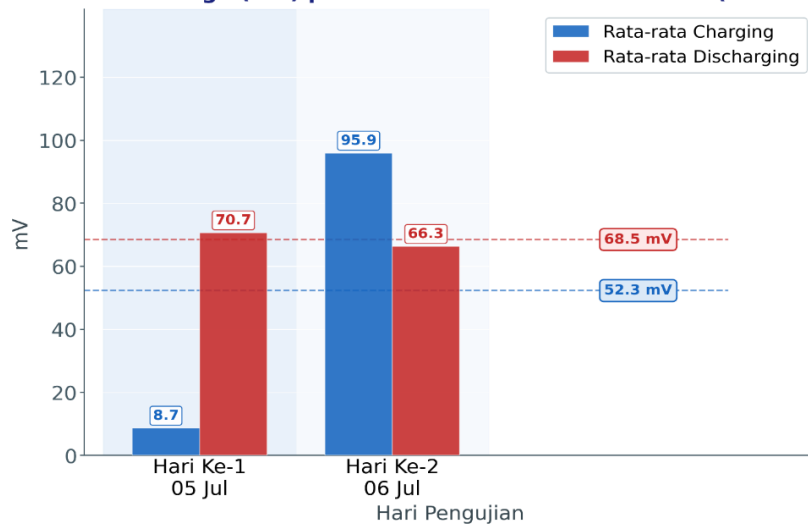
Rekapitulasi hasil pengujian selama dua hari menggunakan SCC PowMr MPPT 20A ditampilkan pada Gambar 5.61 – Gambar 5.66 dan Tabel 5-11 berikut.

Rata-rata Suhu (°C) per Hari - SCC PowMr MPPT 20A (Hari Ke-1 s.d. Ke-2)



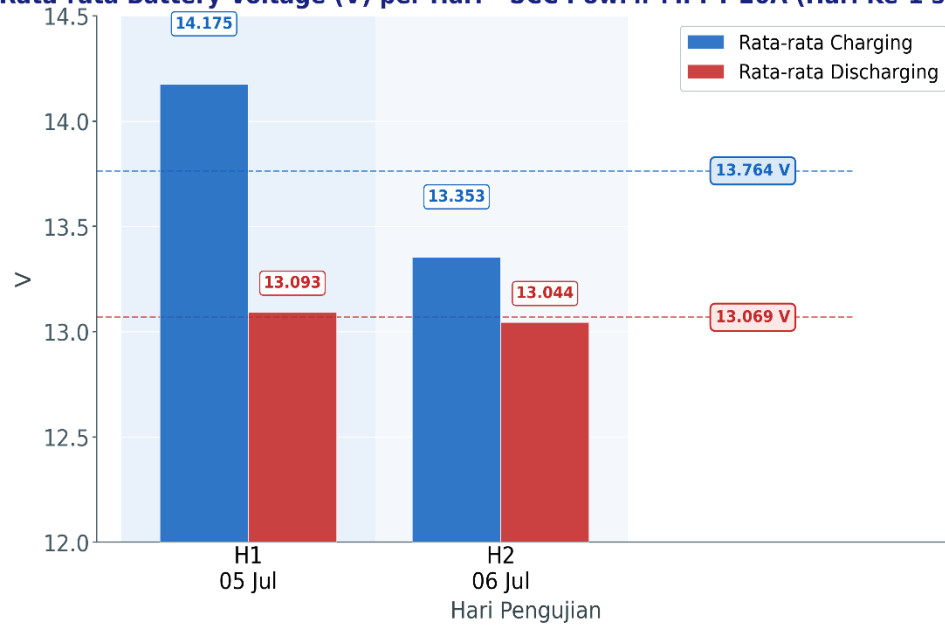
Gambar 5.12 Rata-rata Suhu SCC MPPT Hari Ke-1 s.d Hari Ke-2

Rata-rata Shunt Voltage (mV) per Hari - SCC PowMr MPPT 20A (Hari Ke-1 s.d. Ke-2)



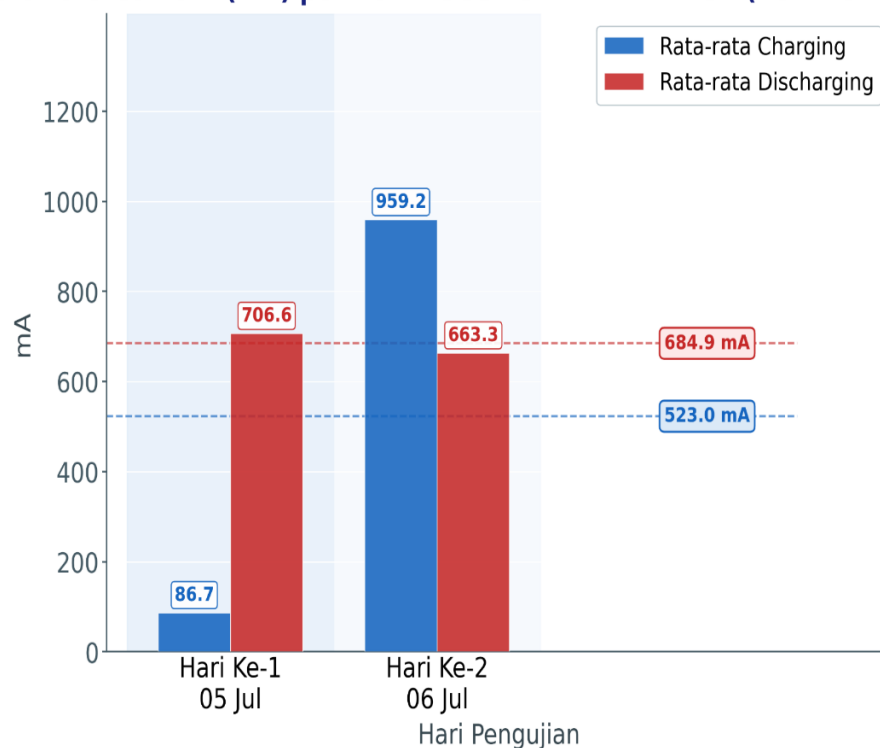
Gambar 5.13 Rata-rata Shunt Voltage SCC MPPT Hari Ke-1 s.d Hari Ke-2

Rata-rata Battery Voltage (V) per Hari - SCC PowMr MPPT 20A (Hari Ke-1 s.d. Ke-2)



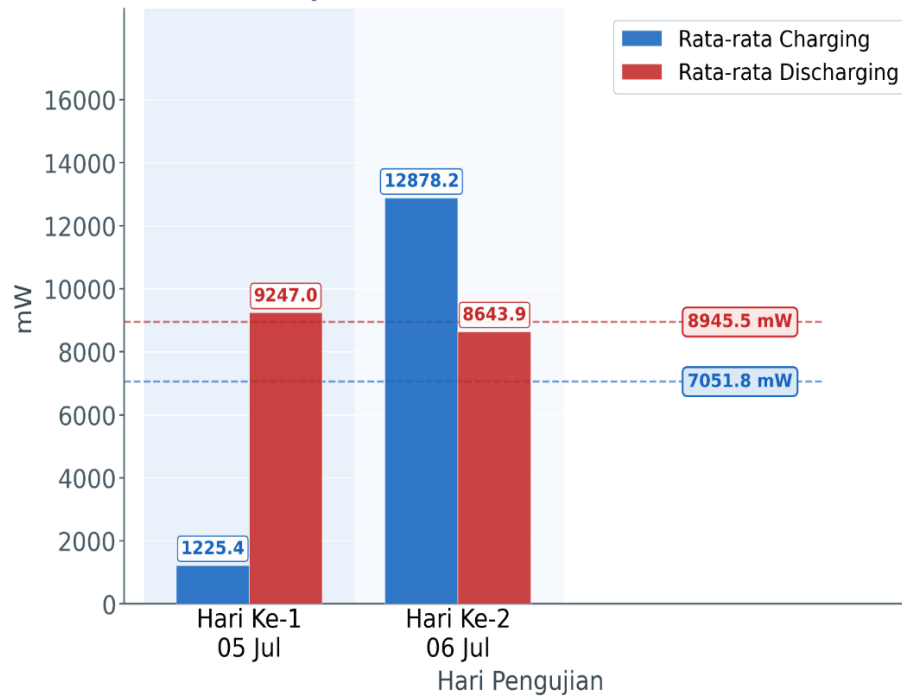
Gambar 5.14 Rata-rata *Battery Voltage* SCC MPPT Hari Ke-1 s.d Hari Ke-2

Rata-rata Current (mA) per Hari - SCC PowMr MPPT 20A (Hari Ke-1 s.d. Ke-2)



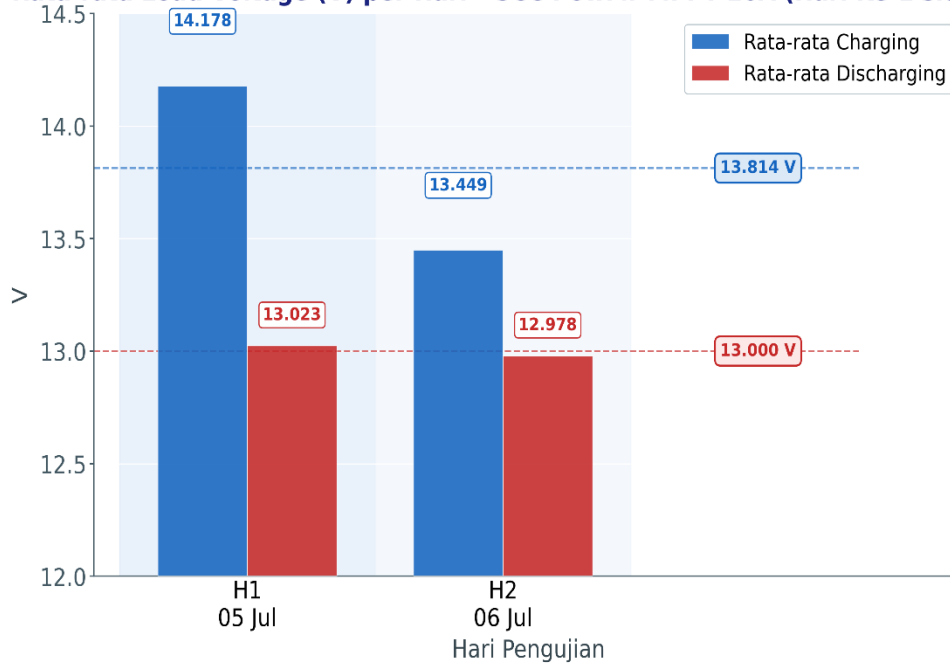
Gambar 5. 15 Rata-rata *Current* SCC MPPT Hari Ke-1 s.d Hari Ke-2

Rata-rata Power (mW) per Hari - SCC PowMr MPPT 20A (Hari Ke-1 s.d. Ke-2)



Gambar 5.16 Rata-rata *Power* SCC MPPT Hari Ke-1 s.d Hari Ke-2

Rata-rata Load Voltage (V) per Hari - SCC PowMr MPPT 20A (Hari Ke-1 s.d. Ke-2)



Gambar 5.17 Rata-rata *Load Voltage* SCC MPPT Hari Ke-1 s.d Hari Ke-2

Tabel 5-3 Rekapitulasi Data

Hari	Tanggal	Charg (titik)	Charg (jam)	Discharge (titik)	Ddischarge (jam)	Suhu Maks (°C)	Shunt V Maks (mV)	Battery V Maks (V)	Arus Maks (mA)	Daya Maks (mW)	Load V Maks (V)
H1	05–06 Jul 2026	118	10,04	156	13,65	35,44	22,57	14,390	225,70	3.139,41	14,410
H2	06–07 Jul 2026	114	9,61	185	15,90	36,38	216,55	13,560	2.165,50	29.208,26	13,730
Rata- rata	—	—	—	—	—	35,91	119,56	13,975	1.195,60	16.173,84	14,070

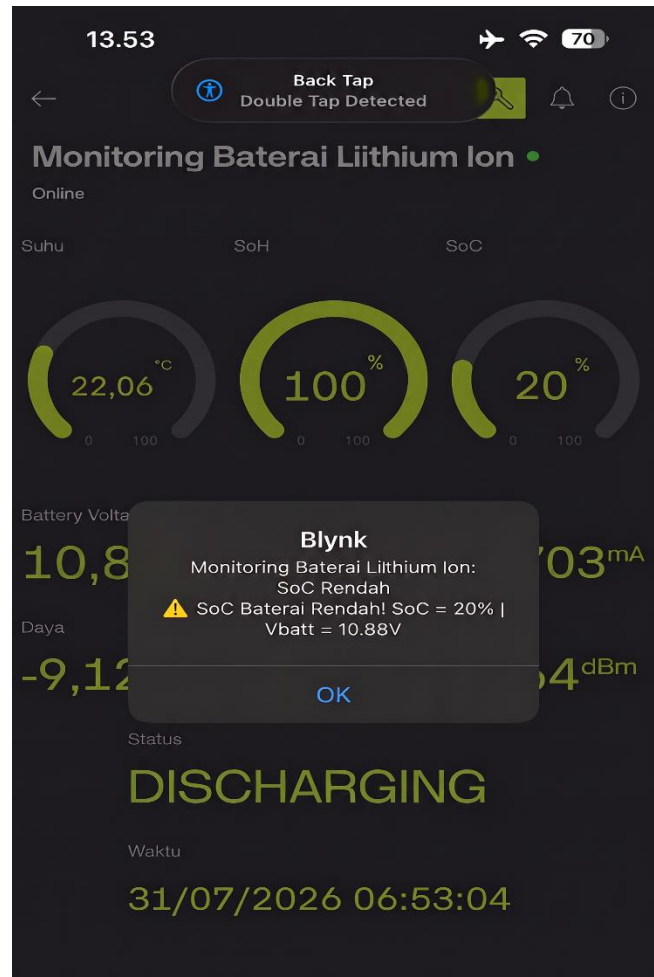
Secara keseluruhan, hasil rekapitulasi dua hari pengujian dengan SCC PowMr MPPT 20A membuktikan keunggulan yang sangat signifikan. kemampuan SCC MPPT dalam mencapai tegangan full charge LiFePO4 (14,41 V pada MPPT tidak adanya BMS cut-off), serta SoC akhir yang jauh lebih tinggi rata-rata 61,82%. Meskipun pengujian MPPT hanya dilakukan selama dua hari, hasilnya sudah cukup representatif untuk menyimpulkan bahwa SCC PowMr MPPT 20A dengan mode pengisian LiFePO4 adalah pilihan yang jauh lebih tepat dan efisien untuk sistem PLTS yang menggunakan baterai LiFePO4 dibandingkan SCC berbasis PWM.

5.2.4 Hasil Pengujian Notifikasi Kapasitas Baterai

Pengujian notifikasi kapasitas baterai dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam memberikan peringatan kepada pengguna melalui aplikasi Blynk berdasarkan nilai kapasitas baterai (State of Charge). Notifikasi dirancang agar pengguna dapat mengetahui kondisi baterai secara real-time sehingga tindakan yang diperlukan, seperti melakukan pengisian ulang atau menghentikan proses pengosongan baterai, dapat dilakukan tepat waktu.

Pada pengujian ini, sistem dikonfigurasi untuk mengirimkan notifikasi ketika nilai SoC mencapai batas yang telah ditentukan. Sebagai contoh, sistem

mengirimkan notifikasi "*SoC Baterai Rendah*" saat kapasitas baterai berada di bawah 20%.



Gambar 5.18 Hasil Pengujian Notifikasi Kapasitas Baterai pada Aplikasi *Blynk*

Tabel 5-4 Hasil Pengujian Notifikasi Kapasitas Baterai pada Aplikasi *Blynk*

Parameter	Hasil
Battery Voltage	10,88 V
SoC	20%
SoH	100%

Berdasarkan hasil pengujian yang ditampilkan pada Gambar di atas, sistem berhasil mendeteksi kondisi SoC baterai yang mencapai 20% dengan Battery Voltage terukur sebesar 10,88 V pada pukul 06:53:04 WIB tanggal 31 Juli 2026. Ketika nilai SoC menyentuh batas threshold $\leq 20\%$, sistem secara otomatis

mengirimkan notifikasi push ke aplikasi Blynk IoT dengan pesan " SoC Baterai Rendah" yang muncul sebagai pop-up peringatan di layar smartphone pengguna.

Nilai Battery Voltage sebesar 10,88 V sesuai dengan perhitungan teoritis SoC 20% menggunakan rumus interpolasi linear:

$$\text{Battery Voltage} = \text{SoC} \times 4,4 : 100\%$$

$$\text{Battery Voltage} = \frac{20 \times 4,4}{100\%} + 10$$

$$\text{Battery Voltage} = \frac{88}{100} + 10$$

$$\text{Battery Voltage} = 0,88 + 10$$

$$\text{Battery Voltage} = 10,88 \text{ V}$$

Status baterai pada saat notifikasi terkirim menunjukkan DISCHARGING yang berarti baterai sedang dalam proses pengosongan untuk mensuplai beban. Nilai SoH sebesar 100% menunjukkan bahwa kondisi kesehatan baterai masih dalam keadaan sangat baik meskipun kapasitas sisa baterai sudah mencapai batas kritis. Hasil pengujian ini membuktikan bahwa fitur notifikasi SoC pada sistem monitoring baterai LiFePO4 berbasis Blynk IoT berfungsi dengan baik dan dapat memberikan peringatan dini kepada pengguna secara real-time.

5.2.5 Rekapitulasi Data IoT

Pengujian sistem *monitoring* baterai LiFePO4 berbasis IoT menggunakan komunikasi LoRa dilakukan selama 2 hari pengujian yang terbagi menjadi dua sesi, yaitu dua hari pengujian menggunakan SCC PowMr MPPT 20A (05 – 07 Juli 2026). Sistem dirancang untuk mengirimkan data *monitoring* secara otomatis setiap interval 5 menit dari unit *transmitter* ke unit *receiver* melalui protokol komunikasi LoRa SX1278 Ra-02 pada frekuensi 433 MHz, kemudian disimpan ke *Google Spreadsheet* melalui koneksi Wi-Fi. Rekapitulasi data IoT pada Tabel 5-12 menunjukkan perbandingan antara jumlah data ideal yang seharusnya diterima berdasarkan interval pengiriman 5 menit dengan jumlah data aktual yang berhasil tersimpan di *Google Spreadsheet* selama masing-masing hari pengujian

Tabel 5-5 Rekapitulasi Data IoT

Hari	Tanggal	Timestamp Awal	Timestamp Akhir	Durasi	Jumlah Data Ideal	Jumlah Data Aktual	Jumlah Data Gagal	Persentase Sukses (%)	Persentase Gagal (%)
H1	05–06 Jul 2026	2026-07-05 07:23:20	2026-07-06 07:09:18	23 jam 45 menit	286	274	12	95,80%	4,20%
H2	06–07 Jul 2026	2026-07-06 07:15:53	2026-07-07 08:51:31	25 jam 35 menit	308	299	9	97,08%	2,92%
Total	9 Hari	—	—	—	2529	2431	98	96,09%	3,91%

Keterangan:

- Data Ideal = jumlah data yang seharusnya masuk berdasarkan interval pengiriman 5 menit
- Data Aktual = jumlah data yang benar-benar diterima dan tersimpan di *Google Spreadsheet*
- Data Gagal = Data Ideal – Data Aktual (data yang tidak berhasil diterima/transmisi gagal)
- Persentase Sukses = $(\text{Data Aktual} / \text{Data Ideal}) \times 100\%$
- Persentase Gagal = $100\% - \text{Persentase Sukses}$

5.2.6 Pengujian Jangkauan LoRa SX1278 Ra-02

Pengujian jangkauan komunikasi LoRa SX1278 Ra-02 dilakukan untuk mengetahui kemampuan komunikasi nirkabel antara unit *transmitter* dan unit *receiver* pada berbagai arah dan jarak. Pengujian dilakukan dengan menempatkan unit *transmitter* di titik tetap sesuai dengan lokasi pengujian pada masing-masing arah mata angin, kemudian unit *receiver* dibawa ke berbagai posisi dengan jarak yang bervariasi sambil memantau nilai *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) yang ditampilkan pada LCD I2C 16x2 unit *receiver* untuk menentukan jarak maksimal yang masih dapat dijangkau pada setiap arah mata angin. RSSI merupakan nilai yang menunjukkan seberapa kuat sinyal yang diterima oleh modul LoRa *receiver* dari modul LoRa *transmitter*. Nilai RSSI selalu bernilai negatif dan dinyatakan dalam satuan dBm, di mana semakin besar nilai RSSI atau semakin mendekati nol maka semakin kuat sinyal yang diterima, sebaliknya semakin kecil nilai RSSI atau semakin jauh dari nol ke arah negatif maka semakin lemah sinyal yang diterima oleh unit *receiver*.

1. Arah Utara

Pengujian jangkauan komunikasi LoRa SX1278 Ra-02 arah utara dilakukan pada Jalan Baru Undip Jangli dengan titik koordinat *transmitter* (-7.0464500, 110.4379234) dan titik koordinat *receiver* (-7.0418658, 110.4380686).



Gambar 5.19 Pengujian Jangkauan Komunikasi LoRa SX1278 Ra-02 Arah Utara



Gambar 5.20 Pengujian LoRa SX1278 Ra-02 Arah Utara di Jalan Baru Undip Jangli

Tabel 5-6 Data Hasil Pengujian Jangkauan Komunikasi LoRa SX1278 Ra-02 Arah Utara

No	Arah	Jarak	RSSI	Keterangan
1	Utara	512,86 M	-102 dBm	Berhasil

Pengujian jangkauan komunikasi LoRa SX1278 Ra-02 pada arah Utara dilakukan di Jalan Baru Undip Jangli dengan titik koordinat *transmitter* (-7.0464500 , 110.4379234) dan titik koordinat *receiver* (-7.0418658 , 110.4380686). Hasil pengujian menunjukkan bahwa jarak maksimal komunikasi LoRa berhasil dilakukan pada jarak 512,86 meter ke arah Utara dengan nilai RSSI sebesar -102 dBm. Nilai RSSI -102 dBm menunjukkan bahwa sinyal LoRa masih dapat diterima oleh unit *receiver* meskipun berada pada kondisi sinyal

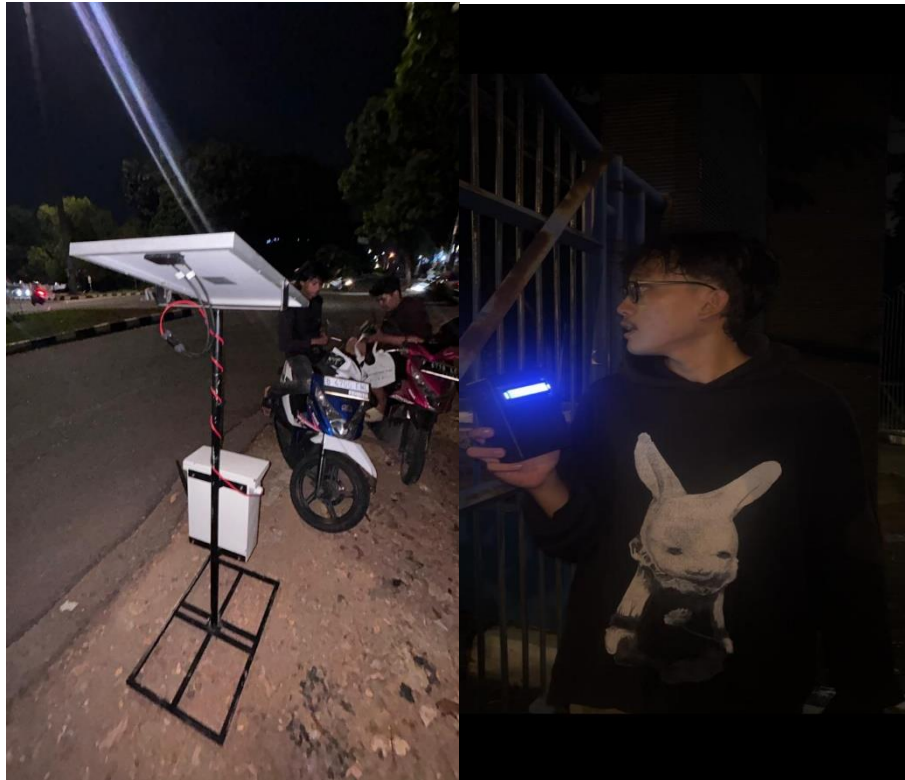
yang lemah, namun komunikasi data tetap berhasil dilakukan tanpa terjadi kegagalan pengiriman.

2. Arah Timur

Pengujian jangkauan komunikasi LoRa SX1278 Ra-02 arah timur dilakukan pada Jl. Prof. Soedarto dengan titik koordinat *transmitter* (-7.0550417, 110.4429817) dan titik koordinat *receiver* (-7.0540425, 110.4452217).



Gambar 5.21 Pengujian Jangkauan Komunikasi LoRa SX1278 Ra-02 Arah Timur



Gambar 5. 22 Pengujian LoRa SX1278 Ra-02 Arah Timur di Jl. Prof. Soedarto

Tabel 5-7 Data Hasil Pengujian Jangkauan Komunikasi LoRa SX1278 Ra-02

Arah Timur

No	Arah	Jarak	RSSI	Keterangan
1	Timur	252,92M	-99 dBm	Berhasil

Pengujian jangkauan komunikasi LoRa SX1278 Ra-02 pada arah Timur dilakukan di Jalan Prof. Soedarto dengan titik koordinat *transmitter* ($-7.0550417, 110.4429817$) dan titik koordinat *receiver* ($-7.0540425, 110.4452217$). Hasil pengujian menunjukkan bahwa jarak maksimal komunikasi LoRa berhasil dilakukan pada jarak 252,92 meter ke arah Timur dengan nilai RSSI sebesar -99 dBm.

3. Arah Barat

Pengujian jangkauan komunikasi LoRa SX1278 Ra-02 arah barat dilakukan pada Jl. Prof. Soedarto dengan titik koordinat *transmitter* ($-7.0550281, 110.4429596$) dan titik koordinat *receiver* ($-7.0562728, 110.4400806$).



Gambar 5.23 Pengujian Jangkauan Komunikasi LoRa SX1278 Ra-02 Arah Barat



Gambar 5.24 Pengujian LoRa SX1278 Ra-02 Arah Barat di Jl. Prof. Soedarto

Tabel 5-8 Data Hasil Pengujian Jangkauan Komunikasi LoRa SX1278 Ra-02

Arah Barat

No	Arah	Jarak	RSSI	Keterangan
1	Barat	351,67 M	-102 dBm	Berhasil

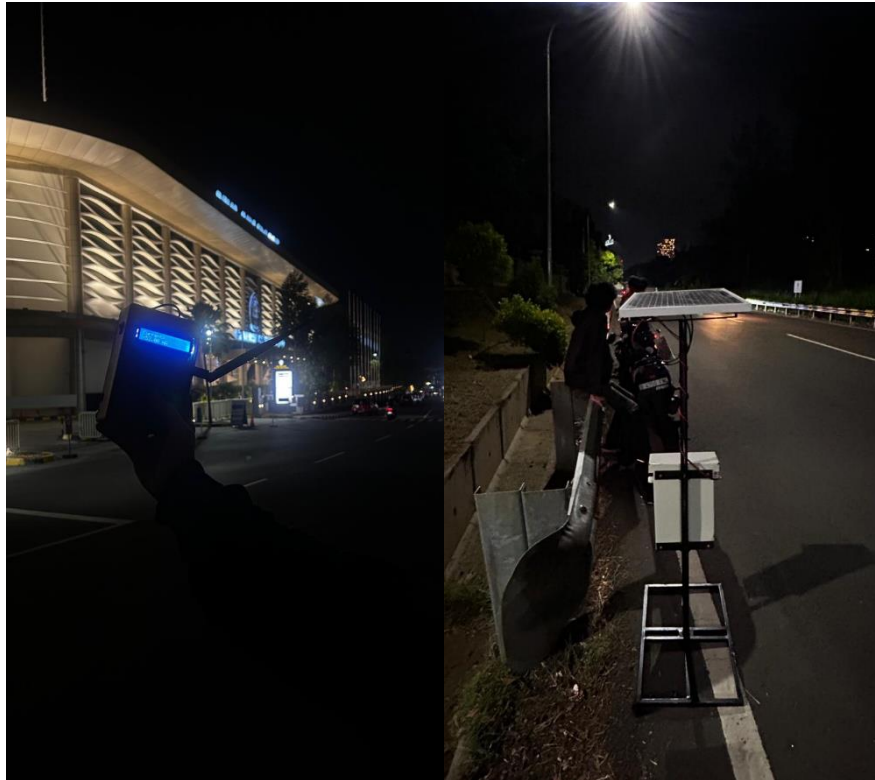
Pengujian jangkauan komunikasi LoRa SX1278 Ra-02 pada arah Barat dilakukan di Jalan Prof. Soedarto dengan titik koordinat *transmitter* (-7.0550281 , 110.4429596) dan titik koordinat *receiver* (-7.0562728 , 110.4400806). Hasil pengujian menunjukkan bahwa komunikasi LoRa berhasil dilakukan pada jarak 351,67meter ke arah Barat sebagai jarak maksimal dengan nilai RSSI sebesar -102 dBm. Nilai RSSI -102 dBm menunjukkan bahwa sinyal LoRa masih dapat diterima oleh unit *receiver* meskipun berada pada kondisi sinyal yang lemah, namun komunikasi data tetap berhasil dilakukan tanpa terjadi kegagalan pengiriman.

4. Arah Selatan

Pengujian jangkauan komunikasi LoRa SX1278 Ra-02 arah selatan dilakukan pada Jl. Banyu Putih Raya dengan titik koordinat *transmitter* (-7.0486128 , 110.4345961) dan titik koordinat *receiver* (-7.0527275 , 110.4325043)



Gambar 5.25 Pengujian Jangkauan Komunikasi LoRa SX1278 Ra-02 Arah Selatan



Gambar 5.26 Pengujian LoRa SX1278 Ra-02 Arah Selatan Jl. Banyu Putih Raya

Tabel 5-9 Data Hasil Pengujian Jangkauan Komunikasi LoRa SX1278 Ra-02
Arah Selatan

No	Arah	Jarak	RSSI	Keterangan
1	Selatan	496,62 M	-101 dBm	Berhasil

Pengujian jangkauan komunikasi LoRa SX1278 Ra-02 pada arah selatan dilakukan di Jalan Banyu Putih Raya dengan titik koordinat *transmitter* (-7.0486128, 110.4345961) dan titik koordinat *receiver* (-7.0527275, 110.4325043). Hasil pengujian menunjukkan bahwa komunikasi LoRa berhasil dilakukan pada jarak 496,62meter ke arah selatan sebagai jarak maksimal dengan nilai RSSI sebesar -101 dBm. Nilai RSSI -101 dBm menunjukkan bahwa sinyal LoRa masih dapat diterima oleh unit *receiver* meskipun berada pada kondisi sinyal yang lemah, namun komunikasi data tetap berhasil dilakukan tanpa terjadi kegagalan pengiriman.

5.2.7 Tabel Rekapitulasi Hasil Pengujian Jangkauan LoRa

Berdasarkan hasil pengujian jangkauan komunikasi LoRa SX1278 Ra-02 yang telah dilakukan pada empat arah mata angin yaitu Utara, Timur, Selatan, dan Barat, diperoleh data jarak maksimal dan nilai RSSI yang berbeda-beda pada setiap arah. Perbedaan jarak maksimal dan nilai RSSI pada setiap arah dipengaruhi oleh kondisi lingkungan sekitar seperti keberadaan bangunan, pepohonan, dan penghalang lainnya yang dapat menyebabkan pelemahan sinyal LoRa. Rekapitulasi hasil pengujian jangkauan komunikasi LoRa SX1278 Ra-02 pada setiap arah mata angin dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 5-10 Tabel Rekapitulasi Hasil Pengujian Jangkauan LoRa

No	Arah	Jarak Maksimal	RSSI	Keterangan
1	Utara	512,86 M	-102 dBm	Berhasil
2	Timur	252,92M	-99 dBm	Berhasil
3	Barat	351,67 M	-102 dBm	Berhasil
4	Selatan	496,62 M	-101 dBm	Berhasil

5.3 Analisis Perbandingan Antar Arah

Berdasarkan hasil pengujian jangkauan komunikasi LoRa SX1278 Ra-02 pada empat arah mata angin, diperoleh jangkauan maksimum yang bervariasi antar arah. Jangkauan terpanjang diperoleh pada arah Utara sejauh 512,86 m dengan RSSI -102 dBm, diikuti arah Selatan sejauh 496,62 m dengan RSSI -101 dBm, arah Barat sejauh 351,67 m dengan RSSI -102 dBm, dan jangkauan terpendek diperoleh pada arah Timur sejauh 252,92 m dengan RSSI -99 dBm.

Perbedaan jangkauan yang signifikan antar arah disebabkan oleh beberapa faktor. Pertama, kondisi topografi dan penghalang fisik (obstacle) di sekitar titik pengujian arah Timur yang menghasilkan jangkauan terpendek kemungkinan dipengaruhi oleh keberadaan gedung, pepohonan, atau struktur fisik lain yang menghalangi propagasi sinyal radio. Kedua, pola radiasi antena modul LoRa SX1278 Ra-02 yang tidak sepenuhnya omnidireksional dapat menyebabkan

variasi kekuatan sinyal pada arah yang berbeda. Ketiga, material dan kepadatan penghalang di setiap arah berbeda-beda, sehingga redaman sinyal yang terjadi pun berbeda.

Dari sisi nilai RSSI, arah Timur justru memiliki RSSI tertinggi (-99 dBm / sinyal paling kuat) meskipun jangkauannya paling pendek. Hal ini mengindikasikan bahwa komunikasi terputus lebih awal bukan karena kelemahan sinyal, melainkan karena penghalang fisik yang memblokir jalur propagasi secara total sebelum sinyal melemah secara gradual. Sebaliknya, arah Utara dan Selatan memiliki RSSI lebih rendah (-102 dan -101 dBm) namun jangkauan lebih jauh, menandakan propagasi sinyal yang lebih bebas hambatan sehingga sinyal dapat merambat lebih jauh meskipun dengan kekuatan yang lebih kecil. Rata-rata jangkauan dari keempat arah adalah $403,52$ m dengan rata-rata RSSI -101 dBm.