

Analisis kinerja sistem pembangkit listrik tenaga surya pada prototipe robot pengangkut sampah perairan

Rizki Nugraha, Yosi Apriani*, Fadila, Wiwin A Oktaviani, Zulkifli Saleh

Universitas Muhammadiyah Palembang

E-mail: *yosi_apriani@um-palembang.ac.id

ABSTRAK

Pemanfaatan energi terbarukan menjadi salah satu solusi strategis dalam mendukung teknologi ramah lingkungan, khususnya untuk penanganan permasalahan sampah di perairan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang diterapkan pada prototipe robot pengangkut sampah perairan. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimental kuantitatif, dengan melakukan pengukuran langsung terhadap parameter kelistrikan sistem, meliputi tegangan, arus, dan daya keluaran panel surya, serta kinerja sistem pengisian baterai. Sistem PLTS terdiri atas panel surya polikristalin berkapasitas 10 Wp, solar charge controller tipe PWM, dan baterai VRLA 12 V sebagai penyimpan energi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kebutuhan daya total robot sebesar 27,82 W, dengan arus operasi sekitar 2,28 A pada tegangan baterai 12,2 V, sehingga robot mampu beroperasi selama ± 1 jam per siklus kerja. Panel surya menghasilkan daya maksimum sebesar 7,70 W pada kondisi cuaca cerah sekitar pukul 11.00 WIB, sedangkan solar charge controller mampu menjaga kestabilan tegangan pengisian pada 14,4 V dengan daya keluaran maksimum mencapai 20,73 W. Hasil analisis menunjukkan bahwa sistem PLTS mampu mendukung operasional prototipe robot melalui mekanisme pengisian baterai, namun kapasitas panel surya masih memiliki keterbatasan untuk suplai daya langsung. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan sistem PLTS yang lebih optimal pada aplikasi robot lingkungan perairan.

Kata Kunci: Pembangkit Listrik Tenaga Surya, analisis kinerja, robot pengangkut sampah, perairan, energi terbarukan.

ABSTRACT

The utilization of renewable energy represents a strategic solution to support environmentally friendly technologies, particularly in addressing waste problems in aquatic environments. This study aims to analyze the performance of a Solar Power Generation System (SPGS) applied to a prototype of an aquatic waste-collecting robot. A quantitative experimental method was employed by conducting direct measurements of the system's electrical parameters, including voltage, current, and power output of the solar panel, as well as the performance of the battery charging system. The SPGS consists of a 10 Wp polycrystalline solar panel, a PWM-type solar charge controller, and a 12 V VRLA battery as the energy storage unit. The experimental results indicate that the robot requires a total power of 27.82 W, with an operating current of approximately 2.28 A at a battery voltage of 12.2 V, enabling the robot to operate for approximately 1 hour per working cycle. The solar panel produced a maximum power output of 7.70 W under clear weather conditions at around 11:00 a.m., while the solar charge controller successfully maintained a stable charging voltage of 14.4 V with a maximum output power of 20.73 W. The performance analysis shows that the SPGS is capable of supporting the robot's operation through battery charging; however, the solar panel capacity remains insufficient for direct power supply. This



study provides a foundation for further optimization of solar power systems in aquatic environmental robotics applications.

Keywords: *Solar power generation system, performance analysis, waste-collecting robot, aquatic environment, renewable energy.*

Tersedia pada: <https://doi.org/10.62391/ejmi.v7i2.130>

Disubmit pada 30/10/2025	Direview pada 10/11/2025	Direvisi pada 20/11/2025
Diterima pada 30/11/2025	Diterbitkan pada 01/12/2025	

PENDAHULUAN

Permasalahan sampah di wilayah perairan merupakan isu lingkungan yang semakin serius dan memerlukan penanganan berkelanjutan. Peningkatan jumlah penduduk, aktivitas permukiman di bantaran sungai, serta rendahnya kesadaran masyarakat terhadap pengelolaan sampah berkontribusi terhadap meningkatnya pencemaran perairan. Sampah yang menumpuk di sungai tidak hanya mengganggu estetika lingkungan, tetapi juga berdampak pada kualitas air, ekosistem perairan, serta keselamatan aktivitas transportasi dan masyarakat di sekitarnya [1].

Di sisi lain, Indonesia memiliki potensi energi surya yang sangat besar karena terletak di wilayah khatulistiwa. Rata-rata intensitas radiasi matahari di Indonesia mencapai sekitar 4,5 kWh/m² per hari dengan durasi penyinaran sekitar 10–12 jam per hari sepanjang tahun [2]. Potensi tersebut menjadikan energi surya sebagai salah satu sumber energi terbarukan yang sangat prospektif untuk dimanfaatkan pada berbagai aplikasi teknologi, termasuk sistem kelistrikan skala kecil dan mandiri. Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dinilai mampu mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil sekaligus mendukung pengembangan teknologi ramah lingkungan [3].

Seiring berkembangnya teknologi, penerapan sistem robotik dalam pengelolaan lingkungan mulai banyak dikembangkan, salah satunya adalah robot pengangkut sampah di perairan. Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji perancangan robot pengangkut sampah berbasis mikrokontroler dengan berbagai mekanisme pengambilan sampah. Mauliadi *dkk.* merancang robot boat pemungut sampah yang dioperasikan secara *teleoperated* dengan sistem conveyor sebagai alat pengambil sampah [4]. Penelitian lain oleh Kosim dan Damayanti mengembangkan robot pembersih sampah otomatis berbasis mikrokontroler yang berfokus pada sistem navigasi dan mekanisme pembersihan [5].

Selain aspek robotika, pemanfaatan energi surya sebagai sumber daya robot juga telah diteliti. Evalina *dkk.* menerapkan sistem PLTS pada robot penyemprot disinfektan dengan menggunakan panel surya dan baterai sebagai penyimpan energi, serta regulator untuk menjaga kestabilan tegangan pengisian [6]. Rohman *dkk.* mengembangkan robot pembersih sampah yang dilengkapi dengan sistem pemilahan sampah organik dan anorganik berbasis sensor warna, namun sistem energinya masih bergantung pada sumber daya konvensional [7].

Berdasarkan kajian terhadap penelitian sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa sebagian besar penelitian robot pengangkut sampah lebih menitikberatkan pada aspek mekanisme pengambilan sampah, navigasi, dan sistem kontrol robot. Sementara itu, analisis kinerja sistem

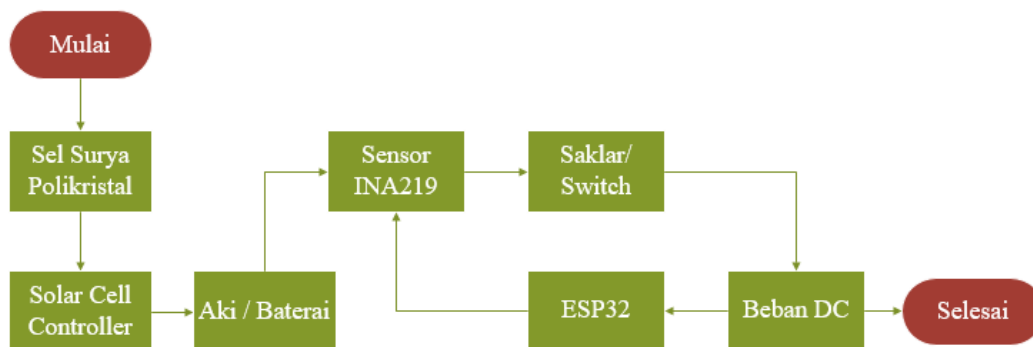
PLTS sebagai sumber energi utama pada robot pengangkut sampah perairan masih relatif terbatas, khususnya yang membahas hubungan antara kebutuhan energi robot, daya keluaran panel surya, serta kestabilan sistem pengisian baterai dalam kondisi operasi nyata.

Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada analisis kinerja sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang diterapkan pada prototipe robot pengangkut sampah perairan. Analisis dilakukan dengan mengevaluasi kebutuhan energi total robot, karakteristik daya keluaran panel surya, serta kinerja solar charge controller dalam menjaga kestabilan tegangan pengisian baterai. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi teknis dalam pengembangan sistem energi terbarukan yang lebih optimal untuk aplikasi robot lingkungan perairan serta menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya di bidang robotika berbasis energi surya.

METODOLOGI PENELITIAN

Jenis, Lokasi, dan Waktu Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental kuantitatif untuk menganalisis kinerja sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) pada prototipe robot pengangkut sampah perairan. Pendekatan eksperimental dipilih karena memungkinkan pengukuran langsung terhadap parameter kelistrikan sistem secara nyata, sehingga performa PLTS dapat dievaluasi secara objektif dan terukur berdasarkan data hasil pengujian [8-9]. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Elektronika Program Studi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Palembang. Kegiatan penelitian berlangsung selama enam bulan, dimulai pada Maret 2024, yang mencakup tahap perancangan sistem, perakitan prototipe, pengujian kinerja komponen, serta pengambilan dan analisis data.



Gambar 1. Blok diagram protipe robot pengangkut sampah.

Objek dan Konfigurasi Sistem Penelitian

Objek penelitian adalah sistem PLTS yang diterapkan pada prototipe robot pengangkut sampah perairan. Sistem PLTS terdiri atas panel surya polikristalin berkapasitas 10 Wp, solar charge controller (SCC) tipe PWM, dan baterai VRLA 12 V sebagai media penyimpanan energi. Panel surya berfungsi mengonversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik melalui proses fotovoltaiik, kemudian energi tersebut diatur oleh SCC sebelum disimpan ke dalam baterai guna menjaga kestabilan tegangan pengisian dan mencegah kerusakan baterai akibat overcharging [10-11]. Baterai digunakan sebagai sumber daya utama bagi seluruh komponen robot, sehingga panel surya tidak menyuplai beban secara langsung. Untuk keperluan pemantauan kinerja sistem, digunakan sensor arus dan tegangan INA219 yang

terhubung dengan mikrokontroler Arduino Mega 2560 dan modul ESP32 untuk pencatatan data kelistrikan secara real time.

Prosedur Pengujian dan Pengambilan Data

Tahapan penelitian diawali dengan perakitan prototipe robot dan integrasi sistem PLTS sesuai konfigurasi yang telah dirancang. Pengujian kebutuhan energi robot dilakukan dengan mengukur arus listrik pada setiap komponen utama, seperti motor penggerak, conveyor belt, dan rangkaian kontrol, untuk menentukan kebutuhan daya total sistem selama satu siklus operasi [12]. Selanjutnya, pengujian kinerja panel surya dilakukan dengan mengukur tegangan dan arus keluaran panel pada berbagai waktu pengujian, mulai dari pagi hingga sore hari, guna memperoleh karakteristik daya keluaran panel surya terhadap perubahan intensitas cahaya matahari. Pengujian solar charge controller dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan regulator dalam menjaga kestabilan tegangan pengisian baterai pada batas aman, yaitu sekitar 14,4 V untuk baterai VRLA, sebagaimana direkomendasikan dalam sistem pengisian berbasis PLTS [13].

Metode Analisis Data

Analisis data dilakukan secara kuantitatif dengan menggunakan persamaan dasar kelistrikan. Daya listrik dihitung berdasarkan hasil pengukuran tegangan dan arus menggunakan persamaan $P = V \times I$, sedangkan energi listrik dihitung menggunakan persamaan $E = P \times t$, dengan P adalah daya (W), V adalah tegangan (V), I adalah arus (A), dan t adalah waktu operasi (jam) [14]. Hasil perhitungan daya dan energi selanjutnya dibandingkan dengan kapasitas sistem PLTS untuk mengevaluasi kecukupan daya panel surya dalam mendukung kebutuhan energi robot. Evaluasi kinerja sistem PLTS didasarkan pada kesesuaian antara daya keluaran panel surya, kestabilan tegangan pengisian baterai, serta kemampuan sistem dalam mendukung operasional robot sesuai durasi yang direncanakan.

Tabel 1. Spesifikasi sistem PLTS dan prototipe robot.

Komponen	Spesifikasi Utama	Fungsi
Panel Surya	Polikristalin, 10 Wp	Sumber energi pengisian
Solar Charge Controller	PWM, 30 A	Pengatur pengisian baterai
Baterai	VRLA 12 V, 12 Ah	Penyimpan energi
Mikrokontroler	Arduino Mega 2560	Kendali sistem
Modul IoT	ESP32	Monitoring data
Sensor	INA219	Pengukuran arus & tegangan
Aktuator	Motor DC & conveyor	Penggerak robot

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Kebutuhan Energi Prototipe Robot Pengangkut Sampah

Analisis kebutuhan energi merupakan tahap awal yang krusial untuk menilai kecukupan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dalam mendukung operasional prototipe robot pengangkut sampah perairan. Pengukuran dilakukan terhadap seluruh komponen kelistrikan yang bekerja selama robot beroperasi, meliputi motor penggerak kanan dan kiri, conveyor belt sebagai mekanisme pengangkut sampah, serta rangkaian kontrol berbasis mikrokontroler dan

modul komunikasi.

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa total arus yang dibutuhkan oleh sistem mencapai 2,28 A pada tegangan baterai 12,2 V. Berdasarkan persamaan dasar kelistrikan $P = V \times I$, diperoleh daya total sistem sebesar 27,82 W. Dengan asumsi durasi operasi robot selama 1 jam per siklus kerja, maka kebutuhan energi listrik sistem adalah 27,82 Wh.



Gambar 2. Foto rancangan robot pengangkut sampah dalam posisi tampak belakang, tampak samping, dan tampak depan.

Nilai kebutuhan energi ini menunjukkan bahwa prototipe robot termasuk dalam kategori beban daya menengah untuk aplikasi robot lingkungan. Beban terbesar berasal dari motor penggerak dan conveyor belt, yang bekerja secara simultan selama proses pengangkutan sampah. Kondisi ini umum ditemukan pada sistem robotik yang memiliki aktuator mekanik aktif, sebagaimana dilaporkan dalam penelitian robot pembersih perairan sebelumnya [15-16]. Oleh karena itu, perancangan sistem PLTS harus mempertimbangkan karakteristik beban dinamis yang fluktuatif selama operasi robot.

Tabel 2. Kebutuhan arus dan daya komponen robot.

Komponen	Arus (A)
Motor penggerak kanan	0,50
Motor penggerak kiri	0,50
Conveyor belt	0,40
Arduino Mega 2560	0,01
ESP32	0,05
Total Arus	2,28

Parameter	Nilai
Tegangan baterai	12,2 V
Daya total	27,82 W
Energi per siklus (1 jam)	27,82 Wh

Karakteristik Kinerja Panel Surya

Pengujian kinerja panel surya dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan panel dalam menghasilkan daya listrik sebagai sumber energi utama sistem PLTS. Panel surya polikristalin berkapasitas 10 Wp diuji dengan mengukur tegangan dan arus keluaran pada interval waktu tertentu, mulai dari pagi hingga sore hari, guna merepresentasikan variasi intensitas radiasi matahari.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa tegangan keluaran panel berada pada kisaran 13,4–14,0 V, sedangkan arus keluaran bervariasi antara 0,20–0,56 A. Daya keluaran panel dihitung berdasarkan hasil pengukuran tersebut, dengan daya maksimum tercatat sebesar 7,70 W pada

pukul 11.00 WIB saat kondisi cuaca cerah. Pada rentang waktu 11.00–13.00 WIB, daya keluaran panel relatif stabil dan mendekati nilai maksimum, sebelum mengalami penurunan secara bertahap pada sore hari.

Secara teoritis, panel surya jarang menghasilkan daya puncak sesuai kapasitas nominalnya akibat faktor non-ideal, seperti sudut datang cahaya, temperatur permukaan panel, serta rugi-rugi sistem [17]. Hasil pengujian ini mengonfirmasi teori tersebut, di mana panel surya 10 Wp hanya mampu menghasilkan sekitar 70–80% dari daya nominalnya pada kondisi lapangan. Fenomena serupa juga dilaporkan oleh Markvart dan Castaner, yang menyatakan bahwa performa panel surya di lapangan sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan karakteristik material panel [18].

Tabel 3. Kinerja panel surya terhadap waktu pengujian.

Waktu (WIB)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	Kondisi Cuaca
08.00	13,4	0,29	3,88	Cerah berawan
09.00	13,5	0,32	4,32	Cerah berawan
10.00	13,8	0,32	4,41	Cerah
11.00	14,0	0,55	7,70	Cerah
12.00	14,0	0,56	7,84	Cerah
13.00	14,0	0,56	7,84	Cerah
14.00	13,9	0,53	7,36	Cerah
15.00	13,9	0,39	5,42	Cerah
16.00	13,6	0,21	2,85	Cerah berawan
17.00	13,4	0,20	2,68	Cerah berawan

Evaluasi Kinerja Solar Charge Controller

Solar charge controller (SCC) berperan penting dalam sistem PLTS, khususnya dalam mengatur proses pengisian baterai agar tetap berada pada batas aman. Pada penelitian ini, SCC tipe PWM digunakan untuk mengendalikan pengisian baterai VRLA 12 V.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa tegangan keluaran SCC meningkat seiring dengan kenaikan tegangan input dari panel surya, hingga mencapai kondisi stabil pada 14,4 V. Kondisi stabil ini mulai tercapai ketika tegangan input panel melebihi 15,7 V, dengan arus keluaran maksimum sebesar 1,44 A dan daya keluaran mencapai 20,73 W.

Kestabilan tegangan pengisian pada nilai 14,4 V menunjukkan bahwa SCC bekerja sesuai dengan karakteristik pengisian baterai VRLA, di mana tegangan tersebut merupakan batas pengisian aman untuk mencegah overcharging dan degradasi baterai [19]. Meskipun SCC tipe PWM memiliki efisiensi yang lebih rendah dibandingkan tipe MPPT, hasil pengujian menunjukkan bahwa SCC masih mampu menjaga kestabilan sistem pengisian secara efektif pada kapasitas sistem yang relatif kecil.

Tabel 4. Kinerja Solar Charge Controller (SCC).

Tegangan Input (V)	Tegangan Output (V)	Arus Output (A)	Daya Output (W)
12,4	11,1	1,10	12,21
13,8	13,3	1,32	17,43
14,9	14,2	1,41	20,02
≥15,7	14,4	1,44	20,73

Hubungan Kinerja Sistem PLTS dengan Operasional Robot

Berdasarkan hasil analisis kebutuhan energi dan kinerja komponen PLTS, dapat diketahui

bahwa daya maksimum yang dihasilkan panel surya (7,70 W) jauh lebih kecil dibandingkan kebutuhan daya robot (27,82 W). Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem PLTS tidak dirancang untuk menyuplai daya robot secara langsung, melainkan berfungsi sebagai sumber pengisian energi ke baterai.

Baterai VRLA berperan sebagai buffer energi yang memungkinkan robot beroperasi secara stabil meskipun daya keluaran panel surya berfluktuasi. Konsep ini umum digunakan pada sistem PLTS skala kecil untuk aplikasi robotik dan sistem mandiri, sebagaimana dijelaskan oleh Dincer dan Rosen [20]. Selama baterai berada dalam kondisi terisi, robot dapat beroperasi sesuai durasi yang direncanakan tanpa ketergantungan langsung terhadap intensitas cahaya matahari. Namun demikian, waktu pengisian baterai menjadi relatif lama akibat keterbatasan kapasitas panel surya. Hal ini menjadi faktor pembatas dalam peningkatan durasi dan fleksibilitas operasi robot, terutama jika digunakan secara berulang dalam satu hari.

Diskusi Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Jika dibandingkan dengan penelitian robot pengangkut sampah sebelumnya, sebagian besar penelitian lebih berfokus pada aspek mekanik dan navigasi robot [15, 21]. Penelitian ini memberikan kontribusi tambahan dengan menitikberatkan pada analisis kinerja sistem PLTS sebagai sumber energi utama robot.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kapasitas panel surya 10 Wp masih belum optimal untuk mendukung beban robot secara langsung. Temuan ini sejalan dengan penelitian Purwoto *dkk.* yang menyatakan bahwa pemilihan kapasitas panel surya harus mempertimbangkan faktor efisiensi sistem dan rugi-rugi daya [19]. Dengan demikian, peningkatan kapasitas panel atau penggunaan SCC tipe MPPT menjadi rekomendasi logis untuk pengembangan sistem di masa mendatang.

Keterbatasan dan Implikasi Teknis

Keterbatasan utama penelitian ini terletak pada kapasitas panel surya yang relatif kecil dan pengujian yang masih terbatas pada kondisi laboratorium dan lingkungan sekitar. Selain itu, variasi beban dinamis akibat perubahan kondisi perairan belum sepenuhnya dianalisis. Meskipun demikian, hasil penelitian ini memberikan implikasi teknis bahwa sistem PLTS berdaya kecil tetap dapat diaplikasikan pada prototipe robot pengangkut sampah perairan dengan dukungan sistem penyimpanan energi yang memadai. Penelitian ini dapat menjadi dasar pengembangan lebih lanjut menuju sistem robot lingkungan berbasis energi terbarukan yang lebih efisien dan berkelanjutan.

Tabel 5. Kinerja sistem PLTS.

Parameter Evaluasi	Hasil	Keterangan
Daya maksimum panel surya	7,84 W	< daya beban robot
Kebutuhan daya robot	27,82 W	Beban menengah
Tegangan pengisian baterai	14,4 V	Stabil & aman
Durasi operasi robot	±1 jam	Per siklus
Mekanisme suplai energi	Tidak langsung	Melalui baterai
Keterbatasan utama	Kapasitas panel	Perlu peningkatan

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis kinerja sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) pada prototipe robot pengangkut sampah perairan, dapat disimpulkan bahwa kebutuhan daya total robot mencapai 27,82 W dengan arus operasi sekitar 2,28 A pada tegangan baterai 12,2 V, sehingga robot mampu beroperasi selama ± 1 jam per siklus kerja. Nilai ini menunjukkan bahwa beban daya robot tergolong menengah dan memerlukan sistem penyimpanan energi yang andal untuk menjamin kontinuitas operasi.

Panel surya polikristalin berkapasitas 10 Wp yang digunakan menghasilkan daya maksimum sebesar 7,70 W pada kondisi cuaca cerah sekitar pukul 11.00 WIB, dengan rentang daya optimal terjadi antara 11.00–13.00 WIB. Hasil ini mengindikasikan bahwa daya keluaran panel surya masih berada di bawah kebutuhan daya robot untuk suplai langsung, sehingga peran baterai sebagai sumber energi utama menjadi sangat penting.

Solar charge controller (SCC) tipe PWM menunjukkan kinerja yang baik dalam menjaga kestabilan tegangan pengisian baterai pada nilai 14,4 V, dengan daya keluaran maksimum mencapai 20,73 W. Kestabilan tegangan ini berkontribusi terhadap keamanan sistem pengisian baterai dan keandalan sistem PLTS secara keseluruhan. Secara umum, sistem PLTS yang dirancang mampu mendukung operasional prototipe robot pengangkut sampah perairan melalui mekanisme pengisian baterai, meskipun kapasitas panel surya masih menjadi faktor pembatas utama dalam peningkatan durasi dan fleksibilitas operasi robot.

Saran

Untuk pengembangan lebih lanjut dan peningkatan kinerja sistem, beberapa saran operasional dapat diberikan sebagai berikut. Pertama, kapasitas panel surya disarankan untuk ditingkatkan menjadi ≥ 20 Wp atau menggunakan konfigurasi panel surya paralel guna mempercepat proses pengisian baterai dan meningkatkan ketersediaan energi. Kedua, penggunaan solar charge controller tipe Maximum Power Point Tracking (MPPT) direkomendasikan agar daya yang dihasilkan panel surya dapat dimanfaatkan secara lebih optimal, khususnya pada kondisi intensitas cahaya yang berubah-ubah.

Ketiga, penelitian selanjutnya perlu dilakukan dengan pengujian lapangan langsung di perairan, sehingga kinerja sistem PLTS dapat dievaluasi pada kondisi operasional yang lebih realistis, termasuk pengaruh beban dinamis, arus air, dan variasi cuaca. Keempat, integrasi sistem manajemen energi dan pemantauan berbasis Internet of Things (IoT) disarankan untuk mendukung pemantauan kinerja sistem secara real time dan meningkatkan keandalan operasional robot dalam jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Rohman, A., Aditama, J., Arifin, M. B., Rahmawati, R., & Sendari, S. (2018). Rancang bangun smart cleaner robot sebagai robot pengambil dan pemilah sampah. *Prosiding Seminar Nasional FORTEI*, 353–358.
- [2] Purwoto, B. H., Jatmiko, J., Fadilah, M. A., & Huda, I. F. (2018). Efisiensi penggunaan panel surya sebagai sumber energi alternatif. *EMITOR: Jurnal Teknik Elektro*, 18(1), 10–14.

- [3] Dincer, I., & Acar, C. (2017). Smart energy systems for a sustainable future. *Applied Energy*, 194, 225–235. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.058>
- [4] Mauliadi, M., Baqsyir, M., & Finaqwan, A. (2020). Rancang bangun robot boat pemungut sampah di perairan Waduk Lhokseumawe berbasis mikrokontroler. *Jurnal Tektro*, 4(2), 68–75.
- [5] Kosim, A., & Damayanti, D. (2024). Rancang bangun sistem robot vacuum cleaner otomatis berbasis mikrokontroler. *Jurnal Teknik Mekatronika*.
- [6] Evalina, N., Azis, A., Pasaribu, F. I., & H., A. A. (2021). Penerapan pembangkit listrik tenaga surya pada robot penyemprot desinfektan. *Prosiding Seminar Nasional*, 2(1), 368–374.
- [7] Khaleel, H. Z., & Oleiwi, B. K. (2024). Design and Implementation Low Cost Smart Cleaner Mobile Robot in Complex Environment. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 11(10), 2869-2877.
- [8] Creswell, J. W. (2014). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (4th ed.). Sage Publications.
- [9] Bolton, W. (2015). *Instrumentation and control systems* (2nd ed.). Elsevier.
- [10] Markvart, T., & Castaner, L. (2013). *Practical handbook of photovoltaics* (2nd ed.). Elsevier.
- [11] Dincer, I., & Rosen, M. A. (2021). *Renewable energy: Systems and applications* (2nd ed.). Wiley.
- [12] Dewi, N., Hasibuan, A. Z., & Sembiring, A. (2020). Prototype Robot Kapal Pemungut Sampah Pada Permukaan Air Dengan Pengendali Smartphone. *Semin. Nas. Teknol. Inf. Komun*, 1(1), 1-8.
- [13] Hasrul, R. R. (2021). Analisis Efisiensi Panel Surya Sebagai Energi Alternatif. *SainETIn: Jurnal Sains, Energi, Teknologi, dan Industri*, 5(2), 79-87.
- [14] Floyd, T. L. (2018). *Electronic devices* (10th ed.). Pearson Education.
- [15] Pasaribu, R. P., Sagala, H., Djari, A. A., & Yosafat, Y. (2023). Prototype Robot Kapal Pengangkut Sampah Di Perairan. *MARLIN*, 5(1), 1-10.
- [16] Hussin, M., Jalani, J., Powdizi, M., Rejab, S., & Ishak, M. K. (2024). Smart robot cleaner using internet of things. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 46(1), 175-186.
- [17] McEvoy, A., Markvart, T., Castañer, L., Markvart, T., & Castaner, L. (Eds.). (2003). *Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications*. Elsevier.
- [18] Nelson, J. (2003). *The physics of solar cells*. Imperial College Press.
- [19] Nurhasanah, A. F., Sudarti, S., & Yushardi, Y. (2023). Kajian Perubahan Iklim Terhadap Efisiensi Panel Surya Sebagai Sumber Energi Alternatif Di Indonesia. *OPTIKA: Jurnal Pendidikan Fisika*, 7(2), 366-375.
- [20] Redko, A., Redko, O., & DiPippo, R. (2019). *Low-temperature energy systems with applications of renewable energy*. Academic Press.
- [21] Binazun, I., Murdiantoro, R. A., & Munawar, A. (2024). Prototype of automatic disinfectant tool based on Internet of Things (IoT) improves healthy living habits. *Journal of Electronic and Electrical Power Applications*, 4(1), 231–237.