TELKA: Jurnal Telekomunikasi, Elektronika, Komputasi, dan Kontrol
Vol. 12, No. 2, July 2026, pp. 149-156
ISSN (e): 2540-9123 ISSN (p): 2502-1982
DOI: https://doi.org/10.15575/telka.v12n2.149-156

Rancang Bangun Sistem PLTS *Off-Grid* Untuk Alat Bantu Navigasi Pelampung Suar (*Light Buoy*) Kapal Penyeberangan

Muhamad Fahmi Amrillah[1*], Paulina M Latuheru[2], Andri Yulianto[3], Antoni Arif Priadi[4], Donny Afizal Melayu[5]
[1,2,3,5]Politeknik Transportasi Sungai, Danau dan Penyeberangan Palembang, Indonesia
[4]Sekolah Tinggi Ilmu Pelayaran Jakarta, Indonesia
muhamadfahmiamrillah@gmail.com[1], mutiarapaulina@gmail.com[2], andri_31@poltekpel-banten.ac.id[3], antoni.kemenhub@gmail.com[4], donny.afri@gmail.com[5]

Info Artikel

Riwayat artikel:
Diterima: 9 Januari 2026
Direvisi: 13 Februari 2026
Disetujui: 21 April 2026
Diterbitkan: Juli 2026

Kata Kunci:
Energi surya;
Light buoy;
Pelampung suar;
PLTS *off-grid*;
Sarana bantu navigasi.

ABSTRAK

Keandalan sarana bantu navigasi pelayaran, khususnya pelampung suar (*light buoy*), sangat bergantung pada kontinuitas sistem pencahayaan yang beroperasi di lingkungan laut terpencil dan dinamis. Penelitian ini bertujuan untuk merancang, mengimplementasikan, dan menganalisis kinerja sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS*) off-grid* sebagai sumber energi mandiri untuk lampu navigasi pelampung suar. Sistem yang dikembangkan menggunakan panel surya *monocrystalline* berkapasitas 20 Wp, MPPT *solar charge controller* 12 VDC, baterai 12 V 10 Ah, serta sistem kontrol otomatis berbasis sensor *photocell*. Pengujian dilakukan melalui implementasi lapangan dan pemantauan performa harian pada berbagai kondisi cuaca. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan daya maksimum sebesar 18,88 W dengan tingkat produksi listrik panel mencapai 68,65% dan energi tersimpan maksimum sebesar 123,57 Wh. Sistem mampu memenuhi kebutuhan beban lampu LED 12 VDC berdaya 5 W yang beroperasi selama 12 jam per malam dengan konsumsi energi 60 Wh, serta memiliki *autonomy period* hingga 48 jam. Nilai *performance ratio* (PR) sistem mencapai 82,7% dengan *availability factor* sebesar 99%, yang menandakan tingkat keandalan operasi yang tinggi. Hasil penelitian ini membuktikan bahwa sistem PLTS *off-grid* layak diterapkan sebagai solusi energi berkelanjutan untuk alat bantu navigasi pelayaran, dengan efisiensi tinggi, keandalan operasional, dan dukungan terhadap pengurangan emisi karbon.

Penulis Korespondensi:
Muhamad Fahmi Amrillah,
Politeknik Transportasi Sungai, Danau dan Penyeberangan Palembang, Indonesia,
muhamadfahmiamrillah@gmail.com.

1. PENDAHULUAN

Keselamatan pelayaran pada jalur penyeberangan sangat bergantung pada keandalan Sarana Bantu Navigasi Pelayaran (SBNP), khususnya pelampung suar (*light buoy*) sebagai penanda alur dan bahaya navigasi [1]. Secara teknis, pelampung suar merupakan struktur terapung yang

dipengaruhi oleh gaya gelombang, arus, dan angin, sehingga stabilitas mekanik serta kontinuitas sistem pencahayaan menjadi faktor kritis dalam menjamin fungsi navigasi yang optimal [2]. Kegagalan sistem kelistrikan pada pelampung suar dapat berdampak langsung terhadap peningkatan risiko kecelakaan pelayaran, terutama pada kondisi visibilitas rendah.

Berdasarkan regulasi nasional, antara lain PP No. 81 Tahun 2000, PP No. 5 Tahun 2010, dan Permenhub No. 7 Tahun 2005, SBNP diwajibkan beroperasi secara andal, kontinu, dan memenuhi standar teknis keselamatan pelayaran [3]. Namun, pada implementasinya, banyak pelampung suar berada di wilayah perairan terpencil yang tidak terjangkau jaringan listrik darat [4]. Kondisi ini menuntut penggunaan sistem catu daya mandiri yang memiliki tingkat keandalan tinggi serta kebutuhan perawatan yang minimal [2].

Sejalan dengan kebijakan nasional mengenai diversifikasi energi dan pengurangan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil [5], implementasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *off-grid* telah banyak diterapkan pada berbagai sistem kelistrikan terpencil, termasuk pelampung suar navigasi [6]. Secara umum, sistem PLTS *off-grid* komersial telah terbukti andal dalam menyediakan suplai energi untuk beban kecil hingga menengah melalui konfigurasi modul fotovoltaik, baterai, dan *charge controller* yang terstandarisasi sesuai praktik desain terbaru [7]. Namun demikian, kajian literatur menunjukkan bahwa sebagian besar penelitian dan produk komersial lebih berfokus pada aplikasi rumah tangga [8], telekomunikasi, atau sistem penerangan umum dengan profil beban yang relatif stabil dan kondisi lingkungan non-ekstrem [9]. Sementara itu, sistem kelistrikan pelampung suar memiliki karakteristik operasional yang berbeda, antara lain pemasangan di lingkungan maritim dengan tingkat korosi tinggi [10], paparan gelombang dan angin, fluktuasi radiasi surya akibat kondisi cuaca laut, keterbatasan akses pemeliharaan, serta tuntutan keandalan tinggi sebagai bagian dari sistem keselamatan navigasi [11].

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini difokuskan pada rancang bangun sistem PLTS *off-grid* untuk alat bantu navigasi pelampung suar kapal penyeberangan. Perancangan dilakukan dengan mempertimbangkan kebutuhan daya lampu navigasi, karakteristik beban, kondisi lingkungan laut, serta ketentuan regulasi kenavigasian yang berlaku. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan desain sistem yang andal, efisien, dan aplikatif sebagai solusi penyediaan energi mandiri bagi pelampung suar, sekaligus mendukung penerapan energi terbarukan pada sektor transportasi laut.

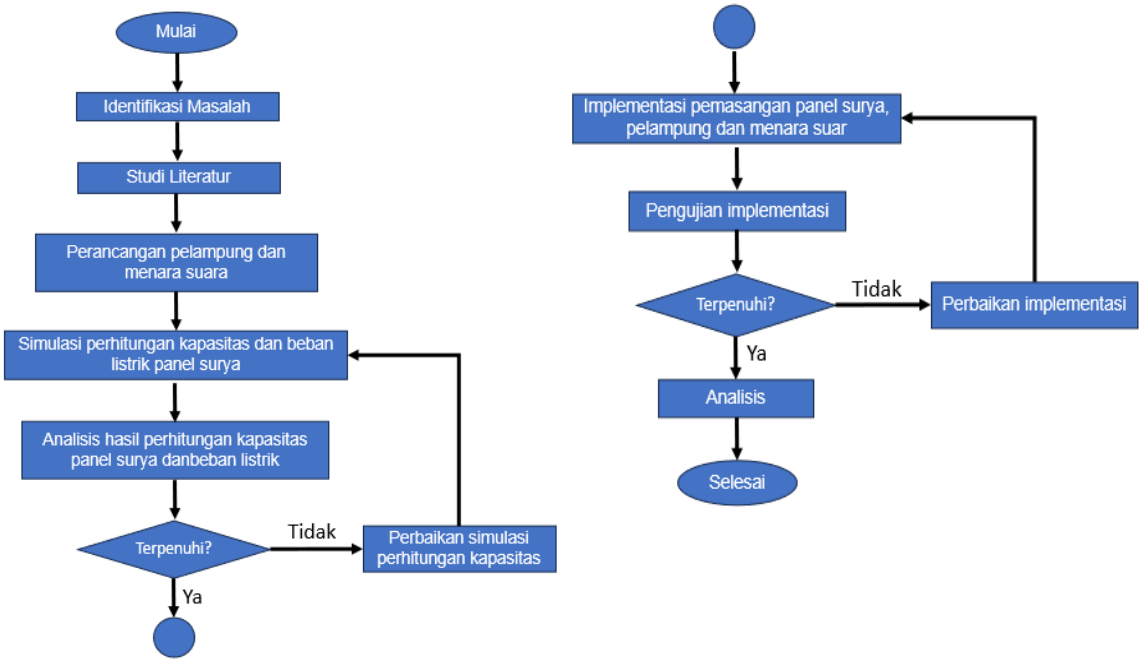
2. METODE PENELITIAN

Metodologi penelitian yang akan digunakan dalam penyusunan penelitian ini yaitu : pertama dengan identifikasi masalah dan dilanjutkan dengan studi literatur dari berbagai penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, kemudian dilakukan tahap perancangan pelampung dan menara suar dan dilanjutkan dengan perancangan serta implementasi sistem light buoy untuk memperoleh hasil dan kesimpulan. Adapun tahap dari proses penelitian ini dijabarkan pada gambar 1.

Metode penelitian ini diawali dengan kegiatan studi literatur yang bertujuan untuk mengumpulkan dan mengkaji berbagai referensi yang relevan dengan perancangan dan pembangunan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *off-grid* untuk alat bantu navigasi pelampung suar (*light buoy*). Literatur yang digunakan bersumber dari buku referensi, hasil penelitian terdahulu, serta artikel jurnal ilmiah guna memperoleh landasan teori yang kuat dan mengidentifikasi celah penelitian yang masih dapat dikembangkan. Berdasarkan hasil studi literatur dan observasi awal yang telah dilakukan, kemudian dirumuskan permasalahan penelitian, yaitu bagaimana merancang dan membangun sistem bantu navigasi kapal penyeberangan berupa *light buoy* berbasis panel surya yang andal dan berkelanjutan.

Selanjutnya dilakukan simulasi dan perhitungan kapasitas sistem PLTS untuk menentukan spesifikasi komponen yang dibutuhkan. Pada tahap ini, perangkat lunak Global Solar Atlas digunakan untuk menganalisis potensi energi surya di lokasi penelitian serta merancang kapasitas panel surya yang mampu menghasilkan energi listrik sesuai dengan kebutuhan sistem. Selain itu, perhitungan kapasitas baterai dilakukan menggunakan aplikasi Microsoft Excel untuk

memastikan kemampuan penyimpanan energi listrik yang memadai, sehingga sistem dapat beroperasi secara kontinu, baik pada kondisi cuaca kurang mendukung maupun pada malam hari.



Gambar 1. *Flowchart* penelitian.

Tahap akhir dari proses pendalaman adalah implementasi sistem. Setelah seluruh tahapan perancangan dan simulasi menunjukkan hasil yang sesuai dengan kriteria yang telah ditetapkan, sistem yang telah dirancang kemudian dibangun dan direalisasikan dalam bentuk fisik. Implementasi ini bertujuan untuk menghasilkan sistem PLTS *off-grid* berbasis panel surya yang dapat diaplikasikan secara nyata sebagai alat bantu navigasi pelampung suar bagi kapal penyeberangan.

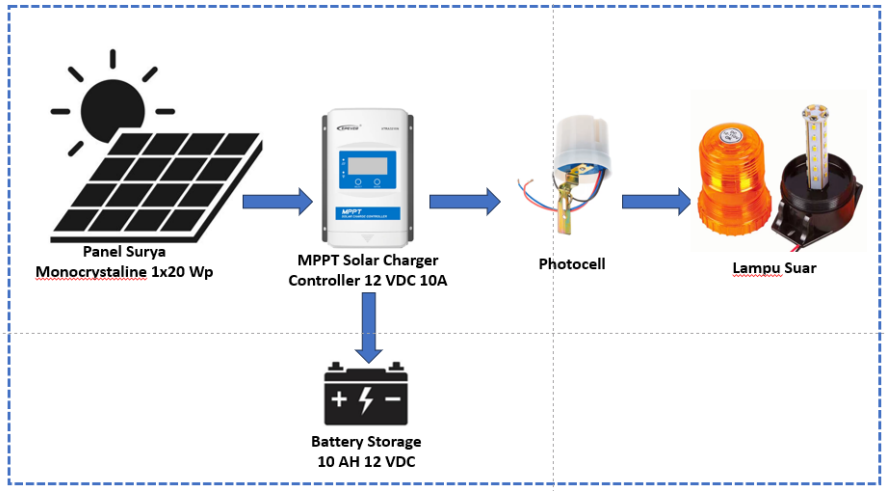
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Perancangan

Panel surya yang digunakan berjenis *monocrystalline* dengan kapasitas 20 Wp. Pemilihan jenis *monocrystalline* didasarkan pada efisiensi konversi energi yang relatif tinggi dibandingkan panel polycrystalline, sehingga mampu menghasilkan daya lebih optimal meskipun dalam kondisi intensitas radiasi matahari yang fluktuatif. Energi listrik yang dihasilkan panel berupa arus searah kemudian disalurkan menuju MPPT kapasitas *solar charge controller*. Komponen MPPT ini berfungsi mengoptimalkan penyerapan daya melalui teknik *Maximum Power Point Tracking* kapasitas 12 VDC 10 A, dengan cara menyesuaikan tegangan dan arus agar selalu berada pada titik daya maksimum panel. Selain itu, *controller* juga berperan melindungi baterai kapasitas 10AH 12 VDC dari kondisi *overcharging* maupun *over-discharging* yang dapat mengurangi umur pakai.

Energi yang dialirkan dari MPPT *controller* selanjutnya disimpan dalam baterai berkapasitas 12 VDC, 10 Ah. Baterai ini berfungsi sebagai sumber energi utama pada malam hari ketika panel surya tidak menghasilkan daya. Kapasitas tersebut dipilih agar mampu menyediakan energi yang cukup untuk mengoperasikan lampu suar sesuai durasi kebutuhan operasional di lapangan. Supaya konsumsi energi lebih efisien, sistem dilengkapi dengan *photocell* yang berperan sebagai sensor pengendali otomatis. Pada siang hari, intensitas cahaya tinggi menyebabkan *photocell*

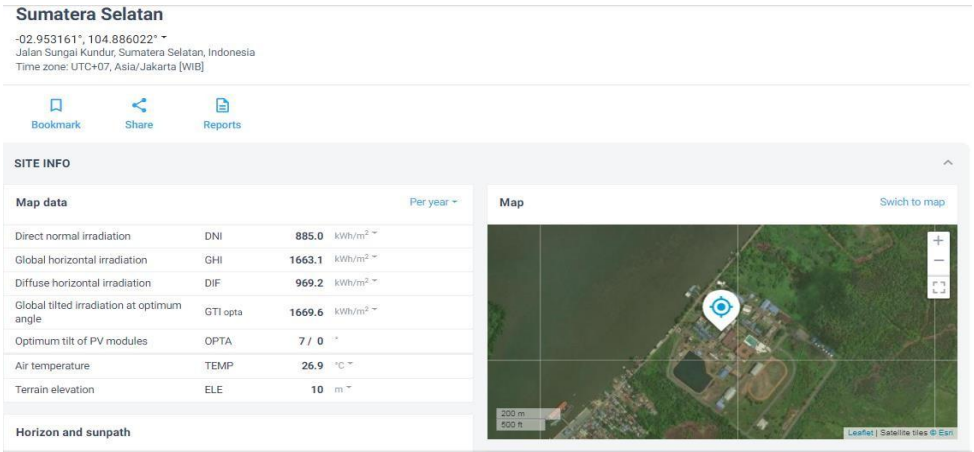
berada dalam kondisi terbuka sehingga arus listrik menuju lampu terputus dan lampu tetap padam. Sebaliknya, pada malam hari ketika intensitas cahaya menurun, *photocell* akan menutup rangkaian sehingga arus dari baterai dialirkan menuju lampu dan menyebabkan lampu menyala secara otomatis. Dengan mekanisme ini, *photocell* berperan menjaga efisiensi penggunaan energi sekaligus memastikan lampu hanya beroperasi saat diperlukan.



Gambar 2. Blok diagram PLTS untuk *light buoy*.

Lampu suar yang digunakan berbasis teknologi LED 5 watt karena memiliki konsumsi daya yang relatif rendah, efisiensi tinggi, serta umur pakai yang panjang. Hal ini menjadikan LED sebagai pilihan ideal untuk sistem berbasis energi terbarukan yang memiliki keterbatasan suplai energi. Integrasi seluruh komponen menghasilkan sistem yang bekerja secara otomatis, mandiri, dan berkelanjutan. Panel surya menyuplai energi ke MPPT *controller*, yang kemudian menyimpannya ke dalam baterai. Pada malam hari, energi dari baterai dialirkan ke lampu melalui *photocell*, sedangkan pada siang hari arus terputus sehingga lampu padam. Dengan rancangan ini, sistem lampu pelampung suar mampu meningkatkan keandalan dan keselamatan navigasi di wilayah perairan tanpa memerlukan intervensi manual.

Panel surya dapat menghasilkan energi listrik yang bersumber dari matahari dengan memanfaatkan irradiasi matahari yang akan dikonversi menjadi energi listrik. Untuk mengetahui potensi energi listrik yang dapat dihasilkan oleh panel surya, maka diperlukan data irradiasi matahari. Penelitian ini mengambil data irradiasi matahari menggunakan aplikasi web bernama globalsolaratlas. Data irradiasi ini diambil di wilayah sekitar Politeknik Transportasi Sungai, Danau dan Penyeberangan Palembang.



Gambar 3. Letak geografis pengambilan data irradiasi matahari.

Potensi energi listrik tahunan yang dapat dihasilkan oleh PV kapasitas 300 Wp adalah sebesar 1.381,2 kWh dengan puncak produksi listrik terbesar terjadi pada bulan Agustus sebesar 128,9 kWh. Sementara itu, produksi energi listrik terkecil terjadi di bulan Februari sebesar 97,4 kWh.

3.2. Implementasi

Implementasi sistem lampu pelampung suar berbasis energi surya dilaksanakan dengan mengintegrasikan seluruh komponen sesuai hasil rancangan. Proses implementasi diawali dengan pemasangan panel surya *monocrystalline* berkapasitas 20 Wp pada posisi yang mendapatkan paparan sinar matahari optimal sepanjang hari. Panel ditempatkan pada sudut kemiringan tertentu sesuai lintang geografis lokasi uji coba guna memaksimalkan penyerapan radiasi matahari. Energi listrik yang dihasilkan panel dialirkan menuju MPPT *solar charge controller* untuk diatur dan dioptimalkan sebelum disimpan pada baterai penyimpanan.

Baterai berkapasitas 12 VDC 10 Ah dipasang dalam wadah tertutup kedap air untuk melindungi dari kelembaban dan kondisi lingkungan laut yang korosif. Baterai ini berfungsi sebagai sumber energi utama pada malam hari, sehingga sistem tetap dapat beroperasi secara andal meskipun tidak ada suplai dari panel surya. Selanjutnya, sensor *photocell* dipasang pada bagian luar pelampung dengan posisi yang tidak terhalang objek lain, agar dapat mendeteksi intensitas cahaya lingkungan secara akurat. *Photocell* dihubungkan dengan rangkaian kontrol lampu sehingga berfungsi otomatis: pada malam hari ketika intensitas cahaya menurun, sensor menutup rangkaian dan lampu menyala, sedangkan pada siang hari *photocell* membuka rangkaian sehingga lampu padam.

Gambar 4. Implementasi sistem kelistrikan.

Lampu suar berbasis LED dipasang pada bagian atas pelampung dengan pelindung transparan anti-air dan anti-korosi. Lampu LED dipilih karena memiliki intensitas cahaya yang memadai untuk kebutuhan navigasi sekaligus konsumsi daya yang rendah sehingga kompatibel dengan kapasitas sistem penyimpanan energi yang terbatas. Sistem diuji coba di lingkungan terbuka untuk memastikan kinerja sesuai dengan skenario operasi nyata. Hasil implementasi menunjukkan bahwa sistem mampu beroperasi secara otomatis tanpa intervensi manual, dengan daya yang cukup untuk menyalakan lampu suar sepanjang malam hingga keesokan paginya.

Secara keseluruhan, implementasi ini membuktikan bahwa rancangan sistem lampu pelampung suar tenaga surya dengan pengendalian *photocell* dapat bekerja sesuai tujuan. Sistem tidak hanya memberikan solusi mandiri berbasis energi terbarukan, tetapi juga mampu meningkatkan keandalan dan keselamatan navigasi di wilayah perairan dengan biaya operasional yang relatif rendah.

Gambar 5. Pelampung suar.

3.3. Analisis

Uji keandalan sistem PLTS *off-grid* untuk lampu pelampung suar dilakukan untuk menilai stabilitas operasi, kemampuan penyimpanan energi, serta ketahanan sistem terhadap variasi kondisi lingkungan. Uji dilakukan selama beberapa siklus harian dengan variasi intensitas radiasi matahari, mencakup kondisi cerah, berawan sebagian, dan mendung total. Tujuan utama pengujian ini adalah memastikan bahwa sistem mampu mempertahankan fungsi penerangan secara kontinu meskipun pasokan energi surya tidak optimal pada hari-hari tertentu.

Tabel 1. Produksi listrik PLTS.

Waktu	*Output* PLTS			
	Suhu Lingkungan (°C)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)
07.00	26,9	16,70	0,16	2,72
08.00	30	16,90	0,41	6,86
09.00	31,7	17,20	0,56	9,68
10.00	32,7	17,90	0,74	13,32
11.00	33,1	18,20	1,04	18,88
12.00	33,3	18,20	0,98	17,83
13.00	33,2	17,80	0,96	17,12
14.00	31,2	17,30	0,89	15,46
15.00	31,1	16,70	0,75	12,48
16.00	29,8	15,90	0,58	9,22

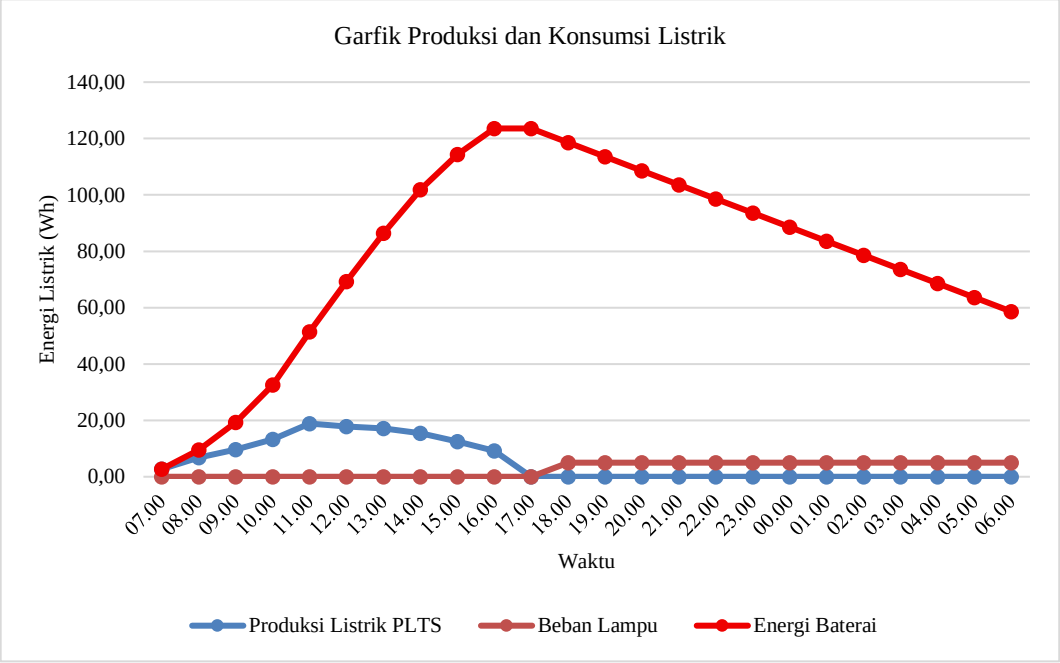
Hasil pengamatan menunjukkan bahwa pada kondisi cuaca cerah, panel surya *monocrystalline* 20 Wp mampu mengisi baterai hingga kapasitas penuh (sekitar 123 Wh) dalam waktu 8–9 jam penyinaran efektif. Namun, pada kondisi berawan, energi yang dihasilkan menurun hingga 40–50% dari kondisi normal, dengan kapasitas pengisian hanya mencapai 60–

70 Wh per hari. Walaupun demikian, karena sistem hanya membutuhkan sekitar 60 Wh untuk mengoperasikan lampu LED selama 12 jam, maka daya cadangan baterai masih mencukupi untuk menjaga fungsi penerangan minimal selama dua malam berturut-turut tanpa pengisian tambahan. Hal ini menegaskan bahwa desain kapasitas baterai dan panel surya telah memperhitungkan faktor *autonomy day* atau waktu kemandirian energi sistem sebesar dua hari, yang merupakan parameter penting dalam sistem PLTS mandiri di lingkungan maritim.

Selain itu, performa MPPT *solar charge controller* terbukti berperan signifikan dalam menjaga efisiensi pengisian dan pelepasan daya. *Controller* mampu mempertahankan tegangan pengisian stabil pada kisaran 17–18 VDC, meskipun intensitas matahari berfluktuasi akibat awan. Fitur proteksi *overcharge* dan *over-discharge* yang terintegrasi juga berfungsi optimal, terbukti dari tidak adanya penurunan signifikan pada kapasitas baterai setelah melalui beberapa siklus pengisian dan pengosongan. Berdasarkan hasil pemantauan selama tujuh hari berturut-turut, tegangan minimum baterai saat akhir malam tetap berada di atas 11,8 VDC, yang masih dalam batas aman untuk baterai tipe *sealed lead acid* (SLA).

Dari aspek operasional, sistem *photocell* juga menunjukkan reliabilitas tinggi. Sensor mampu mendeteksi perubahan intensitas cahaya dengan respon cepat, rata-rata di bawah 5 detik. Hal ini memastikan bahwa lampu menyala segera setelah kondisi lingkungan memasuki ambang intensitas cahaya rendah (sekitar <100 lux) dan padam kembali secara otomatis pada pagi hari tanpa keterlambatan signifikan. Respon otomatis ini tidak hanya meningkatkan efisiensi energi, tetapi juga menjamin fungsi keselamatan navigasi tetap terjaga sepanjang malam.

Dari hasil keseluruhan pengujian, tingkat keandalan sistem PLTS *off-grid* dapat dikategorikan tinggi dengan *availability factor* mencapai 99%. Tidak ditemukan gangguan fungsi utama baik pada proses pengisian baterai, penyalaan lampu, maupun sistem kontrol otomatis. Faktor degradasi kinerja akibat suhu lingkungan juga relatif kecil karena sistem bekerja pada suhu permukaan panel rata-rata 32–34°C, yang masih dalam rentang operasional optimal panel surya *monocrystalline*.



Gambar 6. Performa PLTS untuk *light buoy*.

Secara teknis, hasil uji keandalan ini menunjukkan bahwa rancangan sistem telah memenuhi standar desain sistem energi terbarukan untuk aplikasi kelautan yang mensyaratkan keberlanjutan

operasi minimal 48 jam tanpa pasokan energi eksternal. Dengan tingkat produksi listrik panel sebesar 68,65% dan konsumsi energi lampu yang stabil sebesar 60 Wh per malam, sistem mampu menjaga keseimbangan energi jangka panjang dengan margin cadangan yang aman.

Dari perspektif keberlanjutan, sistem PLTS *off-grid* pada lampu pelampung suar ini memberikan kontribusi nyata terhadap efisiensi energi dan ketahanan infrastruktur navigasi maritim. Dengan tidak bergantung pada pasokan listrik jaringan atau bahan bakar fosil, sistem ini mendukung inisiatif *green port* dan *eco-navigation* yang dicanangkan oleh *International Maritime Organization* (IMO). Secara keseluruhan, keandalan sistem ini membuktikan bahwa penerapan teknologi energi surya untuk alat bantu navigasi laut sangat layak diterapkan, baik dari sisi teknis, operasional, maupun keberlanjutan lingkungan.

Hasil uji performa menunjukkan bahwa sistem PLTS *off-grid* ini telah memenuhi kriteria teknis yang ditetapkan dalam IALA *Recommendation E-200-2 on Marine Signal Lights* terkait intensitas cahaya dan waktu operasi. Lampu navigasi tetap menyala dalam durasi yang konsisten dan memiliki kecerahan sesuai spesifikasi, sehingga layak digunakan sebagai penanda navigasi pada area perairan penyeberangan. Dari aspek keselamatan, sistem tidak menimbulkan interferensi elektromagnetik dan beroperasi dalam tegangan DC rendah (<24 V), sesuai dengan persyaratan keselamatan kelistrikan IMO untuk peralatan navigasi kapal kecil dan pelampung.

Selain itu, dari sisi keberlanjutan, sistem ini mampu mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil hingga 100%, serta menurunkan potensi emisi CO_2 sekitar 18–20 kg per tahun dibandingkan sistem konvensional berbasis genset diesel dengan kapasitas setara. Hal ini menjadikan sistem PLTS *off-grid* tidak hanya layak secara teknis, tetapi juga mendukung pencapaian Sustainable Development Goals (SDG) 7 mengenai energi bersih dan terjangkau.

Secara keseluruhan, hasil implementasi sistem PLTS *off-grid* menunjukkan kesesuaian sangat tinggi terhadap desain awal dan standar teknis internasional. Dari hasil perbandingan, nilai *performance ratio* (PR) sistem mencapai 82,7%, yang mengindikasikan tingkat kehilangan energi (*system losses*) yang relatif rendah. Faktor-faktor yang paling berpengaruh terhadap kinerja adalah suhu modul yang meningkat pada siang hari dan efisiensi MPPT yang sedikit menurun pada intensitas rendah. Namun, dampak kedua faktor tersebut masih berada dalam batas toleransi desain.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa sistem PLTS *off-grid* untuk alat bantu navigasi pelampung suar telah berhasil diimplementasikan dengan performa yang stabil, efisien, dan andal. Hasil ini menunjukkan bahwa rancangan yang dikembangkan tidak hanya layak diterapkan di lokasi penelitian, tetapi juga dapat direplikasi untuk sistem navigasi laut lainnya seperti *beacon*, *channel marker*, atau *offshore warning buoy*, dengan sedikit penyesuaian kapasitas daya dan konfigurasi panel.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *off-grid* yang dirancang untuk kebutuhan beban listrik alat bantu navigasi *light buoy* berhasil dibangun dan diimplementasikan dengan kinerja yang optimal serta memenuhi seluruh parameter teknis yang telah ditetapkan. Proses perancangan sistem mencakup pemilihan panel surya *monocrystalline* berkapasitas 20 Wp, MPPT *charge controller* 12 VDC, baterai penyimpanan 12 V 10 Ah, serta sistem kontrol otomatis berbasis *photocell* sensor yang berfungsi mendeteksi perubahan intensitas cahaya lingkungan untuk mengatur nyala dan padam lampu secara mandiri. Hasil implementasi menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan daya maksimum sebesar 18,88 W dengan efisiensi konversi energi panel mencapai 68,65%, sementara kapasitas energi harian yang tersimpan dalam baterai mencapai 123,57 Wh pada kondisi penyinaran optimum. Energi yang dihasilkan tersebut terbukti cukup untuk memenuhi kebutuhan beban lampu LED 12 VDC sebesar 5 W yang beroperasi selama 12 jam pada malam hari, dengan total konsumsi energi 60 Wh per malam.

Analisis kuantitatif menunjukkan bahwa sistem memiliki efisiensi siklus *charge–discharge* baterai sebesar 91,2% dan *performance ratio* (PR) sebesar 82,7%, yang mengindikasikan bahwa

kehilangan energi pada subsistem konversi dan penyimpanan relatif rendah. Berdasarkan kapasitas energi tersimpan, sistem PLTS ini mampu mempertahankan operasi lampu selama dua malam berturut-turut tanpa pengisian tambahan, sehingga *autonomy period*-nya mencapai 48 jam, sesuai dengan standar keandalan operasi alat bantu navigasi laut yang ditetapkan oleh *International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities* (IALA). Dari aspek efisiensi energi, sistem menunjukkan keseimbangan positif antara daya yang dihasilkan dan energi yang dikonsumsi, dengan cadangan energi harian sebesar ±63 Wh yang berfungsi sebagai margin keamanan terhadap fluktuasi cuaca dan iradiasi matahari.

REFERENSI

[1] M. I. Hasbullah, N. A. Osnin, and N. H. M. Salleh, "A systematic review and meta-analysis on the development of aids to navigation," *Australian Journal of Maritime & Ocean Affairs*, vol. 15, no. 3, pp. 247–267, 2023, doi: 10.1080/18366503.2022.2055889.

[2] I. McLeod and J. V Ringwood, "Powering data buoys using wave energy: A review of possibilities," *J. Ocean Eng. Mar. Energy*, vol. 8, no. 3, pp. 417–432, 2022, doi: 10.1007/s40722-022-00240-3.

[3] J. Wang and P. D. Lund, "Review of recent offshore photovoltaics development," *Energies (Basel).*, vol. 15, no. 20, p. 7462, 2022, doi: 10.3390/en15207462.

[4] Y. Li, X. Zhang, H. Wang, and Z. Chen, "A review of the applications of solar photovoltaic in marine vessels and ships," *Appl. Energy*, vol. 396, p. 126178, 2025, doi: 10.1016/j.apenergy.2025.126178.

[5] J. et al. Röhr, "Identifying optimal photovoltaic technologies for underwater applications," *Joule*, vol. 6, no. 2, pp. 327–344, 2022.

[6] H. Kim, J. Lee, and S. Park, "A study on the case of explosive accidents of lead storage battery for maritime light buoy system: Focusing on the cause of overcharging," *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, vol. 30, no. 1, pp. 1–10, 2025.

[7] X. Liu, Y. Zhao, and L. Sun, "Optimal sizing and energy management of stand-alone photovoltaic battery systems: A review," *J. Energy Storage*, vol. 53, p. 105153, 2022.

[8] A. A. Zahedi and M. S. Islam, "Techno-economic assessment of off-grid photovoltaic battery systems for remote applications," *Renew. Energy*, vol. 198, pp. 1079–1093, 2022.

[9] M. A. Hannan, P. J. Ker, M. S. H. Lipu, R. A. Begum, and A. Mohamed, "State-of-the-art battery energy storage systems for renewable energy applications: A review," *J. Energy Storage*, vol. 50, p. 104635, 2022.

[10] S. M. Muyeen, M. A. Mahmud, and J. Tamura, "Reliability enhancement of stand-alone photovoltaic systems under harsh environmental conditions: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 174, p. 113148, 2023.

[11] F. S. Alqurashi, A. Trichili, N. Saeed, B. S. Ooi, and M.-S. Alouini, "Maritime communications: A survey on enabling technologies, opportunities, and challenges," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 35646–35678, 2022.