

Solar Tracker Dua Sumbu Berbasis Arduino untuk Sistem Fotovoltaik Kapal Nelayan

Novia Utami Putri^{1*}, Agus Apriyanto², Fauzi Ibrahim³, Farli Rossi⁴, Hafidz Zakiyun Alrasyid⁵, Sasmita⁶, Iqbal Shofwan⁷

¹⁻³Department of Engineering, Politeknik Negeri Lampung, Jl. Soekarno-Hatta No. 10, Bandar Lampung 35141, Indonesia

⁴Department of Electrical, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi, Selangor, Malaysia

⁵Department of Mechanical Engineering, Universitas Indonesia, Depok 16424, West Java, Indonesia

⁶Department of Information Technology, Politeknik Negeri Lampung, Jl. Soekarno-Hatta No. 10, Bandar Lampung 35141, Indonesia

⁷Faculty of Engineering and Computer Science, Universitas Teknokrat Indonesia, Jl. Z. A. Pagar Alam No. 9-11, Bandar Lampung 35142, Indonesia

Received: 05-06-2026

Accepted: 27-08-2026

Keywords:

Arduino Uno;
dual-axis tracker;
fishing boat;
photovoltaic;
solar energy.

Correspondent Email:

noviautami@polinela.ac.id

Abstrak. Kapal nelayan berukuran kecil umumnya masih menggunakan generator berbahan bakar bensin untuk penerangan, sedangkan modul fotovoltaik (PV) tetap tidak mampu menyesuaikan perubahan posisi matahari dan arah haluan kapal. Penelitian ini mengembangkan dan mengevaluasi kinerja lapangan sistem pelacak matahari dua sumbu berbasis Arduino Uno pada modul PV 120 Wp yang dipasang pada kapal nelayan. Sistem menggunakan empat sensor Light Dependent Resistor (LDR) untuk mengendalikan dua aktuator linier melalui modul relai. Pengukuran dilakukan selama lima hari (7–11 September 2023). Tegangan dan arus PV diukur setiap jam pukul 08.00–17.00 WIB, sedangkan beban penerangan AC 14 W dipantau pukul 19.00–06.00 WIB. Seluruh daya dihitung ulang menggunakan persamaan $P = VI$. Rata-rata tegangan, arus, dan daya masing-masing sebesar 14,79 V, 3,85 A, dan 57,35 W. Integrasi diskrit menghasilkan estimasi energi harian sisi PV sebesar $573,49 \pm 186,05$ Wh/hari. Daya tertinggi selama pengisian baterai mencapai 88,37 W, sedangkan beban malam rata-rata sebesar 13,11 W dengan konsumsi 139,13 Wh/hari selama 9–12 jam. Prototipe berhasil mengikuti pergerakan matahari dan menyuplai penerangan kapal, namun peningkatan energi belum dapat dikuantifikasi karena tidak tersedia panel pembanding tetap dan pengukuran konsumsi energi sistem pelacak.

Abstract. Small fishing boats commonly use gasoline generators for lighting, while a fixed photovoltaic (PV) module cannot compensate for changes in solar position and vessel heading. This study develops and field-characterizes an Arduino Uno-based dual-axis tracker for a 120-Wp PV module installed on a fishing boat. Four light-dependent resistors arranged as two opposing sensor pairs command two linear-actuator channels through relay modules. Field measurements were collected for five days (7-11 September 2023): PV voltage and current were recorded hourly from 08:00 to 17:00 WIB, and the 14-W AC lighting load was monitored from 19:00 to 06:00 WIB. All power values were recalculated from the raw measurements using $P = VI$. Across 50 daytime observations, the mean voltage, current, and corrected power were 14.79 V, 3.85 A, and 57.35 W, respectively. Discrete hourly integration produced a gross PV-side energy estimate of 573.49 ± 186.05 Wh/day. During confirmed battery charging, the highest corrected power was 88.37 W on day

2 at 13:00; a 102.51-W terminal reading at 14:00 occurred after the charge controller indicated a full battery and was therefore interpreted separately. The nighttime load averaged 13.11 W and 139.13 Wh/day, with approximately 9-12 h of service. The prototype successfully tracked sunlight and supplied boat lighting; however, the absence of a fixed-panel baseline and tracker-drive energy measurement prevents a quantitative claim of energy-gain efficiency.

1. PENDAHULUAN

Kapal nelayan berukuran kecil memerlukan energi listrik untuk mendukung sistem navigasi, komunikasi, dan penerangan pada malam hari. Di banyak wilayah pesisir Indonesia, kebutuhan listrik tersebut masih dipenuhi menggunakan generator berbahan bakar bensin, sehingga menyebabkan tingginya biaya operasional, konsumsi bahan bakar, dan emisi di lingkungan sekitar. Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) berbasis fotovoltaik (*photovoltaic/PV*) menjadi salah satu alternatif yang menjanjikan untuk aplikasi energi terdistribusi dan bergerak karena memiliki desain yang modular, biaya operasional yang rendah, serta penerapannya yang terus berkembang pesat [1]. Penelitian-penelitian sebelumnya juga menunjukkan bahwa sistem PV dengan kapasitas yang sesuai mampu memenuhi sebagian besar kebutuhan energi listrik pada kapal nelayan berukuran kecil [2], [3].

Keluaran daya modul PV terutama dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari, temperatur sel, dan sudut datang radiasi matahari terhadap permukaan modul. Modul PV tetap (*fixed PV module*) memiliki konstruksi yang sederhana dan relatif murah, namun orientasinya tidak dapat menyesuaikan pergerakan semu matahari sepanjang hari sehingga penyerapan energi menjadi kurang optimal. Sistem pelacak matahari satu sumbu (*single-axis solar tracker*) mampu mengompensasi perubahan pada satu sumbu rotasi, sedangkan sistem pelacak dua sumbu (*dual-axis solar tracker*) dapat mengatur sudut azimut dan elevasi secara terus-menerus sehingga orientasi modul selalu lebih sesuai terhadap arah datangnya radiasi matahari. Beberapa penelitian berbasis Arduino melaporkan bahwa sistem pelacak dua sumbu menghasilkan keluaran daya listrik yang lebih tinggi dibandingkan panel tetap pada kondisi pengujian terestrial yang bersifat statis [8]–[10].

Namun demikian, besarnya peningkatan tersebut sangat dipengaruhi oleh lokasi geografis, desain pelacak, kondisi lingkungan, dan metode evaluasi yang digunakan.

Kondisi operasi pada kapal nelayan berbeda secara signifikan dengan sistem PV yang dipasang secara tetap di darat. Perubahan arah haluan kapal menyebabkan orientasi horizontal modul PV terus berubah, sedangkan gerakan mengangguk (*pitch*) dan menggeleng (*roll*) akibat gelombang mengubah kemiringan modul terhadap posisi matahari. Selain itu, sistem PV di lingkungan laut juga menghadapi getaran, beban angin, paparan air laut, korosi, keterbatasan ruang pemasangan, serta bayangan yang berubah-ubah [4]–[7], [14], [15]. Kondisi tersebut menjadikan sistem pelacak dua sumbu secara teknis lebih menarik untuk diterapkan, namun sekaligus meningkatkan kompleksitas mekanis, beban struktur, kebutuhan perawatan, dan konsumsi energi sistem pelacak (*parasitic energy consumption*). Oleh karena itu, evaluasi kinerja melalui pengujian lapangan pada kondisi operasi yang sebenarnya sangat diperlukan sebelum peningkatan penyerapan energi dapat dibuktikan secara kuantitatif.

Kesenjangan penelitian (*research gap*) yang diangkat dalam penelitian ini adalah masih terbatasnya bukti eksperimental lapangan mengenai penerapan sistem pelacak PV dua sumbu berbasis Arduino Uno berbiaya rendah pada kapal nelayan berukuran kecil yang beroperasi di lingkungan laut yang dinamis. Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan dan mengevaluasi secara eksperimental sistem pelacak PV dua sumbu dengan memverifikasi kinerja subsistem pendeteksi, aktuasi, dan konversi daya, menghitung kembali data tegangan dan arus selama lima hari menggunakan metode perhitungan daya yang konsisten, serta mengevaluasi apakah energi listrik yang tersimpan mampu memenuhi kebutuhan beban penerangan malam hari sebesar 14 W. Berbeda dengan naskah awal,

penelitian ini tidak mengklaim adanya peningkatan efisiensi pelacakan dibandingkan modul PV tetap karena tidak dilakukan pengukuran secara simultan menggunakan panel pembanding (*fixed-panel baseline*) serta tidak diukur konsumsi energi listrik dari aktuatur sistem pelacak.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sistem Fotovoltaik untuk Kapal Nelayan

Nugraha mengulas penerapan sistem fotovoltaik (PV) pada kapal nelayan dan mengidentifikasi bahwa penerangan, peralatan bantu, serta pengisian baterai merupakan aplikasi awal yang paling praktis dari pemanfaatan energi surya [2]. Penelitian eksperimental dan analisis ekonomi selanjutnya pada kapal nelayan berukuran kecil menunjukkan bahwa sistem PV berkapasitas 100 Wp mampu mengurangi ketergantungan terhadap sumber listrik konvensional, meskipun besarnya kontribusi yang dihasilkan dipengaruhi oleh profil beban, potensi radiasi matahari, dan kapasitas penyimpanan energi [3]. Penelitian lain pada bidang maritim telah mengevaluasi penerapan PV pada atap kapal serta integrasi sumber energi terbarukan ke dalam sistem kelistrikan kapal [4], [5], [15]. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa penerapan sistem PV pada kapal secara teknis memungkinkan, namun pengaruh pergerakan kapal dan kondisi lingkungan laut tetap harus dipertimbangkan.

2.2. Sistem Pelacak Matahari dan Kendala Operasi di Lingkungan Laut

Sistem pelacak dua sumbu (*dual-axis tracker*) mampu mengurangi ketidaksesuaian sudut datang cahaya dengan mengatur orientasi modul pada dua arah gerakan. Prasetyo *et al.* menerapkan metode kendali logika fuzzy pada sistem pelacak dua sumbu [8], sedangkan Putri *et al.* melaporkan sistem pelacak matahari berbasis Arduino pada jurnal *Electrician* [9]. Selain itu, metode pelacakan astronomis (*astronomical tracking*) juga telah dikembangkan menggunakan sistem kendali terprogram [10]. Namun, sebagian besar prototipe tersebut divalidasi pada kondisi terestrial yang bersifat statis, sehingga modul fotovoltaik tidak dipengaruhi oleh pergerakan

kapal, perubahan arah haluan, maupun perubahan kemiringan akibat gelombang. Oleh karena itu, kinerja yang dilaporkan belum dapat digeneralisasikan secara langsung untuk aplikasi pada kapal nelayan berukuran kecil.

Pada sistem PV di lingkungan laut, getaran dapat memengaruhi keluaran daya serta keandalan struktur [7], sedangkan paparan air laut dan semburan garam dapat mengganggu karakteristik kelistrikan sistem [6]. Selain itu, beban angin menjadi salah satu pertimbangan utama dalam perancangan struktur penyangga PV yang dapat bergerak [14]. Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa sistem pelacak yang digunakan tidak hanya harus mampu mengikuti arah datang cahaya matahari, tetapi juga harus memiliki kekuatan mekanis yang memadai dan konsumsi energi yang efisien.

Meskipun metode pelacakan astronomis umumnya memberikan akurasi penunjukan yang tinggi, metode tersebut memerlukan informasi waktu yang presisi, koordinat geografis, serta algoritma kendali yang lebih kompleks. Sebaliknya, sistem pelacakan berbasis *Light Dependent Resistor* (LDR) menawarkan implementasi yang lebih sederhana dan berbiaya rendah karena orientasi panel disesuaikan secara langsung berdasarkan intensitas cahaya yang diterima sensor. Pada kapal nelayan berukuran kecil, yang mengutamakan kesederhanaan sistem, konsumsi daya yang rendah, dan kemudahan perawatan, sensor LDR merupakan solusi yang lebih praktis meskipun secara teoritis memiliki akurasi pelacakan yang lebih rendah pada kondisi cuaca tertentu [9], [10].

2.3. Posisi Penelitian

Penelitian ini diposisikan sebagai karakterisasi kinerja lapangan (*field characterization*) dari sebuah prototipe berbiaya rendah, bukan sebagai perbandingan terkontrol antarstrategi pelacakan matahari. Kontribusi utama penelitian ini meliputi integrasi sistem pendeteksi cahaya empat kuadran, aktuasi dua sumbu, sistem PLTS *off-grid* yang terdiri atas baterai dan inverter, serta pengukuran langsung di atas kapal selama lima hari. Selain itu, analisis yang dilakukan membedakan antara estimasi energi pada sisi keluaran PV (*gross PV-side energy*) dan energi yang tersimpan pada baterai, serta mengidentifikasi secara eksplisit jenis

pengukuran yang masih diperlukan untuk menentukan peningkatan energi bersih (*net tracker gain*) dari sistem pelacak.

2.4. Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya

Tabel 1 merangkum hubungan antara penelitian-penelitian terdahulu yang representatif dengan penelitian ini. Sebagian besar penelitian pada bidang maritim berfokus pada kelayakan penerapan sistem PV atau potensi energi pada kapal, sedangkan penelitian mengenai sistem pelacak umumnya dilakukan pada platform terestrial yang bersifat statis. Oleh karena itu, penelitian ini memperluas penerapan sistem pelacak dua sumbu berbiaya rendah ke kapal nelayan yang beroperasi secara nyata. Namun demikian, penelitian ini masih dikategorikan sebagai karakterisasi lapangan karena tidak menggunakan panel tetap sebagai pembanding yang dioperasikan secara simultan.

Tabel 1. Posisi penelitian ini dibandingkan dengan penelitian terdahulu.

Penelitian	Fokus	Keterbatasan / Perbedaan
[2]	Penerapan PV pada kapal nelayan	Studi tinjauan; tidak mengembangkan prototipe pelacak
[3]	Sistem PV 100 Wp pada kapal nelayan	Analisis ekonomi dan energi; menggunakan panel tetap
[8]	Pelacak dua sumbu berbasis logika fuzzy	Pengujian pada platform terestrial statis
[9]	Sistem pelacak matahari berbasis Arduino	Aplikasi skala rumah tangga
[10]	Kendali pelacak dua sumbu berbasis metode astronomis	Platform terestrial dengan kendali terprogram
Penelitian ini	Sistem PV dua sumbu berbasis LDR pada kapal nelayan	Pengujian lapangan selama lima hari; tanpa panel pembanding tetap

Perbandingan tersebut juga memperjelas ruang lingkup klaim yang disampaikan dalam penelitian ini. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa seluruh subsistem dapat beroperasi dengan baik, menghasilkan keluaran daya pada

terminal PV, serta mampu menyediakan layanan penerangan pada malam hari. Namun demikian, hasil tersebut belum dapat digunakan untuk menentukan persentase peningkatan energi akibat sistem pelacak, karena analisis tersebut memerlukan pengukuran radiasi matahari secara sinkron, panel tetap dengan konfigurasi geometris yang identik sebagai pembanding, serta pengukuran konsumsi daya aktuator dan sistem kendali.

2.5. Persyaratan Perancangan Berdasarkan Kajian Literatur

Berdasarkan hasil kajian literatur, terdapat empat persyaratan praktis yang perlu dipenuhi dalam perancangan sistem pelacak fotovoltaiik untuk kapal nelayan berukuran kecil. Pertama, sistem pendeteksi dan pengendalian harus mampu mengompensasi perubahan sudut pada arah horizontal maupun vertikal, serta menerapkan *deadband* atau aturan pengambilan keputusan yang setara untuk mencegah relai bekerja berulang (*relay chatter*) ketika kondisi intensitas cahaya telah seimbang. Kedua, jalur energi dari panel PV, baterai, aktuator, dan beban harus diukur secara terpisah sehingga energi yang dihasilkan panel, energi yang tersimpan di baterai, konsumsi energi sistem pelacak, dan energi yang disalurkan ke beban tidak diperlakukan sebagai besaran yang sama.

Ketiga, struktur penyangga panel danudukan aktuator harus mampu menahan pengaruh getaran, beban angin, perubahan arah haluan yang berulang, kelembapan, serta paparan air laut. Oleh karena itu, rumah pelindung komponen listrik dan sambungan kabel harus dirancang agar tahan terhadap korosi dan aman dari kontak yang tidak diinginkan. Keempat, klaim mengenai peningkatan kinerja sistem harus didukung oleh pengujian menggunakan panel tetap sebagai pembanding yang dioperasikan secara bersamaan, pengukuran intensitas radiasi matahari dan temperatur modul, serta durasi pengujian yang cukup panjang untuk merepresentasikan berbagai kondisi cuaca dan keadaan laut. Pertimbangan-pertimbangan tersebut menjadi dasar dalam perancangan perangkat keras serta metode evaluasi kinerja yang disajikan pada bagian-bagian berikutnya.

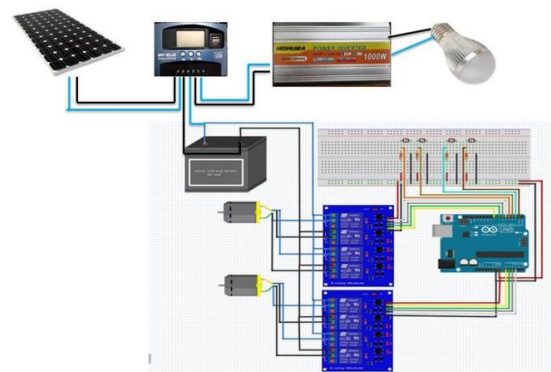
3. METODE PENELITIAN

3.1. Lokasi Penelitian dan Arsitektur Sistem

Prototipe dirakit dan diuji fungsionalnya di Laboratorium Teknik Elektro, kemudian dipasang pada sebuah kapal nelayan di Desa Sukajaya Lempasing, Kecamatan Teluk Pandan, Kabupaten Pesawaran, Lampung. Pengambilan data lapangan dilakukan pada tanggal 7–11 September 2023. Periode pengukuran selama lima hari dipilih untuk mengevaluasi kinerja operasional prototipe pada kondisi lapangan yang representatif sesuai dengan jadwal eksperimen yang tersedia. Pengukuran dilakukan pada kondisi operasi nyata di kapal nelayan, dengan kapal tetap berada dalam keadaan bersandar di lokasi penelitian. Sistem off-grid yang digunakan terdiri atas modul fotovoltaik monokristalin berkapasitas 120 Wp, Solar Charge Controller (SCC), baterai timbal-asam (lead-acid) 12 V 35 Ah, inverter 1000 W, serta beban penerangan berupa dua lampu LED AC dengan total daya 14 W. Sistem pelacak menggunakan mikrokontroler Arduino Uno, empat sensor Light Dependent Resistor (LDR), modul relai, dan dua kanal aktuator linier. Spesifikasi utama sistem ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Konfigurasi Utama Perangkat Keras Prototipe.

Komponen	Spesifikasi/Fungsi
Modul PV	Monokristalin, 120 Wp; tegangan nominal 19,2 V; arus nominal 6,25 A; Voc 24,8 V; Isc 6,35 A
Baterai	Aki timbal-asam (lead-acid), 12 V, 35 Ah
SCC	Pengendali pengisian 12/24 V, kapasitas kanal pengisian/beban 30 A
Inverter	12 VDC menjadi 220/240 VAC, daya nominal 1000 W
Pengendali pelacak	Arduino Uno dengan empat sensor LDR yang disusun dalam dua pasang berlawanan
Aktuator	Dua kanal aktuator linier yang dikendalikan melalui pembalikan polaritas relai
Beban malam	Dua lampu LED dengan total daya nominal 14 W



Gambar 1. Arsitektur sistem kelistrikan yang terdiri atas modul PV, baterai, beban, dan subsistem pelacak dua sumbu.

3.2. Logika Kendali Sistem Pelacak

Empat sensor LDR disusun sebagai dua pasang sensor yang saling berlawanan untuk mendeteksi ketidakseimbangan intensitas cahaya pada arah horizontal dan vertikal. Pada setiap sumbu, Arduino membandingkan keluaran dari kedua sensor. Apabila salah satu sensor menerima intensitas cahaya yang lebih tinggi dibandingkan sensor pasangannya, mikrokontroler mengaktifkan pasangan relai yang sesuai dan membalik polaritas aktuator sehingga panel bergerak menuju arah datangnya cahaya. Ketika keluaran kedua sensor telah mendekati kondisi seimbang, relai dinonaktifkan sehingga aktuator berhenti bergerak.

Program kendali yang diterapkan menggunakan waktu tunda (*actuation delay*) selama 500 ms untuk mencegah relai bekerja secara berulang (*relay switching*) dalam waktu yang sangat singkat. Prinsip kendali diferensial yang sama diterapkan pada sumbu kedua. Sebelum pengujian lapangan dilakukan, relai, aktuator, SCC, inverter, serta tegangan rangkaian terbuka (*open-circuit voltage*) modul PV diuji secara terpisah untuk memastikan seluruh subsistem berfungsi dengan baik.



Gambar 2. Orientasi prototipe pada pagi, siang, dan sore hari selama pengujian lapangan.

3.3. Protokol Pengukuran dan Pengolahan Data

Tegangan dan arus keluaran modul PV diukur secara manual menggunakan multimeter digital genggam setiap satu jam pada pukul 08.00 hingga 17.00 WIB. Kondisi cuaca dicatat secara kualitatif sebagai cerah, berawan, mendung, atau hujan. Dengan interval pencatatan satu jam, data daya yang diperoleh merupakan sampel diskrit untuk memperkirakan variasi keluaran fotovoltaiik sepanjang hari, bukan rekaman kontinu.

Selama operasi malam hari, tegangan dan arus AC pada keluaran inverter diukur setiap satu jam mulai pukul 19.00 hingga 06.00 WIB, sedangkan lampu dinyalakan sekitar pukul 18.00 WIB. Akurasi instrumen, intensitas radiasi matahari, temperatur modul, state of charge (SOC) baterai, orientasi kapal, kecepatan angin, serta arus yang dikonsumsi aktuator tidak direkam selama penelitian. Untuk mengoreksi ketidakkonsistenan pada tabel hasil sebelumnya, seluruh nilai daya dihitung kembali berdasarkan hasil pengukuran tegangan dan arus menggunakan persamaan:

$$P_i = V_i I_i \quad (1)$$

Estimasi energi harian pada sisi keluaran modul PV (gross PV-side energy) dihitung menggunakan metode integrasi diskrit terhadap data daya per jam:

$$E_d = \sum P_i \Delta t, \text{ with } \Delta t = 1 \text{ h} \quad (2)$$

Persamaan (2) menghasilkan estimasi energi harian pada sisi keluaran PV berdasarkan integrasi diskrit atas sampel daya yang dicatat secara manual setiap satu jam; nilai tersebut bukan merupakan pengukuran langsung energi yang tersimpan di baterai. Perhitungan ini juga mencakup data keluaran terminal PV yang direkam setelah *Solar Charge Controller* (SCC) menunjukkan bahwa baterai telah terisi penuh. Prosedur integrasi diskrit yang sama diterapkan pada data beban AC. Selanjutnya, hasil pengukuran harian dirangkum menggunakan nilai rata-rata aritmetika dan simpangan baku sampel selama periode pengamatan lima hari.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

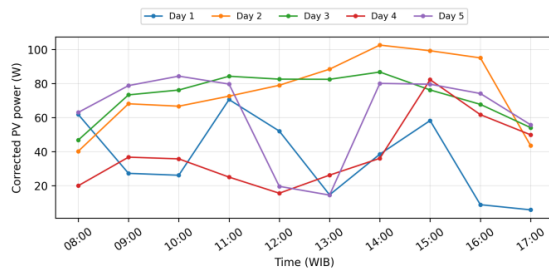
Pengujian awal menunjukkan bahwa modul PV menghasilkan tegangan rangkaian terbuka (*open-circuit voltage*) sebesar 20,0–20,3 V, lebih rendah dibandingkan nilai Voc pada spesifikasi pabrik sebesar 24,8 V. Inverter menghasilkan tegangan keluaran sekitar 220 VAC. Pengujian relai membuktikan bahwa aktuator mampu bergerak maju dan mundur sesuai perintah kendali, sedangkan panel surya dapat mengubah orientasinya dari pagi hingga sore hari. *Solar Charge Controller* (SCC) juga mampu mengisi baterai dan secara otomatis menghentikan proses pengisian ketika indikator baterai penuh tercapai. Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa seluruh subsistem telah berfungsi sesuai rancangan. Namun demikian, akurasi pelacakan belum dapat dievaluasi secara kuantitatif karena kesalahan sudut (*angular error*) maupun ketidakseimbangan pembacaan sensor tidak direkam selama pengujian. Setelah seluruh subsistem berfungsi dengan baik, prototipe selanjutnya dievaluasi pada kondisi lapangan menggunakan kapal nelayan.

Hasil pengukuran selama lima hari yang telah dikoreksi disajikan pada Tabel 3. Nilai rata-rata tegangan dan arus keluaran modul PV masing-masing sebesar 14,79 V dan 3,85 A, sedangkan rata-rata daya hasil perhitungan ulang mencapai 57,35 W. Estimasi energi harian pada sisi keluaran PV (*gross PV-side energy*) sebesar 573,49 Wh/hari dengan simpangan baku 186,05 Wh/hari. Kondisi cuaca cerah pada hari kedua dan ketiga menghasilkan energi tertinggi, sedangkan kondisi berawan maupun hujan pada hari pertama dan keempat menyebabkan penurunan keluaran energi secara signifikan.

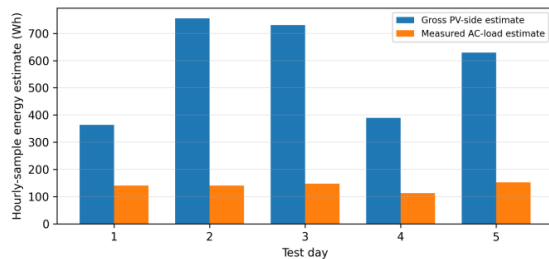
Tabel 3. Ringkasan hasil keluaran PV selama lima hari pengujian yang telah dikoreksi.

Hari	Kondisi Cuaca	Daya Rata-rata (W)	Energi Kotor PV (Wh)	Indikator SCC Penuh
1	Campuran/Hujan	36,39	363,93	–
2	Cerah	75,50	754,98	14.00
3	Cerah	73,01	730,11	14.00
4	Berawan/Cerah	38,92	389,19	–
5	Campuran/Cerah	62,92	629,22	16.00
Rata-rata		57,35	573,49	–

Variasi daya PV selama lima hari ditunjukkan pada Gambar 3, sedangkan perbandingan antara estimasi energi pada sisi PV dan energi yang digunakan oleh beban AC disajikan pada Gambar 4.



Gambar 3. Profil daya PV hasil koreksi selama lima hari pengukuran.



Gambar 4. Perbandingan estimasi energi sisi keluaran PV dan energi beban AC yang terukur.

Daya tertinggi yang masih terjadi selama proses pengisian baterai adalah 88,37 W pada hari kedua pukul 13.00 WIB, dengan tegangan 14,30 V dan arus 6,18 A. Pada pukul 14.00 WIB di hari yang sama diperoleh daya sebesar 102,51 W dari hasil perkalian tegangan 20,10 V dan arus 5,10 A. Namun, catatan lapangan menunjukkan bahwa pada saat tersebut SCC telah mengindikasikan baterai dalam kondisi penuh. Oleh karena itu, nilai tersebut tidak dapat diinterpretasikan sebagai daya pengisian baterai, melainkan merepresentasikan kondisi operasi yang berbeda. Fenomena peningkatan tegangan setelah indikator baterai penuh juga diamati pada hari ketiga dan kelima.

Variasi keluaran daya antahari menunjukkan bahwa kondisi cuaca dan keadaan operasi sangat memengaruhi performa sistem. Karena penelitian ini tidak mengukur intensitas radiasi matahari, temperatur modul, orientasi kapal, maupun konsumsi daya aktuator, kontribusi masing-masing faktor terhadap keluaran PV tidak dapat dipisahkan secara

kuantitatif. Oleh sebab itu, hasil penelitian lebih tepat diperlakukan sebagai karakterisasi kinerja lapangan (*field performance*) dan bukan sebagai ukuran efisiensi intrinsik sistem pelacak atau peningkatan energi dibandingkan panel tetap.

Estimasi energi beban AC hasil perhitungan ulang selama lima hari berturut-turut adalah 140,77 Wh, 141,24 Wh, 148,08 Wh, 113,29 Wh, dan 152,26 Wh, dengan rata-rata sebesar 139,13 Wh/hari serta daya aktif rata-rata 13,11 W. Keluaran AC masih tersedia hingga pukul 05.00 WIB pada empat hari pengujian dan hingga pukul 03.00 WIB pada hari keempat. Dengan lampu mulai dinyalakan sekitar pukul 18.00 WIB, lama pelayanan penerangan yang diamati berkisar antara 9–12 jam.

Baterai 12 V 35 Ah memiliki energi nominal sekitar 420 Wh, atau sekitar 336 Wh apabila diasumsikan menggunakan Depth of Discharge (DoD) sebesar 80%. Energi beban yang terukur masih berada di bawah kapasitas tersebut sehingga penghentian operasi lebih awal pada hari keempat tidak dapat dijelaskan hanya oleh kapasitas nominal baterai. Kondisi cuaca berawan yang menyebabkan pengisian tidak penuh, kondisi baterai, konsumsi daya internal inverter, rugi-rugi konversi energi, serta mekanisme pemutusan tegangan rendah (*low-voltage cutoff*) pada inverter kemungkinan turut memengaruhi lama operasi sistem. Untuk memastikan kontribusi masing-masing faktor diperlukan pengukuran arus sisi DC, tegangan baterai saat berbeban, dan state of charge (SOC) baterai.

Penggunaan inverter berkapasitas 1000 W untuk melayani beban penerangan sebesar 14 W merupakan kelemahan desain karena kapasitasnya jauh melebihi kebutuhan beban dan berpotensi meningkatkan rugi-rugi konversi maupun daya siaga. Penggunaan lampu LED 12 V DC secara langsung atau inverter dengan kapasitas yang lebih kecil perlu dievaluasi pada pengembangan berikutnya. Besarnya potensi penghematan tersebut belum diukur dalam penelitian ini.

Hasil pengujian lapangan menunjukkan bahwa sistem PLTS yang dikembangkan mampu menyediakan energi untuk penerangan tambahan pada kapal nelayan berukuran kecil, sejalan dengan penelitian sebelumnya [2], [3]. Sistem pelacak juga berhasil mengubah

orientasi panel dari pagi hingga sore sesuai prinsip kerja pelacak dua sumbu yang dilaporkan pada penelitian terdahulu [8]–[10]. Berbeda dengan pengujian terestrial statis [8]–[10], prototipe ini diuji langsung pada kapal nelayan yang berada dalam kondisi bersandar di lokasi penelitian. Dengan demikian, hasil ini belum merepresentasikan secara penuh kondisi kapal saat berlayar dan tidak dapat digunakan untuk menghitung peningkatan energi akibat sistem pelacak tanpa panel tetap pembanding serta pengukuran konsumsi energi sensor, Arduino, relai, dan aktuator.

Keterbatasan penelitian meliputi durasi pengujian lima hari, pencatatan manual setiap satu jam, ketidakpastian akurasi instrumen yang tidak dievaluasi, serta pencatatan cuaca yang masih kualitatif. Intensitas radiasi matahari, temperatur modul, kecepatan angin, tingkat getaran, orientasi kapal, pengaruh korosi, dan kesalahan pelacakan (*tracking error*) juga tidak direkam. Oleh karena itu, nilai 573,49 Wh/hari harus dipahami sebagai estimasi energi pada terminal keluaran PV (*gross PV-side energy*), bukan energi bersih setelah dikurangi konsumsi sistem pelacak dan bukan energi yang benar-benar tersimpan di baterai. Pengujian berikutnya memerlukan data logger sinkron, panel tetap pembanding, serta meter energi DC pada jalur PV, baterai, aktuator, dan beban.

5. KESIMPULAN

Prototipe pelacak matahari dua sumbu berbasis Arduino Uno berhasil mengubah orientasi modul PV dan menyediakan energi untuk beban penerangan kapal selama pengujian lima hari. Dari 50 pengamatan siang hari, rata-rata tegangan, arus, dan daya keluaran PV masing-masing sebesar 14,79 V, 3,85 A, dan 57,35 W, dengan estimasi energi sisi keluaran PV (*gross PV-side energy*) sebesar 573,49 ± 186,05 Wh/hari. Beban malam memiliki daya rata-rata 13,11 W dengan konsumsi 139,13 Wh/hari dan lama pelayanan sekitar 9–12 jam. Nilai energi sisi PV tersebut tidak dapat dinyatakan sebagai peningkatan energi bersih karena penelitian tidak menggunakan panel tetap pembanding dan tidak mengukur konsumsi energi sistem pelacak.

Penggunaan inverter 1000 W untuk beban penerangan 14 W merupakan kelemahan

desain karena kapasitasnya jauh melebihi kebutuhan. Untuk meningkatkan efisiensi sistem, pengembangan selanjutnya perlu mengevaluasi penggunaan lampu LED 12 V DC secara langsung atau inverter berkapasitas lebih kecil, serta mengukur neraca energi pada jalur PV, baterai, aktuator, dan beban.

Pengujian lanjutan perlu menggunakan modul PV tetap dengan spesifikasi yang sama sebagai pembanding, pencatatan sinkron menggunakan data logger, serta pengukuran intensitas radiasi matahari, temperatur modul, state of charge (SOC) baterai, orientasi panel atau kapal, dan konsumsi energi aktuator. Durasi pengujian yang lebih panjang juga diperlukan untuk menilai keandalan struktur terhadap getaran, beban angin, korosi, dan paparan air laut.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] International Energy Agency, Renewables 2024: Analysis and Forecast to 2030. Paris, France: IEA, 2024.
- [2] I. M. A. Nugraha, “Penggunaan pembangkit listrik tenaga surya sebagai sumber energi pada kapal nelayan: Suatu kajian literatur,” *J. Sumberdaya Akuatik Indopasifik*, vol. 4, no. 2, pp. 101-110, 2020, doi: 10.46252/jsai-fpik-unipa.2020.vol.4.no.2.76.
- [3] I. M. A. Nugraha, F. Luthfiani, G. Sotiyaramadhani, A. Widagdo, and I. G. M. N. Desnanjaya, “Technical-economical assessment of solar PV systems on small-scale fishing vessels,” *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 13, no. 2, pp. 1150-1157, 2022, doi: 10.11591/ijpeds.v13.i2.pp1150-1157.
- [4] M. Abdullah-Al-Mahbub, A. R. M. Towfiqul Islam, E. Alam, and M. R. Asha, “Sustainable solar energy potential on marine passenger ships of Bay of Bengal: A way of reducing carbon dioxide emissions and disaster risk reduction,” *Energy Explor. Exploit.*, vol. 41, no. 5, pp. 1697-1723, 2023, doi: 10.1177/01445987231173097.
- [5] P. C. Pan, Y. W. Sun, C. Q. Yuan, X. P. Yan, and X. J. Tang, “Research progress on ship power systems integrated with new energy sources: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 144, art. no. 111048, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111048.
- [6] Y. Zhang and C. Yuan, “Effects of marine environment on electrical output characteristics of PV module,” *J. Renew.*

- Sustain. Energy, vol. 13, no. 5, art. no. 053701, 2021, doi: 10.1063/5.0060201.
- [7] Y. Zhang and C. Yuan, "Effects of vibration on output characteristics of shipboard PV modules," *Reg. Stud. Mar. Sci.*, vol. 47, art. no. 101989, 2021, doi: 10.1016/j.rsma.2021.101989.
- [8] R. A. Prasetyo, A. Stefanie, and W. N. Adzillah, "Optimasi daya pada panel surya dengan solar tracker system dual axis menggunakan metode fuzzy logic controller," *J. Ilm. Wahana Pendidikan*, vol. 7, no. 2, pp. 1-8, 2021, doi: 10.5281/zenodo.4657052.
- [9] N. U. Putri, F. Santoso, and F. Trisnawati, "Rancang bangun solar tracking system pembangkit listrik tenaga surya skala rumah tangga berbasis microcontroller Arduino Uno," *Electrician*, vol. 16, no. 2, pp. 161-167, 2022, doi: 10.23960/elc.v16n2.2266.
- [10] Y. Prasetyo, B. Triyono, and H. Kusbandono, "Dual axis solar tracker using astronomic method based smart relay," *J. Adv. Res. Electr. Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 28-33, 2021, doi: 10.12962/jaree.v5i1.156.
- [11] Y. H. Anoi, A. Yani, and Y. W., "Analisis sudut panel solar cell terhadap daya output dan efisiensi yang dihasilkan," *Turbo: J. Program Studi Tek. Mesin*, vol. 8, no. 2, pp. 0-7, 2019, doi: 10.24127/trb.v8i2.1051.
- [12] L. Rudawin, N. Rajabiah, and D. Irawan, "Analisa sistem kerja photovoltaic berdasarkan sudut kemiringan menggunakan monocrystalline dan polycrystalline," *Turbo: J. Program Studi Tek. Mesin*, vol. 9, no. 1, pp. 129-137, 2020, doi: 10.24127/trb.v9i1.1221.
- [13] P. Harahap, "Pengaruh temperatur permukaan panel surya terhadap daya yang dihasilkan dari berbagai jenis sel surya," *RELE: Rekayasa Elektr. dan Energi*, vol. 2, no. 2, pp. 73-80, 2020.
- [14] B. Nan, Y. Chi, Y. Jiang, and Y. Bai, "Wind load and wind-induced vibration of photovoltaic supports: A review," *Sustainability*, vol. 16, no. 6, art. no. 2551, 2024, doi: 10.3390/su16062551.
- [15] C. Karatug and Y. Durmusoglu, "Design of a solar photovoltaic system for a Ro-Ro ship and estimation of performance analysis: A case study," *Sol. Energy*, vol. 207, pp. 1259-1268, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.07.037.
- [16] H. D. Liu, Q. Zhang, X. X. Qi, Y. W. Han, and F. N. Lu, "Estimation of PV output power in moving and rocking hybrid energy marine ships," *Appl. Energy*, vol. 204, pp. 362-372, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.07.014.
- [17] N. Anani and H. Ibrahim, "Adjusting the single-diode model parameters of a photovoltaic module with irradiance and temperature," *Energies*, vol. 13, no. 12, art. no. 3226, 2020, doi: 10.3390/en13123226.
- [18] C. F. Abe, J. B. Dias, G. Notton, and G. A. Faggianelli, "Experimental application of methods to compute solar irradiance and cell temperature of photovoltaic modules," *Sensors*, vol. 20, no. 9, art. no. 2490, 2020, doi: 10.3390/s20092490.