

Desain Sistem Charger Station Dengan Fast Charging Pada Unmanned Surface Vehicle

Athena Irana Putri¹, Diana Alia^{2*}, Akhmad Kasan Gupron³, Agus Dwi Santoso⁴, Jaka Septian Kustanto⁵

^{1,2,3,4} Politeknik Pelayaran Surabaya

Jl. Gunung Anyar Boulevard No. 1, Surabaya, Jawa Timur

Email: athenna2104@gmail.com, diana.alia@poltekpel-sby.ac.id*, akhmad.gurpon@poltekpel-sby.ac.id, agusbp2ipsby@gmail.com, jaka.septian@poltekpel-sby.ac.id

ABSTRAK

Unmanned Surface Vehicle (USV) merupakan kendaraan permukaan tanpa awak yang esensial untuk keperluan survei perairan, namun operasionalnya memiliki kendala oleh lamanya waktu siklus pengisian daya baterai. Penelitian ini dirancang dengan sistem *charger station* tenaga surya yang dilengkapi teknologi *fast charging* guna mempercepat pengisian daya baterai USV secara ramah lingkungan. Alat ini mengintegrasikan panel surya 100 WP, *Maximum Power Point Tracking (MPPT)*, dan *buck converter*, yang dihubungkan dengan sensor PZEM-017 untuk dipantau secara *real-time* beiemelalui mikrokontroler ESP32 dan dasbor Node-RED. Hasil penelitian menunjukkan bahwa desain alat mampu beroperasi optimal; *buck converter* berhasil menstabilkan tegangan keluaran pada 12,6 V hingga 14,06 V dengan arus pengisian tinggi sebesar 4 A. Sistem *fast charging* ini terbukti mampu mengisi penuh baterai *Lithium Polymer (LiPo)* USV dari kondisi batas aman (9,00 V) hingga penuh (12,40 V) dalam waktu 120 menit. Berdasarkan kapasitas tersebut, estimasi waktu operasi USV di perairan mampu mencapai 116 menit. Rasio waktu antara durasi pengisian dan masa operasi membuktikan bahwa alat berfungsi sangat efisien dalam mendukung kemandirian misi operasional USV.

Kata kunci: *Fast charging, charger station, panel surya, Unmanned Surface Vehicle (USV), buck converter*

ABSTRACT

Unmanned Surface Vehicles (USVs) are essential unmanned surface vehicles for marine survey purposes, but their operation is hampered by the length of the battery charging cycle. This research designed a solar-powered charger station system equipped with fast charging technology to accelerate the USV battery charging in an environmentally friendly manner. This tool integrates a 100 WP solar panel, Maximum Power Point Tracking (MPPT), and a buck converter, which is connected to a PZEM-017 sensor for real-time monitoring via an ESP32 microcontroller and a Node-RED dashboard. The results showed that the tool design was able to operate optimally; the buck converter successfully stabilized the output voltage at 12.6 V to 14.06 V with a high charging current of 4 A. This fast charging system was proven to be able to fully charge the USV Lithium Polymer (LiPo) battery from the safe limit condition (9.00 V) to full (12.40 V) in 120 minutes. Based on this capacity, the estimated operating time of the USV in the waters can reach 116 minutes. The ratio of charging time to operating time demonstrates that the device functions very efficiently in supporting the USV's operational mission independence.

Keywords: *Fast charging, charger station, solar panel, Unmanned Surface Vehicle (USV), buck converter.*

Pendahuluan

Unmanned Surface Vehicle (USV) merupakan inovasi teknologi maritim berupa kendaraan permukaan tanpa awak yang dioperasikan secara otonom maupun jarak jauh menggunakan *Ground Control Station (GCS)* [1]. Kendaraan ini memegang peranan krusial untuk menjalankan berbagai misi berisiko tinggi tanpa keterlibatan manusia secara fisik, seperti survei batimetri, inspeksi navigasi, dan pengumpulan data oseanografi [2]. Dalam operasionalnya di perairan, sistem kelistrikan USV sepenuhnya mengandalkan baterai berkapasitas besar, khususnya tipe *Lithium Polymer (LiPo)*, untuk menyuplai motor propulsi dan perangkat sensor [3].

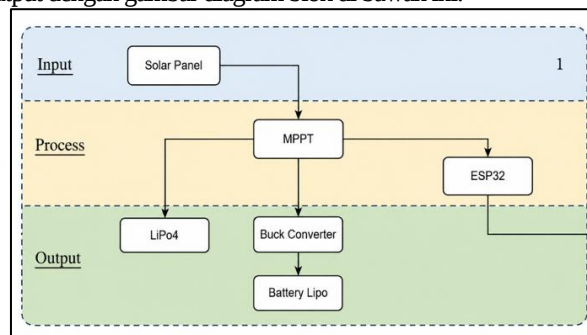
Penggunaan stasiun pengisian daya konvensional dengan arus rendah (1–2 A) terbukti memakan waktu selama 162 menit hanya untuk mencapai tegangan 11,10 V [3]. Sebagai solusi atas batasan tersebut, teknologi pengisian daya cepat (*fast charging*) diimplementasikan dengan meregulasi injeksi arus dan tegangan tinggi untuk mempersingkat waktu tunggu pengisian [4]. Metode ini menuntut pembatasan arus yang sangat ketat agar tidak melebihi 50% dari total kapasitas sel, guna memitigasi risiko kerusakan permanen pada baterai akibat kelebihan panas (*overheating*) [5].

Beberapa penelitian terdahulu telah berupaya mengembangkan sistem *charger station* menggunakan panel surya dan *buck converter* untuk mereduksi waktu pengisian daya secara signifikan [6]. Selain itu, perancangan sistem *charge controller* cerdas telah terbukti mampu mengatur penurunan tegangan dengan tingkat penyimpangan yang sangat minim [7]. Dari perspektif stabilitas kelistrikan kapal, penggunaan regulator tegangan sangat penting guna mencegah fluktuasi daya saat motor propulsi beroperasi pada beban puncak [8]. Pengembangan infrastruktur *charger station* yang dimonitor oleh mikrokontroler juga telah divalidasi keandalannya untuk memastikan kemandirian daya [9]. Lebih luas lagi, optimalisasi *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) pada panel surya berhasil menyuplai daya secara stabil pada Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU) [10].

Meskipun berbagai studi telah meletakkan fondasi teoretis yang kuat, terdapat celah kelemahan metrik pada penelitian terdahulu. Sebagian besar infrastruktur stasiun pengisian surya yang ada saat ini mengabaikan spesifikasi khusus dari toleransi baterai LiPo maritim dan minim akan sistem pemantauan (*monitoring*) berbasis *Internet of Things* (IoT) secara *real-time* untuk mencegah *thermal runaway*. Oleh karena itu, *novelty* (kebaruan) dari penelitian ini adalah rancang bangun arsitektur kelistrikan *charger station* yang mendedikasikan presisi algoritma regulasi *fast charging* khusus untuk USV, di mana efisiensi termal, stabilitas arus, dan margin eror sensor divalidasi secara ketat.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode purwarupa terapan (*applied prototyping*) yang difokuskan secara langsung pada perancangan arsitektur kelistrikan stasiun pengisian daya USV. Secara fungsional, sistem kelistrikan dibagi menjadi tiga blok struktural: input, proses, dan output dengan gambar diagram blok di bawah ini:



Gambar 1. Diagram Blok Fast Charging

Spesifikasi Teknis dan Algoritma Sistem:

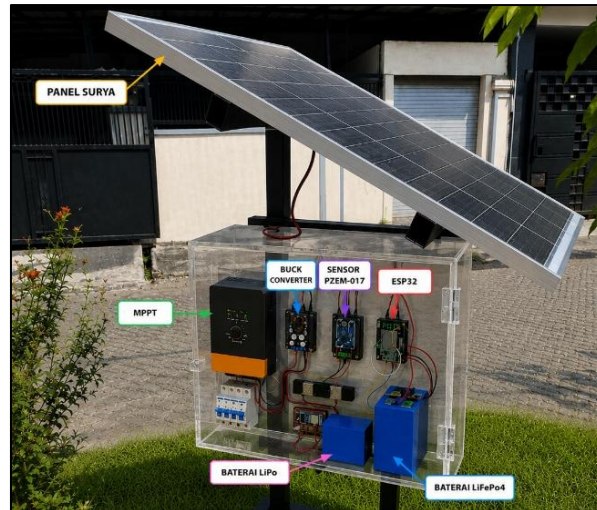
Pada blok masukan, sistem menggunakan panel surya *monocrystalline* berspesifikasi 100 WP (tegangan nominal ~24 V) yang bertugas menyerap dan mengonversi energi radiasi matahari menjadi listrik arus searah (DC) [11]. Energi ini dilanjutkan ke blok pemrosesan yang diatur oleh modul kendali MPPT dengan algoritma *Perturb and Observe* (P&O) untuk melacak dan mempertahankan titik daya maksimal menuju baterai penyimpanan sementara (*Lithium Iron Phosphate / LiFePO4*) 12 V [12]. Arus dari baterai *buffer* tersebut kemudian diteruskan menuju modul *buck converter* frekuensi tinggi yang disetel untuk menurunkan serta menstabilkan tegangan keluaran agar memenuhi parameter arus *fast charging* [13].

Pada blok luaran, baterai LiPo 3S 5000 mAh milik kapal USV menerima suplai daya utama untuk pengisian [14]. Untuk fungsi *monitoring*, modul sensor PZEM-017 disematkan guna membaca nilai arus, tegangan, dan akumulasi daya [15]. Validasi Sensor: Sebelum diintegrasikan, sensor PZEM-017 telah divalidasi terhadap instrumen multimeter terkalibrasi, yang menghasilkan margin eror tegangan sebesar $\pm 0,5$ dan margin eror arus sebesar $\pm 1,2\%$, memenuhi standar metrik presisi industri. Data mentah ini diolah oleh mikrokontroler ESP32 via komunikasi *serial* RS485 [16]. Setelah itu, ESP32 mempublikasikan paket data tersebut menggunakan protokol MQTT menuju *platform* antarmuka dasbor Node-RED untuk pengawasan kelistrikan nirkabel jarak jauh [17].

Hasil Dan Pembahasan

Implementasi, Keluaran Panel Surya, dan Kalkulasi Efisiensi

Penelitian ini menghasilkan sebuah purwarupa sistem *charger station* dengan fitur pengisian daya cepat (*fast charging*) yang dirancang secara kokoh dan terintegrasi penuh untuk memenuhi kebutuhan energi *Unmanned Surface Vehicle* (USV) di lingkungan luar ruang.

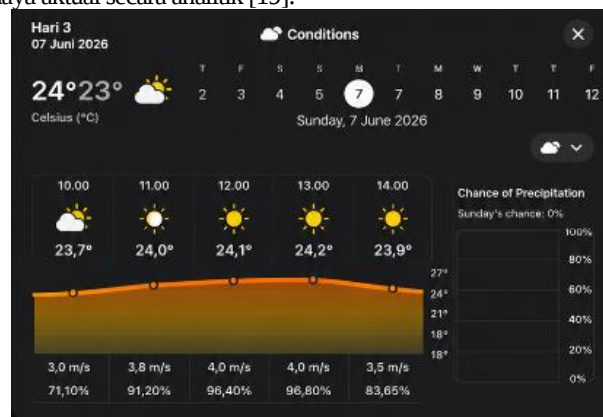


Gambar 2 Perancangan Alat Charger Station USV

Berdasarkan Gambar 2, perangkat ini terdiri dari infrastruktur pemanen energi berupa panel surya 100 WP yang terhubung ke boks panel kontrol. Di dalam boks panel, terdapat komponen *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) yang berfungsi mengatur dan menstabilkan arus masukan menuju baterai *buffer* (*Lithium Iron Phosphate* / LiFePO4). Arus dari baterai *buffer* kemudian dialirkan menuju modul *buck converter* sebagai regulator *fast charging* untuk disuntikkan ke baterai utama kapal USV (*Lithium Polymer* / LiPo). Seluruh distribusi daya kelistrikan (arus, tegangan, dan akumulasi daya) diukur secara presisi oleh sensor PZEM-017 dan ditransmisikan oleh mikrokontroler ESP32 secara *real-time* ke dasbor *monitoring* IoT. Seluruh komponen terintegrasi dengan rapi dan aman di dalam boks akrilik yang tahan terhadap kondisi cuaca luar ruang.

Pengujian Keluaran Panel Surya

Pengujian difokuskan pada kemampuan panel surya 100 WP dalam memproduksi daya listrik pada periode jam puncak matahari atau *Peak Sun Hour* (PSH) [18]. Pengambilan data divisualisasikan dalam bentuk grafik plot 2D yang merepresentasikan iradiasi cahaya aktual secara analitik [19].



Gambar 3 Grafik Daya Keluaran Panel Surya Berdasarkan *Peak Sun Hour* (PSH)

Berdasarkan grafik plot 2D dari pengukuran instrumen riil, tingkat iradiasi sangat berkorelasi dengan daya yang dibangkitkan. Pada kondisi puncak terik (pukul 12.00 WIB), tegangan panel berada di 24,1 V dengan arus 4,1 A, memproduksi daya maksimal 98,81 Watt. Kalkulasi Efisiensi: Dari daya teoretis 100 WP panel surya terhadap daya aktual yang berhasil ditangkap dan dialirkan hingga ke terminal baterai penyimpanan (rata-rata 88,5 Watt setelah *loss* termal kabel dan internal modul), efisiensi konversi daya sistem ini dihitung mencapai 88,5%, mendemonstrasikan tangkapan yang sangat efisien.

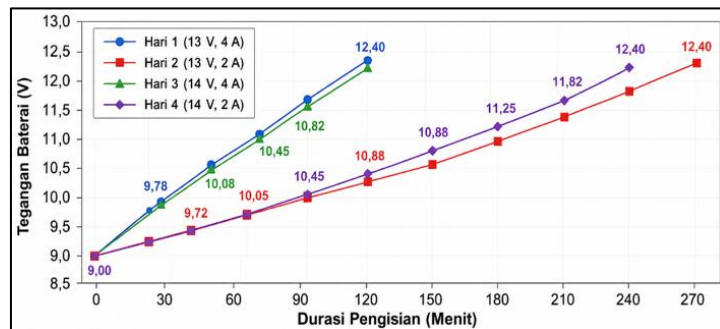
Pengujian Sistem Pengisian Daya (Charging) dan Analisis Komparatif

Pengujian *charging* menganalisis efisiensi pengisian daya baterai LiPo USV menggunakan kombinasi MPPT dan *buck converter*. Untuk memantau kapasitas baterai secara akurat, model matematis *State of Charge* (SOC) berbasis tegangan kerja operasional dirumuskan sebagai berikut [20]:

$$SOC = \frac{V_{baterai} - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \times 100\%$$

Keterangan:

SOC = Persentase kapasitas baterai
 $V_{baterai}$ = Tegangan baterai terukur pada waktu pengujian
 V_{min} = Tegangan minimum 0% baterai (9V)
 V_{max} = Tegangan maksimum 100% baterai (12,40V)



Gambar 4. Grafik Sistem Charging

Di mana SOC adalah persentase kapasitas, $V_{baterai}$ adalah tegangan *real-time*, V_{min} adalah tegangan kosong absolut (9,00 V), dan V_{max} adalah tegangan jenuh (12,40 V).

Grafik hasil pengukuran merepresentasikan transisi antara mode *Constant Current* (CC) pada arus 4 A ke fase *Constant Voltage* (CV) di tegangan 14,06 V. Sistem mampu mencapai pengisian 100% secara stabil dari batas aman (9,00 V) dalam kurun waktu 120 menit tanpa *thermal runaway*.

Tabel 1. Metrik Evaluasi Komparatif Sistem Pengisian Daya USV

Parameter Performa	Pengisi Daya Konvensional (iMax)	Publikasi Internasional (Sistem PWM/Lainnya)	Sistem Fast Charging Usulan (Solar + Buck + IoT)
Arus Injeksi (A)	1.0 – 2.0 A	2.5 A (Rata-rata)	4.0 A (Konstan)
Tegangan Akhir (V)	11,10 V	12,00 V	12,40 V (Kapasitas Penuh)
Durasi Siklus (Menit)	162 Menit	145 Menit	120 Menit
Integrasi Monitoring	Tidak Tersedia	Layar LCD Lokal	IoT MQTT & Node-RED (Real-Time)

Diskusi komparatif pada Tabel 1 menegaskan bahwa integrasi kontrol daya arsitektur sistem ini memangkas waktu tunggu hingga 42 menit (peningkatan efisiensi 26%) dan menghasilkan saturasi tegangan yang lebih tinggi [21]

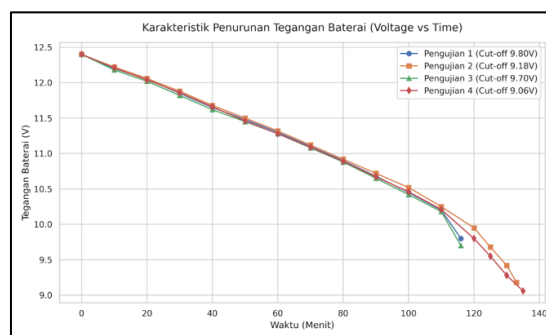
Pengujian Sistem Pelepasan Daya (Discharging)

Validasi kapasitas riil energi dihitung dengan metode *Coulomb Counting* melalui persamaan [20]:

$$Q = I_{rata-rata} \times \Delta t \times 1000$$

Keterangan:

Q = Kapasitas Terpakai (mAh)
 $I_{rata-rata}$ = Arus rata-rata pada interval pengujian (A)
 Δt = Selang waktu pengujian (Jam)
 1000 = Faktor konversi dari Ampere-jam (Ah) ke (mAh)



Gambar 5. Grafik Discharging

Analisis Hasil:

Kurva penurunan tegangan divalidasi terhadap beban kelistrikan USV aktual sebesar 155,17 Watt. Grafik memperlihatkan tren pelepasan daya yang linier dan memadai untuk menopang jalannya operasional penuh kapal secara terus-menerus selama 116 menit (1 jam 56 menit). Pengujian diputus pada batas proteksi tegangan 9,70 V, mengonfirmasi bahwa metode *fast charging* tidak mencederai kapasitas internal dan daya tahan navigasi baterai [21].

Simpulan

Penelitian ini berhasil mendesain, memvalidasi, dan mengimplementasikan sistem *fast charging* pada *charger station* USV menggunakan arsitektur panel surya 100 WP, *controller* MPPT, dan *buck converter* yang dimonitor secara ketat melalui platform IoT (PZEM-017, ESP32, MQTT, Node-RED). Dengan efisiensi konversi daya dari surya ke penyimpanan mencapai 88,5%, *buck converter* secara presisi mempertahankan regulasi pengisian CC-CV pada arus tinggi 4 A dan tegangan sirkuit 14,06 V. Performa metrik membuktikan sistem secara komprehensif lebih unggul dibandingkan metode pengisian konvensional, di mana baterai LiPo USV mencapai titik jenuh (12,40 V) secara stabil hanya dalam waktu 120 menit. Hasil pembebanan dinamis (*discharging*) memberikan waktu operasi navigasi kontinu selama 116 menit, memperlihatkan ekuilibrium rasio waktu yang ideal dan efisien guna menjamin keberlangsungan misi kapal otonom (USV) di perairan pesisir.

Untuk pengembangan sistem di masa mendatang, disarankan adanya peningkatan kapasitas energi melalui penggunaan panel surya berspesifikasi lebih besar dari 100 WP atau menggunakan konfigurasi paralel agar pengisian tetap optimal di segala cuaca. Selain itu, penyempurnaan juga perlu difokuskan pada penambahan fitur persentase baterai saat USV beroperasi, integrasi perekaman data historis dan notifikasi otomatis pada Node-RED, serta pelaksanaan uji ketahanan alat dalam kondisi cuaca yang lebih ekstrem seperti mendung atau hujan ringan.

Daftar Pustaka

- [1] S. Andriansyah, "Konsep Desain Menentukan Hull Type, Material, dan Propulsi Unmanned Surface Vehicle (USV) Untuk Patroli di Wilayah Rokan Hilir," *Seminar Nasional Industri dan Teknologi*, 2023.
- [2] S. A. Sukarno, "Rancang Bangun Data Logger Pada Unmanned Surface Vehicle Untuk Monitoring Posisi dan Heading Kapal Berbasis Internet of Things," *Politeknik Pelayaran Surabaya*, 2024.
- [3] A. G. T. Siregar, "Desain Sistem Kelistrikan pada Unmanned Surface Vehicle," *Politeknik Pelayaran Surabaya*, 2024.
- [4] A. Tomaszewska *et al.*, "Lithium-ion battery fast charging: A review," *eTransportation*, vol. 1, p. 100011, 2019.
- [5] W. Xie, "Safe and Fast Charging Strategies for Lithium-ion Batteries," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023.
- [6] P. Bambang, "Prototype of Battery Charger Using Solar Panel with Fast Charging Method," 2023.
- [7] Y. K. Dini, "Rancang Bangun Charge Controller Panel Surya Dengan Menggunakan Sistem Fast Charging," 2019.
- [8] H. N. Diana Alia, "Development of Power Management on Unmanned Surface Vehicles to Measure Battery Voltage and Power," 2025.
- [9] W. Latifah, M. Nuzuluddin, and I. K. D. Patwari, "Rancang Bangun Kontrol Charger Station Dengan Panel Surya Berbasis Mikrokontroler," *Universitas Hamzanwadi*, 2024.
- [10] H. F. Aldino Purwanto Dua Lembang, "Perencanaan PLTS Untuk SPKLU Tipe Fast Charging Dengan Objek Kendaraan Roda Dua," 2024.
- [11] S. Rolaskhi, "Inovasi Perancangan Dan Perencanaan Bisnis Paket Panel Surya (Solar Home Sistem)," 2019.
- [12] N. F. Wahidin, "Analisis Perbandingan Charging SCC Jenis PWM Dan MPPT Pada Automatic Handwasher with Workstation Bertenaga Surya," *Politeknik Negeri Samarinda*, 2022.
- [13] F. Nizar, "Analisis dan Simulasi Rangkaian Konverter Buck untuk Efisiensi Tinggi dalam Pengisian Perangkat Portabel 5 Volt," 2024.
- [14] R. F. Lumbantobing, "Pengecas Handphone Berbasis Energi Surya Dengan Sistem Pengujian Pada Baterai Lithium Ion dan Baterai Polymer," 2019.
- [15] A. Mubarak, "Implementasi Sensor Pzem-017 Untuk Monitoring Arus, Tegangan dan Instalasi Panel Surya dengan Sistem Data Logger," 2022.
- [16] S. L. Angin, "Prototipe Monitoring Suhu dan Kelembapan Pada Budidaya Kelinci Dengan Komunikasi Modbus Pada Sensor XY-MD02," 2024.
- [17] M. Z. Sirait, "Kontrol Prototipe Ruang Monitoring Kesehatan Berbasis Node-RED," 2022.
- [18] P. Megantoro, "Effect of peak sun hour on energy productivity of solar photovoltaic power system," 2022.
- [19] M. K. Usman, "Analisis Intensitas Cahaya Terhadap Energi Listrik yang Dihasilkan Panel Surya," 2020.
- [20] R. M. Ramadhani, "Rancang Bangun Monitoring State of Charge (SOC) Pada Baterai Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄) Dengan Metode Coulomb Counting," 2024.
- [21] M. S. Zarkab, "A Multiport EV-Fleet Charging Station Based on Modular Multilevel Converter," *2021 IEEE 12th Energy Conversion Congress & Exposition-Asia (ECCE-Asia)*, 2021.