

BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini membahas hasil pengujian sistem dan menyajikan hasilnya. Bagian hasil akan memaparkan data yang diperoleh dari serangkaian pengujian, termasuk uji akurasi, uji pengosongan (*discharging*), dan uji pengisian (*charging*). Selanjutnya, bagian pembahasan akan menganalisis dan menginterpretasikan data tersebut, mengaitkannya dengan tujuan penelitian dan tinjauan pustaka, serta membahas implikasi dan keterbatasan dari penelitian ini.

5.1. Hasil

Tahapan hasil mencakup implementasi prototipe pada *e-cargo bike*, pengujian fungsional modul, dan evaluasi kuantitatif terhadap performa sistem dalam mengukur berbagai parameter kelistrikan.

5.1.1. Implementasi dan Pengujian Fungsional

Modul energy meter yang dirancang berhasil diimplementasikan menjadi sebuah prototipe fungsional. Prototipe awal dirakit tanpa casing untuk validasi dan debugging, kemudian dilengkapi dengan casing yang diproduksi menggunakan teknologi cetak 3D untuk proteksi dan estetika. Modul ini kemudian berhasil dipasang dan diintegrasikan ke dalam sistem kelistrikan *e-cargo bike*. Pada Gambar 5.1 pengujian fungsional menunjukkan bahwa modul mampu menampilkan seluruh parameter energi yang dirancang—tegangan (V), arus (A), konsumsi energi (Wh), kapasitas terpakai (Ah), dan waktu operasi (h)—secara real-time pada layar *OLED*.



Gambar 5.1. Foto Modul Menampilkan Parameter Energi

5.1.2. Hasil Pengujian Akurasi Sistem

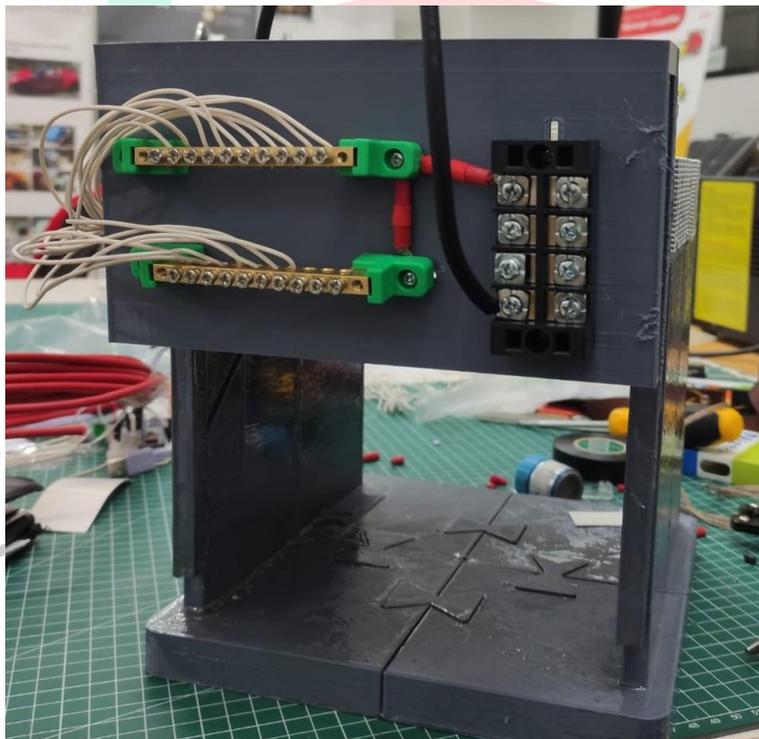
Evaluasi akurasi dilakukan dengan membandingkan data yang terukur oleh modul *energy meter* dengan data dari alat ukur rujukan (multimeter dan aplikasi BMS). Pengujian akurasi dilakukan untuk parameter arus (A), tegangan (V), daya (W), kapasitas baterai (Ah), dan konsumsi energi (Wh). *Error* relatif dihitung menggunakan rumus:

$$Error (\%) = \frac{Nilai Rujukan - Nilai Terukur}{Nilai Rujukan} \times 100\%$$

Gambar 5.2 dan 5.3 berikut menampilkan *dummy load* yang dipakai selama pengujian akurasi ini.



Gambar 5.2. Foto *Dummy Load* yang Digunakan pada Saat Pengujian (1)



Gambar 5.3. Foto *Dummy Load* yang Digunakan pada Saat Pengujian (2)

1. Arus (A)

Hasil pengujian akurasi arus menunjukkan nilai *error* relatif berkisar antara 0.69% hingga 12.92%, dengan nilai *error* rata-rata sebesar 5.83%. Sebagian

besar (80%) data pengukuran menunjukkan error di bawah 8%. Gambar 5.4 berikut menampilkan pengujiannya dan data selengkapnya disajikan pada Tabel 5.1.



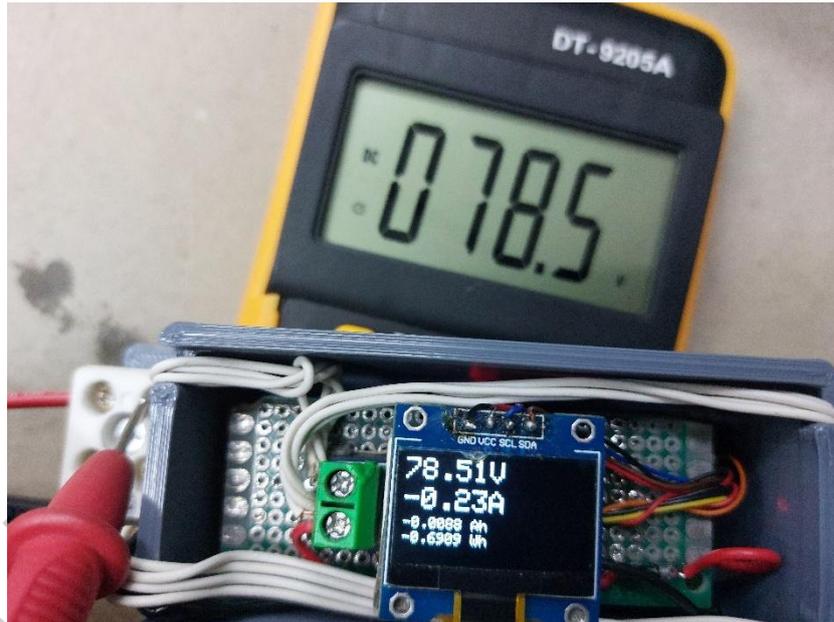
Gambar 5.4. Foto Pengujian Akurasi Arus

Tabel 5.1. Hasil Pengujian Error Arus Energy Meter; rerata error: 5.83%

Hasil Pengujian Error Arus Energy Meter					
No.	Waktu Pengujian	Arus Terukur (A)	Arus Rujukan (A)	Error (%)	
1	04/11/2024 13.41.00	1.43	1.44	0.69%	
2	04/11/2024 13.41.00	1.90	1.92	1.04%	
3	04/11/2024 13.42.00	2.96	2.85	3.86%	
4	04/11/2024 13.43.00	3.10	3.56	12.92%	
5	04/11/2024 13.44.00	4.16	4.40	5.45%	
6	04/11/2024 13.45.00	5.63	6.08	7.40%	
7	04/11/2024 13.47.00	6.89	7.17	3.91%	
8	04/11/2024 13.47.00	7.02	7.67	8.47%	
9	04/11/2024 13.48.00	7.96	8.55	6.90%	
10	04/11/2024 13.49.00	9.35	10.12	7.61%	

2. Tegangan (V)

Pengukuran tegangan menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi dengan error rata-rata 0.41%. Mayoritas pengukuran memiliki *error* mendekati 0%, dengan *error* maksimal tercatat sebesar 0.83%. Gambar 5.5 berikut menampilkan pengujiannya dan Data selengkapnya disajikan pada Tabel 5.2.



Gambar 5.5. Foto Pengujian Akurasi Tegangan

Tabel 5.2. Hasil Pengujian Error Tegangan Energy Meter; rerata error: 0.41%

Hasil Pengujian Error Tegangan Energy Meter					
No.	Waktu Pengujian		Tegangan Terukur (V)	Tegangan Rujukan (V)	Error (%)
1	04/11/2024	14.14.00	78.51	78.50	0.01%
2	04/11/2024	14.18.00	76.93	77.00	0.09%
3	04/11/2024	14.21.00	78.27	78.40	0.17%
4	04/11/2024	14.25.00	78.20	78.40	0.26%
5	04/11/2024	14.37.00	78.51	78.50	0.01%
6	04/11/2024	14.59.10	76.38	76.90	0.68%
7	04/11/2024	14.59.14	76.30	76.90	0.78%
8	04/11/2024	14.59.20	76.38	76.90	0.68%
9	04/11/2024	14.59.24	76.38	76.80	0.55%
10	04/11/2024	14.59.27	76.06	76.70	0.83%

3. Daya (Watt)

Akurasi perhitungan daya, yang merupakan hasil perkalian tegangan dan arus, menunjukkan error antara 0.76% hingga 13.03%, dengan rata-rata error 5.94%. Variasi *error* pada daya sejalan dengan variasi yang terjadi pada pengukuran arus. Data selengkapnya disajikan pada Tabel 5.3.

Tabel 5.3. Hasil Pengujian Error Watt Energy Meter; rerata error: 5.94%

Hasil Pengujian Error Watt Energy Meter							
Waktu Pengujian	Tegangan Terukur (V)	Arus Terukur (A)	Daya Terukur (Watt)	Tegangan Rujukan (V)	Arus Rujukan (A)	Daya Rujukan (Watt)	Error (%)
04/11/2024 13.41.00	79.20	1.43	113.26	79.25	1.44	114.12	0.76%
04/11/2024 13.41.00	79.15	1.90	150.39	79.20	1.92	152.06	1.10%
04/11/2024 13.42.00	79.08	2.96	234.08	79.15	2.85	225.58	3.77%
04/11/2024 13.43.00	78.95	3.10	244.75	79.05	3.56	281.42	13.03%
04/11/2024 13.44.00	78.85	4.16	328.02	78.95	4.40	347.38	5.57%
04/11/2024 13.45.00	78.70	5.63	443.08	78.82	6.08	479.23	7.54%
04/11/2024 13.47.00	78.45	6.89	540.52	78.58	7.17	563.42	4.06%
04/11/2024 13.47.00	78.30	7.02	549.67	78.45	7.67	601.71	8.65%
04/11/2024 13.48.00	78.10	7.96	621.68	78.25	8.55	669.04	7.08%
04/11/2024 13.49.00	77.85	9.35	727.90	78.00	10.12	789.36	7.79%

4. Kapasitas Baterai (Ah)

Perhitungan kapasitas baterai (Ah) yang menggunakan metode integrasi numerik menunjukkan hasil cukup baik dengan rata-rata error 2.95%. Nilai error pada pengujian ini berkisar antara 2.51% hingga 3.28%. Data lengkap tersedia dalam Tabel 5.4.

Tabel 5.4. Hasil Pengujian Error Ah Energy Meter; rerata error: 2.95%

Hasil Pengujian Error Ah Energy Meter					
Durasi Pengujian	Arus Terukur (A)	Ah Terukur	Arus Rujukan (A)	Ah Rujukan	Error (%)
Detik ke-0 s.d. 3.6	2.38	0.00238	2.45	0.00245	2.86%
Detik ke-3.6 s.d. 7.2	2.46	0.00484	2.52	0.00497	2.62%
Detik ke-7.2 s.d. 10.8	2.55	0.00739	2.61	0.00758	2.51%
Detik ke-10.8 s.d. 14.4	2.62	0.01001	2.73	0.01031	2.91%
Detik ke-14.4 s.d. 18.0	2.68	0.01269	2.78	0.01309	3.06%
Detik ke-18.0 s.d. 21.6	2.83	0.01552	2.91	0.01600	3.00%
Detik ke-21.6 s.d. 25.2	2.86	0.01838	2.95	0.01895	3.01%
Detik ke-25.2 s.d. 28.8	2.88	0.02126	2.99	0.02194	3.10%
Detik ke-28.8 s.d. 32.4	2.91	0.02417	3.03	0.02497	3.20%
Detik ke-32.4 s.d. 36.0	2.93	0.02710	3.05	0.02802	3.28%

5. Konsumsi Energi (Wh)

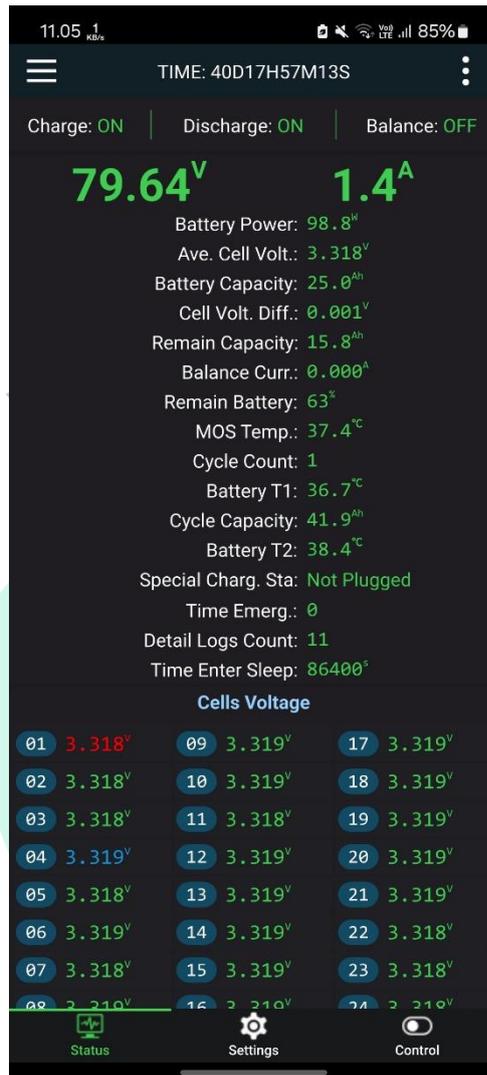
Pengujian terakhir pada akurasi sistem adalah evaluasi perhitungan konsumsi energi yang digunakan (Wh). Berdasarkan data pada Tabel 5.5, hasil pengujian menunjukkan *error* relatif dengan rentang antara 1.68% hingga 3.87%. Nilai *error* rata-rata yang didapatkan untuk pengukuran Wh adalah 3.05%. Hasil ini kembali mengonfirmasi bahwa metode integrasi numerik yang diimplementasikan pada modul mampu menghitung total konsumsi energi secara cukup akurat dan konsisten selama periode pengujian.

Tabel 5.5. Hasil Pengujian Error Wh Energy Meter; rerata error: 3.05%

Hasil Pengujian Error Wh Energy Meter					
Durasi Pengujian	Daya Terukur (Watt)	Wh Terukur	Daya Rujukan (Watt)	Wh Rujukan	Error (%)
Detik ke-0 s.d. 3.6	108.15	0.10815	110.00	0.11000	1.68%
Detik ke-3.6 s.d. 7.2	122.80	0.23095	126.00	0.23600	2.14%
Detik ke-7.2 s.d. 10.8	134.50	0.36545	139.50	0.37550	2.68%
Detik ke-10.8 s.d. 14.4	149.00	0.51445	155.00	0.53050	3.03%
Detik ke-14.4 s.d. 18.0	162.75	0.67720	169.20	0.69970	3.22%
Detik ke-18.0 s.d. 21.6	178.00	0.85520	184.00	0.88370	3.23%
Detik ke-21.6 s.d. 25.2	191.50	1.04670	199.50	1.08320	3.37%
Detik ke-25.2 s.d. 28.8	205.00	1.25170	214.80	1.29800	3.57%
Detik ke-28.8 s.d. 32.4	218.80	1.47050	229.00	1.52700	3.70%
Detik ke-32.4 s.d. 36.0	231.90	1.70240	244.00	1.77100	3.87%

5.1.3. Hasil Pengujian *Discharging* dan *Charging*

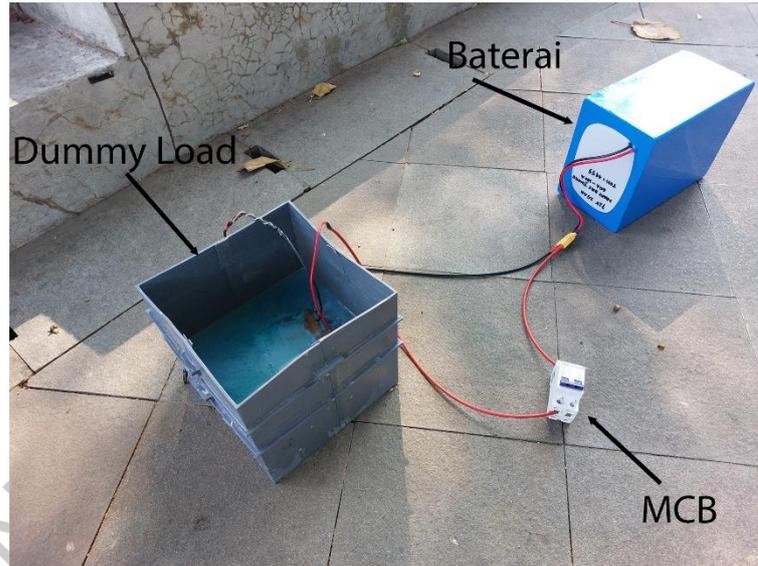
Pengujian pada skenario operasional dilakukan untuk mengetahui perilaku baterai saat proses *discharging* dan *charging*. Pemantauan pada kedua pengujian ini tidak menggunakan modul *energy meter* yang dikembangkan, melainkan menggunakan aplikasi *JK BMS* yang terhubung ke sistem baterai melalui koneksi *Bluetooth* pada ponsel. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan data tegangan dan arus pada baterai. Gambar 5.6. memperlihatkan aplikasi *JK BMS*.



Gambar 5.6. Aplikasi JK BMS untuk Monitoring Data dari Baterai

1. Pengujian Discharging

Proses *discharging* disimulasikan dengan memberikan beban pada baterai menggunakan *dummy load*, Gambar 5.7. memperlihatkan *dummy load* yang digunakan pada saat *discharging*.



Gambar 5.7. Foto *Discharging* Baterai menggunakan *Dummy Load*

Data pemantauan dari aplikasi *JK BMS* menunjukkan penurunan tegangan baterai secara bertahap dari 78.45 V pada awal pengujian (pukul 08.35 WIB) hingga mencapai 77.28 V pada akhir pengujian (pukul 16.30 WIB). Penurunan ini merefleksikan pengurasan kapasitas baterai akibat beban yang diberikan secara kontinu. Data lebih lengkap ditampilkan pada Tabel 5.6.

Tabel 5.6. *Discharging Baterai menggunakan Dummy Load*

No.	Waktu	V bat (V)	I (A)
1	07/10/2024 08.35	78.45	0.8
2	07/10/2024 08.58	78.45	0.8
3	07/10/2024 09.09	78.48	0.8
4	07/10/2024 09.15	78.50	0.8
5	07/10/2024 09.27	78.50	0.9
6	07/10/2024 09.35	78.51	0.9
7	07/10/2024 09.49	78.52	0.8
8	07/10/2024 09.55	78.52	0.8
9	07/10/2024 10.05	78.51	0.8
10	07/10/2024 10.15	78.50	0.8
11	07/10/2024 10.30	78.49	0.8
12	07/10/2024 10.45	78.47	0.8
13	07/10/2024 10.56	78.46	0.8
14	07/10/2024 11.00	78.44	0.8
15	07/10/2024 11.15	78.42	0.8
16	07/10/2024 11.20	78.40	0.9
17	07/10/2024 11.32	78.36	0.9
18	07/10/2024 11.51	78.28	0.9
19	07/10/2024 12.00	78.24	0.9
20	07/10/2024 13.05	78.68	0.9
21	07/10/2024 13.20	78.17	0.9
22	07/10/2024 13.30	78.08	0.9
23	07/10/2024 14.00	77.92	0.9
24	07/10/2024 14.31	77.78	0.9
25	07/10/2024 15.00	77.67	0.9
26	07/10/2024 15.33	77.55	0.9
27	07/10/2024 16.00	77.44	0.9
28	07/10/2024 16.30	77.28	0.9

2. Pengujian Charging

Untuk skenario *charging*, pengisian daya baterai menggunakan sumber energi dari lima buah *solar panel* 30 Wp yang dihubungkan secara seri seperti terlihat pada gambar 5.8. Berdasarkan pemantauan menggunakan aplikasi *JK BMS*, tercatat adanya peningkatan tegangan baterai dari 77.04 V hingga 79.70 V. Selain itu, terpantau pula adanya fluktuasi pada arus pengisian yang disebabkan oleh perubahan intensitas cahaya matahari. Data selengkapnya disajikan pada Tabel 5.7.



Gambar 5.8. Foto Charging Baterai menggunakan Solar Panel

Tabel 5.7. Charging Baterai menggunakan Solar Panel (1)

No.	Waktu	V bat (V)	I (A)
1	15/10/2024 10.43	77.04	1.2
2	15/10/2024 10.49	77.33	0.8
3	15/10/2024 10.54	77.60	1.4
4	15/10/2024 11.06	77.85	1.4
5	15/10/2024 11.15	77.92	1.4
6	15/10/2024 11.24	77.95	1.2
7	15/10/2024 11.31	77.83	0.5
8	15/10/2024 11.42	77.92	0.5
9	15/10/2024 11.52	78.05	1.4
10	15/10/2024 12.03	77.94	0.2
11	15/10/2024 12.16	77.93	0.2
12	15/10/2024 12.23	77.93	0.2
13	15/10/2024 12.25	77.94	0.3
14	15/10/2024 12.34	77.96	0.2
15	15/10/2024 12.47	77.98	0.2
16	15/10/2024 12.55	78.13	0.9
17	15/10/2024 13.06	78.14	0.5
18	15/10/2024 13.14	78.11	0.2
19	15/10/2024 13.24	78.18	0.5
20	15/10/2024 13.48	78.28	0.2
21	15/10/2024 13.57	78.32	0.3
22	15/10/2024 14.02	78.32	0.2

Tabel 5.8. *Charging Baterai menggunakan Solar Panel (2)*

No.	Waktu	V bat (V)	I (A)
1	22/10/2024 10.56	79.11	1.5
2	22/10/2024 11.05	79.64	1.4
3	22/10/2024 11.14	79.82	1.4
4	22/10/2024 11.24	79.80	1.4
5	22/10/2024 11.36	79.79	1.1
6	22/10/2024 11.46	79.80	1.5
7	22/10/2024 11.58	79.77	1.4
8	22/10/2024 12.06	79.75	1.4
9	22/10/2024 12.15	79.72	1.1
10	22/10/2024 12.26	79.71	1.2
11	22/10/2024 12.41	79.72	1.4
12	22/10/2024 13.04	79.69	1.1
13	22/10/2024 13.12	79.64	1.2
14	22/10/2024 13.23	79.72	1.2
15	22/10/2024 13.35	79.54	0.2
16	22/10/2024 13.39	79.69	1.4
17	22/10/2024 13.49	79.70	1.0

5.1.4. Hasil Pengujian Black Box

Pengujian *black box* dilakukan untuk memvalidasi fungsionalitas sistem dari sudut pandang pengguna untuk skenario yang dirancang pada Bab 4. Seluruh pengujian fungsional, mulai dari inialisasi perangkat hingga uji coba langsung pada *e-cargo bike*, telah berhasil dilaksanakan. Hasil dari setiap skenario pengujian menunjukkan bahwa perangkat bekerja sesuai dengan rencana. Tabel 5.9 menunjukkan rangkuman hasil pengujian *black box*.

Tabel 5.9. *Tabel Hasil Pengujian Black Box*

No.	Pengujian	Hasil Pengujian
1.	Inialisasi & Tampilan Awal	<ol style="list-style-type: none"> Layar <i>OLED</i> menyala. Logo pembuka ditampilkan. Semua parameter (V, A, Wh, Ah, h) muncul dengan nilai awal 0 atau sesuai kondisi awal.
2.	Akurasi Pengukuran Tegangan	Nilai tegangan yang ditampilkan di <i>OLED</i> memiliki <i>error</i> yang sangat kecil dengan rata-rata (0.41%) ketika dibandingkan dengan multimeter.
3.	Akurasi Pengukuran Arus	Nilai Arus yang ditampilkan di <i>OLED</i> memiliki <i>error</i> rata-rata yang dapat diterima (5.83%) ketika dibandingkan dengan multimeter.
4.	Akurasi Akumulasi Ah dan Wh	Hasil <i>error</i> pada Ah dan Wh yang dilakukan dengan perhitungan manual memiliki nilai yang

		rendah dengan rata-rata (Ah: 2.95% dan Wh: 3.05%).
5.	Uji Fungsional pada <i>e-cargo bike</i>	Modul tetap menyala dan menampilkan semua parameter secara <i>real-time</i> tanpa ada gangguan atau mati mendadak saat kendaraan beroperasi.

5.1.5. Hasil Pengujian White Box

Pengujian *white box* dilaksanakan dengan menganalisis struktur internal dan alur logika pada kode program yang diimplementasikan di *Arduino Nano*. Pengujian ini memverifikasi setiap komponen krusial dalam perangkat lunak, mulai dari fungsi inisialisasi (*setup()*), loop utama (*loop()*), hingga validitas algoritma perhitungan. Berdasarkan analisis kode dan pemantauan melalui Serial Monitor, seluruh komponen perangkat lunak yang diuji dinyatakan valid dan berjalan sesuai dengan rancangan. Hasil rinci dari pengujian *white box* ditunjukkan dalam Tabel 5.10.

Tabel 5.10. Tabel Hasil Pengujian White Box

No.	Komponen Diuji	Deskripsi Pengujian	Hasil yang Diharapkan	Kesimpulan
1.	Fungsi <i>setup()</i>	Memeriksa eksekusi kode pada <i>setup()</i> menggunakan <i>Serial Monitor Arduino IDE</i> .	Semua proses inisialisasi (komunikasi serial, layar <i>OLED</i> , <i>pin I/O</i>) berhasil dijalankan sekali tanpa <i>error</i> saat perangkat pertama kali dinyalakan.	Valid
2.	Fungsi <i>loop()</i> dan Interval Waktu	Memverifikasi bahwa loop utama berjalan secara kontinu dan interval waktu ($\text{delay}(k_dt * dt)$) dieksekusi dengan benar pada setiap akhir siklus.	<i>Loop</i> berjalan tanpa henti dan jeda waktu antar iterasi sesuai dengan nilai yang ditetapkan (100 ms), memastikan <i>sampling rate</i> yang konsisten.	Valid
3.	Konversi Data Sensor dan Kalibrasi	Menganalisis baris kode yang mengonversi <i>rawValVolt_in</i> dan <i>rawValAmp</i> menjadi nilai rekayasa (V dan A) menggunakan faktor kalibrasi (<i>k_V</i> , <i>k_I</i> , dll.).	Perhitungan matematis dalam kode untuk konversi data analog ke digital dan kalibrasi sesuai dengan rumus yang telah dirancang.	Valid
4.	Logika Integrasi Numerik	Memeriksa baris kode yang menghitung <i>dWh</i> dan <i>dAh</i> dan menambahkannya ke variabel total ($Wh = Wh + dWh$ dan $Ah = Ah + dAh$).	Proses penjumlahan kumulatif pada setiap interval waktu berjalan dengan benar, sesuai dengan implementasi metode integrasi numerik untuk mengakumulasi energi dan kapasitas.	Valid

5.	Reset Variabel Perhitungan	Memeriksa apakah variabel V dan I di-reset menjadi nol setelah setiap n sampel, sementara Wh dan Ah tetap diakumulasi.	Variabel V dan I kembali ke 0 setelah data ditampilkan, sedangkan Ah dan Wh tidak di-reset, memastikan perhitungan rata-rata yang benar tanpa kehilangan data akumulasi.	Valid
----	----------------------------	--	--	-------

5.2. Pembahasan

Bagian ini mengulas hasil-hasil yang telah dipaparkan, menganalisis faktor-faktor yang memengaruhi kinerja sistem, dan membandingkannya dengan penelitian terdahulu serta tujuan awal penelitian.

5.2.1. Analisis Akurasi Pengukuran

Hasil pengujian akurasi menunjukkan bahwa modul yang dikembangkan mampu memberikan data pemantauan energi dengan tingkat kesalahan yang dapat diterima untuk aplikasi kendaraan listrik. Pengukuran tegangan menunjukkan akurasi sangat tinggi (rata-rata *error* 0.41%). Hal ini disebabkan oleh sifat pasif dan stabil dari rangkaian pembagi tegangan yang digunakan, sehingga menghasilkan pengukuran yang konsisten dengan alat ukur rujukan.

Di sisi lain, pengukuran arus menunjukkan variasi *error* yang lebih tinggi dengan rata-rata 5.83%. Faktor utama penyebabnya adalah ketidakstabilan pada *dummy load* berbasis elektrolit yang digunakan saat pengujian. Secara teknis, ketidakstabilan ini muncul dari proses elektrolisis itu sendiri. Saat arus listrik dialirkan melalui larutan elektrolit, terjadi dekomposisi kimia yang menghasilkan gelembung gas hidrogen dan oksigen pada permukaan elektroda. Kombinasi dari fluktuasi cepat akibat gelembung dan pergeseran lambar akibat suhu membuat *dummy load* elektrolit menjadi kurang ideal untuk validasi presisi tinggi, sehingga menyulitkan sensor ACS712 untuk menangkap nilai arus secara presisi. Meskipun demikian, tingkat *error* ini masih berada dalam batas wajar untuk sistem pemantauan non-kritis.

Sebagai parameter turunan, perhitungan daya secara langsung dipengaruhi oleh akurasi arus dan tegangan. Dengan rata-rata *error* sebesar 5.94%, variasinya sejalan dengan fluktuasi pada pengukuran arus.

Temuan kunci dari penelitian ini terletak pada akurasi perhitungan parameter akumulatif, yaitu kapasitas baterai (Ah) dan konsumsi energi (Wh). Meskipun nilai arus dan daya sesaat berfluktuasi, metode integrasi numerik terbukti efektif dengan menghasilkan *error* rata-rata yang relatif rendah, yaitu 2.95% untuk Ah dan 3.05% untuk Wh. Dengan mengakumulasi hasil perkalian pada interval waktu yang sangat singkat ($\Delta t = 100 \text{ ms}$), algoritma ini mampu menghitung total kapasitas dan energi secara akurat. Kemampuan ini lebih unggul dibandingkan metode rata-rata sederhana, terutama untuk menghadapi beban dinamis seperti pada kendaraan listrik. Keunggulan metode integrasi numerik dibandingkan metode rata-rata sederhana menjadi sangat signifikan dalam menghadapi beban dinamis. Sebagai ilustrasi, bayangkan sebuah skenario penggunaan e-cargo bike selama 30 detik:

- Detik 0-5: Akselerasi penuh (Arus: 20 A)
- Detik 5-25: Kecepatan konstan (Arus: 5 A)
- Detik 25-30: Pengereman hingga berhenti (Arus: 0 A)

Jika menggunakan metode rata-rata sederhana (misalnya hanya mengukur arus di awal dan akhir), hasilnya akan sangat tidak akurat: $(20 \text{ A} + 0 \text{ A}) / 2 = 10 \text{ A}$. Nilai rata-rata 10 A ini sama sekali tidak merepresentasikan konsumsi energi sebenarnya. Sebaliknya, metode integrasi numerik akan mengukur arus setiap 100 ms, menangkap nilai 20 A selama 5 detik, nilai 5 A selama 20 detik, dan seterusnya. Dengan mengakumulasi energi dari setiap interval singkat ini, hasil akhirnya akan jauh lebih mendekati konsumsi energi yang sebenarnya. Validasi ini memperkuat temuan (Yahya et al., 2019) yang menyatakan bahwa metode integrasi numerik dapat mencapai akurasi tinggi apabila jumlah interval perhitungan diperbanyak.

Penting untuk dibedakan bahwa ketidakstabilan akibat dummy load elektrolit adalah tantangan pada saat validasi alat, bukan pada saat implementasi nyata. Pada implementasi di *e-cargo bike*, sumber fluktuasi adalah beban dinamis dari motor listrik itu sendiri—seperti lonjakan arus saat akselerasi dan penurunan saat kecepatan konstan. Cara sistem ini mengatasi fluktuasi beban nyata pada *e-cargo bike* justru terletak pada inti metode yang diusulkan, yaitu integrasi numerik. Dengan mengambil sampel data pada interval waktu yang sangat singkat ($\Delta t =$

100 ms), sistem mampu 'menangkap' setiap perubahan daya sesaat. Setiap 'potongan' energi kecil ($dWh = P \times \Delta t$) dihitung dan diakumulasi. Proses penjumlahan berkelanjutan inilah yang memastikan total energi yang terukur tetap akurat, meskipun daya sesaat berfluktuasi secara ekstrem. Dengan kata lain, metode integrasi numerik yang digunakan memang dirancang untuk unggul dalam kondisi beban dinamis seperti ini.

5.2.2. Analisis Kinerja pada Skenario Operasional

Pengujian *discharging* dan *charging* dilakukan untuk memetakan perilaku baterai dalam skenario penggunaan nyata. Pada uji *discharging* dengan dummy load, terpantau adanya penurunan tegangan baterai secara konsisten dari 78.45 V menjadi 77.28 V. Data ini merefleksikan profil pengurasan kapasitas baterai yang nantinya harus dapat diukur secara akurat oleh modul.

- Sementara itu, pada uji *charging* yang menggunakan 5 buah panel surya 30 Wp yang disusun seri, terpantau adanya peningkatan tegangan baterai dari 77.04 V hingga 79.70 V. Selain itu, tercatat pula bahwa arus pengisian bersifat variabel akibat fluktuasi intensitas cahaya matahari. Kemampuan modul untuk nantinya dapat memantau kondisi pengisian yang dinamis dari sumber energi terbarukan seperti ini merupakan salah satu fungsi krusial yang divalidasi kebutuhannya melalui pengujian ini.

5.2.3. Relevansi dengan Tujuan dan Kebaruan Penelitian

Penelitian ini berhasil mencapai tujuannya, yaitu merancang dan mengembangkan sebuah modul *energy meter* fungsional dengan rentang ukur 50-100V/0-30A berbasis integrasi numerik untuk *e-cargo bike*. Kebaruan utama dari penelitian ini terletak pada pengembangan solusi yang spesifik untuk kebutuhan kendaraan listrik ringan, yang belum tersedia di pasar komersial. Mayoritas produk dan penelitian sebelumnya, seperti yang dilakukan oleh (Fadlu Rahman et al., n.d.; Irsyadi et al., 2024), lebih berfokus pada aplikasi rumah pintar dengan beban statis.

Modul yang dikembangkan ini bersifat mandiri (*standalone*) dan *non-IoT*, dengan fokus utama pada akurasi perhitungan melalui integrasi numerik untuk mengatasi tantangan beban dinamis pada *e-cargo bike*, sehingga mengisi celah riset

yang ada. Dengan menyediakan data energi yang akurat dan *real-time*, modul ini diharapkan dapat mendukung efisiensi daya, memperpanjang umur baterai, dan meningkatkan efektivitas operasional *e-cargo bike* (Christakis et al., 2024), sejalan dengan manfaat yang diharapkan dalam penelitian.

