

Analisis Kinerja Sepeda Listrik Dengan Sistem Pengisian Daya Menggunakan Panel Surya Dan Baterai *Lithium-Ion*

The Performance Analysis Of An Electric Bicycle With A Power Charging System Using Solar Panels And A Lithium-Ion Battery

1st Alfiansyah Sisway Halmahera
Telkom University
SI Teknik Elektro
Bandung, Indonesia
alfinnn@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Ekki Kurniawan
Telkom University
SI Teknik Elektro
Bandung, Indonesia
ekkekurniawan@telkomuniversity.ac.id

3rd Irham Mulkan Rodiana
Telkom University
SI Teknik Elektro
Bandung, Indonesia
irhammulkan@telkomuniversity.ac.id

I. PENDAHULUAN

Abstrak — Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja sepeda listrik dengan sistem pengisian daya berbasis energi surya menggunakan panel surya dan baterai *lithium-ion* sebagai media penyimpanan energi. Sistem dirancang untuk mengurangi ketergantungan terhadap sumber listrik konvensional dengan memanfaatkan energi matahari sebagai sumber energi alternatif. Komponen utama sistem terdiri dari panel surya monocrystalline 100 Wp, Maximum Power Point Tracking (MPPT) charge controller, baterai *lithium-ion* 36 V yang dilengkapi *Battery Management System* (BMS), serta motor *Brushless Direct Current* (BLDC) sebagai penggerak utama sepeda listrik. Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja panel surya dalam menghasilkan tegangan dan arus listrik serta menganalisis respons motor BLDC terhadap variasi bukaan *throttle*. Parameter yang diamati meliputi tegangan, arus, daya, dan kecepatan putar motor (RPM). Hasil pengujian menunjukkan bahwa panel surya mampu menghasilkan tegangan relatif stabil pada kisaran 39.7 V hingga 41.5 V, sedangkan arus yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh intensitas cahaya matahari. Daya yang terukur merupakan daya pada sisi keluaran sistem pengisian setelah melalui MPPT, sehingga nilainya dipengaruhi oleh proses konversi dan pengaturan daya. Hasil pengujian motor BLDC menunjukkan bahwa peningkatan bukaan *throttle* menyebabkan kenaikan arus dan kecepatan putar motor secara bertahap dan cenderung linier. Pada bukaan *throttle* maksimum, sepeda listrik mampu mencapai kecepatan hingga 48 km/jam. Berdasarkan hasil analisis, sistem sepeda listrik tenaga surya yang dirancang mampu bekerja secara stabil baik pada proses pengisian maupun saat pengoperasian, sehingga berpotensi menjadi alternatif transportasi yang hemat energi dan ramah lingkungan.

Kata kunci: sepeda listrik, panel surya, baterai *lithium-ion*, motor BLDC, MPPT.

Kebutuhan akan energi alternatif dan transportasi ramah lingkungan terus meningkat seiring dengan menipisnya sumber energi fosil dan meningkatnya polusi udara [1], [2]. Kendaraan bermotor berbahan bakar fosil menjadi salah satu penyumbang utama emisi gas rumah kaca, sehingga diperlukan solusi transportasi yang lebih efisien dan berkelanjutan. Sepeda listrik merupakan salah satu alternatif transportasi yang berkembang pesat karena memiliki efisiensi energi yang tinggi serta mudah digunakan [3].

Pada umumnya, sepeda listrik masih bergantung pada pengisian daya dari jaringan listrik konvensional [4]. Ketergantungan ini menjadi kendala terutama di daerah dengan keterbatasan akses listrik. Oleh karena itu, pemanfaatan energi surya sebagai sumber pengisian daya menjadi solusi potensial untuk menciptakan sistem sepeda listrik yang mandiri dan ramah lingkungan.

Penelitian ini berfokus pada analisis kinerja sepeda listrik dengan sistem pengisian daya menggunakan panel surya dan baterai *lithium-ion* [1], [6]. Analisis dilakukan dengan mengamati hubungan antara parameter listrik dan mekanik seperti tegangan, arus, dan kecepatan putar motor sebagai indikator performa dan efisiensi sistem secara keseluruhan.

II. KAJIAN TEORI

A. Sistem Energi Surya



GAMBAR 1

Panel Surya *Monocrystalline*

Sistem energi surya memanfaatkan radiasi cahaya matahari yang dikonversi menjadi energi listrik menggunakan panel surya berbasis efek fotovoltaiik [5]. Besarnya tegangan dan arus yang dihasilkan panel surya dipengaruhi oleh intensitas cahaya matahari, suhu lingkungan, serta sudut penyinaran. Pada sistem sepeda listrik tenaga surya, energi listrik dari panel surya digunakan untuk mengisi baterai sehingga memungkinkan terciptanya sistem pengisian mandiri yang berkelanjutan.

B. Baterai *Lithium-Ion* dan *Battery Management System*



GAMBAR 2

Baterai *Lithium-Ion*

Baterai *lithium-ion* digunakan sebagai media penyimpanan energi karena memiliki densitas energi yang tinggi, efisiensi pengisian yang baik, serta umur pakai yang relatif panjang [7]. Untuk menjaga keamanan dan kestabilan kinerja baterai, digunakan *Battery Management System* (BMS) yang berfungsi melindungi baterai dari kondisi overcharge, overdischarge, dan arus berlebih [8].

C. Motor BLDC dan Hubungan Parameter Listrik



GAMBAR 3

Motor BLDC

Motor *Brushless Direct Current* (BLDC) merupakan motor listrik arus searah tanpa sikat yang memiliki efisiensi tinggi dan perawatan yang rendah [9]. Kinerja motor BLDC dipengaruhi oleh tegangan dan arus yang diterima dari baterai. Hubungan daya listrik dinyatakan dengan persamaan $P = V \times I$, di mana peningkatan daya input akan meningkatkan kecepatan putar motor hingga batas efisiensi tertentu [9].

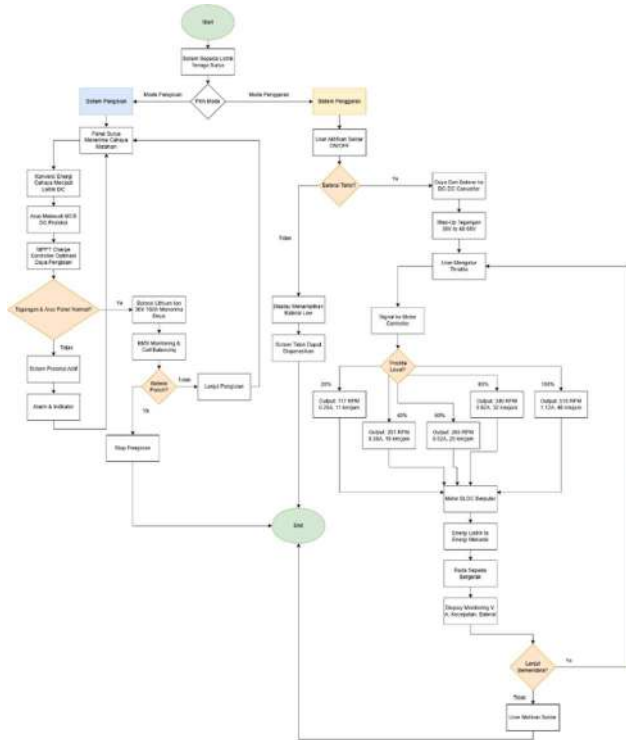
III. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan melalui tahapan perancangan sistem, perakitan perangkat keras, serta pengujian eksperimental yang mengacu pada pengembangan sepeda listrik tenaga surya pada penelitian sebelumnya [2], [4]. Sistem sepeda listrik tenaga surya terdiri dari panel surya 100 Wp, MPPT charge controller, baterai *lithium-ion* 36 V, DC-DC converter (step-up), motor controller BLDC, dan motor BLDC.

Pengujian panel surya dilakukan dengan mengukur tegangan dan arus pada berbagai kondisi intensitas cahaya matahari sebagaimana metode karakterisasi panel surya pada penelitian terdahulu [5], [6]. Pengujian motor BLDC dilakukan dengan memberikan variasi bukaan *throttle* dan mengamati perubahan arus, RPM, serta kecepatan sepeda. Pengujian dilakukan pada lintasan datar dengan kondisi cuaca alami.

Batasan penelitian ini meliputi pengujian pada lintasan datar tanpa tanjakan, penggunaan satu konfigurasi panel surya, serta tidak membahas degradasi baterai dalam jangka panjang.

A. Flowchart



GAMBAR 4

Flowchart Sistem Sepeda Listrik Tenaga Surya

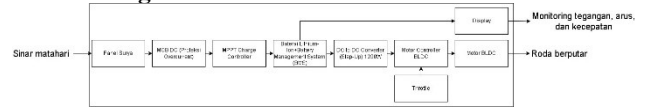
Flowchart tersebut menggambarkan alur kerja sistem sepeda listrik tenaga surya yang dimulai dari kondisi *Start*, ketika sistem diaktifkan. Setelah sistem menyala, proses utama dibagi menjadi dua jalur, yaitu sistem pengisian daya dan sistem penggerak. Pada jalur pengisian, panel surya menerima cahaya matahari dan mengubahnya menjadi energi listrik DC. Tegangan dan arus yang dihasilkan kemudian dikondisikan melalui *DC-DC converter* dan diatur oleh *MPPT charge controller* agar proses pengisian baterai *lithium-ion* berlangsung secara optimal dan aman. Selama proses ini, sistem melakukan monitoring kondisi baterai, seperti tegangan dan arus, untuk memastikan pengisian berada pada batas normal.

Apabila tegangan dan arus panel surya berada dalam kondisi normal, energi listrik akan disalurkan untuk mengisi baterai. Namun, jika terdeteksi kondisi tidak normal, seperti tegangan berlebih atau gangguan pengisian, sistem akan menghentikan proses pengisian dan menampilkan informasi atau peringatan melalui indikator. Setelah baterai terisi atau proses pengisian dihentikan, sistem dapat beralih ke mode penggerak. Pada mode ini, energi yang tersimpan di baterai digunakan sebagai sumber daya utama untuk mengoperasikan sepeda listrik.

Pada jalur sistem penggerak, pengguna mengatur bukaan *throttle* untuk menentukan kecepatan sepeda. Sinyal *throttle* dikirim ke *motor controller* yang kemudian mengatur daya listrik ke motor BLDC. Semakin besar bukaan *throttle*, semakin besar daya yang diberikan sehingga kecepatan putar motor (RPM) meningkat. Motor BLDC kemudian mengubah energi listrik menjadi energi mekanik untuk menggerakkan roda sepeda. Selama sepeda beroperasi, sistem terus

melakukan monitoring terhadap kecepatan, arus, dan kondisi baterai. Jika pengguna menghentikan sepeda atau sistem dimatikan, proses berakhir pada kondisi *End*, menandakan seluruh rangkaian kerja sistem selesai dengan aman dan terkontrol.

B. Blok Diagram



GAMBAR 5

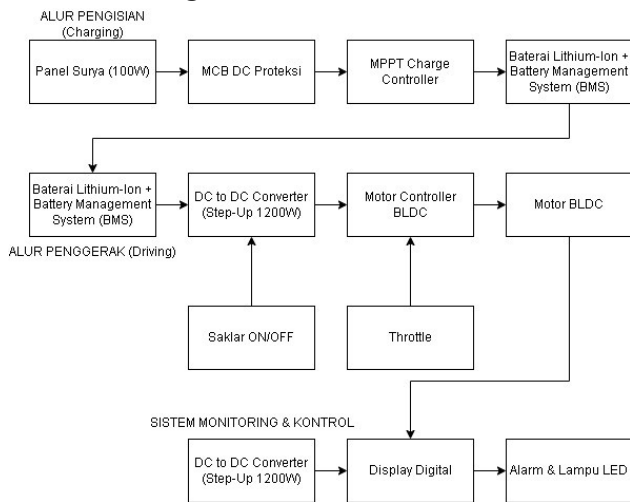
Blok Diagram Sistem Sepeda Listrik Tenaga Surya

Blok diagram tersebut menunjukkan alur kerja sistem sepeda listrik tenaga surya dari sumber energi hingga menghasilkan gerakan pada roda. Proses dimulai dari sinar matahari yang diterima oleh panel surya, kemudian diubah menjadi energi listrik arus searah (DC). Energi listrik ini terlebih dahulu melewati MCB DC yang berfungsi sebagai pengamanan untuk melindungi sistem dari arus lebih atau korsleting. Setelah itu, daya listrik diarahkan ke MPPT charge controller yang berfungsi mengatur tegangan dan arus agar panel surya bekerja pada titik daya maksimum sehingga proses pengisian menjadi lebih efisien.

Energi listrik yang telah diatur oleh MPPT kemudian disimpan pada baterai *lithium-ion* yang dilengkapi dengan *Battery Management System (BMS)*. BMS berperan penting dalam menjaga keamanan baterai, seperti mencegah pengisian berlebih, pengosongan berlebih, serta menyeimbangkan tegangan antar sel baterai [10]. Selanjutnya, energi dari baterai disalurkan ke *DC to DC converter (step-up)* untuk menyesuaikan tegangan agar sesuai dengan kebutuhan sistem penggerak sepeda listrik. Pada tahap ini, sistem juga terhubung dengan display yang menampilkan informasi penting seperti tegangan, arus, dan kondisi sistem secara real-time.

Pada bagian penggerak, energi listrik dari DC to DC converter dialirkan ke *motor controller BLDC*. *Motor controller* menerima sinyal dari *throttle* yang dioperasikan oleh pengguna untuk mengatur besar kecilnya daya yang diberikan ke motor. Semakin besar bukaan *throttle*, semakin besar daya yang disalurkan ke motor BLDC, sehingga kecepatan putar motor meningkat dan roda sepeda berputar lebih cepat. Selama sepeda beroperasi, sistem terus melakukan monitoring terhadap tegangan, arus, dan kecepatan melalui display, sehingga pengguna dapat mengetahui kondisi sepeda listrik secara langsung dan aman.

C. Desain Perangkat Keras



GAMBAR 6

Desain Perangkat Keras Sistem Sepeda Listrik Tenaga Surya

Desain perangkat keras pada gambar menunjukkan pembagian sistem sepeda listrik tenaga surya menjadi tiga bagian utama, yaitu alur pengisian (charging), alur penggerak (driving), serta sistem monitoring dan kontrol. Pada alur pengisian, energi berasal dari panel surya 100 Wp yang menerima sinar matahari dan mengubahnya menjadi energi listrik DC. Energi ini kemudian melewati MCB DC yang berfungsi sebagai pengaman dari arus lebih atau korsleting. Selanjutnya, listrik dialirkan ke MPPT charge controller untuk mengatur tegangan dan arus agar proses pengisian berlangsung pada kondisi paling efisien sebelum disimpan ke baterai *lithium-ion* yang dilengkapi *Battery Management System* (BMS).

Pada alur penggerak, energi listrik yang tersimpan di baterai *lithium-ion* digunakan untuk mengoperasikan sepeda listrik. Daya dari baterai terlebih dahulu melewati *DC to DC converter (step-up)* yang berfungsi menyesuaikan tegangan sesuai kebutuhan sistem penggerak. Tegangan hasil konversi kemudian dialirkan ke *motor controller BLDC*, yang bertugas mengatur suplai daya ke motor berdasarkan sinyal dari *throttle*. *Throttle* dioperasikan oleh pengguna untuk mengatur kecepatan sepeda, sehingga semakin besar bukaan *throttle*, semakin besar daya yang diberikan ke motor BLDC, dan roda sepeda akan berputar lebih cepat. Selain itu, terdapat saklar *ON/OFF* yang digunakan sebagai pengaman utama untuk mengaktifkan atau mematikan sistem.

Pada bagian sistem monitoring dan kontrol, tegangan dari sistem diambil melalui *DC to DC converter* untuk menyuplai daya ke display digital. Display ini berfungsi menampilkan informasi penting seperti tegangan, arus, dan kondisi kerja sistem secara real-time. Selain itu, sistem juga dilengkapi dengan alarm dan lampu LED sebagai indikator peringatan apabila terjadi kondisi tidak normal, seperti tegangan berlebih atau gangguan sistem. Dengan desain perangkat keras seperti ini, seluruh komponen saling terintegrasi dengan baik sehingga sistem sepeda listrik tenaga surya dapat bekerja secara aman, efisien, dan mudah dipantau oleh pengguna.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengujian Panel Surya

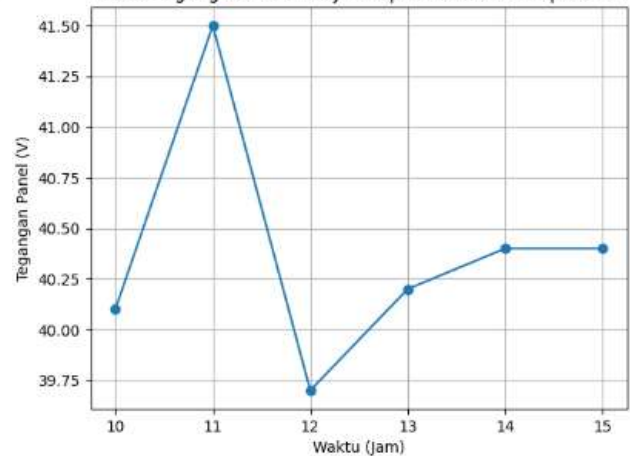
TABEL 1

Hasil Pengukuran Tegangan dan Arus Panel Surya Tanpa Beban

Waktu	Intensitas Cahaya	Tegangan Panel (V)	Arus Panel (A)	Intensitas Cahaya (Lux)
10.00	Cerah	40.1V	10.2A	41.900
11.00	Cerah	41.5V	11.0A	52.900
12.00	Sangat Cerah	39.7V	06.8A	71.200
13.00	Berawan	40.2V	10.7A	48.500
14.00	Berawan	40.4V	10.3A	45.200
15.00	Mendung ringan	40.4V	10.3A	38.700

Hasil pengujian menunjukkan bahwa panel surya mampu menghasilkan tegangan yang relatif stabil pada kisaran 39,7 V hingga 41,5 V. Arus yang dihasilkan bervariasi antara 6,8 A hingga 11,0 A tergantung pada intensitas cahaya matahari. Daya yang terukur merupakan daya keluaran sistem setelah melalui MPPT, sehingga nilainya dipengaruhi oleh proses konversi dan pengaturan daya.

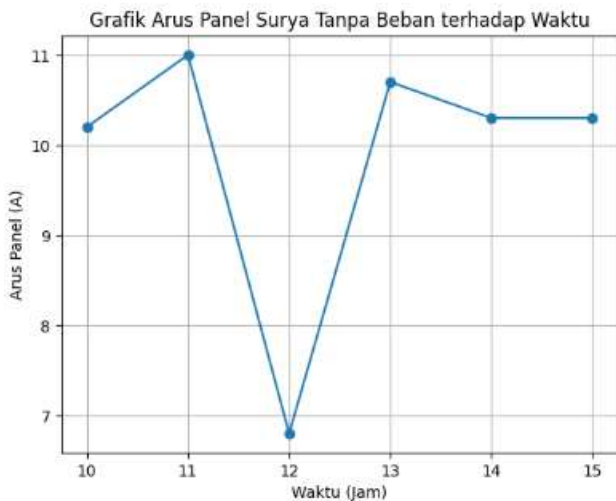
Grafik Tegangan Panel Surya Tanpa Beban terhadap Waktu



GAMBAR 7

Grafik Tegangan Panel Surya Tanpa Beban terhadap Waktu

Grafik tegangan panel surya tanpa beban terhadap waktu menunjukkan bahwa tegangan keluaran panel surya berada pada kisaran yang relatif stabil, yaitu sekitar 39.7 V hingga 41.5 V selama periode pengukuran dari pukul 10.00 hingga 15.00. Tegangan tertinggi terjadi pada pukul 11.00 sebesar 41.5 V saat kondisi cuaca cerah, sedangkan tegangan terendah terjadi pada pukul 12.00 sebesar 39.7 V. Setelah mengalami penurunan, tegangan kembali meningkat secara bertahap dan cenderung stabil hingga sore hari. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun intensitas cahaya matahari dan kondisi cuaca berubah, tegangan panel surya tanpa beban relatif konstan, yang menandakan karakteristik panel surya mampu menjaga kestabilan tegangan keluaran.



GAMBAR 8

Grafik Arus Panel Surya Tanpa Beban terhadap Waktu

Grafik arus panel surya tanpa beban terhadap waktu menunjukkan bahwa arus keluaran panel surya mengalami fluktuasi yang cukup signifikan selama periode pengukuran dari pukul 10.00 hingga 15.00. Arus tertinggi terjadi pada pukul 11.00 sebesar 11.0 A saat kondisi cuaca cerah, sedangkan arus terendah terjadi pada pukul 12.00 sebesar 6.8 A meskipun intensitas cahaya matahari tinggi. Setelah itu, arus kembali meningkat pada pukul 13.00 dan cenderung stabil hingga pukul 15.00 di kisaran 10.3 A. Hal ini menunjukkan bahwa arus panel surya sangat dipengaruhi oleh perubahan kondisi penyinaran dan faktor lingkungan, sehingga lebih mudah berfluktuasi dibandingkan tegangan panel surya.

TABEL 2

Hasil Pengukuran Tegangan dan Arus Panel Surya Dengan Beban

Waktu	Cuaca	Tegangan Panel (V)	Arus Panel (A)	Intensitas Cahaya (Lux)
10.00	Cerah	27.7 V	2.94 A	41.900
11.00	Cerah	27.9 V	3.71 A	52.900
12.00	Sangat Cerah	28.1 V	5.00 A	71.200
13.00	Berawan	27.8 V	3.45 A	48.500
14.00	Berawan	27.6 V	3.10 A	45.200
15.00	Mendung ringan	27.4 V	2.60 A	38.700

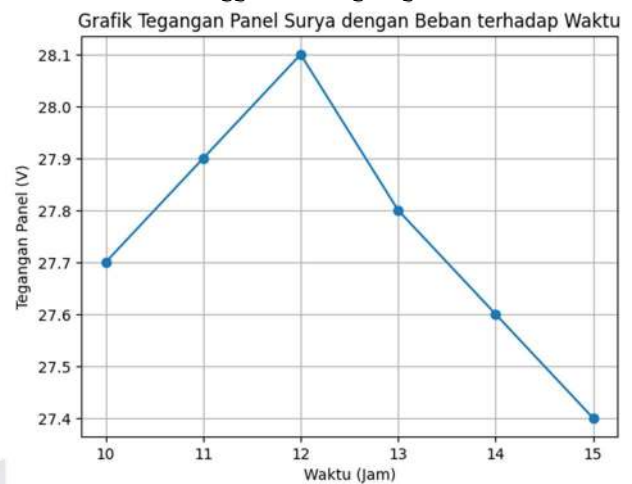
Tabel 2 menunjukkan hasil pengukuran tegangan dan arus panel surya pada kondisi dengan beban selama rentang waktu pukul 10.00 hingga 15.00. Pada kondisi ini, panel surya tidak berada pada keadaan open circuit karena energi listrik yang dihasilkan langsung digunakan oleh sistem. Dari data terlihat bahwa tegangan panel berada pada kisaran 27.4 V hingga 28.1 V, yang relatif stabil meskipun terjadi perubahan intensitas cahaya matahari. Hal ini menunjukkan bahwa adanya beban dan pengaturan dari sistem pengisian menyebabkan tegangan panel menyesuaikan pada level kerja tertentu.

Arus panel surya menunjukkan perubahan yang lebih signifikan dibandingkan tegangan. Pada pukul 10.00 hingga

12.00, ketika kondisi cuaca cerah hingga sangat cerah dan intensitas cahaya meningkat dari 41.900 lux menjadi 71.200 lux, arus panel juga meningkat dari 2.94 A menjadi 5.00 A. Hal ini menunjukkan bahwa arus keluaran panel surya sangat dipengaruhi oleh intensitas cahaya matahari. Semakin besar intensitas cahaya yang diterima panel, semakin besar arus listrik yang dihasilkan untuk memenuhi kebutuhan beban.

Setelah pukul 12.00, kondisi cuaca berubah menjadi berawan hingga mendung ringan yang menyebabkan intensitas cahaya menurun secara bertahap. Penurunan ini diikuti oleh penurunan arus panel dari 3.45 A pada pukul 13.00 menjadi 2.60 A pada pukul 15.00, sementara tegangan tetap relatif stabil. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada sistem berbeban, panel surya cenderung mempertahankan tegangan kerja, sedangkan arus menyesuaikan dengan besarnya energi matahari yang tersedia. Dengan demikian, tabel ini memperlihatkan karakteristik panel surya berbeban yang responsif terhadap perubahan intensitas cahaya dan bekerja secara stabil dalam rentang waktu pengujian.

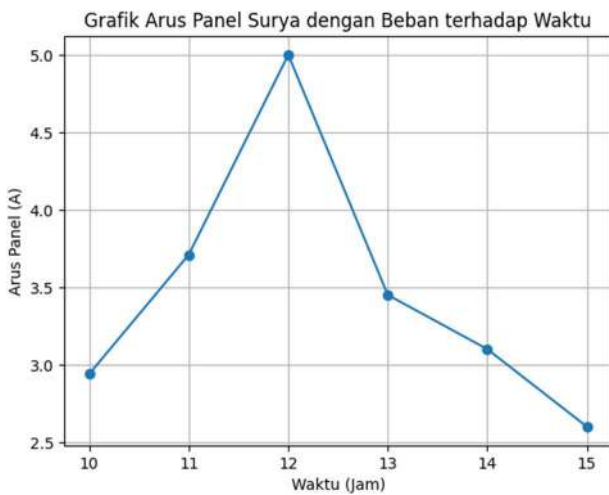
Pada kondisi berbeban, tegangan panel surya berada pada rentang 27 – 28 V karena adanya penarikan arus oleh beban dan pengaturan dari MPPT. Arus keluaran panel berbanding lurus dengan intensitas cahaya matahari, di mana nilai maksimum terjadi pada pukul 12.00 saat intensitas cahaya tertinggi, kemudian menurun seiring kondisi cuaca yang semakin berawan hingga mendung ringan.



GAMBAR 9

Grafik Tegangan Panel Surya dengan Beban terhadap Waktu

Grafik tersebut menunjukkan perubahan tegangan panel surya dengan beban terhadap waktu pengujian dari pukul 10.00 hingga 15.00. Tegangan panel meningkat secara bertahap dari pukul 10.00 sampai mencapai nilai tertinggi pada pukul 12.00, yang menandakan kondisi sinar matahari paling optimal. Setelah pukul 12.00, tegangan mulai menurun seiring dengan berkurangnya intensitas cahaya matahari akibat perubahan cuaca menjadi berawan hingga mendung ringan. Meskipun terjadi penurunan, nilai tegangan tetap berada pada kisaran yang relatif stabil, sehingga dapat disimpulkan bahwa panel surya masih mampu bekerja dengan baik dan menjaga kestabilan tegangan meskipun kondisi lingkungan berubah.



GAMBAR 10

Grafik Arus Panel Surya dengan Beban terhadap Waktu

Grafik tersebut menunjukkan perubahan arus panel surya dengan beban terhadap waktu pengujian dari pukul 10.00 hingga 15.00. Arus panel meningkat dari pukul 10.00 sampai mencapai nilai tertinggi pada pukul 12.00, yang menandakan bahwa intensitas cahaya matahari pada waktu tersebut paling besar sehingga energi listrik yang dihasilkan panel surya juga meningkat. Setelah pukul 12.00, arus panel mengalami penurunan seiring dengan berkurangnya intensitas cahaya matahari akibat kondisi cuaca yang berubah menjadi berawan hingga mendung ringan. Hal ini menunjukkan bahwa arus panel surya sangat dipengaruhi oleh ketersediaan cahaya matahari, di mana semakin tinggi intensitas cahaya matahari maka arus yang dihasilkan semakin besar, dan sebaliknya akan menurun ketika intensitas cahaya berkurang.

TABEL 3

Hasil Pengukuran Tegangan dan Arus Baterai 24 V dengan Beban

Waktu	Cuaca	Tegangan Panel (V)	Arus Panel (A)	Intensitas Cahaya (Lux)
10.00	Cerah	27.7 V	2.94 A	41.900
11.00	Cerah	27.9 V	3.71 A	52.900
12.00	Sangat Cerah	28.1 V	5.00 A	71.200
13.00	Berawan	27.8 V	3.45 A	48.500
14.00	Berawan	27.6 V	3.10 A	45.200
15.00	Mendung ringan	27.4 V	2.60 A	38.700

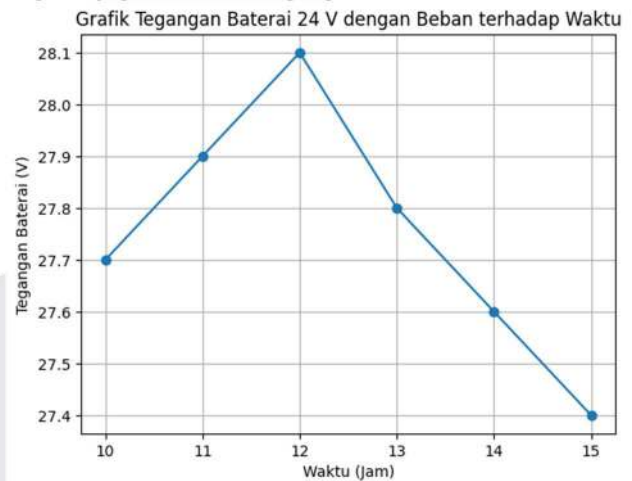
Tabel 3 menunjukkan hasil pengukuran tegangan dan arus pada baterai 24 V dalam kondisi berbeban yang dilakukan pada rentang waktu pukul 10.00 hingga 15.00 dengan variasi kondisi cuaca. Data ini memperlihatkan bagaimana baterai menerima dan menyalurkan energi listrik yang berasal dari panel surya ketika sistem sedang bekerja. Tegangan baterai berada pada kisaran 27.4 V hingga 28.1 V, yang menunjukkan bahwa baterai berada dalam kondisi kerja normal dan stabil selama proses pengujian, meskipun terjadi perubahan intensitas cahaya matahari.

Arus yang terukur pada baterai mengalami perubahan seiring dengan perubahan intensitas cahaya matahari. Pada saat cuaca cerah hingga sangat cerah, yaitu pada pukul 10.00 hingga 12.00, intensitas cahaya matahari meningkat dari

41.900 lux menjadi 71.200 lux, sehingga arus yang mengalir ke baterai juga meningkat dari 2.94 A menjadi 5.00 A. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar energi matahari yang diterima panel surya, semakin besar arus pengisian atau arus kerja yang diterima oleh baterai dalam kondisi berbeban.

Setelah pukul 12.00, kondisi cuaca berubah menjadi berawan hingga mendung ringan yang menyebabkan intensitas cahaya matahari menurun secara bertahap. Penurunan intensitas cahaya matahari ini diikuti oleh penurunan arus baterai dari 3.45 A pada pukul 13.00 menjadi 2.60 A pada pukul 15.00, sementara tegangan baterai tetap relatif stabil. Hal ini menunjukkan bahwa sistem pengisian mampu menjaga kestabilan tegangan baterai, sedangkan arus akan menyesuaikan dengan ketersediaan energi dari panel surya. Dengan demikian, tabel ini menunjukkan bahwa baterai dapat bekerja secara stabil dan responsif terhadap perubahan kondisi lingkungan selama pengujian berlangsung.

Tegangan baterai selama pengujian berada pada rentang 27.4 V hingga 28.1 V karena baterai berada dalam kondisi berbeban dan sedang menerima energi dari panel surya melalui sistem pengisian, sehingga tegangan kerja cenderung meningkat namun tetap berada dalam batas normal baterai 24 V. Perubahan arus yang terjadi dipengaruhi oleh intensitas cahaya matahari, di mana semakin tinggi intensitas cahaya matahari yang diterima panel surya maka semakin besar energi listrik yang dihasilkan dan arus yang mengalir ke baterai. Sebaliknya, saat intensitas cahaya matahari menurun akibat kondisi cuaca berawan hingga mendung, arus yang mengalir ke baterai juga ikut menurun, sementara tegangan tetap relatif stabil karena adanya sistem pengaturan pengisian yang menjaga kestabilan tegangan baterai.

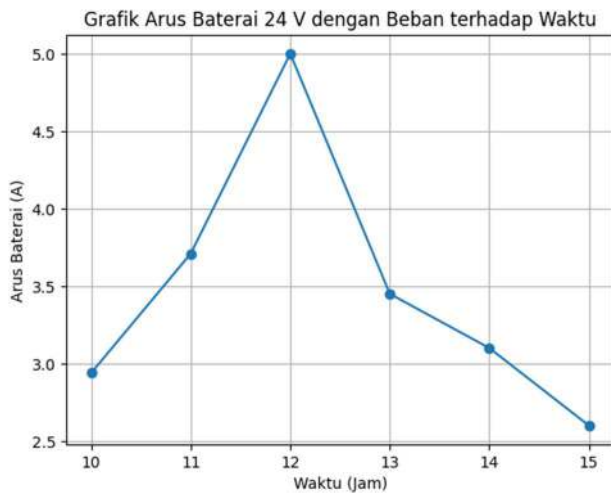


GAMBAR 11

Grafik Tegangan Baterai 24 V dengan Beban terhadap Waktu

Grafik tersebut menunjukkan perubahan tegangan panel surya dengan beban terhadap waktu pengujian dari pukul 10.00 hingga 15.00. Tegangan panel meningkat secara bertahap dari pukul 10.00 sampai mencapai nilai tertinggi pada pukul 12.00, yang menandakan kondisi sinar matahari paling optimal. Setelah pukul 12.00, tegangan mulai menurun seiring dengan berkurangnya intensitas cahaya matahari akibat perubahan cuaca menjadi berawan hingga mendung ringan. Meskipun terjadi penurunan, nilai tegangan tetap berada pada kisaran yang relatif stabil, sehingga dapat disimpulkan bahwa panel surya masih mampu bekerja

dengan baik dan menjaga kestabilan tegangan meskipun kondisi lingkungan berubah.



GAMBAR 12

Grafik Arus Baterai 24 V dengan Beban terhadap Waktu

Grafik tersebut menunjukkan perubahan arus panel surya dengan beban terhadap waktu pengujian dari pukul 10.00 hingga 15.00. Arus panel meningkat dari pukul 10.00 sampai mencapai nilai tertinggi pada pukul 12.00, yang menandakan bahwa intensitas cahaya matahari pada waktu tersebut paling besar sehingga energi listrik yang dihasilkan panel surya juga meningkat. Setelah pukul 12.00, arus panel mengalami penurunan seiring dengan berkurangnya intensitas cahaya matahari akibat kondisi cuaca yang berubah menjadi berawan hingga mendung ringan. Hal ini menunjukkan bahwa arus panel surya sangat dipengaruhi oleh ketersediaan cahaya matahari, di mana semakin tinggi intensitas cahaya matahari maka arus yang dihasilkan semakin besar, dan sebaliknya akan menurun ketika intensitas cahaya berkurang.

TABEL 4

Hasil Pengukuran Tegangan dan Arus Baterai 36 V Dengan Beban

Waktu	Cuaca	Tegangan Panel (V)	Arus Panel (A)	Intensitas Cahaya (Lux)
10.00	Cerah	27.7 V	2.94 A	41.900
11.00	Cerah	27.9 V	3.71 A	52.900
12.00	Sangat Cerah	28.1 V	5.00 A	71.200
13.00	Berawan	27.8 V	3.45 A	48.500
14.00	Berawan	27.6 V	3.10 A	45.200
15.00	Mendung ringan	27.4 V	2.60 A	38.700

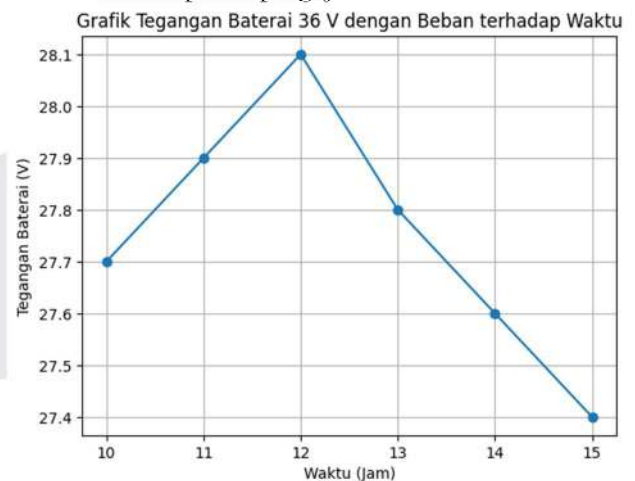
Tabel 4 menunjukkan hasil pengukuran tegangan dan arus pada baterai 36 V dalam kondisi berbeban yang dilakukan pada rentang waktu pukul 10.00 hingga 15.00 dengan variasi kondisi cuaca. Data ini menggambarkan bagaimana baterai bekerja ketika menerima dan menyalurkan energi listrik dari panel surya saat sistem sedang beroperasi. Dari tabel terlihat bahwa tegangan baterai berada pada kisaran 27.4 V hingga 28.1 V dan relatif stabil sepanjang waktu pengujian, meskipun terjadi perubahan kondisi cuaca dan intensitas cahaya matahari.

Perubahan nilai arus yang terukur pada baterai menunjukkan hubungan yang cukup jelas dengan intensitas

cahaya matahari. Pada kondisi cuaca cerah hingga sangat cerah, yaitu pada pukul 10.00 hingga 12.00, intensitas cahaya matahari meningkat dari 41.900 lux menjadi 71.200 lux, sehingga arus yang mengalir juga meningkat dari 2.94 A menjadi 5.00 A. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar energi matahari yang diterima panel surya, maka semakin besar pula arus listrik yang dapat digunakan oleh sistem untuk memenuhi kebutuhan beban dan proses kerja baterai.

Setelah pukul 12.00, kondisi cuaca berubah menjadi berawan hingga mendung ringan yang menyebabkan intensitas cahaya matahari menurun secara bertahap. Penurunan intensitas cahaya matahari ini diikuti oleh penurunan arus dari 3.45 A pada pukul 13.00 menjadi 2.60 A pada pukul 15.00, sementara tegangan baterai tetap relatif stabil. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada sistem berbeban, arus baterai sangat dipengaruhi oleh ketersediaan energi dari panel surya, sedangkan tegangan dijaga agar tetap stabil oleh sistem pengaturan daya. Dengan demikian, tabel ini menunjukkan bahwa baterai 36 V mampu bekerja secara stabil dan responsif terhadap perubahan kondisi lingkungan selama pengujian berlangsung.

Tegangan baterai 36 V pada pengujian ini berada pada kisaran 27.4 V hingga 28.1 V karena baterai bekerja dalam kondisi berbeban dan sedang menerima suplai energi dari panel surya melalui sistem pengaturan daya, sehingga tegangan yang terukur merupakan tegangan kerja sistem, bukan tegangan nominal maksimum baterai. Perubahan arus yang terjadi dipengaruhi oleh intensitas cahaya matahari yang diterima oleh panel surya, di mana peningkatan intensitas cahaya matahari menyebabkan peningkatan arus yang mengalir ke baterai, sedangkan penurunan intensitas cahaya matahari akibat kondisi berawan hingga mendung ringan menyebabkan arus menurun. Meskipun arus mengalami fluktuasi, sistem pengisian tetap mampu menjaga kestabilan tegangan baterai sehingga baterai dapat bekerja secara aman dan stabil selama proses pengujian.

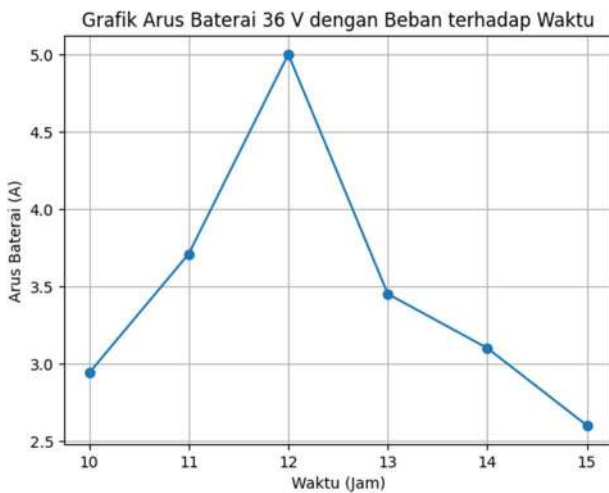


GAMBAR 13

Grafik Tegangan Baterai 36 V dengan Beban terhadap Waktu

Grafik tersebut menunjukkan perubahan tegangan panel surya dengan beban terhadap waktu pengujian dari pukul 10.00 hingga 15.00. Tegangan panel meningkat secara bertahap dari pukul 10.00 sampai mencapai nilai tertinggi pada pukul 12.00, yang menandakan kondisi sinar matahari paling optimal. Setelah pukul 12.00, tegangan mulai menurun seiring dengan berkurangnya intensitas cahaya matahari

akibat perubahan cuaca menjadi berawan hingga mendung ringan. Meskipun terjadi penurunan, nilai tegangan tetap berada pada kisaran yang relatif stabil, sehingga dapat disimpulkan bahwa panel surya masih mampu bekerja dengan baik dan menjaga kestabilan tegangan meskipun kondisi lingkungan berubah.



GAMBAR 14

Grafik Arus Baterai 36 V dengan Beban terhadap Waktu

Grafik tersebut menunjukkan perubahan arus panel surya dengan beban terhadap waktu pengujian dari pukul 10.00 hingga 15.00. Arus panel meningkat dari pukul 10.00 sampai mencapai nilai tertinggi pada pukul 12.00, yang menandakan bahwa intensitas cahaya matahari pada waktu tersebut paling besar sehingga energi listrik yang dihasilkan panel surya juga meningkat. Setelah pukul 12.00, arus panel mengalami penurunan seiring dengan berkurangnya intensitas cahaya matahari akibat kondisi cuaca yang berubah menjadi berawan hingga mendung ringan. Hal ini menunjukkan bahwa arus panel surya sangat dipengaruhi oleh ketersediaan cahaya matahari, di mana semakin tinggi intensitas cahaya matahari maka arus yang dihasilkan semakin besar, dan sebaliknya akan menurun ketika intensitas cahaya berkurang.

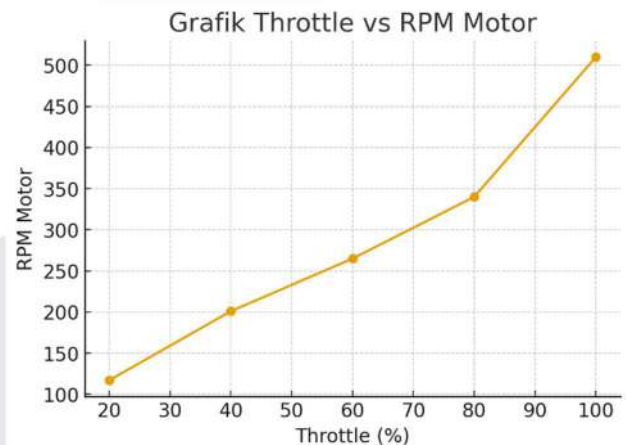
B. Hasil Pengujian Motor BLDC

TABEL 5
Pengukuran Beban Motor dan RPM

Bukaan Throttle	Tegangan Motor (V)	Arus Motor (A)	RP M Motor	Kecepatan (km/jam)	Catatan
20%	40.59 V	0.25 A	117 RPM	11 km/jam	Motor bekerja ringan, beban rendah.
40%	40.53 V	0.38 A	201 RPM	19 km/jam	Sistem mulai stabil, konsumsi daya meningkat.

60%	40.50 V	0.52 A	265 RPM	25 km/jam	Torsi meningkat, motor mulai bekerja lebih efisien.
80%	40.45 V	0.62 A	340 RPM	32 km/jam	Beban meningkat, konsumsi arus lebih tinggi.
100%	40.38 V	1.12 A	510 RPM	48 km/jam	Performa maksimum, arus dan RPM mencapai puncak.

Pengujian motor BLDC menunjukkan bahwa peningkatan bukaan throttle menyebabkan kenaikan arus dan kecepatan putar motor secara bertahap. Pada bukaan throttle 20%, motor menghasilkan kecepatan 117 RPM dengan arus 0,25 A, sedangkan pada bukaan throttle 100% kecepatan motor meningkat menjadi 510 RPM dengan arus 1,12 A. Hasil ini menunjukkan bahwa motor BLDC memiliki respons yang baik terhadap perubahan daya input.



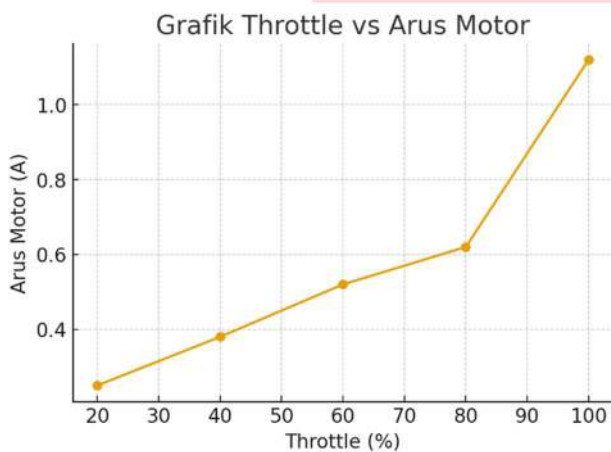
GAMBAR 15

Grafik Throttle vs RPM Motor

Grafik tersebut menunjukkan hubungan antara bukaan throttle terhadap kecepatan putar motor BLDC (RPM) pada sepeda listrik. Sumbu horizontal menggambarkan persentase bukaan throttle, sedangkan sumbu vertikal menunjukkan nilai RPM motor. Secara umum, grafik memperlihatkan bahwa semakin besar bukaan throttle yang diberikan, maka kecepatan putar motor juga semakin meningkat. Hal ini menandakan bahwa sistem penggerak sepeda listrik merespons perintah throttle dengan baik.

Pada bukaan *throttle* 20%, motor berputar dengan kecepatan sekitar 117 RPM, yang menunjukkan kondisi motor bekerja pada daya rendah. Ketika bukaan *throttle* dinaikkan menjadi 40% dan 60%, kecepatan motor meningkat masing-masing menjadi sekitar 200 RPM dan 265 RPM. Kenaikan ini terjadi secara bertahap dan relatif linier, yang menunjukkan bahwa suplai daya dari baterai ke motor BLDC diatur secara proporsional oleh *motor controller*.

Pada bukaan *throttle* yang lebih besar, yaitu 80% dan 100%, kecepatan motor meningkat secara signifikan hingga mencapai sekitar 340 RPM dan 510 RPM. Kondisi ini menunjukkan bahwa motor BLDC mampu menghasilkan kecepatan maksimum saat menerima daya yang lebih besar dari sistem. Hubungan yang hampir linier antara *throttle* dan RPM ini membuktikan bahwa sistem pengendalian motor bekerja secara stabil dan responsif, sehingga mendukung performa sepeda listrik yang nyaman dan mudah dikendalikan oleh pengguna.



GAMBAR 16
Grafik *Throttle* vs Arus Motor

Grafik tersebut menunjukkan hubungan antara bukaan *throttle* dengan arus yang mengalir pada motor BLDC pada sepeda listrik. Sumbu horizontal menyatakan persentase bukaan *throttle*, sedangkan sumbu vertikal menunjukkan besar arus motor dalam satuan ampere (A). Secara umum, grafik memperlihatkan bahwa arus motor meningkat seiring dengan bertambahnya bukaan *throttle*, yang menandakan bahwa semakin besar perintah kecepatan dari pengguna, semakin besar pula daya listrik yang dibutuhkan oleh motor.

Pada bukaan *throttle* 20%, arus motor masih relatif kecil, yaitu sekitar 0,25 A, yang menunjukkan bahwa motor bekerja pada kondisi beban ringan. Ketika bukaan *throttle* dinaikkan menjadi 40% dan 60%, arus motor meningkat menjadi sekitar 0,38 A dan 0,52 A. Peningkatan ini terjadi secara bertahap dan stabil, yang menunjukkan bahwa *motor controller* mampu mengatur suplai arus ke motor dengan baik sesuai dengan perintah *throttle*.

Pada bukaan *throttle* yang lebih tinggi, yaitu 80% dan 100%, arus motor meningkat lebih signifikan hingga

mencapai sekitar 0,62 A dan 1,12 A. Hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi kecepatan tinggi, motor BLDC membutuhkan arus yang lebih besar untuk menghasilkan torsi dan kecepatan yang lebih tinggi. Hubungan yang cenderung meningkat dan terkontrol antara *throttle* dan arus motor ini membuktikan bahwa sistem penggerak sepeda listrik bekerja secara responsif dan efisien, serta sesuai dengan karakteristik kerja motor BLDC.

C. Analisis Kinerja dan Efisiensi Sistem

Berdasarkan hasil pengujian, hubungan antara tegangan, arus, dan kecepatan motor menunjukkan karakteristik yang linier dan stabil. Energi yang dihasilkan panel surya dapat disalurkan dengan baik ke baterai dan dimanfaatkan oleh motor BLDC dengan tingkat kehilangan daya yang masih dalam batas wajar. Dengan demikian, sistem sepeda listrik tenaga surya yang dirancang dinilai memiliki kinerja yang baik dan layak digunakan sebagai alternatif transportasi yang hemat energi dan ramah lingkungan.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan menguji sistem sepeda listrik dengan pengisian daya menggunakan panel surya dan baterai *lithium-ion* sebagai sumber energi utama. Berdasarkan hasil pengujian, panel surya mampu menghasilkan tegangan dan arus yang cukup untuk mengisi baterai *lithium-ion* 36 V secara stabil. Pengukuran intensitas cahaya matahari dilakukan menggunakan *luxmeter*, sehingga hubungan antara kondisi pencahayaan dan kinerja panel surya dapat diamati secara lebih terukur.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa perubahan intensitas cahaya matahari yang terukur oleh *luxmeter* berpengaruh langsung terhadap nilai tegangan dan arus keluaran panel surya. Semakin tinggi nilai intensitas cahaya matahari, maka semakin besar daya listrik yang dihasilkan oleh panel surya. Hal ini menunjukkan bahwa sistem pengisian daya bekerja sesuai dengan karakteristik dasar panel surya dan teori konversi energi surya.

Pengujian motor BLDC menunjukkan adanya hubungan yang sebanding antara bukaan *throttle*, arus motor, dan kecepatan putar motor (RPM). Sepeda listrik mampu mencapai kecepatan maksimum sebesar 48 km/jam pada kondisi pengujian, yang menandakan bahwa energi hasil pengisian dari panel surya dapat dimanfaatkan secara efektif. Secara keseluruhan, sistem sepeda listrik tenaga surya ini layak digunakan sebagai alternatif transportasi yang hemat energi dan ramah lingkungan.

REFERENSI

- [1] M. Abdillah, F. Azis, K. Karo, F. Risqullah, N. F. Silalahi, and S. Aryza, "Solar Cell Electric Bike In The Development Of Environmentally Transportation Technology," *Jurnal Scientia*, vol. 13, 2024, doi: 10.58471/scientia.v13i04.
- [2] S. Adhisuwignjo, I. Siradjuddin, M. Rifa'i, and R. I. Putri, "Development of a solar-powered electric bicycle in bike sharing transportation system," *IOP*

- Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 70, p. 012025, Jun. 2017, doi: 10.1088/1755-1315/70/1/012025.
- [3] M. Latif, A. Valdesio, and M. Muharam, "Energi Listrik dari Pengereman Regeneratif Sepeda Motor dengan Menggunakan Dinamo Sepeda," *JURNAL NASIONAL TEKNIK ELEKTRO*, vol. 7, no. 2, p. 90, Jul. 2018, doi: 10.25077/jnte.v7n2.503.2018.
- [4] D. Pawar, S. Ghonge, S. Patil, and P. Ahire Vivek Yakkundi, "Review Paper on Solar Powered E-Bike," *Int J Innov Sci Res Technol*, vol. 7, no. 11, 2022, [Online]. Available: <https://www.jetir.org>
- [5] M. M. Hasan *et al.*, "Harnessing Solar Power: A Review of Photovoltaic Innovations, Solar Thermal Systems, and the Dawn of Energy Storage Solutions," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 18, p. 6456, Sep. 2023, doi: 10.3390/en16186456.
- [6] G. Apostolou, A. Reinders, and K. Geurs, "An Overview of Existing Experiences with Solar-Powered E-Bikes," *Energies (Basel)*, vol. 11, no. 8, Aug. 2018, doi: 10.3390/en11082129.
- [7] K. R. Ngoy *et al.*, "Lithium-ion batteries and the future of sustainable energy: A comprehensive review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 223, p. 115971, Nov. 2025, doi: 10.1016/j.rser.2025.115971.
- [8] R. Suganya, L. M. I. Joseph, and S. Kollem, "Understanding *lithium-ion battery management systems* in electric vehicles: Environmental and health impacts, comparative study, and future trends: A review," *Results in Engineering*, vol. 24, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.103047.
- [9] J. Karthikeyan and R. Dhana Sekaran, "Current control of brushless dc motor based on a common dc signal for space operated vehicles," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 33, no. 10, pp. 1721–1727, Dec. 2011, doi: 10.1016/j.ijepes.2011.08.014.
- [10] K. K and P. P, "Analysis of cell balancing of Li-ion batteries with dissipative and non-dissipative systems for electric vehicle applications," *Energy Reports*, vol. 12, pp. 2408–2428, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.egy.2024.08.023.
- [11] G. A. Ramdhani, E. Kurniawan, and P. Pangaribuan, "Rancang bangun PLTS hybrid pada sistem hidroponik," *eProceedings of Engineering*, vol. 11, no. 5, 2024.
- [12] M. H. Fadhilah, E. Kurniawan, and U. Sunarya, "Perancangan dan implementasi MPPT charge controller pada panel surya menggunakan mikrokontroler untuk pengisian baterai sepeda listrik," *eProceedings of Engineering*, vol. 4, no. 3, 2017.
- [13] R. P. Hanifan, E. Kurniawan, and E. Susanto, "Integrasi modul sel surya pada baterai aluminium," *eProceedings of Engineering*, vol. 11, no. 5, 2024.
- [14] N. Wicaksanajati, E. Kurniawan, and U. K. Usman, "Analisis pembuatan elektrolit dengan panel surya," *eProceedings of Engineering*, vol. 11, no. 5, 2024.