

RANCANG BANGUN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA HYBRID (PLTS-PLTB) PADA RUMAH RAKIT APUNG

Dewa Aditya Ramadani¹, Michael kalengkongan², Steward Liwan³,
Muchdar Patabo⁴, Johan Pongoh⁵

Program Studi Teknik Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Manado
dewa.a.ramadani@gmail.com

ABSTRACT

The increasing energy demand in remote and coastal areas, particularly in floating raft house communities (rumah rakit apung), has driven the need for sustainable and independent power supply solutions. This study aims to design and develop a hybrid power generation system combining Solar Power Plant (PLTS) and Wind Power Plant (PLTB) to meet the electrical load requirements of a floating raft house. The system was designed in an off-grid parallel configuration consisting of 3 × 250 Wp monocrystalline solar panels (750 Wp total), a 500 W vertical axis wind turbine, a 24 V/100 Ah battery, an MPPT hybrid charge controller, and a 24V/1000VA DC-AC inverter. The research method used was Research and Development (R&D), including literature study, field observation, load analysis, system design, prototype assembly, component testing, and system performance analysis. Measurement results showed that the solar panels produced a maximum output voltage of 27.9 V with a current of 12.4 A and a power of 345.96 W at 12:00 WITA under 7,392 Lux irradiance, while the wind turbine produced a maximum output of 15.98 V, 1.12 A, and 17.90 W at 16:00 WITA with a wind speed of 7 m/s. Battery monitoring results showed that the State of Charge (SOC) reached 100% at 16:00 and remained above 80% throughout the night, confirming the reliability of the system in supplying continuous loads. The hybrid system successfully met the daily energy demand of 2,005 Wh and achieved operational cost savings of Rp30,160,000 per year compared to gasoline generators, while reducing CO₂ emissions by 5.90 tons per year. These results demonstrate that the PLTS-PLTB hybrid system is a viable, efficient, and environmentally friendly solution for electrifying floating raft house communities in coastal water environments.

Keywords: Floating Raft House, Hybrid Power System, MPPT, Renewable Energy, Solar Panel, Wind Turbine

ABSTRAK

Kebutuhan energi yang terus meningkat di wilayah terpencil dan pesisir, khususnya pada komunitas rumah rakit apung, mendorong perlunya solusi penyediaan listrik yang mandiri dan berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan merancang dan membangun sistem pembangkit listrik tenaga hybrid yang menggabungkan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) untuk memenuhi kebutuhan beban listrik harian rumah rakit apung. Sistem dirancang dalam konfigurasi paralel off-grid yang terdiri dari 3 × 250 Wp panel surya monocrystalline (750 Wp total), turbin angin sumbu vertikal 500 W, baterai 24 V/100 Ah, MPPT hybrid charge controller, dan inverter DC-AC 24V/1000VA. Metode penelitian yang digunakan adalah Research and Development (R&D) yang meliputi studi literatur, observasi lapangan, analisis kebutuhan beban, perancangan sistem,

perakitan prototipe, pengujian komponen, dan analisis kinerja sistem. Hasil pengukuran menunjukkan panel surya menghasilkan tegangan berbeban tertinggi 27,9 V dengan arus 12,4 A dan daya 345,96 W pada pukul 12.00 WITA dengan intensitas cahaya 7.392 Lux, sedangkan turbin angin menghasilkan output tertinggi 15,98 V, 1,12 A, dan 17,90 W pada pukul 16.00 WITA dengan kecepatan angin 7 m/s. Hasil monitoring baterai menunjukkan State of Charge (SOC) mencapai 100% pada pukul 16.00 dan tetap di atas 80% sepanjang malam, mengkonfirmasi keandalan sistem dalam menyuplai beban secara kontinu. Sistem hybrid berhasil memenuhi kebutuhan energi harian sebesar 2.005 Wh dan menghemat biaya operasional hingga Rp30.160.000 per tahun dibandingkan generator bensin, sekaligus mengurangi emisi CO₂ sebesar 5,90 ton per tahun. Hasil ini membuktikan bahwa sistem hybrid PLTS-PLTB merupakan solusi yang layak, efisien, dan ramah lingkungan untuk elektrifikasi komunitas rumah rakit apung di lingkungan perairan pesisir.

Kata kunci: Energi Terbarukan, MPPT, Panel Surya, Rumah Rakit Apung, Sistem Hybrid, Turbin Angin hybrid, plts, pltb, rumah rakit apung

A. Pendahuluan

Kebutuhan energi yang semakin meningkat, mendorong Pemerintah terus berupaya melaksanakan percepatan pengembangan energi terbarukan di Indonesia [1]. EBT yang bersifat ramah lingkungan serta berperan strategis dalam mengurangi emisi dan mengatasi permasalahan pemanasan global [2]. Meskipun rasio elektrifikasi nasional telah mencapai lebih dari 99%, masih terdapat wilayah terpencil dan permukiman perairan seperti rumah rakit apung yang belum memperoleh akses listrik secara optimal. Masyarakat pada umumnya menggunakan energi konvensional seperti bahan bakar fosil/minyak seringkali mahal dan tidak ramah lingkungan [3]. Di sisi lain, Indonesia memiliki potensi energi surya yang melimpah sekitar 4,80 kWh/m²/hari serta potensi energi angin rata-rata 3–6 m/s yang signifikan di wilayah perairan terbuka dan pesisir [2][4]. Kondisi ini menunjukkan peluang

pemanfaatan energi terbarukan sebagai solusi penyediaan listrik yang mandiri dan berkelanjutan.

penelitian sebelumnya telah mengkaji pemanfaatan PLTS, PLTB, serta sistem hybrid (PLTS–PLTB) menjadi salah satu solusi dalam penyediaan listrik yang lebih ramah lingkungan, terutama di daerah yang memiliki potensi energi matahari dan angin yang tinggi[5][6]. Sistem hybrid terbukti mampu meningkatkan keandalan pasokan energi karena kedua sumber saling melengkapi: energi surya optimal pada siang hari, sementara angin cenderung lebih kencang pada sore hingga malam hari [7]. Perkembangan terbaru juga menunjukkan integrasi sistem penyimpanan baterai dan kontrol MPPT untuk memaksimalkan efisiensi konversi energi [5][8]. Dalam kajian [9] rancang bangun sistem pembangkit energi hybrid PLTS-PLTB juga menegaskan bahwa konfigurasi yang baik dapat memberikan keandalan

lebih tinggi pada kondisi beban yang bervariasi. Namun, sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada bangunan di darat, sehingga yang membahas penerapan sistem hybrid PLTS–PLTB pada rumah rakit apung di lingkungan perairan masih sangat terbatas [10]. Kajian terbaru oleh Grela et al. [10] tentang EBT pada rumah terapung di Eropa menunjukkan bahwa kombinasi panel surya, turbin angin kecil, dan sistem penyimpanan baterai mampu mencapai energi yang signifikan. Lebih lanjut, Xiong et al. [11] dalam tinjauan global sistem fotovoltaik terapung menegaskan bahwa panel surya yang dipasang di atas permukaan air memberikan keunggulan tambahan berupa suhu operasi yang lebih rendah dan efisiensi konversi yang lebih baik. Penelitian tersebut memperkuat pengembangan sistem energi terbarukan yang spesifik untuk hunian dan struktur terapung di wilayah perairan Indonesia.

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun sistem pembangkit listrik tenaga hybrid PLTS–PLTB yang sesuai dengan karakteristik dan kebutuhan rumah rakit apung. Sistem dirancang menggunakan panel surya 3 × 250 Wp, turbin angin 500 W, dan baterai 24 V/100 Ah dalam konfigurasi off-grid yang dikelola melalui MPPT dan inverter. Penelitian ini diharapkan

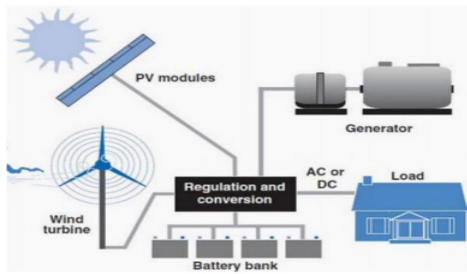
menghasilkan prototipe sistem energi yang mandiri, efisien, dan ramah lingkungan sebagai solusi bagi masyarakat yang berada di wilayah perairan.

B. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode *Research and Development*. Tahapan penelitian meliputi studi literatur, observasi lapangan, analisis kebutuhan beban, perancangan sistem, perakitan prototipe, pengujian komponen, dan analisis kinerja sistem secara keseluruhan.

Gambaran Umum Sistem

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid (PLTH) merupakan sistem pembangkitan energi listrik yang menggabungkan dua atau lebih sumber energi terbarukan dengan tujuan mendapatkan pasokan daya yang lebih andal dan efisien. Konfigurasi dasar sistem PLTH dapat dikelompokkan menjadi tiga jenis, yaitu sistem hybrid seri, paralel, dan switched [8]. Pada penelitian ini, sistem dirancang dalam konfigurasi paralel off-grid yang memadukan PLTS berkapasitas 750 Wp (3 panel × 250 Wp) dan PLTB berkapasitas 500 W sebagai sumber pembangkit utama, dengan baterai 24 V/100 Ah sebagai media penyimpanan energi. Sistem perancangan dapat di lihat pada gambar 1.



Gambar 1. Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid (PLTH)

Panel surya yang digunakan merupakan jenis monocrystalline silicon 250 Wp yang dirangkai secara paralel untuk mempertahankan tegangan sistem pada 24 V sekaligus meningkatkan kapasitاس. Pemilihan konfigurasi paralel pada panel surya didasarkan pada karakteristik beban dan tegangan sistem baterai yang digunakan [12]. Turbin angin yang digunakan adalah jenis sumbu vertikal dengan kapasitas 500 W, yang cocok untuk kondisi kecepatan angin rata-rata 3–6 m/s sebagaimana yang umum ditemukan di kawasan perairan terbuka[13]–[15]. Energi yang disimpan pada baterai bertindak sebagai penyimpan energi dan sumber cadangan ketika cahaya matahari dan kecepatan angin rendah. Inverter DC–AC digunakan untuk mengubah tegangan baterai 24 V DC menjadi tegangan AC 220 V sehingga dapat menyuplai beban peralatan listrik rumah tangga di atas rumah rakit apung [8][11]. Pertimbangan dalam perancangan sistem ini adalah kondisi lingkungan yang berbeda dengan di darat. Panel surya dan turbin angin dipasang pada struktur atap rumah rakit apung yang harus mampu menahan beban tambahan, getaran gelombang air,

paparan kelembapan dan korosi dari lingkungan perairan [12]. karena itu, seluruh komponen dipilih dengan proteksi yang sesuai untuk lingkungan lembap, PLTS dan PLTB dalam sistem hybrid memberikan keuntungan yang jelas, dimana siang hari cerah PLTS memberikan kontribusi daya maksimum, sementara saat kecepatan angin tinggi pada sore hingga malam hari, PLTB bisa menjadi sebagai sumber utama. [5][7][16].



Gambar 2. Rumah Rakit Apung

Sistem hybrid pada rumah rakit apung dirancang untuk memenuhi kebutuhan beban dasar yang meliputi penerangan, pengisian perangkat elektronik, dan peralatan rumah tangga berdaya rendah. Keandalan ditingkatkan melalui manajemen energi otomatis yang dikendalikan oleh MPPT, sehingga pengisian dan pengosongan baterai selalu terjaga dalam batas aman[5][17], Pendekatan serupa yang mengintegrasikan kontrol cerdas pada sistem hybrid juga dikembangkan oleh [18] melalui konsep smart grid, dalam sistem kontrol terpadu untuk turbin angin, panel PV, dan penyimpanan baterai. Pendekatan serupa telah terbukti efektif dalam beberapa studi sistem

energi terbarukan untuk kawasan terpencil dan daerah yang tidak terjangkau jaringan PLN di Indonesia [15][16].

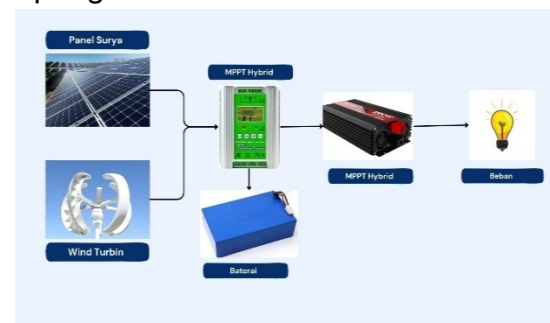
Cara Kerja Sistem

Sistem pembangkit listrik tenaga hybrid PLTS-PLTB pada rumah rakit apung bekerja dengan memanfaatkan kondisi alam yang lebih maksimal, dimana energi surya dan juga angin yang secara bersama dapat menyuplai beban listrik secara andal di lingkungan perairan yang tidak terjangkau oleh jaringan PLN. Panel surya yang mengubah radiasi matahari menjadi energi listrik DC, dan turbin angin yang mengubah energi kinetik angin menjadi listrik yang kemudian menjadi tegangan DC. Keluaran listrik DC dari panel surya dan turbin angin digabungkan melalui rangkaian pengatur daya yang sekaligus mengoptimalkan proses pengisian baterai dan melindungi sistem dari kondisi overcharge maupun overdischarge. energi yang tersimpan di baterai berfungsi sebagai cadangan daya sehingga sistem tetap dapat menyuplai beban ketika intensitas dari cahaya maupun kecepatan angin yang menurun. Pada saat kondisi cuaca yang baik, daya dari PLTS dan PLTB terlebih dahulu digunakan untuk menyuplai beban ke rumah rakit, sedangkan kelebihan daya dialirkan untuk mengisi baterai hingga mencapai kapasitas yang ditentukan. Ketika daya dari kedua pembangkit tidak mencukupi, sistem otomatis beralih menggunakan energi dari baterai untuk menjaga kestabilan suplai daya ke peralatan listrik di

rumah rakit. Energi DC yang kemudian di konversi menjadi tegangan AC melalui inverter sehingga dapat digunakan untuk beban AC seperti penerangan, dan peralatan elektronik pada rumah rakit apung. seluruh proses ini dipantau dan dikendalikan oleh unit kontrol sehingga sistem hybrid dapat beroperasi secara otomatis, efisien dan aman dalam berbagai saat beroperasi di lingkungan area perairan.

Perancangan Sistem

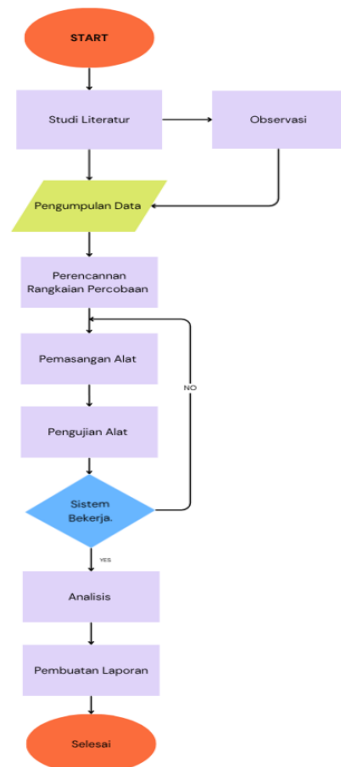
Pada gambar 3 yang tertera, memperlihatkan digram perancangan sistem pada sebuah pembangkit listrik tenaga hybrid yang di buat pada penelitian ini, sistem disini menunjukkan bahwa suplai yang di dapat merupakan dari alam, yaitu Angin dan juga Matahari yang menjadi sebuah sumber utama ke turbin angin dan juga panel surya agar dapat menyalurkan daya ke seluruh rangkaian. Dan tegangan yang tersalurkan di simpan pada sebuah baterai yang akhirnya akan di pakai buat menghidupkan perangkat-perangkat elektronik di rumah rakit apung .



Gambar 3. Blok Perancangan Sistem Hybrid

Daya yang tersimpan pada sebuah baterai, dapat di salurkan ke beban, yang dimana akan ditransfer ke MPPT dan juga inverter lalu akan di salurkan ke beban-beban yang ada pada rumah rakit apung. MPPT yang berperan untuk menstabilkan tiap sumber dari Turbin angin dan juga panel surya agar dapat selalu bekerja pada titik daya maksimum, meskipun kurangnya sinar paparan matahari, atau daya angin yang sering berubah-ubah. Sehingga dengan adanya MPPT dapat mengurangi banyaknya energi potensial yang menghilang.

Flowchart



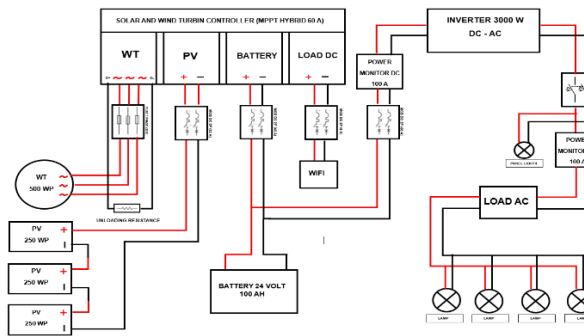
Gambar 4. Flowchart

Pada gambar flowchart kali ini menunjukkan kerja sistem dari proses pembuatan pembangkit listrik tenaga hybrid. Yang dimana diawali dengan studi literatur dan observasi untuk memperoleh referensi serta

data kondisi yang ada di lapangan. Lalu dilakukan pengumpulan data yang biasanya di pakai atau di gunakan sebagai dasar pembelajaran atau perancangan rangkaian percobaan dan penentuan spesifikasi pada komponen sistem hybrid. Lalu memasuki ke tahap yang dimana meliputi pemasangan alat dan pengujian sistem untuk memastikan seluruh komponen bisa bekerja sesuai dengan perancangan. Jika sistem tidak/belum bekerja dengan baik, maka akan dilakukan observasi dan evaluasi serta perbaikan pada tahap perancangan atau pemasangan alat. Apabila sistem bisa bekerja secara optimal dapat dilanjutkan ke tahap analisis dan kinerja sistem berdasarkan hasil pengujian. Seluruh hasil penelitian kemudian di rangkum dalam bentuk laporan sehingga proses penelitian dinyatakan selesai.

C.Hasil Penelitian dan Pembahasan

Wiring Diagram Hybrid (PLTS-PLTB)



Gambar 5. Wiring Diagram

Analisa Kebutuhan Beban

Kebutuhan beban listrik merupakan tahap awal dalam perancangan sistem pembangkit listrik tenaga hybrid. Identifikasi beban yang akurat akan menentukan kapasitas komponen yang dibutuhkan. Beban listrik pada rumah rakit apung dalam penelitian ini terdiri atas peralatan penerangan, pengisian perangkat elektronik, dan peralatan rumah tangga berdaya rendah. Dan bisa di lihat pada tabel dibawah ini mengenai kebutuhan dan juga jangka waktu yang akan di pakai di rumah rakit apung.

Tabel 1. Analisis Kebutuhan Beban Listrik Harian Rumah Rakit Apung

Peralatan Listrik	Jm l	P(W)	ja m	E(W h)
Lampu LED	4	5	11	220
Lampu LED	3	10	11	330
Lampu LED	2	15	11	330
Charger HP (5 unit)	5	5	3	75

Dispenser	1	350	3	1.050
Total		455 Watt		2.005 Wh

Berdasarkan Tabel 1, total kebutuhan energi listrik harian rumah rakit apung adalah 2.005 Wh dengan total daya terpasang sebesar 455 W. Setelah memperhitungkan faktor rugi-rugi sistem (losses) sebesar 20% yang meliputi rugi-rugi pada kabel, konverter, inverter, dan baterai, kebutuhan energi total yang harus dihasilkan sistem pembangkit menjadi 2.506,2 Wh per hari.

Pengukuran Panel surya

Pengukuran panel surya terdiri dari pengukuran intensitas cahaya dan tegangan panel. Pengukuran intensitas cahaya matahari dilakukan selama 5 hari berturut-turut menggunakan alat ukur Lux Meter digital di lokasi rumah rakit apung. Pengukuran dilaksanakan mulai pukul 08.00 hingga 15.00 WITA dengan interval 1 jam untuk mendapatkan pengukuran yang representatif yang dapat di lihat di tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengukuran Intensitas Cahaya Matahari Selama 5 Hari (Lux)

Wa ktu (W I TA)	Ha ri 1	Ha ri 2	Ha ri 3	Ha ri 4	Ha ri 5	Ra ta-rat a

						(Lux)
08:00	3487	3645	3398	3576	3712	3564
09:00	4919	5085	4696	4950	5108	4952
10:00	3749	4961	4182	4316	4517	4345
11:00	7748	5987	6383	7012	6876	6801
12:00	8257	6985	6542	7743	7434	7392
13:00	7655	5233	6774	7023	6687	6674
14:00	6321	5876	6102	6234	5987	6104
15:00	5.876	5.543	5.721	5.654	5.821	5723

Hasil pengukuran pada Tabel 2 menunjukkan bahwa intensitas cahaya matahari tertinggi secara konsisten terjadi pada pukul 12.00 WITA dengan nilai rata-rata 7.392 Lux, sementara nilai terendah pada pukul 08.00 WITA dengan rata-rata 3.564 Lux. Fluktuasi antar hari disebabkan oleh variasi tutupan awan di kawasan perairan.

Pengukuran selanjutnya adalah pengukuran tegangan panel surya

yang sudah di rangkai seri. Pada konfigurasi seri, tegangan, arus, dan daya total merupakan penjumlahan secara keseluruhan panel. Pengukuran tegangan dan arus pada dilakukan secara bersamaan pada ketiga panel menggunakan Multimeter digital. Sedangkan perhitungan daya pada tabel 3. Dengan persamaan :

$$P = V \times I \quad (1)$$

Seluruh data pengukuran masing-masing panel beserta tegangan total seri disajikan dalam satu Tabel 3.

Tabel 3. Pengukuran Tegangan Panel Surya Konfigurasi Seri (3 × 250 Wp = 750 Wp).

Waktu (WITA)	Intensitas Cahaya (Lux)	Tegangan (V)	Arus (I)	Watt
08:00	3.564	24,1	1,4	33,74
09:00	4.952	25,7	7,7	197,89
10:00	4.345	26,6	2,1	55,86
11:00	6.801	27,5	11,6	319,00
12:00	7.392	27,9	12,4	345,96
13:00	6.674	27,08	11,3	306,00
14:00	6.104	27	10,9	294,30
15:00	5.723	26,81	4,6	123,33

$$P = V \times I \rightarrow P = 24,1 \times 1,4 = 33,74$$

Berdasarkan Tabel 3, tegangan sistem berbeban (V) berkisar antara 24,1 V pada pukul 08.00 hingga 27,9

V pada pukul 12.00 WITA, sedangkan arus (I) yang dihasilkan berkisar antara 1,4 A hingga 12,4 A dengan pola yang jauh lebih fluktuatif dibandingkan tegangan. Daya (watt) tertinggi terjadi pada pukul 12.00 WITA sebesar 345,96 W, bertepatan dengan intensitas cahaya matahari tertinggi yaitu 7.392 Lux, sedangkan daya terendah terjadi pada pukul 08.00 sebesar 33,74 W saat intensitas cahaya masih rendah (3.564 Lux). Hal ini menunjukkan bahwa tegangan sistem relatif stabil sepanjang waktu pengukuran karena dipengaruhi oleh karakteristik pengisian baterai 24 V, sementara arus mengalami perubahan signifikan mengikuti fluktuasi intensitas cahaya matahari. Dengan demikian, variasi daya yang dihasilkan panel surya lebih banyak ditentukan oleh perubahan arus dibandingkan perubahan tegangan, sesuai dengan prinsip $P = V \times I$ pada sistem charging dengan tegangan baterai yang relatif terkunci. Pola ini juga mengindikasikan kinerja MPPT yang cukup responsif terhadap perubahan intensitas cahaya matahari sepanjang hari.

Pengukuran Kinerja Turbine

Pengukuran kinerja turbin angin dilakukan selama 12 jam pengamatan dari pukul 08.00 hingga 19.00 WITA menggunakan Anemometer digital untuk mengukur kecepatan angin, Tachometer untuk mengukur putaran generator (RPM), serta Multimeter untuk mengukur tegangan dan arus output turbin.

Tabel 4. Hasil Pengukuran Kinerja Turbin Angin 500 W

Waktu (WITA)	Kecepatan Angin (m/s)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya Output (W)	Keterangan
08:00	3,2	7,23	0,52	3,76	Angin lemah
09:00	4,5	10,34	0,74	7,65	Angin sedang
10:00	5,5	12,57	0,89	11,19	Angin sedang
11:00	6,1	13,94	0,97	13,52	Angin baik
12:00	5,2	11,89	0,84	9,99	Angin sedang
13:00	5,9	13,38	0,93	12,44	Angin baik
14:00	6,4	14,53	1,01	14,67	Angin baik
15:00	6,6	15,14	1,07	16,20	Angin baik
16:00	7,0	15,98	1,12	17,90	Angin kencang
17:00	5,5	12,57	0,88	11,06	Angin sedang
18:00	4,8	10,87	0,76	8,26	Angin sedang
19:00	4,1	9,34	0,67	6,26	Angin lemah

Hasil pengukuran pada Tabel 4 menunjukkan kecepatan angin di lokasi penelitian bervariasi antara 3,2 m/s hingga 7 m/s. Kecepatan angin tertinggi dicapai pukul 16.00 WITA (7 m/s) menghasilkan tegangan 15,98 V

dan daya output 17,90 W. Pola ini konsisten dengan karakteristik angin di perairan terbuka yang cenderung meningkat pada sore hari.

Monitoring Pengisian Dan Status baterai

Monitoring kondisi baterai dilakukan selama 15 jam dari pukul 08.00 hingga 22.00 WITA untuk mengevaluasi profil pengisian (charging) dan pengosongan (discharging) baterai 24 V/100 Ah.

Tabel 5. Monitoring Pengisian dan Status Baterai 24V/200Ah

Waktu (WITA)	V Baterai (V)	Arus Pengisian PLTS (A)	Arus Pengisian PLTB (A)	SOC Baterai (%)	Suhu Baterai (°C)	Status
08:00	24	1,40	0,52	45	32	Charging
09:00	24,2	7,70	0,74	52	33	Charging
10:00	24,6	2,10	0,89	63	34	Charging
11:00	24,9	11,60	0,97	74	35	Charging

12:00	25,4	12,40	0,84	84	36	Charging
13:00	25,9	11,30	0,93	91	36	Charging
14:00	26,3	10,90	1,01	96	35	Charging
15:00	26,7	4,60	1,07	99	35	Charging
16:00	26,9	2,00	1,12	100	34	Charging
17:00	27,0	0,50	0,88	100	33	Charging
18:00	27,0	0,00	0,76	100	33	Float
19:00	26,5	0,00	0,67	96	32	Discharging
20:00	26	0,00	0,40	90	32	Discharging
21:00	25,90	0,00	0,37	86	31	Discharging

22 :0 0	25 ,5 6	0,0 0	0,3 4	81	30	Disc harg ing
---------------	---------------	----------	----------	----	----	---------------------

Data pada Tabel 5 menunjukkan baterai mulai diisi pada pukul 08.00 dengan SOC awal 45%, meningkat hingga 100% pada pukul 16.00 sore hari, PLTB menjadi satu-satunya sumber pengisian. Pada pukul 19.00–22.00 baterai menyuplai beban dengan SOC tetap di atas 80%.

Analisis Perbandingan Ekonomi

Sebelum adanya pengembangan , masyarakat di rumah rakit apung menggunakan generator bensin sebagai sumber listrik. Generator yang digunakan memiliki kapasitas 1 kW (1.000 W) dan dioperasikan rata-rata 10 jam per malam untuk memenuhi kebutuhan penerangan dan peralatan elektronik dasar. Berdasarkan faktor konsumsi bensin generator sebesar 0,7 liter/kWh (nilai moderat), konsumsi bahan bakar harian dengan harga Rp12.000 per liter dapat dihitung sebagai berikut :

$$\text{Konsumsi per hari} =$$

$$\text{Daya} \times \text{jam operasi} \times \text{faktor konsumsi} \quad (2)$$

$$\text{Konsumsi/hari} = 1 \text{ kW} \times 10 \text{ jam} \times 0,7 \text{ liter/kWh} = 7 \text{ liter/hari}$$

$$\text{Biaya/hari} = 7 \text{ liter} \times \text{Rp}12.000/\text{liter} = \text{Rp}84.000/\text{hari}$$

Tabel 6. Perhitungan Biaya Bahan Bakar

Periode	Jumlah Hari	Konsumsi (Liter)	Biaya (Rp)
Per Hari	1	7 liter	Rp84.000
Per Minggu	7	49 liter	Rp588.000
Per Bulan	30	210 liter	Rp2.520.000
Per Tahun	365	2.555 liter	Rp30.660.000

Berdasarkan Tabel 6, biaya bahan bakar generator bensin mencapai Rp2.520.000 per bulan atau Rp30.660.000 per tahun. Besaran pengeluaran ini merupakan beban finansial yang sangat signifikan bagi masyarakat nelayan dengan penghasilan tidak menentu.

Sistem hybrid PLTS–PLTB yang dirancang kali ini memerlukan biaya awal untuk pengadaan komponen dan pemasangan. Rincian biaya sistem hybrid berdasarkan harga pasar tahun 2025-2026 dapat di lihat di tabel 7.

Tabel 7. Rincian Biaya Investasi Sistem Hybrid PLTS–PLTB

N o	Kompo nen	Spesifik asi	Harga (Rp)
1	Panel Surya (3 unit)	3 × 250 Wp	Rp4.500.000
2	Turbin Angin	500 W HAWT	Rp7.000.000
3	Baterai	24 V / 100 Ah	Rp3.500.000
4	MPPT/ Solar Charge Controller	MPPT Hybrid	Rp3.125.000
5	Inverter DC–AC	24V/1000VA	Rp1.500.000
6	Kabel & Aksesoris Instalasi	Marine-grade	Rp1.500.000
	TOTAL INVESTASI SISTEM HYBRID		Rp21.125.000

Total pengeluaran awal sistem hybrid adalah sebesar Rp21.125.000. Tidak

diperlukan biaya bahan bakar apapun karena sistem beroperasi menggunakan energi surya dan angin yang tersedia secara gratis. Perbandingan biaya operasional antara generator BBM dan sistem hybrid dilakukan untuk berbagai periode waktu, memberikan gambaran yang nyata tentang keuntungan yang diperoleh masyarakat nelayan dengan beralih ke energi terbarukan.

Tabel 8. Perbandingan Biaya Operasional: Generator BBM vs Sistem Hybrid PLTS–PLTB

Peri ode	Biaya Genera tor BBM (Rp)	Biaya Siste m Hybri d (Rp)	Penghe matan (Rp)
Per Hari	Rp84.000	Rp0 (gratis)	Rp84.000
Per Ming gu	Rp588.000	Rp0 (gratis)	Rp588.000
Per Bula n	Rp2.520.000	Rp41.667	Rp2.478.333
Per Tah un	Rp30.660.000	Rp500.000	Rp30.160.000

Tabel menunjukkan bahwa sistem hybrid memberikan penghematan

biaya yang sangat signifikan dibandingkan penggunaan BBM. penghematan harian yang mencapai Rp84.000 karena sistem hybrid tidak memerlukan bahan bakar sama sekali. Biaya hybrid terpakai hanya di perawatan sistem hybrid yang dimana bisa dilakukan dalam 1 bulan sekali, di banding BBM yang harus di pakai setiap hari. Selain keuntungan ekonomi, peralihan dari generator BBM ke sistem hybrid PLTS–PLTB memberikan dampak positif yang signifikan terhadap lingkungan Dengan konsumsi BBM yang dihindari sebesar 7 liter per hari, jumlah emisi CO₂ yang berhasil dikurangi dapat dihitung sebagai berikut.

$$E_{\{CO_2\}} = V_{\{BB\}} \times \text{times FE} \quad (3)$$

$$E_{\{CO_2\}} = \text{Emisi CO}_2 \text{ (kg CO}_2\text{/hari)}$$

$$V_{\{BB\}} = \text{Konsumsi bahan bakar (liter/hari)}$$

$$FE = \text{Faktor emisi bahan bakar (kg CO}_2\text{/liter)}$$

$$\begin{aligned} \text{Emisi CO}_2\text{/hari} &= 7 \text{ liter} \times 2,31 \text{ kg CO}_2\text{/liter} \\ \text{CO}_2\text{/liter} &= 16,17 \text{ kg CO}_2\text{/hari} \end{aligned}$$

Tabel 9 Dampak Pengurangan Emisi CO₂ dan Penghematan BBM

Parameter	Per Hari	Per Tahun
Bensin yang dihemat	7 liter	2.555 liter
Emisi CO ₂ dihindari	16,17 kg	5.902 kg

Emisi CO ₂ (setara ton)	0,016 ton	5,90 ton
Biaya BBM dihemat	Rp84.000	Rp30.660.000

Berdasarkan Tabel 9, dalam 1 tahun operasi sistem hybrid PLTS–PLTB mampu mengurangi emisi CO₂ sebesar 5,90 ton dan menghemat 2.555 liter bensin. Bagi masyarakat nelayan, manfaat lingkungan ini juga berdampak tidak langsung pada kesehatan ekosistem perairan tempat mereka mencari nafkah, karena berkurangnya polusi udara dari gas buang generator.

D. Kesimpulan

Sistem pembangkit listrik tenaga hybrid PLTS (750 Wp) dan PLTB (500 W) dengan baterai 24 V/100 Ah berhasil dirancang dalam konfigurasi off-grid untuk memenuhi kebutuhan beban listrik harian rumah rakit apung sebesar 2.005 Wh. Pengujian menunjukkan panel surya menghasilkan tegangan berbeban tertinggi 27,9 V dengan arus 12,4 A dan daya 345,96 W pada pukul 12.00 WITA, sedangkan turbin angin menghasilkan tegangan tertinggi 15,98 V dengan arus 1,12 A dan daya 17,90 W pada pukul 16.00 WITA saat

kecepatan angin mencapai 7 m/s. Kombinasi kedua sumber energi ini menjaga tegangan baterai stabil di kisaran 24-27 V dengan SOC tetap di atas 80% sepanjang malam, menunjukkan keandalan sistem dalam menyuplai beban secara kontinu. Selain itu, sistem hybrid ini menghemat biaya operasional hingga Rp30.160.000 per tahun dibandingkan generator BBM, sekaligus mengurangi emisi CO₂ sebesar 5,90 ton per tahun. Dengan demikian, sistem hybrid PLTS-PLTB terbukti mampu menyediakan pasokan listrik yang lebih stabil dan berkelanjutan bagi masyarakat rumah rakit apung.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Tharo Zuraidah, Anisah Siti, and Rahman Fatur, "Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid (PLTH) Surya-Bayu Sebagai Media Pembelajaran," *Semin. Nas. Sinergi Multi Disiplin Sos. Hum. dan Sains Teknol.*, vol. 1, no. 1, pp. 169–182, 2024, [Online]. Available: <https://proceeding.pancabudi.ac.id/index.php/SMSHDST/article/view/60>
- [2] E. Baru, "Mendukung Pertahanan Negara," 2024.
- [3] L. A. Wenno, L. Manoppo, A. R. Rondonuwu, D. S. Pongoh, and H. A. B. Lesnussa, "Konsep Pemanfaatan PLTS pada Rakit Rumah Apung," *J. Elektr.*, vol. 3, no. 2, pp. 37–42, 2024, doi: 10.65485/elektrik.v3i2.1032.
- [4] A. Kharisma, S. Pinandita, and A. E. Jayanti, "Literature Review : Kajian Potensi Energi Surya Alternatif Energi Listrik," 2024, doi: 10.14710/jebt.2024.23956.
- [5] G. Lumanauw, A. A. S. Ramschie, and F. A. Bungkaes, "Analisa Kebutuhan Baterai Dan Sistem Pengisian Dan Pengosongan Baterai Untuk Sistem Hybrid (PLTB & PLTS) Di Kawasan Pesisir Danau Tondano," *J. Elektr.*, vol. 4, no. 1, pp. 1–12, 2025, doi: 10.65485/elektrik.v4i1.1211.
- [6] M. E. M. Soudagar *et al.*, "An overview of the existing and future state of the art advancement of hybrid energy systems based on PV-solar and wind," pp. 207–216, 2024.
- [7] M. Virgil, G. Lumanauw, and F. Bungkaes, "Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Pada Pembangkit Listrik Hybrid Di Kawasan Pesisir Danau Tondano," *J. Elektr.*, vol. 2, no. 2, pp. 14–22, 2025, doi: 10.65485/elektrik.v2i2.1210.
- [8] Wahyu Bagus Rahmatulloh and Aris Heri Andriawan, "Rancang Bangun PLTS Menggunakan Sistem Hybrid Pada Rumah Tangga Untuk Mengurangi Ketergantungan Energi Listrik Dari PLN," *Uranus J. Ilm. Tek. Elektro, Sains dan Inform.*, vol. 2, no. 3, pp. 58–72, 2024, doi: 10.61132/uranus.v2i3.207.
- [9] F. Teknik and U. Pamulang, "Rancang Bangun Sistem Pembangkit Energi Listrik

- Hybrid PLTS 100Wp dengan PLTB 400w,” vol. 3, no. 6, pp. 8416–8450, 2024.
- [10] J. Grela, A. Skala, D. Latoń, and K. Bańczyk, “Enhancing Energy Autonomy in an e-Houseboat: Integration of Renewable Energy Sources with Hybrid Energy Storage Systems,” *Energies*, vol. 18, no. 5, 2025, doi: 10.3390/en18051080.
- [11] L. Xiong, C. Le, P. Zhang, H. Ding, and J. Li, “A global review,” no. November 2013, 2023, doi: 10.1063/5.0159394.
- [12] R. Syahputra and I. Soesanti, “Journal of Electrical and Computer Engineering - 2020 - Syahputra - Planning of Hybrid Micro-Hydro and Solar Photovoltaic.pdf.” pp. 1–16, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1155/2020/5972342%0AResearch>
- [13] M. R. Abdillah, A. D. Santoso, and F. Nofandi, “RANCANG BANGUN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU (PLTB) UNTUK DAYA LAMPU NAVIGASI”, doi: 10.14710/jebt.2024.22991.
- [14] Y. I. Nakhoda and C. Saleh, “Yusuf Ismail Nakhoda, 2) Choirul Saleh,” vol. 7, no. 1, pp. 20–28, 2017.
- [15] Z. Huda, H. Gusmedi, and L. Hakim, “RANCANG BANGUN DESAIN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU (PLTB) SKALA KECIL (STUDI KASUS TAMBAK UDANG KUALA SUNGAI PASIR),” vol. 13, no. 3, 2021.
- [16] P. Gajewski, “Turbine , Photovoltaic Panels and Battery Energy Storage,” 2021.
- [17] M. Rezkallah, A. Chandra, and H. Ibrahim, “Wind–PV–Battery Hybrid Off-Grid System: Control Design and Real-Time Testing,” *Clean Technol.*, vol. 6, no. 2, pp. 471–493, 2024, doi: 10.3390/cleantechnol6020024.
- [18] T. Elektro *et al.*, “PERANCANGAN HYBRID SYSTEM PLTB DENGAN PV,” vol. 8, pp. 387–395, 2023.
- [19] M. F. Rusydi, A. Djohar, M. Musaruddin, A. Lolok, A. N. Aliansyah, and I. Galugu, “Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid (PLTB dan PLTS) Menggunakan Aplikasi HOMER (Studi Kasus di Gunung Ahuawali),” vol. 09, no. 02, pp. 106–111, 2024.
- [20] K. Publikasi *et al.*, “Manajemen Sumber Daya Energi Terbarukan : Optimalisasi PLTS-PLTB untuk Kelistrikan Berkelanjutan di Pulau Dudepo,” 2025.