SINERGI *Vol. 24, No.2, pp.178-187, Oktober 2026*
DOI : http://dx.doi.org/10.31963/sinergi.v24i2.5714

Perancangan dan Pengendalian Sumber Energi Pada Kendaraan Mobil Listrik

Andi Muh. Fadhil Risal[1], Muh. Isrul[2*], Simon Ka'ka[3], Akhmad Taufik[4]

[1,2,3,4] Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Ujung Pandang, Makassar 90245, Indonesia
*E-mail korespondensi: muh.isrul03@gmail.com

Abstract*: The development of electric vehicles powered by renewable energy requires an integrated energy system capable of harvesting, storing, distributing, and monitoring electrical energy. This study presents the design and implementation of an energy supply system for a solar-assisted electric vehicle by integrating photovoltaic (PV) panels, a Solar Charge Controller (SCC), a battery, a Brushless Direct Current (BLDC) motor, and an Internet of Things (IoT)-based monitoring system. The electrical parameters of the system were monitored using a PZEM-017 sensor, ESP8266 microcontroller, and Blynk platform. The experimental evaluation included photovoltaic output under varying solar irradiance and motor electrical power consumption at three transmission levels. The measured PV output power varied from 6.21 to 214.88 W, while the maximum measured PV conversion efficiency reached 22.91% at 11:30. The reduction in charging current during the afternoon was associated with decreasing solar irradiance and the battery charging condition. Motor testing showed different electrical power consumption characteristics for the three transmission levels, with the highest instantaneous power of approximately 1030 W observed at transmission level 3. The developed system successfully integrated energy generation, storage, propulsion, and real-time monitoring. However, the available experimental data do not sufficiently establish the previously reported battery charging duration of 5–6 h and motor operating duration of 4–8 h; therefore, these values are not used as primary performance claims in this revised manuscript. Further testing with controlled battery state-of-charge, load, solar irradiance, and operating duration is required to quantitatively determine charging time, energy efficiency, and driving endurance.*

Keywords: *Electric vehicle, Solar panel, Energy management, BLDC motor, Real-time monitoring*

Abstrak: Pengembangan kendaraan listrik berbasis energi terbarukan memerlukan sistem energi yang mampu membangkitkan, menyimpan, menyalurkan, dan memantau energi listrik secara terintegrasi. Penelitian ini menyajikan perancangan dan implementasi sistem sumber energi pada kendaraan mobil listrik berbasis panel surya dengan mengintegrasikan panel fotovoltaik (PV), Solar Charge Controller (SCC), baterai, motor Brushless Direct Current (BLDC), serta sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT). Parameter kelistrikan dipantau menggunakan sensor PZEM-017, mikrokontroler ESP8266, dan aplikasi Blynk. Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi karakteristik keluaran panel surya pada variasi irradiance serta konsumsi daya listrik motor BLDC pada tiga tingkat transmisi. Hasil pengujian menunjukkan daya keluaran panel surya berada pada rentang 6,21–214,88 W, dengan efisiensi konversi maksimum sebesar 22,91% pada pukul 11:30. Penurunan arus pengisian pada sore hari berkaitan dengan menurunnya irradiance dan kondisi pengisian baterai. Pengujian motor menunjukkan karakteristik konsumsi daya yang berbeda pada setiap tingkat transmisi, dengan daya sesaat tertinggi sekitar 1030 W pada transmisi 3. Sistem yang dikembangkan berhasil mengintegrasikan pembangkitan energi, penyimpanan energi, penggerak kendaraan, dan monitoring kelistrikan secara real-time. Namun, data eksperimen yang disajikan belum memadai untuk memvalidasi klaim sebelumnya mengenai waktu pengisian baterai 5–6 jam dan durasi operasi motor 4–8 jam sehingga kedua parameter tersebut tidak digunakan sebagai klaim kinerja utama dalam versi revisi. Pengujian lanjutan dengan kondisi state of charge baterai, beban, irradiance, dan durasi operasi yang terkontrol diperlukan untuk menentukan waktu pengisian, efisiensi energi, dan daya tahan operasi kendaraan secara kuantitatif.

Kata kunci : Kendaraan Listrik, Panel Surya, Manajemen Energi, Motor BLDC, Pengisian Baterai, Monitoring IoT.

I. PENDAHULUAN

Perkembangan kendaraan listrik (*electric vehicle*/EV) merupakan salah satu pendekatan untuk mengurangi ketergantungan sektor transportasi terhadap bahan bakar fosil dan menekan dampak lingkungan akibat emisi kendaraan konvensional. Kendaraan listrik menggunakan energi listrik yang disimpan dalam baterai sebagai sumber utama sistem penggerak, sehingga kinerja kendaraan sangat dipengaruhi oleh karakteristik sistem penyimpanan energi, sistem pengisian, elektronika daya, dan

motor traksi [1], [2]. Meskipun perkembangan teknologi EV berlangsung pesat, keterbatasan kapasitas penyimpanan energi, waktu pengisian, jarak tempuh, dan kebutuhan infrastruktur pengisian masih menjadi tantangan dalam pengembangan kendaraan listrik [1]–[3].

Baterai merupakan salah satu komponen utama kendaraan listrik karena berfungsi sebagai media penyimpanan dan penyedia energi bagi sistem penggerak. Kondisi baterai perlu dipantau dan dikendalikan untuk menjaga keamanan, keandalan, serta umur operasinya. *Battery Management System* (BMS) memiliki fungsi penting dalam pemantauan kondisi baterai, termasuk estimasi *State of Charge* (SOC), *State of Health* (SOH), pengendalian pengisian dan pengosongan, serta perlindungan terhadap kondisi operasi yang tidak sesuai [3], [4]. Dengan demikian, pengembangan sistem sumber energi kendaraan listrik perlu mempertimbangkan tidak hanya kapasitas baterai, tetapi juga strategi pengisian dan pengelolaan energi yang sesuai dengan karakteristik sumber dan beban.

Pemanfaatan energi terbarukan, khususnya energi surya, merupakan salah satu alternatif untuk menyediakan sumber energi tambahan bagi kendaraan listrik. Panel fotovoltaik (PV) dapat mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik yang selanjutnya dapat digunakan untuk mengisi baterai. Integrasi energi surya dengan sistem kendaraan listrik berpotensi mengurangi ketergantungan terhadap sumber energi konvensional serta meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan [5]. Kajian mengenai sistem pengisian kendaraan listrik berbasis energi surya menunjukkan bahwa PV dapat diintegrasikan dengan sistem penyimpanan energi untuk mengatasi karakteristik intermiten sumber energi surya. Namun, variasi irradiance, kondisi cuaca, keterbatasan luas panel, dan kapasitas penyimpanan tetap menjadi faktor penting yang menentukan kinerja sistem [5], [6].

Kinerja panel surya sangat dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari. Perubahan irradiance menyebabkan perubahan arus dan daya keluaran panel, sedangkan temperatur dan kondisi operasi sistem juga dapat memengaruhi karakteristik listrik panel. Oleh karena itu, pengukuran tegangan, arus, irradiance, daya keluaran, dan efisiensi diperlukan untuk mengevaluasi kemampuan panel surya sebagai sumber energi kendaraan. Pada aplikasi kendaraan listrik berbasis energi surya, karakteristik keluaran PV menjadi penting karena energi yang tersedia dari panel tidak selalu sama dengan kebutuhan daya sistem penggerak.

Pada sisi penyimpanan energi, energi listrik dari panel surya perlu dikendalikan sebelum disalurkan ke baterai. *Solar Charge Controller* (SCC) berfungsi mengatur proses pengisian sehingga tegangan dan arus pengisian dapat disesuaikan dengan karakteristik baterai. Pengelolaan pengisian yang tepat diperlukan karena kondisi pengisian secara langsung berkaitan dengan keamanan, efisiensi, dan umur baterai [3], [4]. Integrasi sumber PV, SCC, dan baterai juga perlu mempertimbangkan ketidakseimbangan antara daya yang tersedia dari PV dan daya yang dibutuhkan oleh beban kendaraan.

Sistem penggerak merupakan bagian penting lainnya pada kendaraan listrik. Motor listrik mengubah energi listrik dari baterai menjadi energi mekanik untuk menggerakkan kendaraan. Motor *Brushless Direct Current* (BLDC) banyak digunakan pada aplikasi kendaraan listrik karena memiliki konstruksi tanpa sikat, efisiensi yang baik, serta karakteristik pengaturan kecepatan yang sesuai untuk sistem penggerak. Pada kendaraan dengan sistem transmisi bertingkat, kebutuhan daya listrik motor dapat berubah sesuai tingkat transmisi dan kondisi pembebanan. Oleh karena itu, pengukuran konsumsi daya listrik motor pada beberapa tingkat transmisi diperlukan untuk mengetahui karakteristik kebutuhan energi sistem penggerak [2].

Selain pembangkitan, penyimpanan, dan penggunaan energi, sistem monitoring diperlukan untuk mengetahui kondisi kelistrikan kendaraan selama beroperasi. Parameter seperti tegangan, arus, daya, dan energi dapat digunakan untuk mengevaluasi hubungan antara sumber energi, baterai, dan beban motor. Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) memungkinkan data kelistrikan dikirim dan ditampilkan secara *real-time* melalui jaringan internet. Penggunaan sensor pengukuran listrik yang diintegrasikan dengan mikrokontroler dan platform monitoring dapat memberikan informasi kondisi sistem secara lebih cepat dan mudah diakses. Pendekatan monitoring berbasis IoT juga relevan untuk sistem PV karena memungkinkan pemantauan parameter pembangkitan dan kinerja

sistem secara jarak jauh [7].

Meskipun berbagai penelitian telah membahas kendaraan listrik, sistem baterai, pengisian berbasis energi surya, dan monitoring energi secara terpisah, integrasi panel surya, SCC, baterai, motor BLDC, serta sistem monitoring energi berbasis IoT dalam satu prototipe kendaraan listrik masih memerlukan evaluasi eksperimental yang lebih terukur. Khususnya, perlu diketahui karakteristik daya keluaran panel surya pada perubahan irradiance serta kebutuhan daya listrik motor pada berbagai kondisi transmisi. Informasi tersebut penting untuk mengevaluasi kesesuaian antara kemampuan sumber energi dan kebutuhan beban kendaraan.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem sumber energi kendaraan listrik yang mengintegrasikan panel surya, *Solar Charge Controller* (SCC), baterai, motor BLDC, serta sistem monitoring berbasis PZEM-017, ESP8266, dan Blynk. Pengujian dilakukan untuk memperoleh karakteristik keluaran panel surya berdasarkan tegangan, arus, irradiance, daya keluaran, dan efisiensi, serta mengevaluasi konsumsi daya listrik motor BLDC pada tiga tingkat transmisi. Hasil penelitian digunakan untuk mengevaluasi integrasi sumber energi, penyimpanan energi, sistem penggerak, dan monitoring kelistrikan pada prototipe kendaraan listrik.

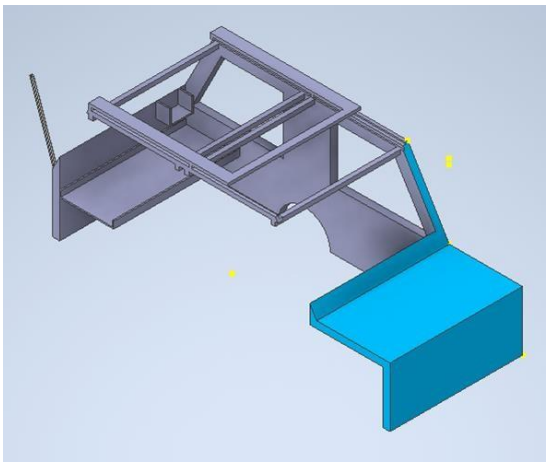
II. METODE PENELITIAN

A. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Bengkel Mekanik, Jurusan Teknik Mesin, Kampus II Politeknik Negeri Ujung Pandang, Sulawesi Selatan. Penelitian berlangsung dari Oktober 2024 hingga Juli 2025. Penelitian terdiri atas tahap perancangan mekanik, perancangan sistem kelistrikan, integrasi sistem monitoring, pembuatan prototipe, dan pengujian kinerja sistem.

B. Perancangan Mekanik

Rangka kendaraan dirancang sebagai struktur utama untuk menopang baterai, panel surya, motor BLDC, sistem transmisi, dan komponen pendukung lainnya. Desain mekanik ditunjukkan pada Gambar 1. Pada prototipe, panel surya ditempatkan pada bagian atas kendaraan, sedangkan baterai dan komponen sistem kelistrikan ditempatkan pada bagian kendaraan yang terlindung.



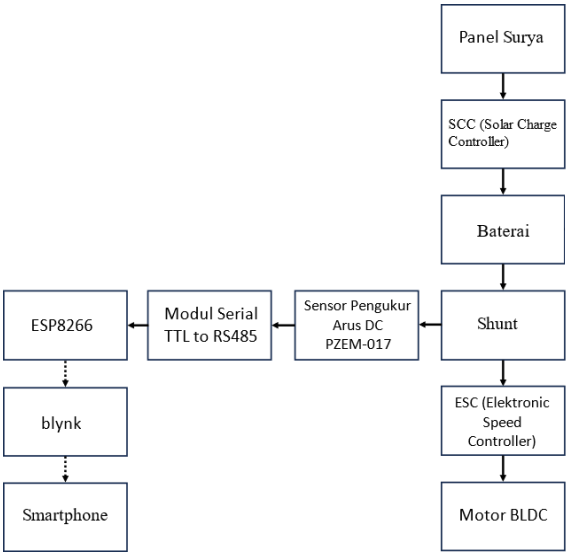
Gambar 1 Rancangan Mekanik

C. Konfigurasi Sistem Kelistrikan

Konfigurasi sistem kelistrikan ditunjukkan pada Gambar 2. Panel surya dihubungkan ke SCC untuk mengatur energi yang digunakan dalam proses pengisian baterai. Energi yang tersimpan pada baterai kemudian dialirkan ke ESC untuk mengendalikan motor BLDC.

PZEM-017 digunakan untuk memperoleh parameter kelistrikan pada sisi yang dipantau. Data hasil

pengukuran diproses oleh ESP8266 dan dikirimkan ke aplikasi Blynk sehingga pengguna dapat memantau kondisi kelistrikan secara real-time melalui smartphone. Konfigurasi tersebut sesuai dengan diagram sistem pada artikel awal.



Gambar 2. Diagram skematik sistem sumber energi dan monitoring kendaraan listrik

Aliran energi sistem dapat diringkas sebagai:

$$PV \rightarrow SCC \rightarrow Battery \rightarrow ESC \rightarrow BLDC$$

sedangkan aliran informasi monitoring adalah:

$$PZEM - 017 \rightarrow ESP8266 \rightarrow Blynk$$

D. Prinsip Pengukuran Daya Panel Surya

Daya listrik keluaran panel surya dihitung berdasarkan hasil pengukuran tegangan dan arus menggunakan persamaan:

$$P_{out} = V_{PV} \times I_{PV}$$

dengan:

- P_{out} = daya listrik keluaran panel (W);
- V_{PV} = tegangan keluaran panel (V);
- I_{PV} = arus keluaran panel (A).

Daya radiasi matahari yang diterima permukaan panel dihitung menggunakan:

$$P_{in} = G \times A_{PV}$$

dengan:

- P_{in} = daya radiasi yang masuk ke permukaan panel (W);
- G = irradiance matahari (W/m²);
- A_{PV} = luas total permukaan aktif panel (m²).

Efisiensi konversi panel dihitung menggunakan:

$$\eta_{PV} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

Persamaan tersebut digunakan untuk membandingkan energi radiasi matahari yang diterima panel

dengan energi listrik yang dihasilkan pada sisi keluaran.

E. Prosedur Pengujian Panel Surya

Pengujian panel surya dilakukan untuk mengetahui karakteristik tegangan, arus, daya keluaran, irradiance, daya radiasi masuk, dan efisiensi konversi.

Tahapan pengujian adalah:

1. Memeriksa kondisi dan koneksi panel surya.
2. Memastikan konfigurasi panel sesuai rancangan sistem.
3. Menghubungkan panel dengan SCC dan sistem baterai.
4. Mengukur irradiance pada bidang panel.
5. Mengukur tegangan dan arus keluaran panel.
6. Mencatat parameter setiap 30 menit dari pukul 09:00 hingga 17:00.
7. Menghitung daya keluaran panel menggunakan Persamaan (1).
8. Menghitung daya radiasi menggunakan Persamaan (2).
9. Menghitung efisiensi panel menggunakan Persamaan (3).
10. Membandingkan perubahan daya dan efisiensi terhadap perubahan irradiance dan kondisi pengisian baterai.

F. Pengujian Pengisian Baterai

Pengujian pengisian baterai dilakukan untuk mengetahui respons sistem PV-SCC-baterai selama proses penyimpanan energi.

Parameter yang perlu dicatat meliputi:

- tegangan baterai;
- arus pengisian;
- daya pengisian;
- SOC awal;
- SOC akhir;
- waktu mulai;
- waktu selesai;
- irradiance selama pengujian;
- kondisi cuaca.

Energi listrik selama pengisian dapat dihitung dengan:

$$E_{ch} = \int P_{ch}\,(t)dt$$

atau untuk data diskrit:

$$E_{ch} \approx \sum_{i=1}^{n} P_i\,\Delta t$$

dengan E_{ch}merupakan energi pengisian (Wh), $P_i$adalah daya pengisian pada interval pengukuran ke-i, dan Δtadalah interval waktu pengukuran.

G. Pengujian Konsumsi Daya Motor BLDC

Pengujian motor dilakukan pada tiga tingkat transmisi. Parameter listrik motor diukur menggunakan sistem sensor PZEM-017. Pengujian dilakukan untuk mengetahui kebutuhan daya listrik motor pada masing-masing tingkat transmisi.

Daya listrik motor dihitung dengan:

$$P_m = V_m I_m$$

dengan:

- P_m= daya listrik yang dikonsumsi motor (W);
- V_m= tegangan motor (V);
- I_m= arus motor (A).

Energi listrik yang digunakan selama periode pengujian dihitung dengan:

$$E_m = \int P_m\,(t)dt$$

atau:

$$E_m \approx \sum P_{m,i}\,\Delta t$$

Pengujian harus mencantumkan kondisi pembebanan, misalnya:

- massa kendaraan;
- massa pengemudi;
- kondisi permukaan lintasan;
- kecepatan kendaraan;
- kemiringan lintasan;
- durasi pengujian;
- kondisi SOC awal baterai;
- tingkat transmisi yang digunakan.

Jika data tersebut belum tersedia, bagian ini perlu dilengkapi dari catatan eksperimen.

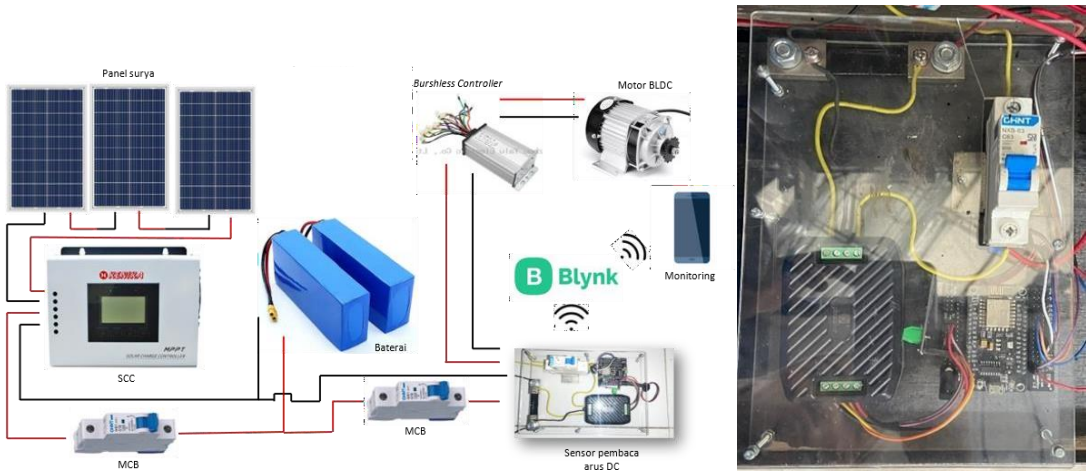
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Implementasi Sistem

Hasil implementasi kendaraan listrik ditunjukkan pada Gambar 3. Kendaraan telah berhasil direalisasikan dengan mengintegrasikan rangka kendaraan, panel surya, baterai, sistem pengendali, motor BLDC, dan perangkat monitoring.

Gambar 3. Prototipe kendaraan listrik berbasis panel surya

Rangkaian elektronik sistem ditunjukkan pada Gambar 4. Panel surya berfungsi sebagai sumber energi, SCC mengatur proses pengisian baterai, sedangkan baterai menyediakan energi listrik untuk sistem penggerak. Motor BLDC dikendalikan menggunakan ESC. Sistem monitoring menggunakan PZEM-017 yang terhubung dengan ESP8266 untuk mengirimkan data kelistrikan ke Blynk.



(a) (b)

Gambar 4 Hasil pembuatan rangkaian elektronik (a) rangkaian dari panel surya sampai ke motor BLDC (b) rangkain sensor arus dan tegangan

Gambar 4 menunjukkan energi matahari ditangkap oleh panel surya dan diubah menjadi listrik, kemudian diatur oleh *solar charge controller (SCC)* sebelum disimpan ke dalam baterai sebagai sumber utama daya kendaraan. Energi listrik dari baterai selanjutnya digunakan untuk menggerakkan motor listrik melalui motor controller. Untuk pemantauan sistem, digunakan sensor PZEM-017 yang mengukur berbagai parameter listrik seperti tegangan, arus, daya, dan energi. Data hasil pengukuran tersebut dibaca oleh mikrokontroler ESP8266 dan dikirimkan secara nirkabel ke aplikasi Blynk sehingga pengguna dapat memantau kondisi sistem secara *real-time* melalui *smartphone*.

B. Hasil Pengujian Panel Surya

Tabel 1 menunjukkan hasil pengukuran kinerja panel surya pada mobil listrik dari pukul 09:00 hingga 17:00. Parameter yang dicatat meliputi tegangan, arus, daya keluar, iradiasi, daya masuk, dan efisiensi. Nilai daya dan efisiensi meningkat seiring dengan naiknya intensitas matahari, dengan efisiensi tertinggi mencapai 22,91% pada pukul 11:30. Setelah itu, efisiensi menurun drastis bukan hanya karena intensitas matahari berubah, tetapi juga disebabkan oleh kondisi baterai yang sudah penuh, sehingga arus pengisian berkurang dan daya yang masuk ke sistem menjadi lebih kecil. Hal ini menunjukkan bahwa kinerja panel surya dipengaruhi oleh kombinasi faktor iradiasi matahari dan kapasitas penyimpanan baterai.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa daya keluaran panel surya mengalami perubahan yang cukup besar sepanjang periode pengujian. Daya keluaran berada pada rentang 6,21–214,88 W. Daya tertinggi sebesar 214,88 W diperoleh pada pukul 11:00 ketika tegangan 63,2 V dan arus 3,4 A. Efisiensi tertinggi sebesar 22,91% tercatat pada pukul 11:30. Nilai tersebut diperoleh ketika daya keluaran panel sebesar 125,16 W dan daya radiasi yang diterima permukaan panel sebesar 546,36 W.

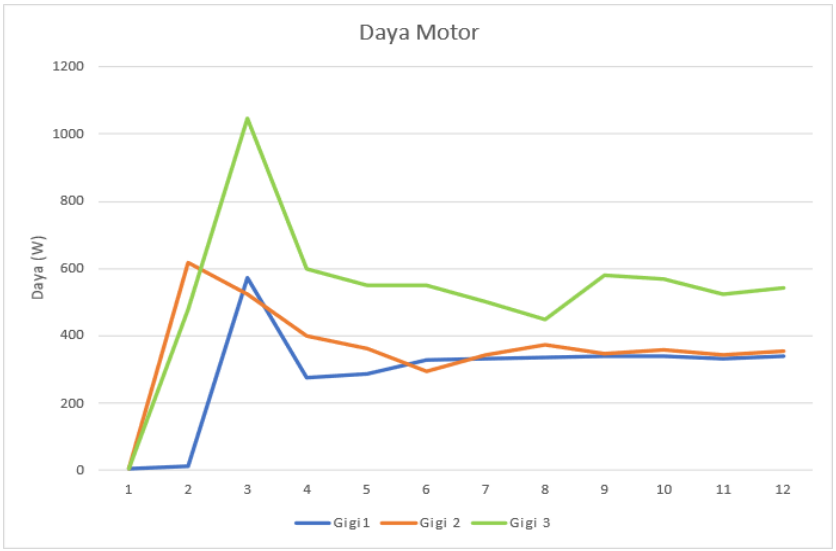
Namun, efisiensi tidak selalu meningkat seiring meningkatnya irradiance. Misalnya, pada pukul 12:00 irradiance mencapai 1079,2 W/m², tetapi daya keluaran hanya 118,18 W dengan efisiensi 7,06%. Hal tersebut menunjukkan bahwa performa sistem tidak hanya dipengaruhi oleh irradiance, tetapi juga kondisi operasi panel, temperatur, konfigurasi sistem, karakteristik SCC, dan kondisi baterai. Setelah pukul 14:00, arus keluaran turun hingga sekitar 0,1 A sehingga daya keluaran hanya sekitar 6 W. Pada naskah awal kondisi ini dikaitkan dengan baterai yang telah penuh. Interpretasi tersebut perlu diperkuat dengan data SOC atau tegangan baterai karena data SOC tidak disajikan pada tabel pengujian. Oleh karena itu, pada versi revisi, penurunan arus disebut sebagai indikasi berkurangnya arus pengisian, sedangkan hubungan langsung dengan kondisi baterai penuh perlu dikonfirmasi melalui data SOC atau karakteristik SCC.

Tabel 1 Hasil Pengujian Panel Surya

Waktu	V (V)	I (A)	Pout (W)	Irradiance (W/m²)	Pin (W)	η (%)
9:00	57,7	1,5	86,55	642,3	995,82	8,69
9:30	57,9	1,5	86,85	748,0	1159,70	7,49
10:00	58,5	2,2	128,70	954,5	1479,86	8,70
10:30	58,3	2,3	134,09	852,8	1322,18	10,14
11:00	63,2	3,4	214,88	935,7	1450,71	14,81
11:30	59,6	2,1	125,16	352,4	546,36	**22,91**
12:00	62,2	1,9	118,18	1079,2	1673,19	7,06
12:30	63,3	0,9	56,97	350,9	544,04	10,47
13:00	63,2	0,8	50,56	713,7	1106,52	4,57
13:30	63,2	0,8	50,56	514,0	796,91	6,34
14:00	63,1	0,1	6,31	230,5	357,37	1,77
14:30	62,4	0,1	6,24	480,0	744,19	0,84
15:00	62,1	0,1	6,21	136,1	211,01	2,94
15:30	62,1	0,1	6,21	715,3	1109,00	0,56
16:00	63,1	0,1	6,31	766,5	1188,38	0,53
16:30	62,4	0,1	6,24	653,5	1013,19	0,62
17:00	63,1	0,1	6,31	442,3	685,74	0,92

C. Analisis Konsumsi Daya Motor BLDC

Gambar 5 menunjukkan perubahan daya listrik yang dikonsumsi motor BLDC pada tiga tingkat transmisi. Istilah "daya yang dihasilkan motor" pada naskah awal perlu diperbaiki karena data yang ditampilkan merupakan data kelistrikan pada sisi masukan motor, bukan pengukuran daya mekanik keluaran poros.



Gambar 5 Konsumsi daya listrik motor BLDC pada tiga tingkat transmisi

Berdasarkan grafik, transmisi 3 menunjukkan kebutuhan daya listrik tertinggi, dengan puncak sekitar 1030 W. Setelah kondisi awal, konsumsi daya pada transmisi 3 berada pada kisaran 400–600 W. Transmisi 2 menunjukkan kebutuhan daya yang lebih rendah dan relatif stabil setelah fase awal pengujian, sedangkan transmisi 1 menunjukkan konsumsi daya paling rendah dengan nilai sekitar 300–350 W pada kondisi relatif stabil.

Perbedaan konsumsi daya tersebut menunjukkan bahwa perubahan tingkat transmisi memengaruhi kebutuhan daya listrik motor. Akan tetapi, data ini belum dapat digunakan untuk menyimpulkan bahwa transmisi tertentu menghasilkan daya mekanik lebih besar karena penelitian tidak melakukan pengukuran torsi dan kecepatan poros secara langsung.

D. Hubungan Sumber Energi dan Beban

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memiliki dua karakteristik energi yang berbeda. Pada sisi sumber, panel surya mampu menghasilkan daya maksimum terukur sebesar 214,88 W. Pada sisi beban, konsumsi daya motor dapat mencapai sekitar 1030 W pada kondisi pengujian transmisi 3.

Perbandingan tersebut menunjukkan bahwa daya sesaat yang dibutuhkan motor dapat jauh lebih besar daripada daya sesaat yang dihasilkan panel surya. Oleh karena itu, baterai memiliki fungsi penting sebagai *energy buffer* untuk menyimpan energi ketika pembangkitan PV tersedia dan memasok energi ketika kebutuhan beban lebih besar daripada daya PV.

Secara sederhana, neraca daya sistem dapat dinyatakan sebagai:

$$P_{PV} + P_{bat} = P_{load} + P_{loss}$$

Pada kondisi pengisian:

$$P_{PV} > P_{load}$$

sebagian energi dapat diarahkan ke baterai, sedangkan ketika kendaraan membutuhkan daya lebih besar:

$$P_{load} > P_{PV}$$

kekurangan daya harus disuplai oleh baterai.

Konsep tersebut memperlihatkan bahwa keberhasilan sistem kendaraan listrik berbasis PV tidak dapat dievaluasi hanya berdasarkan daya maksimum panel, tetapi juga harus mempertimbangkan kapasitas penyimpanan baterai, karakteristik beban motor, kondisi irradiance, dan strategi manajemen energi.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan dan pengujian sistem sumber energi kendaraan listrik berbasis panel surya, diperoleh beberapa kesimpulan.

1. Sistem sumber energi kendaraan listrik berhasil direalisasikan dengan mengintegrasikan panel surya, Solar Charge Controller (SCC), baterai, ESC, motor BLDC, sensor PZEM-017, ESP8266, dan platform Blynk. Sistem tersebut memungkinkan integrasi pembangkitan, penyimpanan, penggunaan energi, serta monitoring parameter kelistrikan secara real-time.
2. Hasil pengujian panel surya menunjukkan daya keluaran berada pada rentang 6,21–214,88 W. Daya maksimum sebesar 214,88 W diperoleh pada pukul 11:00, sedangkan efisiensi konversi maksimum sebesar 22,91% diperoleh pada pukul 11:30. Variasi daya dan efisiensi menunjukkan bahwa kinerja panel dipengaruhi oleh perubahan irradiance dan kondisi operasi sistem.
3. Setelah pukul 14:00, arus keluaran panel menurun hingga sekitar 0,1 A sehingga daya keluaran berada di sekitar 6 W. Penurunan arus tersebut menunjukkan berkurangnya energi yang dapat disalurkan dari PV pada periode akhir pengujian. Hubungan langsung antara

penurunan arus dengan kondisi baterai penuh perlu dikonfirmasi melalui data SOC dan karakteristik SCC.

4. Pengujian konsumsi daya motor menunjukkan bahwa kebutuhan daya listrik berbeda pada tiga tingkat transmisi. Transmisi 3 menghasilkan kebutuhan daya listrik tertinggi dengan puncak sekitar 1030 W, sedangkan transmisi 1 menunjukkan kebutuhan daya listrik yang lebih rendah pada kondisi stabil. Data tersebut menunjukkan bahwa tingkat transmisi memengaruhi kebutuhan energi listrik motor.
5. Perbandingan antara daya maksimum PV sebesar 214,88 W dan kebutuhan daya motor yang dapat mencapai sekitar 1030 W menunjukkan pentingnya baterai sebagai media penyimpanan dan penyangga energi. Dengan demikian, pengembangan sistem manajemen energi diperlukan agar energi PV dan energi baterai dapat dikelola sesuai kondisi pembangkitan dan kebutuhan beban.
6. Data eksperimen yang tersedia dalam penelitian ini belum cukup untuk memvalidasi secara kuantitatif klaim waktu pengisian baterai 5–6 jam dan durasi operasi motor 4–8 jam. Oleh karena itu, kedua parameter tersebut memerlukan pengujian tambahan dengan kondisi SOC, beban, irradiance, dan durasi pengujian yang terukur secara sistematis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak, khususnya dosen pembimbing, keluarga, dan teman-teman, atas dukungan dan bantuan yang telah diberikan hingga Penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

[1] S. Thangavel, D. Mohanraj, T. Girijaprasanna, S. Raju, C. Dhanamjayulu, and S. M. Muyeen, "A comprehensive review on electric vehicle: Battery management system, charging station, traction motors," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 20994–21019, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3250221.

[2] V. M. Macharia, V. K. Garg, and D. Kumar, "A review of electric vehicle technology: Architectures, battery technology and its management system, relevant standards, application of artificial intelligence, cyber security, and interoperability challenges," *IET Electrical Systems in Transportation*, vol. 13, no. 2, Art. no. e12083, 2023.

[3] M. Waseem, M. Ahmad, A. Parveen, and M. Suhaib, "Battery technologies and functionality of battery management system for EVs: Current status, key challenges, and future prospectives," *Journal of Power Sources*, vol. 580, Art. no. 233349, 2023, doi: 10.1016/j.jpowsour.2023.233349.

[4] W. Liu, T. Placke, and K. T. Chau, "Overview of batteries and battery management for electric vehicles," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 4058–4084, 2022.

[5] K. Y. Yap, H. H. Chin, and J. J. Klemeš, "Solar energy-powered battery electric vehicle charging stations: Current development and future prospect review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 169, Art. no. 112862, 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112862.

[6] D. Darwin, A. Panjaitan, and S. Suwarno, "Analisa pengaruh intensitas sinar matahari terhadap daya keluaran pada sel surya jenis monokristal," *Jurnal MESIL (Mesin Elektro Sipil)*, vol. 1, no. 2, pp. 99–106, 2020.

[7] L. Wibowo, R. Wahyusari, T. Yuwono, and A. Shofia, "IoT-based high-accuracy monitoring system for on-grid photovoltaic power system using NodeMCU ESP8266 and PZEM004T," *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*, vol. 15, no. 2, 2024.