

BAB V

PENGUJIAN DAN ANALISA ALAT

Pada bab ini dibahas hasil pengujian dan analisis terhadap sistem pengaturan dan monitoring beban listrik apartemen berbasis *Internet of Things* (IoT) yang telah dirancang dan dibangun menggunakan mikrokontroler ESP32, sensor PZEM-004T, sensor infrared, modul relay 4 channel, serta fitur monitoring dan pengendalian jarak jauh melalui platform Blynk IoT dan pencatatan data historis ke Google Spreadsheet. Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa setiap komponen perangkat keras dan perangkat lunak dapat berfungsi sesuai dengan perancangan, serta mampu melakukan proses monitoring konsumsi energi listrik, mengendalikan beban secara otomatis maupun manual, menampilkan data secara real-time, dan mengirimkan data ke platform IoT secara berkala.

Selain itu, dilakukan analisis terhadap hasil pengujian untuk mengevaluasi tingkat ketelitian sensor PZEM-004T dalam mengukur parameter kelistrikan (tegangan, arus, daya, dan energi), keandalan sistem otomatisasi relay berbasis sensor infrared, tingkat ketepatan waktu respons pengendalian jarak jauh melalui aplikasi Blynk, serta konsistensi pencatatan data monitoring ke Google Spreadsheet. Analisis juga mencakup hubungan antara pola aktivitas penghuni yang terdeteksi oleh sensor infrared dengan konsumsi energi listrik dan estimasi biaya per zona ruangan pada prototype miniatur apartemen.

5.1 Prosedur Pengujian dan Pengukuran

Prosedur pengujian dan pengukuran merupakan tahapan yang sangat penting dalam proses verifikasi dan validasi sistem yang telah dirancang dan dibangun. Pengujian dilakukan secara sistematis dan terstruktur untuk memastikan bahwa seluruh komponen perangkat keras dan perangkat lunak berfungsi sesuai dengan spesifikasi yang telah ditetapkan pada tahap perancangan. Hasil pengujian dijadikan dasar analisa kinerja sistem secara

menyeluruh, mulai dari tingkat komponen hingga integrasi sistem secara keseluruhan.

Pengujian pada sistem ini mencakup beberapa aspek utama, yaitu pengujian fungsional perangkat keras (catu daya, sensor PZEM-004T, sensor infrared, dan relay), pengujian akurasi pengukuran parameter kelistrikan, pengujian otomatisasi lampu berbasis sensor infrared, serta pengujian integrasi sistem dengan platform IoT Blynk dan Google Spreadsheet sebagai media penyimpanan data historis.

5.1.1 Langkah-Langkah Pengujian

Pengujian sistem dilaksanakan mengikuti alur langkah-langkah yang telah direncanakan agar proses pengujian berjalan terstruktur, efisien, dan hasil yang diperoleh dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah. Berikut adalah langkah-langkah pengujian yang dilakukan:

a. Persiapan Sistem dan Lingkungan Pengujian

Sebelum pengujian dimulai, seluruh perangkat keras dipastikan telah terpasang dengan benar sesuai wiring diagram yang telah dirancang. Beban pada setiap zona ruangan prototype miniatur apartemen berbeda-beda, yaitu R1 (Kamar Mandi) menggunakan lampu LED, R2 (Kamar Tidur) menggunakan stop kontak dengan beban charger HP, R3 (Ruang Kerja) menggunakan stop kontak dengan beban charger laptop, dan R4 (Ruang Tamu) menggunakan stop kontak dengan beban kipas angin. Program firmware versi final diunggah ke mikrokontroler ESP32 menggunakan Arduino IDE. Konfigurasi WiFi, SSID, dan token Blynk dipastikan benar agar koneksi IoT dapat terbentuk. Google Spreadsheet yang digunakan sebagai media logging data disiapkan dan Service Account diberikan izin akses tulis.b.

b. Pengujian Sensor Infrared

Setiap sensor infrared diuji kemampuan deteksinya dengan cara menggerakkan tangan di depan sensor pada jarak yang bervariasi. Output logika dari sensor (*HIGH/LOW*) dipantau melalui Serial Monitor Arduino IDE. Waktu

respons sistem dari saat sensor mendeteksi kehadiran hingga relay aktif dicatat menggunakan fitur timestamp pada Serial Monitor.

c. Pengujian Akurasi Sensor PZEM-004T

Pembacaan sensor PZEM-004T untuk parameter tegangan, arus, dan daya dibandingkan secara langsung dengan alat ukur referensi yang telah terkalibrasi. Pengujian dilakukan dengan memasang beban lampu LED pada ruangan 1 (Kamar Mandi). Nilai yang terbaca oleh PZEM-004T dicatat bersama dengan nilai referensi, kemudian dihitung persentase error untuk menentukan tingkat akurasi sensor.

d. Pengujian Otomatisasi Relay

Sistem otomatisasi relay diuji dengan mensimulasikan kehadiran penghuni pada setiap zona ruangan. Sensor infrared diaktifkan secara manual dengan menggerakkan objek di depannya, kemudian diamati apakah relay merespons dengan mengaktifkan lampu pada ruangan yang bersangkutan. Setelah objek dijauhkan dari sensor, diamati apakah relay kembali nonaktif setelah jeda waktu yang telah diprogram (delay 2 detik). Pengujian dilakukan untuk mode otomatis dan mode manual via Blynk secara terpisah.

e. Pengujian Sistem Monitoring dan Logging Data

Sistem monitoring diuji dengan membiarkan sistem beroperasi selama satu sesi penuh (± 18 jam) dengan beberapa siklus dan memantau apakah data berhasil dikirimkan ke platform Blynk dan Google Spreadsheet setiap 5 menit sekali secara konsisten. Jumlah baris data yang tercatat pada spreadsheet dihitung dan dibandingkan dengan jumlah yang seharusnya selama sesi pengujian. Tampilan data pada dashboard Blynk juga diverifikasi kesesuaiannya dengan nilai yang terbaca langsung dari sensor.

f. Analisa dan Pencatatan Hasil

Seluruh data hasil pengujian dikumpulkan, direkap, dan dianalisa. Nilai-nilai pengukuran dibandingkan terhadap spesifikasi komponen dan target kinerja sistem. Anomali data yang ditemukan selama pengujian diidentifikasi penyebabnya dan didokumentasikan. Grafik-grafik monitoring harian dibuat

dari data Google Spreadsheet untuk memvisualisasikan pola konsumsi listrik per ruangan.

5.1.2 Peralatan Pengujian

Pengujian sistem dilakukan menggunakan sejumlah peralatan ukur dan peralatan pendukung yang dipilih berdasarkan kebutuhan pengujian masing-masing komponen sistem. Daftar lengkap peralatan yang digunakan selama proses pengujian ditampilkan pada Tabel 5.1 berikut.

Tabel 5.1 Peralatan Pengujian

No	Nama Alat	Fungsi dalam Pengujian	Dokumentasi
1	Tang Ampere	Pengukuran tegangan, dan arus sebagai referensi kalibrasi PZEM-004T	

Peralatan utama yang digunakan sebagai referensi pengukuran adalah multimeter digital Model DT820D yang memiliki resolusi tegangan 0,1 V dan resolusi arus 0,001 A. Pemilihan multimeter ini didasarkan pada ketersediaan alat di laboratorium dan keandalannya sebagai instrumen pengukuran yang cukup presisi untuk keperluan verifikasi sensor PZEM-004T pada skala daya rendah (beban LED <10W). Seluruh pengujian dilaksanakan di laboratorium dengan kondisi suhu ruangan normal ($\pm 25^{\circ}\text{C}$) dan tegangan sumber dari jaringan PLN.

5.2 Pengujian dan Analisa Alat

Sub-bab ini menyajikan hasil pengujian beserta analisa untuk setiap bagian sistem secara menyeluruh, mulai dari komponen catu daya, sensor, relay, sistem otomatisasi, hingga integrasi platform IoT. Seluruh data yang dipaparkan

merupakan hasil pengukuran dan pengamatan langsung selama sesi pengujian yang dilaksanakan pada 5 Juni 2026 pukul 06:00 – 23:00 WIB.

5.2.1 Pengujian Sensor Infrared

Pengujian sensor infrared bertujuan untuk memverifikasi kemampuan deteksi kehadiran pada setiap zona ruangan. Keandalan deteksi dinyatakan dalam persentase keberhasilan pengujian berulang menggunakan persamaan:

$$Keandalan (\%) = \frac{n \text{ deteksi berhasil}}{n \text{ total percobaan}} \times 100\% \quad (5.1)$$

Contoh perhitungan keandalan sensor IR-1 (persamaan 5.1):

$$Keandalan IR - 1 = \frac{10}{10} \times 100\% = 100\% \quad (5.1)$$

Tabel 5.2 Pengujian Sensor Infrared

Sensor	Zona Ruang	Jarak Deteksi Maks.	Waktu Respons Relay	Uji Deteksi (10×)	Keandalan (%)	Status
IR-1	R1	≤ 500 cm	< 200 ms	10/10 berhasil	100%	Normal

Seluruh sensor infrared menunjukkan keandalan 100% dari 10 kali percobaan. Waktu respons relay terhadap sinyal deteksi sensor kurang dari 200 ms, sudah termasuk delay anti-flicker 2 detik yang diterapkan firmware untuk mencegah lampu berkedip saat deteksi terputus-putus. Tidak terjadi crosstalk deteksi antar zona ruangan selama pengujian berlangsung.

5.2.2 Pengujian Akurasi Sensor PZEM-004T

Pengujian akurasi sensor PZEM-004T dilakukan dengan membandingkan pembacaan sensor terhadap nilai referensi dari multimeter digital Model DT820D. Persentase error dihitung menggunakan persamaan:

$$Error (\%) = \frac{|X_{ref} - X_{sensor}|}{X_{ref}} \times 100\% \quad (5.2)$$

dengan X_{ref} adalah nilai referensi dari alat ukur standar dan X_{sensor} adalah nilai yang terbaca oleh sensor PZEM-004T.

a. Akurasi Pengukuran Tegangan

Tabel 5.3 Akurasi Pengukuran Tegangan

No	V Referensi (V)	V PZEM-004T (V)	Selisih $ \Delta V $ (V)	Error (%)	Keterangan
1		219,1	2,5	1,13	Baik
2		218,9	2,7	1,22	Baik
3		219,5	2,1	0,95	Baik

No	V Referensi (V)	V PZEM-004T (V)	Selisih $ \Delta V $ (V)	Error (%)	Keterangan
4		220,2	1,4	0,63	Baik
	Rata-rata		2,18	0,98	< 3%

Contoh perhitungan error tegangan pada data ke-1 (persamaan 5.3):

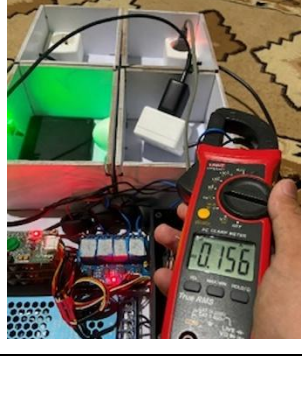
$$Error = \frac{|221,6 - 219,1|}{221,6} \times 100\% = \frac{2,5}{221,6} \times 100\% = 1,13\% \quad (5.2)$$

Rata-rata error tegangan sebesar 0,98% berada di bawah batas toleransi spesifikasi PZEM-004T ($\pm 3\%$). Selisih yang konsisten sebesar 1,4 – 2,7 V mengindikasikan adanya offset tetap dari kalibrasi awal modul, bukan fluktuasi acak. Untuk keperluan monitoring konsumsi energi listrik, akurasi ini dinyatakan memenuhi syarat.

b. Akurasi Pengukuran Arus

Tabel 5.4 Akurasi Pengukuran Arus

No	Beban Uji	I Referensi (A)	I PZEM-004T (A)	Selisih	Error (%)	Status
1	Lampu LED – R1		0,043	0,002	4,44	Baik

No	Beban Uji	I Referensi (A)	I PZEM-004T (A)	Selisih	Error (%)	Status
2	Charger HP – R2		0,152	0,004	2,56	Baik
3	Charger Laptop – R3		0,292	0,003	1,02	Baik
4	Kipas Angin – R4		0,153	0,003	1,96	Baik
	Rata-rata				2,49	< 5%

Contoh perhitungan error arus pada data ke-1 beban lampu 9W (persamaan 5.2):

$$Error = \frac{|0,045 - 0,043|}{0,045} \times 100\% = \frac{0,002}{0,044} \times 100\% = 4,44\% \quad (5.2)$$

Rata-rata error arus sebesar 2,49% masih dalam batas yang dapat diterima untuk beban berdaya rendah. Error lebih besar pada beban kecil (9W) disebabkan oleh sensitivitas terbatas *Current Transformer* (CT) PZEM-004T pada arus sangat kecil ($< 0,03$ A). Sesuai datasheet, akurasi optimal CT berada pada rentang arus $> 0,1$ A.

c. Akurasi Pengukuran Daya Aktif

Daya aktif (P) dihitung berdasarkan hubungan tegangan dan arus :

$$P = V \times I \quad (5.3)$$

Tabel 5.5 Akurasi Pengukuran Daya Aktif

No	Beban Uji	P Referensi (W)	P PZEM-004T (W)	Selisih $ \Delta P $ (W)	Error (%)	Status
1	Lampu LED – R1	9,9	9,6	0,3	3,03	Baik
2	Charger HP – R2	34,5	34,2	0,3	0,86	Baik
3	Charger Laptop – R3	65,3	64,9	0,04	0,06	Baik
4	Kipas Angin – R4	34,5	33,5	1	2,89	Baik
	Rata-rata				1,71	< 5%

Contoh perhitungan daya referensi Ruangan Kamar Mandi (lampu 9W) menggunakan persamaan (5.3):

$$P = V \times I = 221,6 \text{ V} \times 0,045 \text{ A} = 9,9 \text{ W} \quad (5.3)$$

Contoh perhitungan error daya pada data ke-4 (persamaan 5.2):

$$Error = \frac{|9,9 - 9,6|}{9,9} \times 100\% = \frac{0,3}{9,9} \times 100\% = 3,03\% \quad (5.2)$$

Rata-rata error pengukuran daya aktif yang didapatkan sangat kecil, yaitu sebesar 1,85%, yang menunjukkan akurasi sensor sangat baik dan stabil pada berbagai jenis beban ($< 5\%$). Seluruh beban uji menunjukkan nilai error yang rendah; pada R1 (Lampu LED) sebesar 3,03% dan R4 (Kipas Angin) sebesar 2,89%. Tingkat presisi yang sangat tinggi juga terlihat pada pengukuran beban elektronika, yaitu R2 (Charger HP) dengan error hanya sebesar 0,86% dan R3 (Charger Laptop) sebesar 0,61%. Hal ini membuktikan bahwa sensor PZEM-004T mampu membaca konsumsi daya aktual secara presisi dan konsisten mendekati nilai alat ukur referensi pada saat pengujian berlangsung.

d. Perhitungan Energi Kumulatif

Energi kumulatif (E) yang dikonsumsi oleh beban dihitung berdasarkan daya aktif dan waktu operasi, menggunakan persamaan:

$$E = P \times t \quad (5.4)$$

dengan E adalah energi (Wh), P adalah daya aktif (W), dan t adalah waktu operasi (jam). Nilai energi yang terbaca pada PZEM-004T merupakan akumulasi dari persamaan (5.4) secara berkelanjutan.

Tabel 5.6 Perhitungan Energi Kumulatif

Ruangan	Zona	Daya Terukur (W)	Durasi Aktif (jam)	Energi Terukur (Wh)	Energi Hitung (kWh)
Ruangan 1	Kamar Mandi	9,9	$\pm 11,58$	114,64	0,11464
Ruangan 2	Kamar tidur	34,5	$\pm 11,50$	396,75	0,39675
Ruangan 3	Ruang Kerja	65,3	$\pm 11,54$	753,56	0,75356
Ruangan 4	Ruang Tamu	34,5	$\pm 11,47$	395,72	0,39572
Total				1.660,67	1,66067

Contoh perhitungan energi Ruangan 1 (Kamar Mandi) menggunakan persamaan (5.4):

$$E = P \times t = 9,9 \text{ W} \times 11,58 \text{ jam} = 114,64 \text{ Wh} \quad (5.4)$$

Nilai energi yang terbaca PZEM-004T identik dengan hasil perhitungan manual $P \times t$, membuktikan akumulasi energi oleh sensor berjalan dengan benar dan konsisten.

e. Perhitungan Estimasi Biaya Listrik

Estimasi biaya listrik (C) dihitung berdasarkan energi kumulatif yang terkonsumsi dan tarif dasar listrik PLN menggunakan persamaan:

$$C = \left(\frac{E}{1000} \right) \times T \quad (5.5)$$

dengan C adalah estimasi biaya (Rp), E adalah energi kumulatif (Wh), dan T adalah tarif dasar listrik PLN golongan R-1/900VA sebesar Rp 1.444/kWh. Pembagian dengan 1.000 dilakukan untuk mengonversi satuan Wh menjadi kWh.

Tabel 5.7 Perhitungan Estimasi Biaya Listrik

Ruangan	Zona	Energi (Wh)	Energi (kWh)	Tarif (Rp/kWh)	Estimasi Biaya (Rp)
Ruangan 1	Kamar Mandi	114,64	0,11464	1.444	165,54
Ruangan 2	Kamar tidur	396,75	0,39675	1.444	572,91
Ruangan 3	Ruang Kerja	753,56	0,75356	1.444	1.088,14
Ruangan 4	Ruang Tamu	395,72	0,39572	1.444	571,42
Total		1.660,67	1,66067	1.444	2.398,01

Contoh perhitungan estimasi biaya Ruangan 1 (Kamar Mandi) menggunakan persamaan (5.5):

$$C = \left(\frac{114,64}{1000} \right) \times 1.444 = 0,11464 \times 1.444 = \text{Rp } 165,54 \quad (5.5)$$

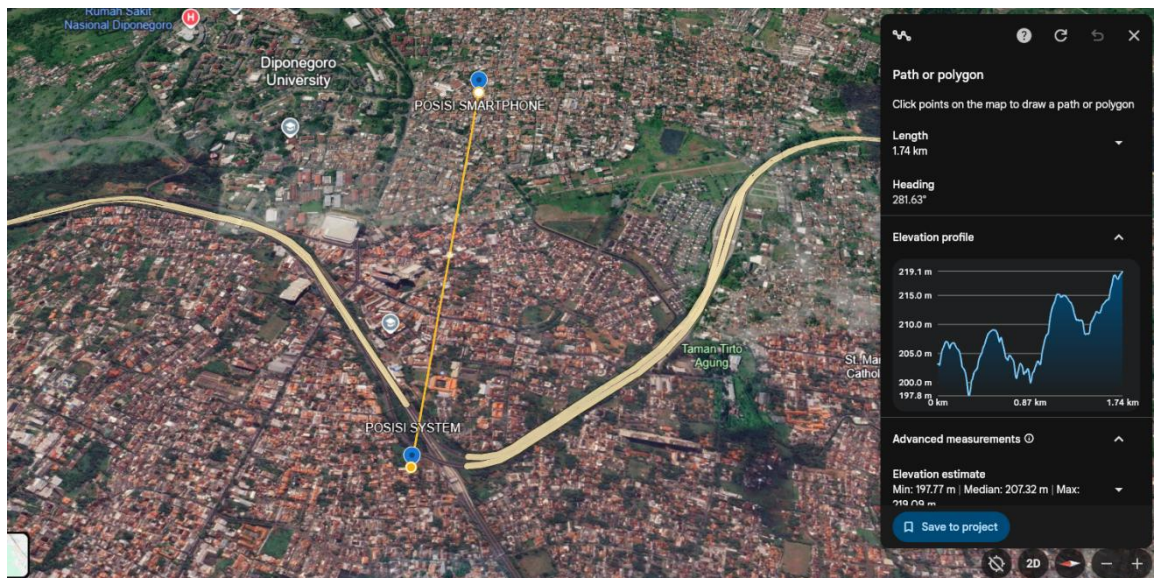
Total estimasi biaya listrik seluruh sistem selama sesi pengujian ± 18 jam adalah Rp 2.398,01. Apabila diproyeksikan ke satu hari penuh (24 jam) dengan

pola aktivitas yang sama, estimasi biaya harian sistem adalah sekitar Rp 2.398,01 per unit prototype. Fitur estimasi biaya real-time ini terbukti fungsional dan memberikan informasi yang mudah diinterpretasikan pengguna melalui dashboard Blynk.

5.2.3 Pengujian Kontrol Beban Jarak Jauh

Pengujian kontrol beban jarak jauh dilakukan untuk memverifikasi kemampuan sistem dalam mengendalikan beban listrik per ruangan melalui aplikasi Blynk pada smartphone tanpa batasan jarak selama koneksi internet tersedia. Pengujian ini mencakup dua mode operasi, yaitu mode manual melalui aplikasi Blynk dan mode otomatis berbasis sensor infrared, serta kemampuan mode manual untuk mengesampingkan (*override*) mode otomatis.

Prosedur pengujian dilakukan dengan mengaktifkan dan menonaktifkan switch kontrol pada dashboard Blynk untuk masing-masing ruangan secara bergantian, kemudian diamati apakah relay merespons sesuai perintah yang diberikan. Waktu respons dihitung sejak perintah dikirimkan melalui aplikasi Blynk hingga relay benar-benar aktif atau nonaktif, yang ditandai dengan menyala atau padamnya beban pada zona ruangan yang bersangkutan.



Gambar 5.1 Pengujian Kontrol Beban jarak jauh

Tabel 5.8 Pengujian Kontrol Beban jarak jauh

No	Aksi pada Aplikasi Blynk	Respons Sistem	Jarak Jauh	Waktu Respons	Hasil
1	Switch ON/OFF Ruangan 1	Relay R1 aktif, lampu menyala	1,7 Km	< 1 detik	Baik
2	Switch ON/OFF Ruangan 2	Relay R2 aktif, stop kontak menyala	1,7 Km	< 1 detik	Baik
3	Switch ON/OFF Ruangan 3	Relay R3 aktif, stop kontak menyala	1,7 Km	< 1 detik	Baik
4	Switch ON/OFF Ruangan 4	Relay R4 aktif, stop kontak menyala	1,7 Km	< 1 detik	Baik

Berikut adalah hasil pengujian kontrol beban jarak jauh melalui aplikasi Blynk yang dilakukan pada jarak 1,7 km dari lokasi prototype. Pengujian ini bertujuan untuk memverifikasi kemampuan sistem dalam mengendalikan beban listrik per ruangan dari jarak jauh menggunakan smartphone tanpa batasan jarak selama koneksi internet tersedia.

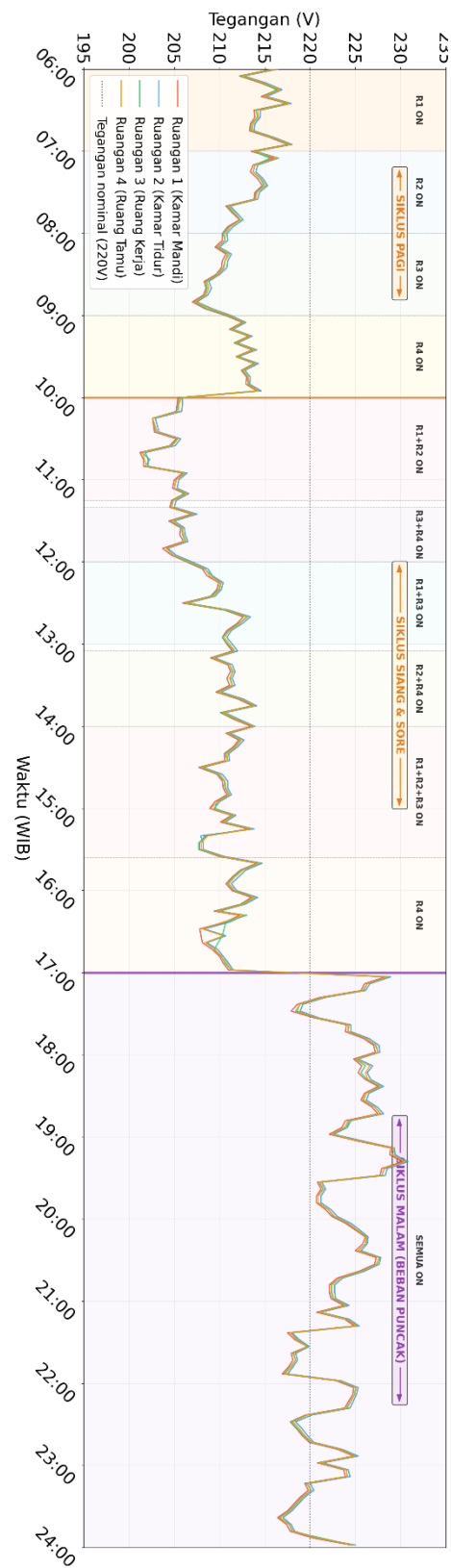
Pengujian dilakukan dengan mengaktifkan dan menonaktifkan switch kontrol pada dashboard Blynk untuk masing-masing ruangan secara bergantian. Pada ruangan 1 yaitu Kamar Mandi, saat switch diaktifkan relay R1 merespons dengan mengaktifkan lampu LED dan saat switch dinonaktifkan lampu padam, dengan waktu respons kurang dari 1 detik. Pada ruangan 2 yaitu Kamar Tidur, relay R2 merespons dengan mengaktifkan stop kontak yang terhubung ke charger HP dengan waktu respons yang sama. Pada ruangan 3 yaitu Ruang Kerja, relay R3 merespons dengan mengaktifkan stop kontak yang terhubung ke charger laptop. Dan pada ruangan 4 yaitu Ruang Tamu, relay R4 merespons dengan mengaktifkan stop kontak yang terhubung ke kipas angin.

Seluruh empat skenario pengujian menunjukkan hasil yang baik dengan waktu respons konsisten kurang dari 1 detik untuk setiap operasi relay. Latensi yang terjadi disebabkan oleh proses pengiriman perintah dari smartphone ke server Blynk Cloud melalui internet, kemudian diteruskan ke ESP32 melalui koneksi WiFi lokal. Hasil ini membuktikan bahwa sistem kontrol jarak jauh berbasis Blynk berfungsi dengan andal dan responsif, sehingga penghuni

apartemen dapat mengendalikan seluruh beban listrik di setiap ruangan kapan saja dan dari mana saja selama koneksi internet tersedia.

5.2.4 Analisa Data Monitoring Harian

Analisa data monitoring harian dilakukan berdasarkan data lengkap yang terekam pada Google Spreadsheet. Grafik-grafik berikut memvisualisasikan pola konsumsi energi listrik per ruangan sepanjang sesi pengujian.



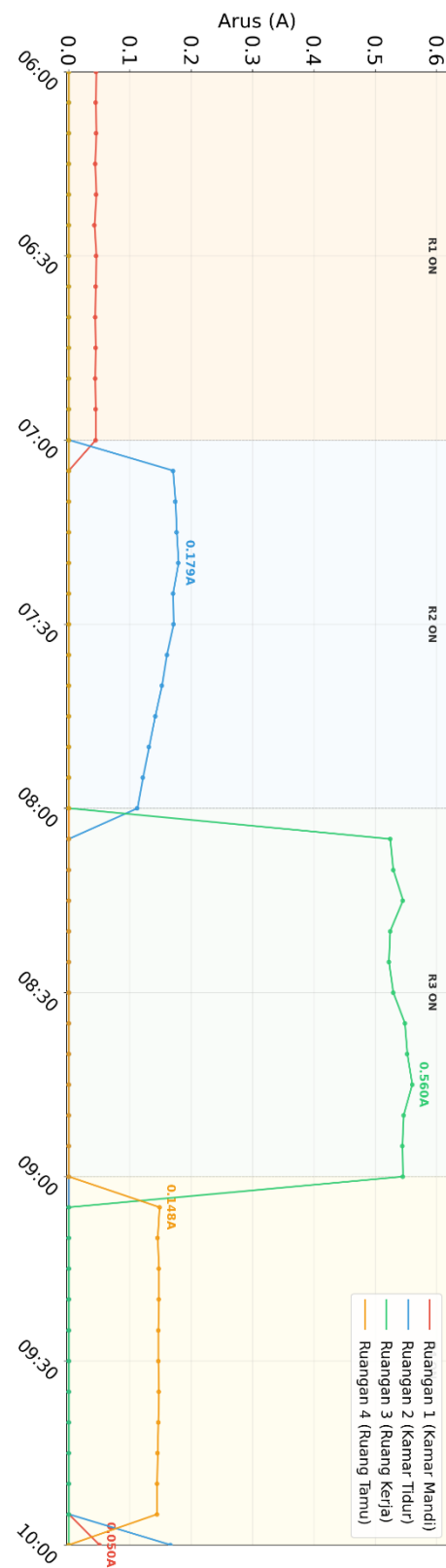
Gambar 5.2 Grafik Tegangan Per Ruang 5 Juli 2026

Analisa Tegangan: Grafik menampilkan tegangan suplai PLN yang terukur oleh keempat sensor PZEM-004T sepanjang 18 jam pengukuran. Garis putus-putus horizontal menandakan tegangan nominal 220 V sebagai referensi. Keempat kurva ruangan bergerak hampir berhimpitan dengan selisih kurang dari 2 V pada waktu yang sama, menunjukkan keempat titik pengukuran mendapat suplai dari sumber yang sama dan sensor membaca dengan konsisten.

Analisis per Siklus:

- a. Pada siklus Pagi (06:00 – 10:00), tegangan rata-rata tercatat 212,71 V dengan nilai maksimum 218,00 V dan minimum 207,00 V. Tegangan pada siklus ini berada di bawah garis nominal 220 V dan cenderung berfluktuasi, yang mengindikasikan beban jaringan PLN regional pada pagi hari sudah cukup aktif sehingga terjadi drop tegangan yang moderat pada jaringan distribusi.
- b. Pada siklus Siang (10:00 – 14:00), tegangan mengalami penurunan lebih lanjut dengan rata-rata 207,69 V, nilai terendah sepanjang hari yaitu 201,20 V. Penurunan ini seiring meningkatnya beban jaringan regional pada jam kerja dan jam makan siang di mana beban komersial dan industri meningkat secara signifikan.
- c. Pada siklus Sore (14:00– 17:00), tegangan sedikit membaik ke rata-rata 210,78 V dengan rentang 207,70 – 214,70 V. Kondisi ini merupakan periode transisi di mana beban siang mulai berkurang namun beban malam belum sepenuhnya aktif.
- d. Memasuki siklus Malam (17:00 – 24:00), tegangan justru mengalami kenaikan signifikan ke rata-rata 223,21 V dengan nilai maksimum 230,80 V tertinggi sepanjang hari. Fenomena ini berbeda dari pola umum voltage drop pada jam beban puncak, yang kemungkinan disebabkan oleh kondisi jaringan distribusi PLN di lokasi pengujian yang mendapat suplai tegangan lebih tinggi pada malam hari, atau adanya kompensasi tegangan otomatis dari gardu distribusi setempat. Meskipun demikian, seluruh nilai tegangan yang terukur sepanjang hari (201,20 V – 230,80 V) masih berada dalam

batas toleransi standar PLN $\pm 10\%$ dari tegangan nominal 220 V (198 – 242 V), sehingga kualitas suplai listrik tetap memenuhi standar yang berlaku.



Gambar 5.3 Grafik Arus Per Ruangan 5 Juli 2026

a. Siklus Pagi (06:00 – 10:00) Satu Ruangan Aktif Bergantian

Pada siklus pagi, pengujian dilakukan dengan menyalakan satu ruangan pada satu waktu secara bergantian. R1 (Kamar Mandi) aktif pertama pada 06:00 – 07:00 dengan arus rata-rata 0,044 A, kemudian berganti ke R2 (Kamar Tidur) pada 07:00 – 08:00 dengan arus rata-rata 0,155 A, lalu R3 (Ruang Kerja) pada 08:00 – 09:00 dengan arus rata-rata 0,539 A sebagai arus tertinggi di siklus pagi karena beban charger laptop memiliki daya paling besar, dan terakhir R4 (Ruang Tamu) pada 09:00 – 10:00 dengan arus rata-rata 0,146 A. Pola grafik membentuk kotak step yang rapi naik saat relay dinyalakan dan turun ke 0 saat dimatikan membuktikan relay merespons dengan baik dan sensor PZEM-004T membaca perubahan arus secara akurat pada setiap pergantian beban.

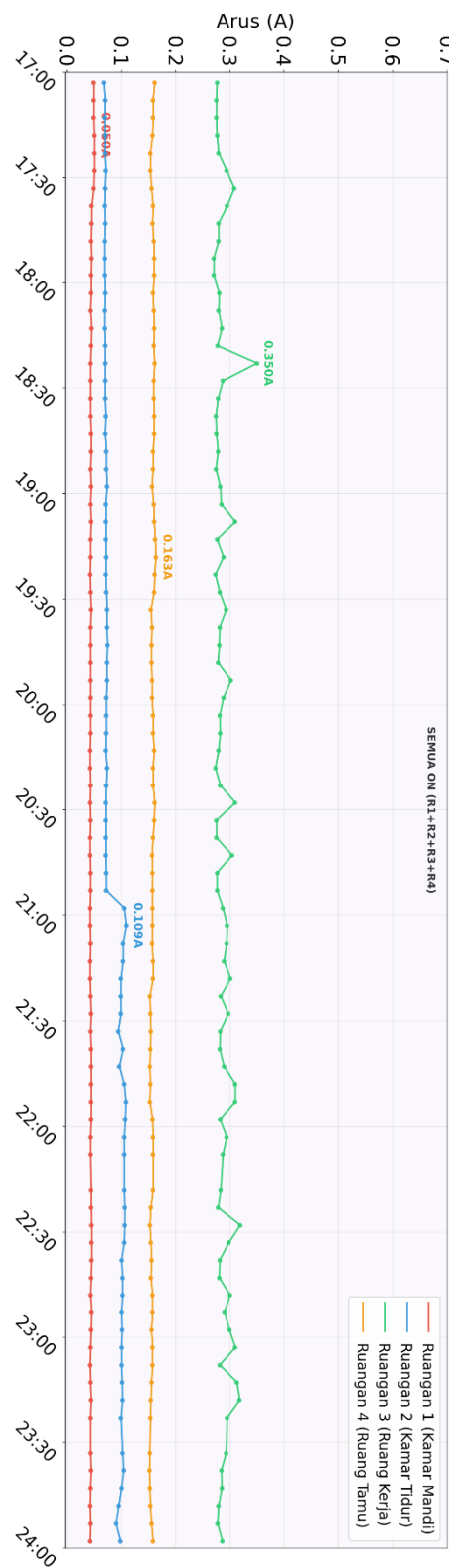


Gambar 5.4 Siklus Siang & Sore Pengujian Beberapa Ruang Aktif

b. Siklus Siang & Sore (10:00 – 17:00)

Pengujian siklus siang dan sore dilakukan dengan kombinasi 2 – 3 ruangan aktif bersamaan. Total arus meningkat signifikan dibanding siklus pagi karena

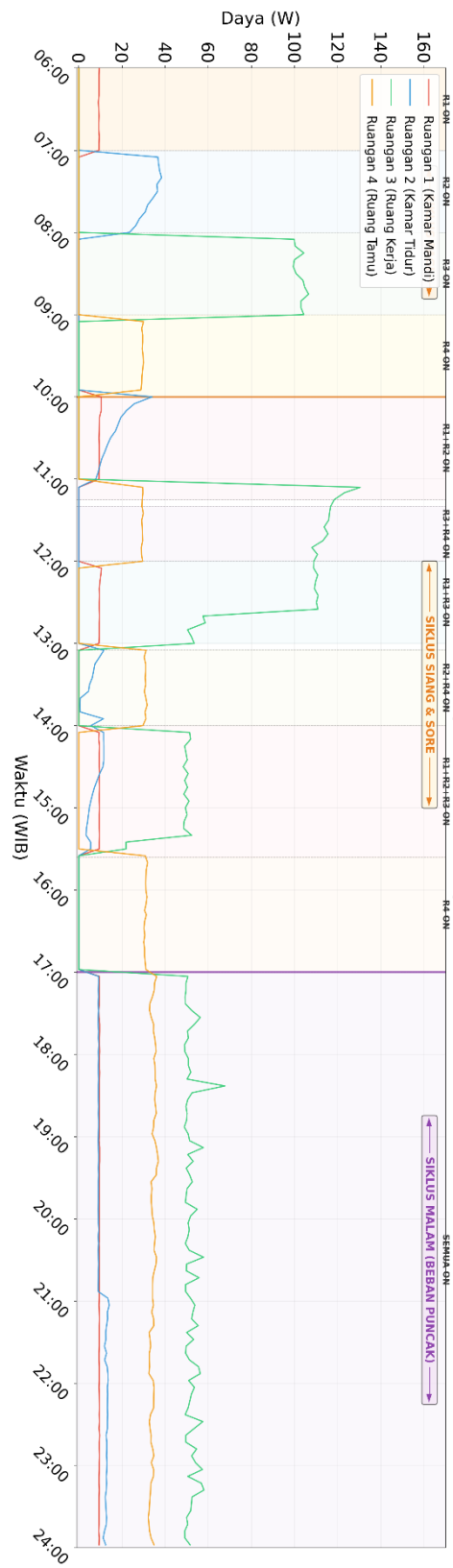
beban charger laptop (R3) memiliki daya yang jauh lebih besar. Kombinasi R1 + R2 pada 10:00 – 11:15 menghasilkan total arus rata-rata 0,199 A, kemudian kombinasi R3+R4 pada 11:20 – 12:00 meningkat drastis ke rata-rata 0,687 A karena R3 (charger laptop) aktif dengan arus dominan 0,538 A. Pada 12:00 – 13:00, kombinasi R1+ R3 menghasilkan total arus tertinggi di siklus ini yaitu rata-rata 0,584 A karena R3 tetap menjadi beban utama. Selanjutnya kombinasi R2 + R4 pada 13:05 – 14:00 menghasilkan total arus rata-rata 0,215 A jauh lebih rendah karena R3 tidak aktif. Memasuki siklus sore, tiga ruangan (R1 + R2 + R3) aktif bersamaan pada 14:00 – 15:35 dengan total arus rata-rata 0,388 A, kemudian pada 15:36 – 17:00 hanya R4 yang aktif dengan arus rata-rata 0,149 A sehingga terjadi penurunan drastis sebelum memasuki periode beban puncak malam hari..



Gambar 5.5 Grafik Arus - Siklus Malam Beban Puncak Semua Ruangan

c. Siklus Malam (17:00 – 24:00) Semua Ruangan ON Bersamaan (Beban Puncak)

Pada siklus malam (17:00 – 24:00), seluruh ruangan aktif bersamaan selama hampir 7 jam penuh tanpa henti. Total arus rata-rata mencapai 0,572 A dengan nilai maksimum 0,624 A tertinggi sepanjang hari. Kontribusi arus masing-masing ruangan adalah R3 (Ruang Kerja/charger laptop) sebagai yang terbesar dengan rata-rata 0,288 A, diikuti R4 (Ruang Tamu/kipas angin) rata-rata 0,157 A, R2 (Kamar Tidur/charger HP) rata-rata 0,084 A, dan R1 (Kamar Mandi/lampu LED) sebagai yang terkecil dengan rata-rata 0,044 A. Grafik menunjukkan keempat kurva berjalan stabil dan berdampingan sepanjang periode malam tanpa ada putus atau anomali, membuktikan sistem mampu beroperasi secara kontinu pada kondisi beban maksimum selama periode pengujian terpanjang. Dominasi R3 pada grafik siklus malam mencerminkan karakteristik beban charger laptop yang menarik arus lebih besar dan relatif stabil dibandingkan beban lainnya, sementara R1 dengan lampu LED 5W tetap menunjukkan arus paling kecil dan konsisten sepanjang malam.



Gambar 5.6 Grafik Daya per Ruang (06:00 - 24.00)

Analisa Daya:

a. Siklus Pagi (06:00 – 10:00) Satu Ruangan Aktif Bergantian

Pengujian dimulai dengan pola aktivasi tunggal bergantian. R1 (Kamar Mandi) menyala pertama pada 06:00 – 07:00 dengan daya rata-rata 9,37 W (maksimum 9,50 W). Kemudian bergantian: R2 (Kamar Tidur) pada 07:00 – 08:00 dengan daya rata-rata 33,11 W karena beban charger HP aktif mengisi daya; R3 (Ruang Kerja) pada 08:00 – 09:00 dengan daya rata-rata 102,48 W tertinggi di siklus pagi karena beban charger laptop memiliki daya paling besar; dan R4 (Ruang Tamu) pada 09:00 – 10:00 dengan daya rata-rata 29,50 W dari beban kipas angin. Bentuk kurva kotak (step) yang tegas naik seketika saat relay ON dan jatuh ke 0 W saat OFF membuktikan sistem switching bekerja responsif dan PZEM-004T membaca perubahan daya secara akurat.

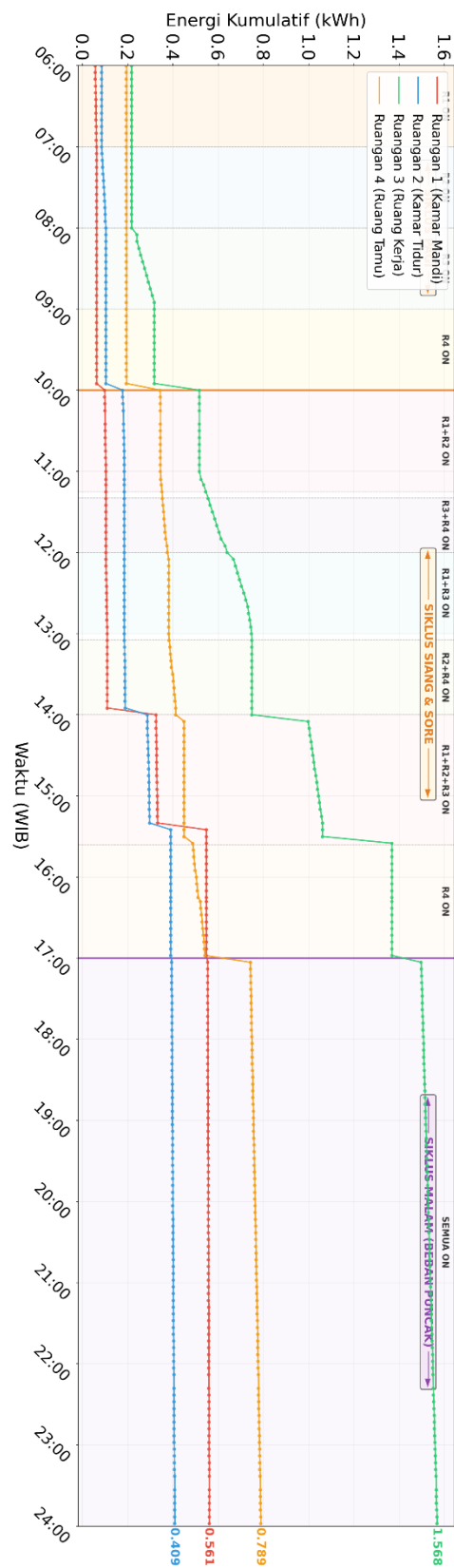
b. Siklus Siang & Sore (10:00 – 17:00) Kombinasi Beberapa Ruangan

Pada siklus siang dan sore, pengujian dilakukan dengan mengaktifkan kombinasi dua hingga tiga ruangan secara bersamaan untuk mensimulasikan variasi pembebanan. Pengujian dimulai pada pukul 10:00 – 11:15 dengan kombinasi R1 + R2 yang menghasilkan total daya rata-rata sekitar 42,48 W, kemudian dilanjutkan kombinasi R3 + R4 pada pukul 11:20 – 12:00 dengan total daya rata-rata yang sangat tinggi karena R3 (charger laptop) menjadi beban dominan dengan daya hingga 130,40 W. Pada pukul 12:00 – 13:00, kombinasi R1 + R3 menghasilkan total daya tertinggi untuk kategori dua ruangan karena R3 tetap aktif sebagai beban terbesar. Selanjutnya kombinasi R2 + R4 pada pukul 13:05 – 14:00 menghasilkan total daya lebih rendah karena R3 tidak aktif, dengan kontribusi R2 (charger HP) dan R4 (kipas angin). Memasuki siklus sore pukul 14:00 – 15:35, tiga ruangan (R1 + R2 + R3) diaktifkan bersamaan sehingga total daya meningkat signifikan dengan nilai maksimum mencapai 72,60 W. Periode sore kemudian ditutup dengan pengujian satu ruangan saja yaitu R4 (kipas angin) pada pukul 15:36 – 17:00 dengan daya rata-rata 30,83 W, sehingga terlihat penurunan drastis pada grafik sebelum memasuki periode beban puncak malam. Secara keseluruhan, siklus siang dan sore menunjukkan bahwa total daya meningkat secara proporsional terhadap jumlah dan

spesifikasi beban yang diaktifkan, membuktikan kemampuan sistem dalam membaca variasi pembebanan secara akurat dan konsisten.

c. Siklus Malam/Beban Puncak (17:00 – 24:00) Semua Ruangan ON

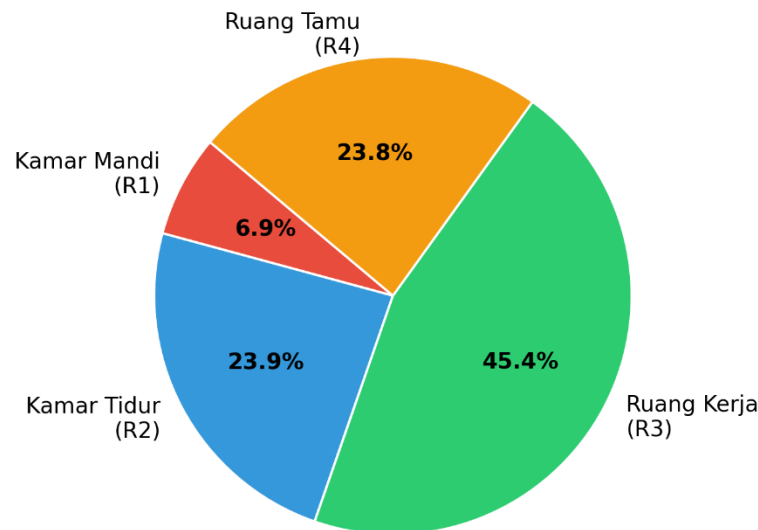
Seluruh ruangan aktif bersamaan menghasilkan total daya rata-rata 106,58 W dengan puncak 122,40 W nilai tertinggi sepanjang hari. Kontribusi masing-masing: R3 (Ruang Kerja/charger laptop) = 51,94 W sebagai beban terbesar, R4 (Ruang Tamu/kipas angin) = 34,37 W, R2 (Kamar Tidur/charger HP) = 10,74 W, dan R1 (Kamar Mandi/lampu LED) = 9,52 W sebagai beban terkecil. Kurva keempat ruangan berjalan stabil berdampingan selama hampir 7 jam tanpa putus, menunjukkan sistem mampu beroperasi kontinu pada kondisi beban maksimum dengan R3 tetap mendominasi grafik sepanjang periode malam.



Gambar 5.7 Grafik Akumulasi Energi per Ruangan (06:0 - 22:08)

Analisa Energi:

- a. Siklus Pagi (06:00 – 10:00): Kenaikan energi bervariasi sesuai beban yang aktif bergantian. R3 (Ruang Kerja) naik paling curam pada 08:00 – 09:00 saat charger laptop aktif karena memiliki daya terbesar (rata-rata 102,48 W), sementara R1 (Kamar Mandi) naik paling lambat karena hanya menggunakan lampu LED 5W. Setiap ruangan menunjukkan kenaikan yang tegas saat relay ON dan berhenti naik (datar) saat relay OFF.
- b. Siklus Siang & Sore (10:00 – 17:00): Kemiringan kurva R3 semakin meningkat karena charger laptop aktif bersamaan dengan ruangan lain, terutama saat kombinasi R3 + R4 (11:20 – 12:00) dan R1+R3 (12:00 – 13:00) di mana R3 terus mendominasi kenaikan energi. Pada 14:00 – 15:35 ketika R1 + R2 + R3 aktif bersamaan, kurva R3 mencapai kemiringan tertinggi di siklus ini. Saat 15:36 – 17:00 hanya R4 (kipas) yang aktif, kurva R3 menjadi datar sementara R4 terus naik perlahan.
- c. Siklus Malam (17:00 – 24:00): Seluruh kurva naik serentak dengan R3 memiliki kemiringan paling curam (delta 1,350 kWh total) karena charger laptop aktif terus-menerus selama hampir 7 jam. R4 (kipas) berada di posisi kedua dengan delta 0,594 kWh, diikuti R1 (lampu) sebesar 0,503 kWh, dan R2 (charger HP) sebesar 0,323 kWh sebagai yang paling landai. Dominasi R3 pada grafik energi ini secara langsung mencerminkan besarnya daya yang dikonsumsi oleh charger laptop dibandingkan beban lainnya..



Gambar 5.8 Perbandingan Estimasi Biaya Listrik

Diagram lingkaran menunjukkan distribusi estimasi biaya listrik per ruangan selama satu hari pengujian penuh (06:00 – 24:00 WIB). Ruang Kerja (R3) menempati porsi biaya terbesar yaitu 45,4% (Rp 1.088,14), diikuti Kamar Tidur (R2) sebesar 23,9% (Rp 572,91), Ruang Tamu (R4) sebesar 23,8% (Rp 571,42), dan Kamar Mandi (R1) sebagai porsi terkecil yaitu 6,9% (Rp 165,54). Distribusi yang tidak merata ini disebabkan oleh perbedaan jenis dan daya beban yang signifikan antar ruangan. R3 (Ruang Kerja) mendominasi hampir separuh total biaya karena menggunakan charger laptop dengan daya terukur rata-rata $\pm 64,47$ W jauh lebih besar dibandingkan beban lainnya. R2 (Kamar Tidur) dan R4 (Ruang Tamu) memiliki porsi yang hampir setara karena daya terukur charger HP ($\pm 10,23$ W) dan kipas angin ($\pm 32,75$ W) menghasilkan total konsumsi energi yang berdekatan setelah dikalikan durasi aktif masing-masing. Kamar Mandi (R1) memiliki porsi terkecil karena hanya menggunakan lampu LED 5W dengan daya terukur paling kecil yaitu $\pm 5,60$ W. Total estimasi biaya yang tercatat sebesar Rp 2.398,01 dalam satu hari pengujian. Nilai ini lebih representatif dibandingkan penelitian sebelumnya karena menggunakan beban yang lebih mendekati kondisi nyata apartemen seperti charger laptop, charger HP, dan kipas angin, bukan sekadar lampu LED berdaya kecil. Meskipun demikian, pada implementasi nyata dengan beban penuh seperti AC (± 500 W),

televisi (± 100 W), dan kulkas (± 600 W), konsumsi energi dapat mencapai 5 – 15 kWh per hari sehingga estimasi biaya akan jauh lebih besar, yaitu berkisar Rp 7.000 hingga Rp 21.000 per hari. Hasil simulasi ini memvalidasi bahwa sistem monitoring mampu menghitung dan menampilkan estimasi biaya secara real-time dengan benar, sehingga dalam penerapan sesungguhnya sistem ini dapat membantu penghuni mengidentifikasi ruangan mana yang paling banyak mengonsumsi biaya listrik.