

Implementation of a LoRa-Based Electric Vehicle Energy Monitoring System in Internet-Limited Competition Areas

[Implementasi Sistem Pemantauan Energi Kendaraan Listrik Berbasis Lora Pada Area Kompetisi Terbatas Internet]

Achmad Rifa'i¹⁾, Indah Sulistiyowati^{*,2)}

¹⁾ Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

²⁾ Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

*Email Penulis Korespondensi: indah_sulistiyowati@umsida.ac.id

Abstract. *The Kontes Mobil Hemat Energi (KMHE) and the Shell Eco-marathon (SEM) are competitions that encourage students to design and develop energy-efficient and environmentally friendly electric vehicles. However, the majority of current energy monitoring systems for electric vehicles are built on Internet of Things (IoT) designs that depend on a stable connection to the internet, which is frequently unavailable in situations such as race tracks. Obtaining real-time energy usage statistics during vehicle operation becomes challenging due to this constraint. This research aims to design and implement a LoRa (Long Range)-based electric vehicle energy monitoring system that operates independently of internet networks. The proposed system consists of transmitter and receiver units that monitor voltage, current, power, and electrical energy parameters using a Current Transformer (CT) sensor, a voltage divider circuit, an ADS1115 ADC module, and an ESP32 microcontroller as the main controller. A LoRa RA-02 module operating at 433 MHz is used to wirelessly send data, which are then shown in real time at the receiving device. Experimental results show that the system is capable of transmitting data reliably up to a distance of approximately 500 meters under field conditions without internet connectivity. The voltage measurement exhibits an average error below 0.1%, while the current measurement error ranges up to 4.65% compared to reference instruments. During vehicle operation, the system is able to calculate electrical power and energy consistently during vehicle operation. These results demonstrate that the suggested LoRa-based monitoring system is appropriate for real-time electric car energy monitoring in competitive settings with spotty internet connectivity.*

Keywords - Electric Vehicle, Energy Monitoring, LoRa, ESP32

Abstrak. *Kontes Mobil Hemat Energi (KMHE) dan Shell Eco-marathon (SEM) merupakan kompetisi yang mendorong mahasiswa untuk merancang dan mengembangkan kendaraan listrik yang hemat energi dan ramah lingkungan. Namun, sebagian besar sistem monitoring energi kendaraan listrik saat ini berbasis Internet of Things (IoT) yang bergantung pada koneksi internet yang stabil, yang sering kali tidak tersedia pada kondisi tertentu seperti lintasan balap. Keterbatasan ini menyebabkan sulitnya memperoleh data penggunaan energi secara real-time selama kendaraan beroperasi. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring energi kendaraan listrik berbasis LoRa (Long Range) yang dapat beroperasi tanpa bergantung pada jaringan internet. Sistem yang diusulkan terdiri dari unit transmitter dan receiver yang memantau parameter tegangan, arus, daya, dan energi listrik menggunakan sensor Current Transformer (CT), rangkaian pembagi tegangan, modul ADC ADS1115, serta mikrokontroler ESP32 sebagai pengendali utama. Modul LoRa RA-02 yang beroperasi pada frekuensi 433 MHz digunakan untuk mengirimkan data secara nirkabel, yang kemudian ditampilkan secara real-time pada perangkat penerima. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mengirimkan data secara andal hingga jarak sekitar 500 meter pada kondisi lapangan tanpa koneksi internet. Pengukuran tegangan menunjukkan rata-rata kesalahan di bawah 0,1%, sedangkan kesalahan pengukuran arus mencapai hingga 4,65% dibandingkan dengan alat referensi. Selama kendaraan beroperasi, sistem mampu menghitung daya dan energi listrik secara konsisten. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem monitoring berbasis LoRa yang diusulkan sesuai untuk pemantauan energi kendaraan listrik secara real-time pada kondisi kompetisi dengan keterbatasan koneksi internet.*

Kata Kunci - Kendaraan Listrik, Monitoring Energi, LoRa, ESP32.

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi kendaraan listrik telah menjadi inisiatif global dalam upaya mengurangi emisi karbon dan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Salah satu kegiatan yang mendorong inovasi di bidang ini adalah kompetisi kendaraan hemat energi, seperti Kontes Mobil Hemat Energi (KMHE) dan Shell Eco-marathon, yang diikuti oleh mahasiswa dari berbagai perguruan tinggi. Dalam kompetisi tersebut, setiap tim dituntut untuk merancang dan mengembangkan kendaraan yang mampu mengonsumsi energi seminimal mungkin dengan jarak tempuh sejauh

mungkin [1], [2]. Melalui kegiatan ini, mahasiswa dapat berkontribusi secara langsung terhadap pengembangan teknologi transportasi berkelanjutan di Indonesia.

Universitas Muhammadiyah Sidoarjo merupakan salah satu perguruan tinggi yang aktif dalam pengembangan kendaraan listrik melalui partisipasi mahasiswa dalam kompetisi hemat energi. Pengembangan kendaraan listrik menjadi langkah penting dalam mendorong inovasi sistem energi berkelanjutan serta menunjukkan kepedulian terhadap terwujudnya masa depan yang ramah lingkungan. Selain itu, inovasi tersebut juga menumbuhkan kesadaran mahasiswa terhadap isu perubahan iklim global dan keberlanjutan lingkungan [3], [4].

Tim IMEI Universitas Muhammadiyah Sidoarjo mengalami kendala dalam memperoleh data penggunaan energi selama proses pengembangan kendaraan listrik. Tim mengalami kesulitan dalam mendapatkan data energi secara real-time ketika kendaraan berjalan di lintasan uji maupun sirkuit kompetisi. Data konsumsi energi baru dapat diketahui setelah kendaraan mencapai garis akhir, sedangkan perbedaan kondisi lintasan menyebabkan variasi konsumsi energi kendaraan. Hal ini menyulitkan tim dalam mengevaluasi performa kendaraan dan menyesuaikan strategi berkendara selama kompetisi maupun pengujian.

Penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem monitoring energi kendaraan listrik berbasis Internet of Things (IoT) untuk memantau konsumsi energi melalui koneksi internet [5], [6]. Namun, sebagian besar sistem tersebut sangat bergantung pada akses internet yang stabil, yang umumnya tidak tersedia atau kurang andal di lingkungan kompetisi. Akibatnya, pendekatan monitoring berbasis IoT yang ada belum mampu menyediakan data energi secara kontinu dan real-time selama kendaraan beroperasi di lintasan kompetisi.

Keterbatasan tersebut menunjukkan adanya celah penelitian dalam pengembangan sistem monitoring energi kendaraan listrik yang mampu beroperasi secara mandiri tanpa koneksi internet, namun tetap menyediakan data konsumsi energi secara real-time dan andal di lingkungan kompetisi. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk membangun sistem monitoring energi yang dapat menyesuaikan dengan kondisi kompetisi yang memiliki keterbatasan atau tidak tersedianya jaringan internet.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dibutuhkan sistem monitoring yang mampu mengirimkan data konsumsi energi kendaraan listrik secara real-time tanpa memerlukan koneksi internet. Salah satu solusi yang dapat diterapkan adalah penggunaan teknologi komunikasi Long Range (LoRa). LoRa merupakan teknologi komunikasi nirkabel yang bekerja pada frekuensi rendah (433 MHz, 868 MHz, atau 915 MHz), memiliki jangkauan komunikasi yang jauh, konsumsi daya rendah, serta mampu beroperasi tanpa akses internet [7], [8], [9]. Teknologi ini dapat mencapai jangkauan komunikasi hingga ratusan meter pada kondisi line-of-sight (LOS), sehingga sesuai untuk sistem monitoring di area kompetisi. LoRa memungkinkan pengiriman data energi secara langsung dari kendaraan listrik ke area monitoring pit tanpa memerlukan infrastruktur jaringan tambahan [10], [11].

Penelitian ini merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring energi kendaraan listrik berbasis teknologi LoRa. Sistem ini mampu menampilkan dan menyimpan data konsumsi energi secara real-time ketika kendaraan beroperasi di lintasan, sehingga mendukung analisis performa yang akurat dan tepat waktu. Sistem terdiri dari dua komponen utama, yaitu unit transmitter yang dipasang pada kendaraan dan unit receiver yang ditempatkan di area monitoring. Sistem dilengkapi sensor Current Transformer (CT) untuk pengukuran arus, rangkaian pembagi tegangan untuk pengukuran tegangan, modul analog-to-digital converter (ADC) eksternal ADS1115 untuk akuisisi sinyal analog yang lebih akurat, serta mikrokontroler ESP32 sebagai pengendali utama [12], [13], [14].

Kebaruan penelitian ini terletak pada implementasi sistem monitoring energi kendaraan listrik berbasis LoRa yang dapat beroperasi secara mandiri tanpa koneksi internet dan secara khusus dirancang untuk aplikasi pada kompetisi kendaraan hemat energi. Pendekatan ini memungkinkan pemantauan parameter tegangan, arus, daya, dan energi secara real-time selama kendaraan beroperasi, sehingga memberikan dukungan praktis dalam evaluasi performa dan optimasi strategi berkendara pada lingkungan kompetisi.

Sistem monitoring energi berbasis LoRa yang diusulkan diharapkan dapat membantu Tim IMEI Universitas Muhammadiyah Sidoarjo dalam meningkatkan efisiensi energi, mengoptimalkan strategi berkendara selama kompetisi, serta mendukung pengembangan teknologi kendaraan listrik yang lebih cerdas, efisien, dan ramah lingkungan.

II. METODE

Penelitian ini membahas perancangan dan implementasi sistem monitoring energi kendaraan listrik yang dirancang untuk beroperasi di area kompetisi dengan keterbatasan koneksi internet. Sistem dikembangkan untuk memantau parameter tegangan, arus, daya, dan energi secara real-time dengan memanfaatkan komunikasi nirkabel berbasis LoRa (Long Range).

A. Monitoring Energi Kendaraan Listrik

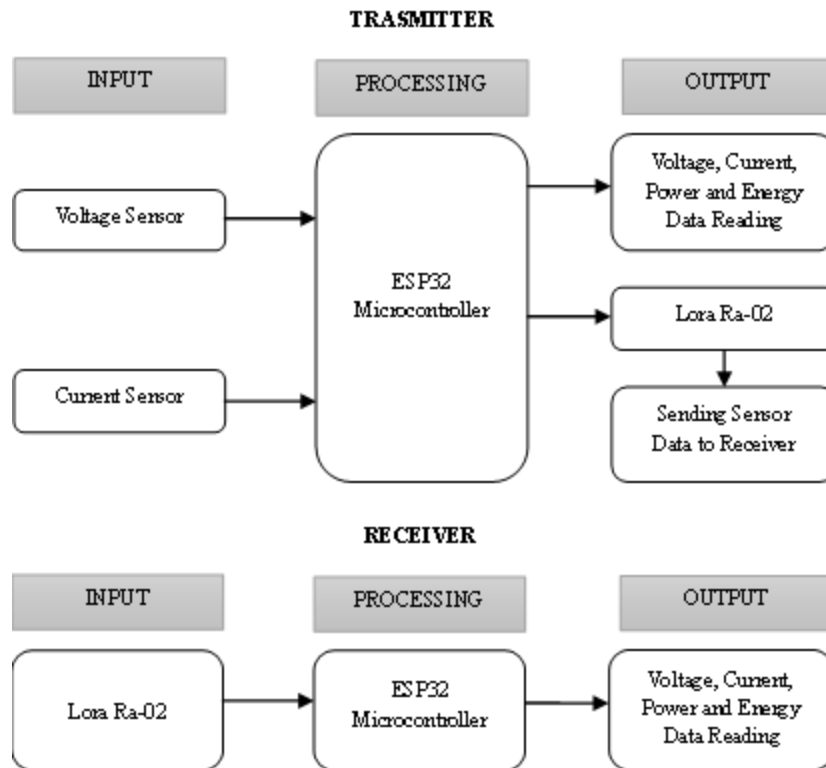
Sistem monitoring energi kendaraan listrik dirancang untuk memperoleh data konsumsi energi secara real-time saat kendaraan beroperasi di lintasan. Sistem ini terdiri dari dua unit utama, yaitu unit transmitter yang dipasang pada kendaraan listrik dan unit receiver yang ditempatkan di area monitoring [14], [15].

Subjek penelitian ini adalah prototipe kendaraan listrik yang digunakan oleh Tim IMEI Universitas Muhammadiyah Sidoarjo dalam kompetisi kendaraan hemat energi, di mana sistem monitoring diimplementasikan dan dievaluasi pada kondisi pengujian dan kompetisi.

Tegangan baterai diukur pada unit transmitter menggunakan rangkaian pembagi tegangan, sedangkan arus listrik yang mengalir dari baterai ke beban diukur menggunakan sensor Current Transformer (CT).

Data tegangan dan arus yang diperoleh kemudian diproses oleh mikrokontroler ESP32 untuk menghitung nilai daya dan energi [5], [16]. Data hasil pemrosesan selanjutnya dikirimkan secara nirkabel ke unit receiver.

Unit receiver menerima data yang dikirimkan dan menampilkan nilai tegangan, arus, daya, serta energi pada LCD I2C dan serial monitor, sehingga tim dapat memantau konsumsi energi kendaraan secara real-time selama pengujian maupun kompetisi [12], [13], [17]. Diagram blok sistem yang diusulkan ditunjukkan pada Gambar 1.

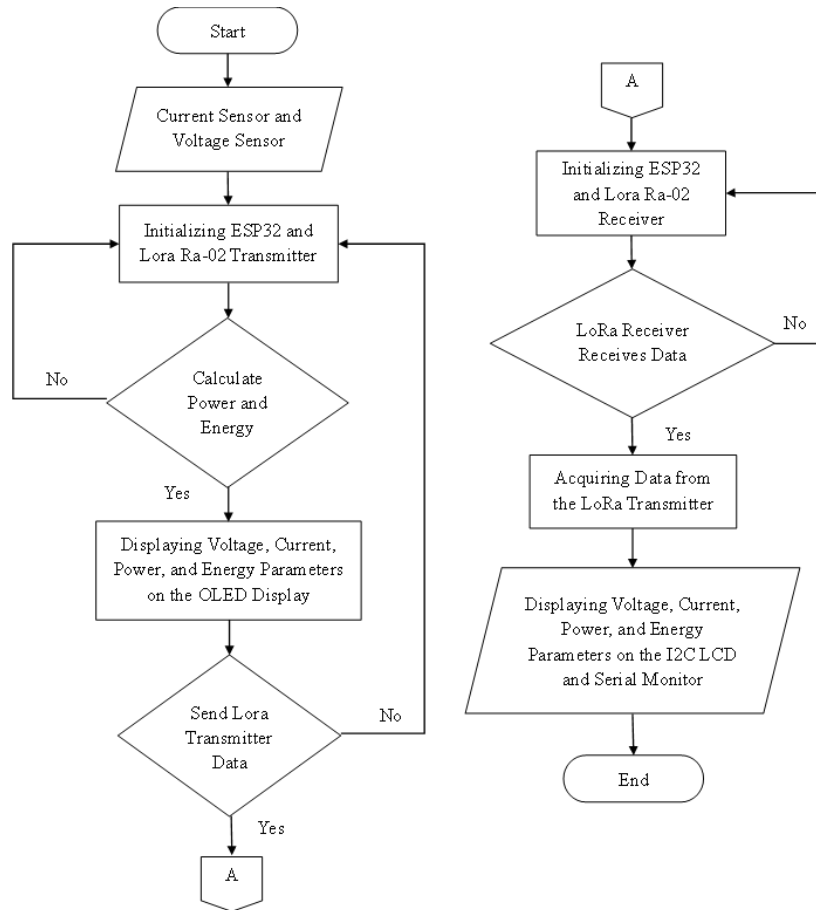


Gambar 1. Blok Diagram

B. Sistem dan Komunikasi LoRa

Sistem monitoring energi kendaraan listrik ini menggunakan komunikasi nirkabel berbasis LoRa sebagai media transmisi data antara unit transmitter dan receiver. Modul LoRa RA-02 yang beroperasi pada frekuensi 433 MHz dipilih karena memiliki jangkauan komunikasi yang jauh serta konsumsi daya yang rendah, sehingga sesuai untuk area kompetisi dengan keterbatasan atau tanpa koneksi internet [8], [10], [11].

Pada sisi transmitter, data hasil pembacaan sensor yang telah diproses oleh ESP32 dikirimkan secara periodik melalui modul LoRa. Sementara itu, pada sisi receiver, modul LoRa menerima data yang dikirimkan dan meneruskannya ke mikrokontroler ESP32 untuk diproses dan ditampilkan secara real-time. Dengan konfigurasi ini, sistem mampu memantau konsumsi energi kendaraan listrik secara langsung tanpa bergantung pada koneksi internet [18]. Diagram alir sistem ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Flowchart

C. Perancangan Rangkaian dan Perhitungan Energi

Rangkaian sistem monitoring energi kendaraan listrik terdiri dari rangkaian pengukuran tegangan, rangkaian pengukuran arus, serta rangkaian keseluruhan unit transmitter dan receiver [6], [19]. Rangkaian pengukuran tegangan menggunakan metode pembagi tegangan untuk menurunkan tegangan baterai kendaraan listrik agar sesuai dengan batas input modul ADC ADS1115. Tegangan keluaran dari rangkaian pembagi tegangan kemudian dibaca oleh ADC dan diproses oleh mikrokontroler ESP32 [14], [15].

Hubungan antara tegangan masukan dan tegangan keluaran pada rangkaian pembagi tegangan dinyatakan dengan persamaan berikut:

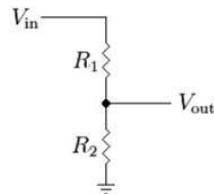
$$V_{out} = V_{in} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (1)$$

V_{out} : Tegangan Keluaran (V)

V_{in} : Tegangan Baterai Kendaraan Listrik (V)

R_1, R_2 : Nilai Resistansi (Ohm)

Di mana V_{in} merupakan tegangan baterai kendaraan listrik, R_1 dan R_2 adalah nilai resistor pada pembagi tegangan, dan V_{out} adalah tegangan keluaran yang diberikan ke input ADC. Rangkaian pembagi tegangan yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Rangkaian Pembagi Tegangan

Selain pengukuran tegangan, sistem juga dilengkapi sensor arus berbasis Current Transformer (CT) untuk mengukur arus listrik yang mengalir dari baterai ke beban kendaraan. Sebelum pengujian, sensor tegangan dan arus dikalibrasi dengan membandingkan hasil pembacaan sensor dengan alat ukur referensi berupa multimeter digital terkalibrasi. Kalibrasi dilakukan pada beberapa kondisi beban untuk meminimalkan kesalahan pengukuran dan meningkatkan akurasi data.

Data tegangan dan arus yang diperoleh kemudian digunakan untuk menghitung daya dan energi listrik [5], [16]. Perhitungan daya dilakukan menggunakan persamaan berikut:

$$P = V \times I \quad (2)$$

P : Daya (W)
V : Tegangan (V)
I : Arus (A)

Sementara itu, energi listrik dihitung sebagai akumulasi daya terhadap waktu pengukuran dengan persamaan:

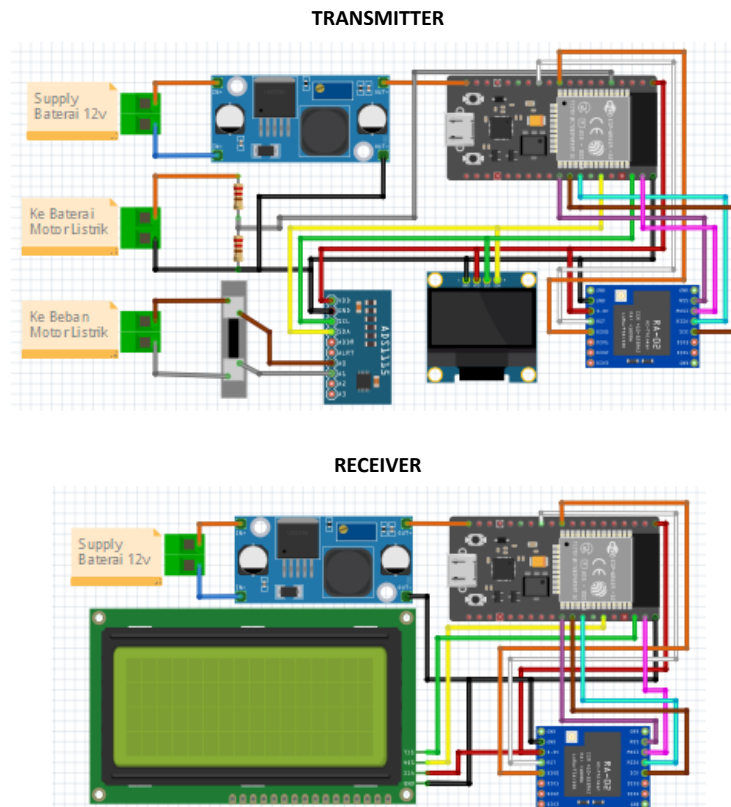
$$W = P \times t \quad (3)$$

W : Energi (Wh)
P : Daya (W)
t : Waktu (s)

Variabel penelitian yang diukur dalam penelitian ini meliputi tegangan baterai (V), arus beban (A), daya listrik (W), dan konsumsi energi listrik (Wh), yang dicatat selama kendaraan beroperasi pada kondisi yang merepresentasikan kompetisi.

Sebelum pengujian, dilakukan kalibrasi sensor dengan membandingkan hasil pengukuran sistem terhadap pembacaan multimeter digital terkalibrasi untuk memastikan akurasi. Pengujian sistem dilakukan pada kondisi statis dan saat kendaraan beroperasi di lintasan kompetisi untuk mengevaluasi kinerja sensor dan keandalan sistem secara keseluruhan.

Rangkaian keseluruhan sistem monitoring energi kendaraan listrik yang mencakup unit transmitter dan receiver dirancang menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pengendali utama, modul ADS1115 sebagai ADC eksternal, dan modul LoRa RA-02 sebagai media komunikasi nirkabel [19], [20], [21]. Diagram skematik sistem secara lengkap ditunjukkan pada Gambar 4.

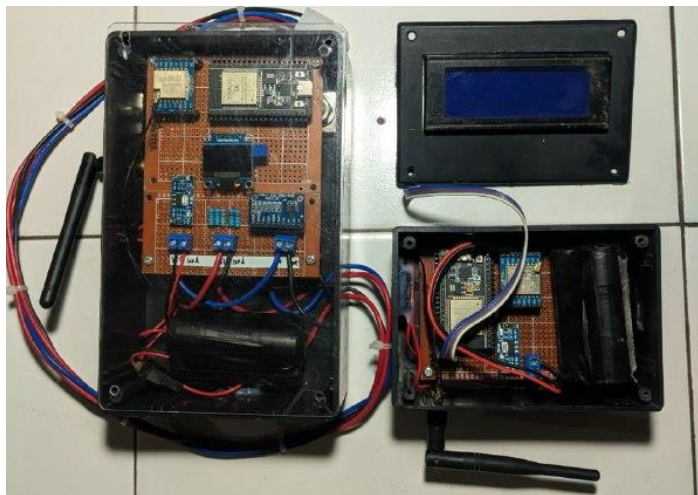


Gambar 4. Diagram Skematik Sistem Monitoring Energy

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini membahas hasil perancangan dan implementasi sistem monitoring energi kendaraan listrik berbasis LoRa. Proses pengembangan sistem diawali dengan identifikasi kebutuhan monitoring energi, dilanjutkan dengan pemilihan sensor tegangan dan arus, perancangan rangkaian elektronik, serta integrasi perangkat keras dan perangkat lunak pada unit transmitter dan receiver.

Prototipe akhir sistem monitoring energi kendaraan listrik yang dikembangkan ditunjukkan pada Gambar 5, yang memperlihatkan tampilan fisik perangkat sebelum dilakukan pengujian dan evaluasi kinerja lebih lanjut.



Gambar 5. Prototipe Akhir Sistem Monitoring Energi Kendaraan Listrik

Selanjutnya dilakukan pengujian kinerja untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mengukur parameter listrik, menghitung daya dan energi, serta mentransmisikan data secara nirkabel menggunakan komunikasi LoRa.

A. Pengujian Sensor Tegangan

Pengujian sensor tegangan dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi sistem dalam mengukur tegangan baterai kendaraan listrik melalui rangkaian pembagi tegangan. Nilai tegangan yang diperoleh dari sistem dibandingkan dengan hasil pengukuran menggunakan multimeter digital sebagai alat referensi. Hasil pengujian sensor tegangan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Pengujian Sensor Tegangan

No	Reference Voltage (Digital Multimeter) (V)	Measured Voltage by Microcontroller (LCD I2C) (V)	Error (%)
1	49.66	49.63	0.06 %
2	49.59	49.57	0.04 %
3	49.51	49.47	0.08 %
4	49.44	49.41	0.06 %
5	49.40	49.39	0.02 %
6	49.33	49.32	0.02 %
7	49.29	49.27	0.04 %
8	49.21	49.18	0.06 %
9	49.19	49.15	0.08 %
10	49.14	49.13	0.02 %
11	49.11	49.09	0.04 %
12	49.05	49.02	0.06 %
13	48.88	48.85	0.06 %
14	48.81	48.79	0.04 %
15	48.74	48.70	0.08 %

Berdasarkan hasil pengujian, nilai tegangan yang diukur oleh mikrokontroler menunjukkan perbedaan yang sangat kecil dibandingkan dengan pengukuran multimeter. Persentase kesalahan relatif rendah pada seluruh titik pengujian, yang menunjukkan bahwa kinerja pengukuran tegangan stabil dan akurat.

Rata-rata kesalahan pengukuran yang diperoleh dari pengujian sensor tegangan adalah sekitar $\pm 0,05\%$. Nilai kesalahan yang rendah ini menunjukkan bahwa rangkaian pembagi tegangan memiliki tingkat akurasi dan stabilitas yang baik. Oleh karena itu, subsistem pengukuran tegangan dinilai andal untuk aplikasi monitoring energi kendaraan listrik secara real-time.

B. Pengujian Sensor Arus

Pengujian sensor arus dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sensor berbasis Current Transformer (CT) dalam mengukur arus listrik yang mengalir dari baterai ke beban kendaraan. Nilai arus yang terbaca oleh sistem dibandingkan dengan hasil pengukuran multimeter digital sebagai referensi. Hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Pengujian Sensor Arus

No	Reference Current (Digital Multimeter) (A)	Measured Current by Microcontroller (LCD I2C) (A)	Error (%)
1	0	0	0 %
2	0.43	0.41	4.65 %
3	0.47	0.46	2.13 %
4	0.50	0.50	0 %
5	0.48	0.46	4.17 %
6	0.52	0.51	1.92 %
7	0.56	0.55	1.79 %
8	0.47	0.47	0 %
9	0.56	0.55	3.33 %
10	0.60	0.58	1.64 %
11	0.61	0.60	2.00 %
12	0.58	0.58	0 %
13	0.50	0.49	2.00 %
14	0.49	0.48	2.04 %
15	0.52	0.50	3.85 %

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa sensor arus mampu mendeteksi variasi arus pada berbagai kondisi beban. Perbedaan antara hasil pengukuran sistem dan multimeter relatif kecil.

Berdasarkan analisis data, rata-rata kesalahan sensor arus adalah sekitar $\pm 1,97\%$. Nilai kesalahan ini masih berada dalam batas yang dapat diterima untuk kebutuhan monitoring energi kendaraan listrik. Dengan demikian, sensor arus berbasis CT memiliki tingkat akurasi dan stabilitas yang cukup untuk digunakan sebagai parameter input dalam perhitungan daya dan energi listrik.

C. Pengujian Komunikasi LoRa

Pengujian komunikasi LoRa dilakukan untuk mengevaluasi jarak komunikasi efektif dan kestabilan transmisi data antara unit transmitter dan receiver. Parameter yang diamati meliputi tingkat penerimaan data, nilai RSSI, serta kondisi penerimaan pada berbagai jarak pengujian. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Pengujian Komunikasi Lora

No	Distance (m)	RSSI (dBm)	Data Received
1	0	-31	Yes
2	2	-35	Yes
3	5	-38	Yes
4	8	-39	Yes
5	10	-40	Yes
6	20	-51	Yes
7	30	-65	Yes
8	50	-77	Yes
9	75	-80	Yes
10	100	-89	Yes
11	200	-92	Yes
12	500	-102	Yes
13	1000	Not Connected	No
14	2000	Not Connected	No
15	5000	Not Connected	No

Berdasarkan hasil pengujian, sistem komunikasi LoRa menunjukkan performa yang baik pada jarak pendek hingga menengah. Transmisi data tetap stabil hingga jarak 500 meter dengan nilai RSSI sebesar -102 dBm. Namun, pada jarak di atas 500 meter, kualitas komunikasi mengalami penurunan signifikan, yang ditunjukkan dengan tidak diterimanya data pada jarak 1000 hingga 5000 meter.

Penurunan performa komunikasi ini disebabkan oleh pelemahan sinyal seiring bertambahnya jarak transmisi, serta faktor lingkungan seperti hambatan fisik, kondisi medan, dan konfigurasi antena saat pengujian. Meskipun secara teori LoRa mendukung komunikasi jarak jauh, hasil praktis penelitian ini menunjukkan bahwa jangkauan efektif sistem sekitar 500 meter sesuai dengan desain dan kondisi lapangan yang digunakan. Oleh karena itu, sistem monitoring energi kendaraan listrik yang diusulkan tetap cukup andal untuk digunakan pada lingkungan kompetisi, dengan batasan pada jarak komunikasi untuk aplikasi skala lebih besar.

D. Pengujian Perhitungan Daya dan Energi

Pengujian perhitungan daya dan energi dilakukan untuk memastikan bahwa sistem mampu menghitung nilai daya dan energi listrik secara benar berdasarkan data tegangan dan arus yang diperoleh. Pengujian dilakukan dengan beban konstan selama waktu tertentu, kemudian hasil perhitungan dibandingkan dengan data referensi. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Pengujian Perhitungan Daya dan Energi

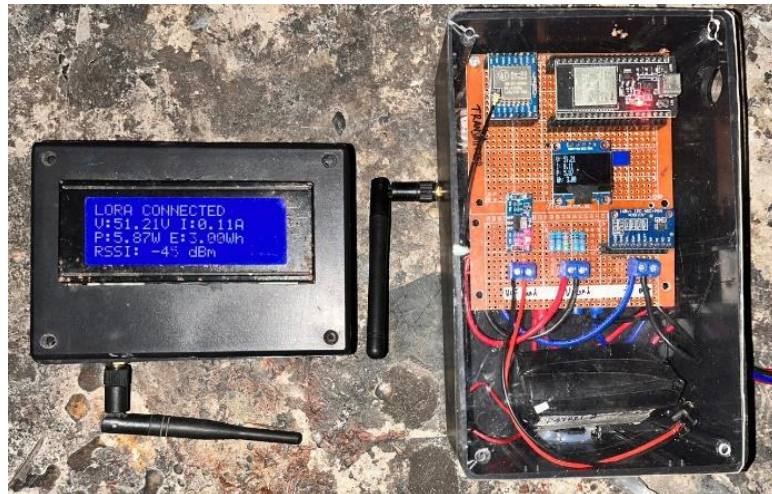
No	Voltage (V)	Current (I)	Power (W)	Energy (Wh)	Time (Minutes)
1	49.63	0	0.00	0.00	0
2	49.57	0.41	20.32	0.17	0.5
3	49.47	0.46	22.76	0.37	1
4	49.41	0.50	24.71	0.57	1.5
5	49.39	0.46	22.72	0.77	2
6	49.32	0.51	25.15	0.98	2.5
7	49.27	0.55	27.10	1.21	3
8	49.18	0.47	23.11	1.41	3.5
9	49.15	0.55	27.03	1.64	4
10	49.13	0.58	28.50	1.88	4.5
11	49.09	0.60	29.45	2.13	5
12	49.02	0.58	28.43	2.37	5.5
13	48.85	0.49	23.94	2.57	6
14	48.79	0.48	23.42	2.77	6.5
15	48.70	0.50	24.35	2.98	7

Hasil menunjukkan bahwa sistem mampu menghitung nilai daya dan energi secara konsisten sesuai dengan perubahan tegangan, arus, dan waktu pengukuran. Nilai energi yang terakumulasi meningkat secara proporsional terhadap durasi operasi, yang menunjukkan bahwa algoritma perhitungan energi telah diimplementasikan dengan benar.

Penyimpangan yang terjadi masih dalam batas yang dapat diterima dan dipengaruhi oleh akurasi sensor serta resolusi waktu akuisisi data. Dengan demikian, sistem dinilai layak digunakan untuk monitoring konsumsi daya dan energi kendaraan listrik secara real-time.

E. Pembahasan Kinerja Sistem Secara Keseluruhan

Pengujian sistem secara keseluruhan dilakukan untuk mengevaluasi performa terintegrasi sistem monitoring energi kendaraan listrik pada kondisi yang mendekati penggunaan di lintasan kompetisi. Pada tahap ini, unit transmitter dipasang pada kendaraan listrik, sedangkan unit receiver ditempatkan di area monitoring. Kondisi pengujian ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 5. Prototipe Akhir Sistem Monitoring Energi Kendaraan Listrik

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa sistem mampu membaca dan menampilkan parameter tegangan, arus, daya, dan energi secara real-time selama komunikasi LoRa berada dalam jangkauan efektifnya. Data yang ditampilkan pada LCD dapat terbaca dengan jelas, dan sistem mampu merespons perubahan beban kendaraan selama beroperasi.

Ketika jarak komunikasi melebihi jangkauan efektif LoRa, transmisi data ke unit receiver menjadi tidak stabil. Namun demikian, proses pengukuran tegangan dan arus serta perhitungan daya dan energi pada unit transmitter tetap berjalan dengan baik. Data yang diukur tetap diproses dan disimpan sementara pada sisi transmitter, sehingga ketika koneksi LoRa kembali tersedia, transmisi data dapat dilanjutkan tanpa memengaruhi akurasi parameter energi.

Dibandingkan dengan sistem monitoring berbasis IoT yang bergantung pada koneksi internet secara terus-menerus [6], sistem berbasis LoRa yang diusulkan memberikan keunggulan praktis pada lingkungan kompetisi dengan keterbatasan jaringan. Penelitian ini menegaskan bahwa teknologi LoRa tidak hanya sesuai untuk komunikasi jarak jauh dan konsumsi daya rendah, tetapi juga efektif diterapkan untuk monitoring energi kendaraan listrik secara real-time pada kompetisi kendaraan hemat energi. Temuan ini menunjukkan kontribusi sistem yang diusulkan sebagai solusi monitoring energi yang andal dan berorientasi pada kebutuhan kompetisi.

IV. SIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring energi kendaraan listrik berbasis LoRa yang mampu mengukur tegangan, arus, daya, dan energi listrik secara real-time tanpa bergantung pada koneksi internet. Sistem yang dikembangkan secara khusus ditujukan untuk aplikasi pada kompetisi kendaraan hemat energi, di mana akses internet sering kali terbatas atau tidak tersedia.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat akurasi dan stabilitas pengukuran yang baik. Pengukuran tegangan menghasilkan rata-rata kesalahan sekitar $\pm 0,05\%$, sedangkan pengukuran arus memiliki rata-rata kesalahan sekitar $\pm 1,97\%$. Selain itu, sistem mampu menghitung daya dan energi listrik secara konsisten sesuai dengan variasi tegangan, arus, dan durasi pengukuran. Pengujian komunikasi menunjukkan bahwa modul LoRa RA-02 pada frekuensi 433 MHz mampu mentransmisikan data secara andal hingga jarak sekitar 500 meter dengan nilai RSSI -102 dBm, yang masih memadai untuk lingkungan lintasan kompetisi.

Meskipun jangkauan komunikasi nirkabel memiliki keterbatasan pada kondisi lapangan tertentu, fungsi utama monitoring energi tetap berjalan dengan baik. Ketika komunikasi LoRa terputus, unit transmitter tetap melakukan pengukuran tegangan dan arus serta perhitungan daya dan energi secara mandiri, sehingga akurasi data tidak terganggu. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan dapat menjadi solusi efektif dalam mendukung analisis konsumsi energi, evaluasi performa kendaraan, serta optimasi strategi berkendara selama pengujian maupun kompetisi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Muhammadiyah Sidoarjo atas dukungan akademik dan fasilitas yang diberikan selama pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada dosen pembimbing dan penguji atas arahan, masukan, serta bimbingan yang sangat berarti dalam penyempurnaan penelitian dan penulisan artikel ini.

Penulis turut menyampaikan apresiasi kepada Tim IMEI Universitas Muhammadiyah Sidoarjo atas kerja sama dan dukungan selama proses perancangan, pengujian, dan implementasi sistem pada kendaraan listrik. Semoga hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi positif bagi pengembangan teknologi kendaraan listrik dan sistem monitoring energi pada kompetisi kendaraan hemat energi.

REFERENSI

- [1] N.-T. Hoang, H.-P. Vo, P.-T. Le, C.-L. Tran, N.-D. Trinh, and T.-A.-D. Pham, "The Innovative Design of the Electric Vehicles for Shell Eco-Marathon Asia Contest," in *2022 6th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD)*, 2022, pp. 296–302. doi: 10.1109/GTSD54989.2022.9988988.
- [2] A. Dukenderov, A. Abilez, A. Onabek, A. Aitbayev, Y. Baimukhan, and E. Shehab, "Systems Engineering Approach for Designing Electrical Vehicle for Shell Eco-Marathon," in *2023 IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)*, 2023, pp. 451–456. doi: 10.1109/SIST58284.2023.10223502.
- [3] S. Iliiev and D. Lyubenov, "Investigation Dynamic Characteristics of Electric Vehicle Participating in the Competition Shell Eco-Marathon," in *2022 International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES)*, 2022, pp. 1–4. doi: 10.1109/CIEES55704.2022.9990721.
- [4] S. Sabarad and S. Sanyal, "Establishing an optimal eco-driving strategy for an electric vehicle through testbed simulation — A case study from Shell Eco-Marathon 2018," in *2019 IEEE Students Conference on Engineering and Systems (SCES)*, 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/SCES46477.2019.8977209.
- [5] J. Wang, "Research on Monitoring Strategy of New Energy Vehicle Power System Based on the Internet of Things," in *2022 2nd International Signal Processing, Communications and Engineering Management Conference (ISPCEM)*, 2022, pp. 105–108. doi: 10.1109/ISPCEM57418.2022.00027.
- [6] M. A. Fudin, I. Sulistiyowati, and A. H. Falah, "IoT Integrated Electric Car Energy Monitoring System: Case Study of IMEI TEAM UMSIDA," *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 189–195, 2024, doi: 10.37905/jjee.v6i2.25198.
- [7] Z. J. R. Kamoon and M. Ilyas, "Investigating the Performance of LoRa Communication for Nominal LoRa and Interleaved Chirp Spreading LoRa," in *2022 International Conference on Artificial Intelligence of Things (ICAIoT)*, 2022, pp. 1–7. doi: 10.1109/ICAIoT57170.2022.10121818.
- [8] Y. Liu, J. Cai, and M. Qiu, "Research on low-power and low-cost smart animal husbandry positioning system based on LoRa transmission," in *2025 5th International Symposium on Computer Technology and Information Science (ISCTIS)*, 2025, pp. 571–575. doi: 10.1109/ISCTIS65944.2025.11065437.
- [9] K. P. Kamble, "LoRa Communication based Wireless Sensor Monitoring system," in *2022 International Conference on Sustainable Computing and Data Communication Systems (ICSCDS)*, 2022, pp. 1127–1131. doi: 10.1109/ICSCDS53736.2022.9760796.
- [10] H. Aghajari, S. Ahmadianabi, H. B. Babadegani, and M. N. Soorki, "Empirical Performance Analysis and Channel Modeling of UAV-Assisted LoRa Networks," in *2022 30th International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 2022, pp. 463–468. doi: 10.1109/ICEE55646.2022.9827258.
- [11] S. B. Gayathri, V. B. Varshini, S. Shanmati, A. S., M. Muniraj, and S. Shoba, "Performance Analysis of LoRa Communication Under Building Obstruction Using LoRa ESP32-V3," in *2025 IEEE Wireless Antenna and Microwave Symposium (WAMS)*, 2025, pp. 1–5. doi: 10.1109/WAMS64402.2025.11158138.
- [12] V. Chandani, A. Kotnis, and N. R. Kolhare, "Affordable Heart Health Monitoring System Using ESP32, AD8232 and MAX30102," in *2025 IEEE Madhya Pradesh Section Conference (MPCON)*, 2025, pp. 806–811. doi: 10.1109/MPCON66082.2025.11256709.
- [13] N. Ya'acob, S. I. Ismail, M. Z. M. Amin, and N. F. A. Aziz, "Design and Implementation of a Wireless Health Monitoring System for Real-Time Patient Data Using ESP32," in *2024 IEEE 15th Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC)*, 2024, pp. 149–153. doi: 10.1109/ICSGRC62081.2024.10691254.

- [14] E. S. Duvanov, A. F. Pashchenko, M. Y. Shishov, and D. A. Churkin, "Development of an Automated Microclimate Monitoring System Based on the ESP32 Microcontroller," in *2025 7th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*, 2025, pp. 158–161. doi: 10.1109/SUMMA68668.2025.11302387.
- [15] M. R. Nugraha *et al.*, "Radiosonde System Using ESP32 and LoRa Ra-02 Web-Based for Upper-Air Profile Observation," in *2024 International Conference on Information Technology and Computing (ICITCOM)*, 2024, pp. 213–217. doi: 10.1109/ICITCOM62788.2024.10762300.
- [16] D. V M, S. A., E. H., and S. PL, "Electric Vehicle Battery Parameters Monitoring System using IoT," in *2025 International Conference on Visual Analytics and Data Visualization (ICVADV)*, 2025, pp. 386–391. doi: 10.1109/ICVADV63329.2025.10961381.
- [17] Z. K. Farej and H. Y. Al-hayaly, "Accuracy Evaluation of Healthcare Monitoring System Based on ESP32 Microcontroller with IoT," in *2023 International Conference on Engineering, Science and Advanced Technology (ICESAT)*, 2023, pp. 90–94. doi: 10.1109/ICESAT58213.2023.10347330.
- [18] Y. Raghavi, V. Chakravarthy, R. S. Sri, S. N. K. G, R. Lingarao, and V. Vivek, "Real-Time Bus Tracking Using LoRa Technology," in *2025 IEEE Wireless Antenna and Microwave Symposium (WAMS)*, 2025, pp. 1–5. doi: 10.1109/WAMS64402.2025.11158837.
- [19] P. K., S. S. H., S. R., S. H., A. D., and S. G., "Advanced IoT-Driven Battery Management System for Electric Vehicles Integrated with Renewable Energy," in *2025 5th International Conference on Pervasive Computing and Social Networking (ICPCSN)*, 2025, pp. 565–570. doi: 10.1109/ICPCSN65854.2025.11035405.
- [20] S. Dlamini, B. Mendu, and B. Monchussi, "Control Strategies and Battery Management for Hybrid Energy Systems and Electric Vehicles," in *2024 International Conference on Electrical and Computer Engineering Researches (ICECER)*, 2024, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICECER62944.2024.10920414.
- [21] A. B., S. L. Neeraja, T. V Kishore, U. Deepika, S. Prathyusha, and K. V., "IoT-Enabled Advanced Health Monitoring System using ESP32 and UBI DOTS," in *2024 International Conference on IoT Based Control Networks and Intelligent Systems (ICICNIS)*, 2024, pp. 403–408. doi: 10.1109/ICICNIS64247.2024.10823147.

Conflict of Interest Statement:

The author declares that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.