

ANALISIS KESEIMBANGAN ENERGI DAN PENENTUAN KAPASITAS PV-BATERAI UNTUK RUMPON CERDAS BERPROPELER HEKSAGONAL

ENERGY BALANCE ANALYSIS AND PV-BATTERY SIZING FOR A SMART RUMPON WITH A HEXAGONAL PROPELLER

Putri Rizkiah¹, Dedi Kurniawan^{2*}, Andi Fiardi³, Baihaqi³, M. Ikhsan⁴, Rizqiya Windy Saputra¹

¹STAI Tgk Chik Pante Kulu, Darussalam, Banda Aceh, Indonesia

² Program Studi Sistem Kelistrikan Kapal, Politeknik Pelayaran Malahayati, Aceh Besar, Indonesia

³ Program Studi Permesinan Kapal, Politeknik Pelayaran Malahayati, Aceh Besar, Indonesia

⁴ Universitas Islam Negeri Ar-Raniry Banda Aceh, Banda Aceh, Indonesia

*email: dedikurniawan@poltekpelaceh.ac.id

ABSTRAK

Rumpon cerdas memerlukan sumber energi mandiri untuk sensor, komunikasi, lampu navigasi, kontrol, dan penggerak korektif. Penambahan propeler heksagonal meningkatkan kemampuan station-keeping, tetapi juga menambah beban listrik yang harus dipenuhi sistem fotovoltaik dan baterai secara andal. Penelitian ini menyusun analisis keseimbangan energi dan menentukan kombinasi kapasitas PV-baterai untuk rumpon berpropeler heksagonal menggunakan metode perhitungan skenario. Daya poros propeler pada titik desain sebesar 145,34 W dikonversi menjadi kebutuhan listrik motor sekitar 180 W setelah memperhitungkan efisiensi motor dan pengendali. Beban non-propulsi terdiri atas sensor-kontrol, komunikasi, lampu navigasi, pelacak-keamanan, serta rugi-rugi sistem sebesar 724 Wh/hari. Tiga duty cycle motor (1, 2, dan 3 jam/hari), tiga kondisi peak-sun-hour (3,0; 4,2; dan 5,0 jam/hari), serta kapasitas PV 300, 400, dan 500 Wp dianalisis dengan performance ratio 0,75. Pada duty cycle 2 jam/hari, kebutuhan energi total adalah 1,084 kWh/hari. Pada kondisi desain konservatif 4,2 PSH, sistem 300 Wp mengalami defisit 139 Wh/hari, sedangkan 400 dan 500 Wp menghasilkan surplus masing-masing 176 dan 491 Wh/hari. Pada stress case 3,0 PSH, 500 Wp masih menghasilkan surplus 41 Wh/hari untuk duty cycle 2 jam. Baterai 2,4 kWh menyediakan otonomi sekitar 1,67 hari, sedangkan 3,6 kWh sekitar 2,50 hari. Konfigurasi 400 Wp–2,4 kWh layak untuk operasi moderat, sementara 500 Wp–3,6 kWh lebih sesuai untuk desain berketahanan tinggi.

Kata kunci: Rumpon Cerdas, Fotovoltaik, Baterai, Keseimbangan Energi, Propeler Heksagonal

ABSTRACT

A smart fish aggregating device (rumpon) requires an autonomous energy source for sensing, communication, navigation lighting, control, and corrective propulsion. Adding a hexagonal propeller improves the potential for station-keeping assistance but also introduces an electrical load that must be reliably supplied by the photovoltaic and battery subsystem. This study develops an energy-balance analysis and determines suitable PV-battery combinations for a smart rumpon with a hexagonal propeller using a scenario-based engineering approach. The propeller shaft power at the design point is 145.34 W, corresponding to approximately 180 W electrical motor input after motor and controller efficiencies are considered. Non-propulsion loads, including sensors and control, communications, navigation lights, tracking/security devices, and system losses, amount to 724 Wh/day. Three motor duty cycles (1, 2, and 3 h/day), three peak-sun-hour conditions (3.0, 4.2, and 5.0 h/day), and PV capacities of 300, 400, and 500 Wp are evaluated using a 0.75 performance ratio. At a 2 h/day duty cycle, total demand is 1.084 kWh/day. Under the conservative 4.2-PSH design condition, a 300-Wp system has a 139-Wh/day deficit, whereas 400 and 500 Wp provide 176 and 491 Wh/day surpluses, respectively. Under a 3.0-PSH stress case, 500 Wp still provides a 41-Wh/day surplus for a 2 h/day motor duty. A 2.4-kWh battery provides approximately 1.67 days of autonomy, while 3.6 kWh provides about 2.50 days. The 400-Wp/2.4-kWh configuration is

adequate for moderate operation, whereas 500 Wp/3.6 kWh is more appropriate for a resilience-oriented design.

Keywords: *Smart Rumpon, Photovoltaic, Battery, Energy Balance, Hexagonal Propeller*

1. Pendahuluan

Digitalisasi teknologi perikanan dan sistem pemantauan maritim mendorong perubahan rumpon dari struktur pasif menjadi platform yang membawa sensor, lampu, sistem komunikasi, pelacak posisi, dan perangkat keamanan. Penelitian Amien et al. (2023) menunjukkan bahwa komponen seperti baterai, panel surya, dan lampu pada *fish aggregating device* menjadi bagian penting yang perlu dilindungi dan dikendalikan. Pada sistem yang lebih maju, rumpon juga dapat dilengkapi penggerak korektif berdaya rendah untuk membantu menjaga orientasi atau mengurangi simpangan ketika beban lingkungan meningkat.

Konsekuensi dari peningkatan fungsi adalah kebutuhan energi harian yang tidak lagi didominasi satu beban. Sensor dan kontrol bekerja hampir terus-menerus, komunikasi bersifat periodik, lampu navigasi beroperasi pada malam hari, sementara motor propeler memiliki daya besar tetapi *duty cycle* pendek. Arsitektur energi untuk platform laut harus memperhitungkan profil beban seperti ini secara eksplisit. Wang et al. (2023) menekankan bahwa sistem PV merupakan salah satu sumber daya paling umum untuk marine buoy dan sizing harus disesuaikan dengan kebutuhan energi, kondisi radiasi, serta kapasitas baterai. Chandrasekhar et al. (2020) juga memperlihatkan bahwa buoy mandiri dapat menggabungkan energy harvesting, baterai, dan komunikasi LoRa untuk fungsi pelacakan posisi.

Aceh memiliki sumber energi surya yang layak untuk sistem kecil. Hutajulu et al. (2022) melaporkan potensi radiasi Banda Aceh sekitar 4,12 kWh/m²/hari dalam kajian lintas provinsi, sedangkan Husni et al. (2022) menggunakan peak-sun-hour konservatif 4,2 jam/hari dalam perencanaan PLTS di Banda Aceh. Kajian terbaru untuk Aceh juga menunjukkan radiasi surya regional sekitar 4,8–5,2 kWh/m²/hari (Munawir et al., 2025). Rentang tersebut cukup menjanjikan, tetapi desain rumpon tidak boleh hanya menggunakan nilai rata-rata karena beberapa hari berawan dapat menurunkan produksi secara tajam.

Pada sisi beban, studi sebelumnya tentang solar-powered boat menunjukkan bahwa ukuran PV dan baterai perlu dioptimalkan secara bersama karena kelebihan kapasitas meningkatkan biaya dan massa, sedangkan kekurangan kapasitas

menurunkan reliability (Nasirudin et al., 2020). Dalam lingkungan perikanan, integrasi PV dan pemantauan IoT juga telah dibuktikan mampu menyediakan energi untuk beban produktif skala kecil (Shaffa et al., 2026). Namun belum banyak kajian yang menghubungkan kebutuhan energi rumpon dengan beban propeler korektif berdaya rendah, padahal beban ini dapat menjadi komponen dominan ketika *duty cycle* meningkat.

Kesenjangan penelitian terletak pada belum tersedianya basis sizing yang sederhana, transparan, dan spesifik untuk arsitektur rumpon cerdas dengan propeler heksagonal. Penelitian ini tidak melakukan klaim produksi PV lapangan harian; kondisi radiasi disusun sebagai skenario desain yang merujuk pada data literatur lokal. Tujuan penelitian adalah (1) menyusun profil beban harian rumpon; (2) menghitung kebutuhan energi propeler dari daya poros ke daya listrik; (3) mengevaluasi kombinasi PV 300–500 Wp pada tiga kondisi PSH dan tiga *duty cycle motor*; serta (4) menentukan kapasitas baterai yang memberikan otonomi rasional untuk operasi pesisir.

2. Metode Penelitian

2.1 Arsitektur Beban dan Sumber Energi

Arsitektur sistem terdiri atas panel PV, *charge controller*, baterai 24 V, DC bus, modul sensor-kontrol, komunikasi, lampu navigasi, tracking/security, serta motor propeler. Sistem diperlakukan sebagai stand-alone DC micro-system sehingga seluruh energi harian harus berasal dari PV dan baterai. Energi gelombang tidak dimasukkan sebagai sumber pada perhitungan inti agar analisis dapat menunjukkan kemampuan minimum sistem PV-baterai. Meskipun demikian, potensi energi gelombang Ujong Batee yang telah dilaporkan oleh Rima et al. (2026) dapat menjadi sumber tambahan pada pengembangan berikutnya.

Tabel 1. Profil Beban Harian Rumpon Cerdas

Beban	Daya	Durasi	Energi/hari
Sensor + kontrol	12 W	24 jam	288 Wh
Komunikasi	15 W	6 jam	90 Wh
Lampu navigasi	15 W	12 jam	180 Wh
Tracking + keamanan	4 W	24 jam	96 Wh
Standby/rugi-rugi	-	-	70 Wh
Subtotal non-propulsi	-	-	724 Wh

Daya poros propeler pada titik desain diambil sebesar 145,34 W dari konfigurasi heksagonal yang telah dianalisis pada studi numerik sebelumnya. Dengan efisiensi motor 0,86 dan efisiensi pengendali 0,94, daya listrik motor dihitung sekitar 180 W. Nilai tersebut tidak mewakili motor komersial tertentu, tetapi berfungsi sebagai requirement desain yang dapat diterjemahkan ke spesifikasi motor BLDC atau PMSM pada tahap prototipe.

$$P_{motor,e} = P_{shaft} / (\eta_{motor} \eta_{controller}) \approx 145,34 / (0,86 \times 0,94) \approx 180 \text{ W}$$

2.2 Model Energi PV dan Baterai

Energi PV harian dihitung menggunakan kapasitas nominal panel, *Peak-Sun-Hour* (PSH), dan *Performance Ratio* (PR). Nilai PR 0,75 mencakup rugi temperatur, kabel, charge controller, mismatch, orientasi, dan kontaminasi ringan. Pendekatan serupa lazim dipakai pada tahap sizing awal sistem PV (Wang et al., 2023; Husni et al., 2022).

$$EPV = PPV \times PSH \times PR$$

Tiga kondisi radiasi digunakan. PSH 4,2 jam/hari menjadi kondisi desain konservatif berbasis kajian PLTS Banda Aceh (Husni et al., 2022). PSH 3,0 jam/hari digunakan sebagai stress case untuk beberapa hari sangat berawan dan tidak diklaim sebagai nilai rata-rata lokasi. PSH 5,0 jam/hari mewakili kondisi baik yang masih berada dalam rentang sumber daya surya Aceh yang dilaporkan oleh Munawir et al. (2025). Kapasitas PV yang diuji adalah 300, 400, dan 500 Wp.

Energi beban harian dihitung sebagai penjumlahan beban non-propulsi dan energi motor. Tiga duty cycle motor digunakan untuk mewakili operasi korektif ringan, moderat, dan tinggi: 1, 2, dan 3 jam per hari. Kapasitas baterai dinilai pada 2,4 kWh (24 V–100 Ah) dan 3,6 kWh (24 V–150 Ah). Depth of discharge dibatasi 80% dan efisiensi pelepasan energi 94%. Otonomi dihitung dari energi usable baterai dibagi kebutuhan energi harian.

$$E_{load} = E_{aux} + P_{motor,e} \times t_{motor}$$

$$N_{autonomy} = (E_{batt} \times DoD \times \eta_{dis}) / E_{load}$$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Kebutuhan Energi Berdasarkan Duty Cycle Motor

Tabel 2. Kebutuhan Energi Harian pada Variasi Duty Cycle

Duty motor	Energi motor	Beban total	Porsi motor
1 jam/hari	180 Wh	904 Wh	19,9%
2 jam/hari	360 Wh	1.084 Wh	33,2%
3 jam/hari	540 Wh	1.264 Wh	42,7%

Tabel 2 memperlihatkan bahwa motor menjadi beban yang cepat dominan ketika *duty cycle* meningkat. Pada operasi 1 jam/hari, motor menyumbang sekitar 19,9% energi total; pada 3 jam/hari kontribusinya naik menjadi 42,7%. Implikasi desainnya adalah strategi kendali posisi sama pentingnya dengan kapasitas panel. Jika motor diaktifkan berdasarkan dead-band posisi atau tegangan tambat, jumlah jam operasi dapat ditekan tanpa memperbesar PV dan baterai secara berlebihan.

Kebutuhan 1,084 kWh/hari pada *duty cycle* 2 jam dipilih sebagai kondisi moderat. Angka ini relatif kecil dibanding sistem propulsi kapal, tetapi cukup besar untuk sebuah buoy/rumpon karena seluruh energi harus dibawa dan dipanen pada struktur yang memiliki area panel terbatas. Hal ini memperkuat temuan Nasirudin et al. (2020) bahwa sizing PV-baterai pada platform bergerak harus mempertimbangkan keterbatasan ruang dan massa, bukan hanya kecukupan energi.

3.2 Produksi PV pada Kondisi Radiasi Berbeda

Tabel 3. Energi PV Harian pada PR = 0,75

PSH	PV 300 Wp	PV 400 Wp	PV 500 Wp
3,0	675 Wh	900 Wh	1.125 Wh
4,2	945 Wh	1.260 Wh	1.575 Wh
5,0	1.125 Wh	1.500 Wh	1.875 Wh

Pada kondisi desain konservatif 4,2 PSH, PV 300 Wp menghasilkan 945 Wh/hari, lebih rendah daripada beban moderat 1.084 Wh/hari. Artinya, baterai akan mengalami penurunan state of charge apabila kondisi tersebut berlangsung terus-menerus. PV 400 Wp menghasilkan 1.260 Wh/hari sehingga tersedia surplus 176 Wh/hari, sedangkan 500 Wp menghasilkan surplus 491 Wh/hari. Surplus ini penting untuk memulihkan baterai setelah hari berawan, mengompensasi ageing, dan menyediakan margin bagi pertumbuhan beban.

Tabel 4. Margin Energi pada Duty Cycle Motor 2 Jam/Hari

PSH	300 Wp	400 Wp	500 Wp
3,0	-409 Wh	-184 Wh	+41 Wh
4,2	-139 Wh	+176 Wh	+491 Wh
5,0	+41 Wh	+416 Wh	+791 Wh

Stress case 3,0 PSH membedakan konfigurasi yang sekadar cukup dari konfigurasi yang resilient. Pada kondisi tersebut, 400 Wp masih defisit 184 Wh/hari. Baterai dapat menutup defisit sementara, tetapi beberapa hari berturut-turut akan mengurangi otonomi. PV 500 Wp menghasilkan surplus kecil 41 Wh/hari pada duty cycle 2 jam, sehingga kebutuhan baterai terutama berfungsi sebagai buffer intrahari dan cadangan untuk variasi yang lebih ekstrem. Dengan demikian, 400 Wp lebih cocok sebagai konfigurasi minimum rasional, sedangkan 500 Wp memberi robustness lebih baik terhadap cuaca dan peningkatan duty cycle.

3.3 Kapasitas Baterai dan Otonomi

Tabel 5. Otonomi Baterai pada Beban Moderat 1,084 Kwh/Hari

Baterai	Energi nominal	Energi usable	Otonomi
24 V-100 Ah	2,4 kWh	1,805 kWh	1,67 hari
24 V-150 Ah	3,6 kWh	2,707 kWh	2,50 hari

Baterai 2,4 kWh menghasilkan energi usable sekitar 1,805 kWh setelah batas DoD 80% dan efisiensi discharge 94% diterapkan. Nilai tersebut setara dengan otonomi 1,67 hari untuk beban moderat. Baterai 3,6 kWh meningkatkan otonomi menjadi sekitar 2,50 hari. Dalam aplikasi laut, tambahan kapasitas tidak hanya berfungsi menghadapi hari berawan, tetapi juga mengurangi depth-of-cycle rata-rata sehingga berpotensi memperpanjang umur baterai. Namun kapasitas lebih besar menambah massa, biaya, volume enclosure, dan kebutuhan proteksi termal/kedap air.

Wang et al. (2023) menempatkan optimasi suplai PV marine buoy sebagai persoalan keseimbangan antara reliability dan keterbatasan platform. Hasil penelitian ini mendukung prinsip tersebut. Konfigurasi 300 Wp terlalu dekat dengan batas energi untuk *duty cycle* 2 jam; 400 Wp-2,4 kWh memberikan margin yang cukup pada kondisi 4,2 PSH, tetapi masih bergantung pada baterai pada stress case; sedangkan 500 Wp-3,6 kWh memberikan margin operasional tertinggi.

Untuk sistem prototipe, pilihan akhir sebaiknya mengikuti target reliability, area panel yang tersedia, dan maksimum massa yang dapat ditanggung pelampung.

3.4 Implikasi Operasi, Monitoring, dan Pengembangan Sistem

Sizing energi tidak dapat dipisahkan dari strategi operasi. Kontrol motor berbasis event lebih efisien daripada jadwal tetap. Motor dapat diaktifkan hanya ketika error posisi, arah, atau tegangan tambat melewati threshold; setelah koreksi tercapai, sistem kembali ke mode low-power. Dengan strategi tersebut, duty cycle harian berpotensi mendekati skenario 1-2 jam dan bukan 3 jam. Integrasi telemetri memungkinkan pengiriman state of charge, arus PV, status motor, dan alarm keamanan. Pendekatan ini relevan dengan pengembangan sistem kontrol rumpon berbasis komunikasi yang telah ditunjukkan oleh Amien et al. (2023).

Lingkungan laut menambah dua sumber degradasi penting: shading/garam pada panel dan korosi/kebocoran pada enclosure baterai. Oleh sebab itu, PR 0,75 digunakan secara konservatif. Pada operasi nyata, parameter PR harus diverifikasi dari data logger. Pemanfaatan IoT untuk perikanan pesisir sebagaimana dievaluasi oleh Shaffa et al. (2026) menunjukkan nilai monitoring jarak jauh, namun perangkat komunikasi sendiri menambah beban energi dan harus dimasukkan dalam audit daya. Sistem yang sehat perlu mempunyai mode survival ketika SoC rendah, misalnya menonaktifkan motor korektif dan mempertahankan hanya lampu keselamatan, tracking, dan komunikasi periodik.

Dalam konteks Ujong Batee, sumber energi laut dapat menjadi tahap integrasi lanjutan. Rima et al. (2026) melaporkan potensi energi gelombang lokal 4,78-6,43 kW/m untuk periode kajian April 2024, sedangkan Rizal dan Ningsih (2020) menunjukkan potensi *wave-energy* yang signifikan pada pantai barat Sumatra. Namun artikel ini sengaja tidak menjumlahkan kontribusi energi gelombang ke neraca utama karena teknologi konversi dan efisiensinya belum menjadi bagian perangkat rumpon. Pendekatan konservatif ini menjaga agar sizing PV-baterai dapat berdiri sendiri dan kemudian menjadi baseline ketika sumber hibrida ditambahkan.

4. Simpulan

Analisis menunjukkan bahwa kebutuhan energi rumpon cerdas sangat dipengaruhi *duty cycle propeler*. Dengan beban non-propulsi 724 Wh/hari dan motor listrik sekitar 180 W,

kebutuhan total mencapai 0,904; 1,084; dan 1,264 kWh/hari untuk *duty cycle* motor 1, 2, dan 3 jam. Pada kondisi konservatif 4,2 PSH dan performance ratio 0,75, PV 300 Wp belum mencukupi beban moderat karena defisit 139 Wh/hari, sedangkan 400 Wp menghasilkan surplus 176 Wh/hari dan 500 Wp menghasilkan 491 Wh/hari. Pada stress case 3,0 PSH, PV 500 Wp masih hampir seimbang dengan surplus 41 Wh/hari untuk *duty cycle* 2 jam. Baterai 2,4 kWh memberikan otonomi sekitar 1,67 hari dan baterai 3,6 kWh sekitar 2,50 hari. Konfigurasi 400 Wp–2,4 kWh dapat diposisikan sebagai desain minimum untuk operasi moderat, sementara 500 Wp–3,6 kWh lebih sesuai untuk sistem yang menargetkan resilience lebih tinggi. Dampak penelitian adalah tersedianya basis sizing yang transparan untuk prototipe rumpon cerdas; pengujian lapangan tetap diperlukan untuk memverifikasi radiasi, performance ratio, *duty cycle* aktual, degradasi panel, dan perilaku baterai di lingkungan laut.

Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Politeknik Pelayaran Malahayati serta institusi para penulis atas dukungan akademik, diskusi lintas disiplin, dan pengembangan gagasan sistem maritim berenergi terbarukan.

Daftar Pustaka

- Amien, M. M., Jahja, M., Yunginger, R., Yunus, M., Tansa, S., & Nasibu, I. Z. (2023). Prototype of battery box security system and lamp control on fish aggregating devices using Telegram control. *Jurnal Otomasi Kontrol dan Instrumentasi*, 15(1), 1–9. <https://doi.org/10.5614/joki.2023.15.1.1>
- Chandrasekhar, A., Vivekananthan, V., & Kim, S.-J. (2020). A fully packed spheroidal hybrid generator for water wave energy harvesting and self-powered position tracking. *Nano Energy*, 69, 104439. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.104439>
- Husni, F. H., Syukri, S., Muliadi, M., & Murisal Asyadi, T. (2022). Perencanaan sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) di Gedung Pasca Sarjana Universitas Iskandar Muda. *Aceh Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2(1), 19–24. <https://doi.org/10.55616/ajeetech.v2i1.282>
- Hutajulu, O. Y., Siregar, B., & Mendoza, M. D. (2022). Studi kelayakan potensi penyinaran matahari 34 provinsi di Indonesia untuk pembangkit listrik tenaga matahari skala rumah tangga. *Jurnal Insinyur Profesional*, 2(1). <https://doi.org/10.24114/jip.v2i1.28232>
- Munawir, Mahidin, Away, Y., Azwar, & Wan Ismail, W. I. N. (2025). Mapping and analysis of local potential for new and renewable energy and its conversion technology in Aceh-Indonesia. *Renewable and Sustainable Energy Transition*, 8, 100126. <https://doi.org/10.1016/j.rset.2025.100126>
- Nasirudin, A., Hasanudin, H., Utama, D., & Tahwoto, L. P. (2020). Determination of PV power and battery capacity size for a leisure solar powered boat at Kalimas River, Surabaya, Indonesia. *Kapal: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Kelautan*, 17(3), 123–129. <https://doi.org/10.14710/kapal.v17i3.31965>
- Rima, A., Kurniawan, D., Yudhawastu, K., Fitria, Y. P., Yani, M., & Aziz, M. (2026). Potensi energi gelombang laut sebagai sumber energi terbarukan: Studi kasus pesisir Ujong Batee Politeknik Pelayaran Malahayati. *Jurnal Maritim Malahayati*, 7(1), 405–409.
- Rizal, A. M., & Ningsih, N. S. (2020). Ocean wave energy potential along the west coast of the Sumatra island, Indonesia. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, 6, 137–154. <https://doi.org/10.1007/s40722-020-00164-w>
- Shaffa, S., Kusumanto, R. D., & Taqwa, A. (2026). Performance evaluation of a solar-powered thermoelectric cool box with GSM-IoT monitoring for coastal fisheries. *Jurnal Polimesin*, 24(2). <https://doi.org/10.30811/jpl.v24i2.8857>
- Wang, C., Song, X., Fu, Q., Cui, L., & Chen, P. (2023). Design and optimization of PV power supply system for marine buoys. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(9), 1808. <https://doi.org/10.3390/jmse11091808>