

Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida Pada Prototipe Pelabuhan Pintar Menggunakan *Raspberry Pi*

Indrako Arif Ramadhan¹, Henna Nurdiansari², Kuntoro Bayu Ajie³, Edi Kurniawan⁴

^{1,2,3,4}Teknologi Rekayasa Kelistrikan Kapal (TRKK), Politeknik Pelayaran (Polteknepel) Surabaya

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

Email: indrakoarif@gmail.com, henna.nurdiansari@polteknepel-sby.ac.id, kuntoro.bayu@polteknepel-sby.ac.id, edi.kurniawan@polteknepel-sby.ac.id

ABSTRAK

Penggunaan energi terbarukan merupakan solusi dalam mendukung pengembangan pelabuhan pintar (*smart port*), khususnya dalam pemenuhan sumber daya listrik yang stabil, berkelanjutan, dan efisien. Kebutuhan sistem energi alternatif menjadi relevan terutama akibat keterbatasan pasokan listrik berbasis bahan bakar fosil serta tuntutan efisiensi proses sandar kapal. Dalam konteks tersebut, pemanfaatan pembangkit listrik tenaga angin dan surya berpotensi meningkatkan kemandirian energi di lingkungan pelabuhan. Dalam penelitian sebelumnya, peneliti belum mengintegrasikan sistem hybrid dengan pemantauan *real-time*, pengolahan data, penggunaan mikrokomputer, dan konteks pelabuhan pintar. Beberapa penelitian hanya berfokus pada salah satu sumber energi. Keterbatasan tersebut mendorong penelitian ini untuk merancang sistem hibrida panel surya dan turbin angin vertikal yang dapat melakukan monitoring daya yang masuk, *switching* energi dan pemrosesan data secara *real-time*. Metode penelitian yang digunakan adalah *Research and Development* (R&D) yang meliputi tahap perancangan, perakitan, pengujian, dan evaluasi sistem. Hasil pengujian 1x24 jam membuktikan sistem mampu menghasilkan total energi $\pm 68,16$ Wh ($\pm 5,24$ Ah), memenuhi $\pm 72\%$ kapasitas baterai 12 V. Panel surya mendominasi suplai sebesar 61% dengan daya rata-rata $\pm 5,28$ W pada siang hari. Turbin angin berkontribusi sebesar 39% dengan rata-rata daya $\pm 0,72$ W sebagai sumber pendukung di malam hari. Sensor cahaya BH1750 dengan ambang batas 50 lux berhasil menjadi pemicu *switching* otomatis antara siang dan malam. Modul MPPT juga berhasil menstabilkan tegangan output dari kedua sumber hingga mencapai titik daya maksimum. Secara keseluruhan, sistem beroperasi sesuai dengan tujuannya.

Kata kunci: VAWT, pelabuhan, energi terbarukan, Panel surya, Sistem tenaga hibrida, MPPT

ABSTRACT

The use of renewable energy is a strategic solution to support the development of smart ports, particularly in ensuring a stable, sustainable, and efficient power supply. The need for alternative energy systems has become increasingly relevant due to the limitations of fossil-fuel-based electricity and the operational efficiency demands during ship berthing processes. In this context, the utilization of wind and solar power offers potential for energy autonomy within port environments. Previous studies have not yet integrated a hybrid energy system with real-time monitoring, data processing, microcomputer utilization, and a smart port context, and several studies focused only on a single energy source. These limitations motivated this research to design a hybrid system that combines solar panels and vertical-axis wind turbines, capable of monitoring incoming power, performing energy switching, and processing data in real time. The research employed a Research and Development (R&D) methodology, which included system design, assembly, testing, and evaluation stages. The 24-hour test results show that the system can generate a total energy output of approximately 68.16 Wh (± 5.24 Ah), representing around 72% of the 12V battery capacity. The solar panel dominates the energy supply, contributing 61% of the energy with an average power of approximately 5.28 W during the daytime. Meanwhile, the wind turbine contributes 39% of the average power, approximately 0.72 W, serving as a supporting source at night. The BH1750 light sensor, with a 50 lux threshold, successfully serves as a trigger for automatic day-night switching. The MPPT module also effectively stabilizes the output voltage from both sources, ensuring operation at their maximum power points. Overall, the system operates in accordance with its intended objectives.

Keywords: VAWT, port, renewable energy, Solar Panel, Hybrid power system, MPPT

Pendahuluan

Di Pelabuhan merupakan urat nadi sektor maritim yang tidak hanya berfungsi sebagai tempat kapal bersandar, tetapi juga sebagai pusat distribusi logistik dan bongkar muat barang. Seiring dengan modernisasi, konsep pelabuhan pintar (*smart port*) mulai banyak diterapkan untuk menekan antrean kapal dan mempercepat proses operasional [1]. Tentu saja, otomatisasi

dan digitalisasi dalam pelabuhan pintar membutuhkan pasokan energi listrik yang stabil dan berkelanjutan [2]. Di sisi lain, ketergantungan kita pada bahan bakar fosil masih sangat tinggi. Padahal, selain jumlahnya yang semakin menipis, emisi karbon dari pembakaran bahan bakar fosil berdampak buruk terhadap kelestarian lingkungan di pelabuhan [3].

Untuk menjawab tantangan tersebut, pemerintah melalui visi RPJPN 2025-2045 berkomitmen untuk mempercepat transisi menuju *Net Zero Emission* (NZE) dengan mengoptimalkan bauran Energi Baru Terbarukan (EBT) [4]. Beberapa sumber daya alam yang melimpah di wilayah pesisir, seperti cahaya matahari dan angin, menjadi alternatif yang paling rasional. Panel surya (Pembangkit Listrik Tenaga Surya/PLTS), misalnya, sangat populer karena kemampuannya memanen radiasi matahari secara langsung menjadi arus listrik yang bebas polusi [5]. Teknologi *photovoltaic* ini memiliki umur pakai yang panjang serta biaya operasional yang cenderung efisien untuk jangka panjang [6].

Selain surya, angin pesisir juga memiliki potensi besar. Penggunaan turbin angin tipe *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) sangat cocok diterapkan di area pelabuhan [7]. Berbeda dengan turbin konvensional, VAWT memiliki keunggulan *self-starting* yang mampu menangkap hembusan angin dari segala arah, bahkan pada kecepatan angin yang relatif rendah [8]. Mengingat cuaca yang kerap fluktuatif, mengandalkan satu sumber energi saja seringkali kurang optimal. Oleh karena itu, inovasi penggabungan kedua sumber ini menjadi sistem hibrida (PLTS dan PLTB) sangat relevan untuk menjaga stabilitas suplai energi [9]. Kombinasi ini menutupi kekurangan masing-masing; saat matahari terbenam, hembusan angin malam dapat mengambil alih peran pengisian daya [10].

Berbagai penelitian terdahulu telah mengkaji pemanfaatan energi terbarukan di area pelabuhan [11]. Namun, sebagian besar literatur masih berfokus pada evaluasi sistem kelistrikan tunggal tanpa mengaplikasikan skema hibrida [12]. Beberapa riset telah mencoba memonitor daya listrik menggunakan mikrokontroler dasar, namun sistem tersebut belum terintegrasi untuk pemrosesan data secara *real-time* dengan mekanisme otomatisasi peralihan daya pada skala beban pelabuhan pintar [13]. Kesenjangan inilah (*research gap*) yang menjadi landasan perlunya pengembangan sistem terpadu yang lebih cerdas dan adaptif terhadap fluktuasi cuaca.

Oleh karena itu, kontribusi utama dari penelitian ini adalah merancang purwarupa pembangkit listrik tenaga hibrida (VAWT dan panel surya) berskala kecil yang sepenuhnya dikendalikan oleh mikrokomputer *Raspberry Pi*. Kebaruan (*novelty*) dari penelitian ini terletak pada integrasi sistem *hybrid* dengan fitur *monitoring* tegangan *real-time*, pengoptimalan daya melalui MPPT, serta penerapan logika *auto-switching* cerdas berbasis sensor cahaya lingkungan, yang secara spesifik dirancang untuk mendukung kemandirian energi pada infrastruktur pelabuhan pintar [14].

Melihat berbagai celah dari riset sebelumnya, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menganalisis efektivitas sebuah purwarupa pembangkit listrik tenaga hibrida (VAWT dan Panel Surya) berskala kecil [15]. Sistem ini dirancang sebagai satu daya utama pelabuhan pintar, dikendalikan sepenuhnya oleh mikrokomputer *Raspberry Pi*, dan dilengkapi dengan fitur *monitoring* tegangan serta *switching* daya otomatis secara *real-time*

Metode Penelitian

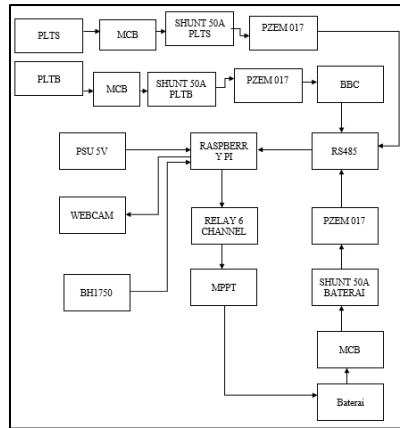
Karya ilmiah terapan ini menggunakan metode *Research and Development* (R&D) yang bertujuan untuk merancang, merakit, menguji, dan menyempurnakan sebuah produk inovasi [16]. Metode ini bertindak sebagai jembatan yang solid antara teori dasar kelistrikan dengan aplikasi praktis di lapangan, sehingga hasil akhirnya berupa purwarupa fungsional yang telah divalidasi [17].

Desain kelistrikan berpusat pada *Raspberry Pi 5* yang bertindak sebagai "otak" utama (*System on Chip*) untuk mengolah data, mengontrol aktuator, dan mengatur lalu lintas komunikasi antar perangkat [18]. Untuk membaca parameter listrik (tegangan, arus, daya, dan energi) dari sistem hibrida, digunakan tiga buah modul sensor PZEM-017. Karena masing-masing sensor memiliki alamat *Modbus* yang berbeda, ketiganya dapat berkomunikasi secara bergantian melalui satu jalur *RS485* tanpa takut datanya bertabrakan [19].

Agar sistem bisa berpindah sumber energi secara otomatis (siang menggunakan surya, malam menggunakan angin), sistem ini diintegrasikan dengan sensor intensitas cahaya BH1750 [20]. Daya yang dihasilkan kemudian dioptimalkan oleh pengontrol pengisian daya (MPPT) sebelum disimpan ke dalam baterai *LiFePO4* 12V 7Ah yang dikawal oleh MCB DC 10A sebagai sistem proteksi keamanannya [21]. Sebagai tambahan visualisasi *real-time*, data operasional ini juga diteruskan ke aplikasi *monitoring* via jaringan IoT [22].

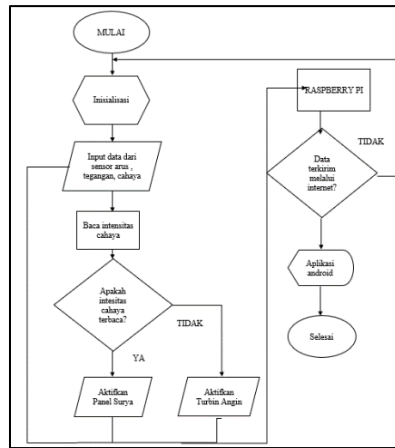
Pengujian alat dilakukan melalui dua tahapan utama di area kampus Politeknik Pelayaran Surabaya. Pertama, *Uji Statis* untuk mengecek fungsionalitas tiap komponen secara individual (seperti pembacaan sensor dan putaran generator DC). Kedua, *Uji Dinamis* (Terintegrasi) yang dilakukan di area terbuka selama 1×24 jam untuk mengukur kinerja aktual sistem hibrida dalam menyuplai listrik ke beban dengan variasi cuaca dan hembusan angin pesisir.

Gambar 1. Blok Diagram Sistem di bawah merupakan rangkaian sistem kelistrikan yang dikendalikan sepenuhnya oleh *Raspberry Pi 5* sebagai pusat pemrosesan data dan pengontrol aktuator. Sistem terintegrasi dengan tiga modul sensor daya PZEM017 melalui jalur komunikasi *RS485* untuk memantau parameter listrik secara bergantian pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (didukung generator dan *shunt* arus 50 A), Pembangkit Listrik Tenaga Surya (menggunakan panel 50 WP dan modul MPPT), serta unit penyimpanan baterai 12V 7Ah, di mana setiap jalurnya diamankan oleh proteksi MCB DC 10 A. Guna menunjang sistem pemantauan dan peralihan sumber energi yang komprehensif, rangkaian ini juga dilengkapi dengan sensor intensitas cahaya BH1750, modul *relay 6-channel*, sakelar pemilih, serta indikator LED.



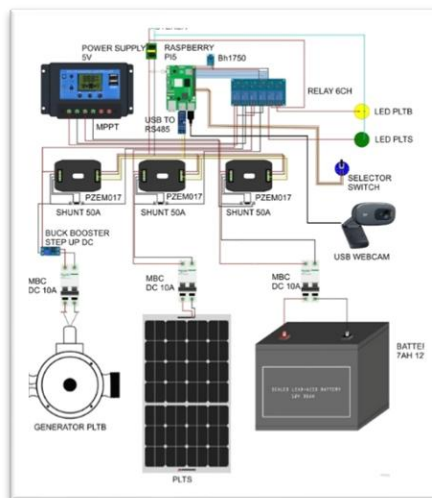
Gambar 1. Blok Diagram Sistem

Gambar 2 berikut mengilustrasikan alur kerja sistem dalam mengambil dan mentransmisikan data. Secara ringkas, proses dimulai dari inialisasi perangkat, dilanjutkan dengan pembacaan parameter tegangan dari turbin angin dan panel surya oleh sensor. Data yang terkumpul kemudian diproses dan dikirimkan oleh *Raspberry Pi* melalui jaringan internet untuk divisualisasikan secara langsung pada aplikasi Android.



Gambar 2. Flowchart

Gambar 3 berikut mengilustrasikan *wiring diagram* sistem pembangkit listrik hibrida (PLTS dan PLTB) yang dikendalikan secara terpusat oleh *Raspberry Pi 5*. Secara garis besar, energi yang dihasilkan dari panel surya dan turbin angin akan melewati sistem proteksi keamanan (MCB) serta pengatur tegangan (MPPT dan *buck-booster*) sebelum disimpan ke dalam baterai. Seluruh parameter kelistrikan dipantau secara langsung menggunakan modul PZEM017, sementara *Raspberry Pi* bertugas mengatur mode operasional dan indikator sistem dengan bantuan sensor cahaya BH1750, *relay*, serta sakelar pemilih (*selector switch*).



Gambar 3. Wiring Diagram

Logika keputusan (*decision logic*) untuk peralihan sumber energi dieksekusi secara otomatis oleh *Raspberry Pi* berdasarkan data dari sensor intensitas cahaya BH1750. Ambang batas (*threshold*) sistem diatur pada 50 lux. Jika pembacaan sensor lebih dari 50 lux (indikasi siang hari), *Raspberry Pi* memicu *relay* untuk mengaktifkan sirkuit panel surya sebagai catu daya utama. Sebaliknya, apabila intensitas cahaya turun di bawah 50 lux (indikasi malam/mendung gelap), *Raspberry Pi* secara seketika memutus *relay* panel surya dan membuka jalur listrik dari turbin angin (PLTB). Keputusan otomatis ini memastikan aliran listrik menuju *smart port* tetap *seamless* tanpa intervensi manusia.

Hasil Dan Pembahasan

Pengujian Statis

Fokus pengujian statis dilakukan untuk mengevaluasi kinerja masing-masing komponen secara individual sebelum diintegrasikan menjadi satu kesatuan sistem. Pengujian ini memastikan setiap bagian berfungsi secara optimal sesuai dengan spesifikasinya.

1. **Pengujian Turbin Angin (VAWT):** Turbin angin diuji menggunakan bantuan *blower* sebagai sumber angin buatan untuk memverifikasi kemampuan generator DC dalam mengonversi energi kinetik. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa pada kecepatan angin terendah 9,36 km/h, turbin menghasilkan tegangan 6 V dan daya 2,52 W. Ketika kecepatan angin dinaikkan mencapai 13,5 km/h, tegangan keluaran melonjak hingga 14,1 V dengan daya 15,7 W.

Tabel 1. Pengujian Generator DC

No	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	Kecepatan Angin
1.	6	0.42	2.52	9.36 km/h
2.	7,8	0.58	4.52	10.8 km/h
3.	9,8	0.75	7.35	12.4 km/h
4.	13,19	1.05	13.8	12.9 km/h
5.	14.1	1.12	15.7	13.5 km/h

2. **Pengujian Panel Surya (PLTS):** Panel surya berkapasitas 50 WP diuji dengan mengamati fluktuasi tegangan dan arus terhadap variasi intensitas cahaya matahari. Pengukuran di lapangan menunjukkan pada intensitas cahaya 13.700 lux, panel mampu menghasilkan tegangan sebesar 19,03 V dengan arus 0,30 A, yang setara dengan daya 5,7 W. Daya ini dihitung menggunakan persamaan daya listrik DC, yaitu $P = V \times I$

Tabel 2. Pengujian Panel Surya

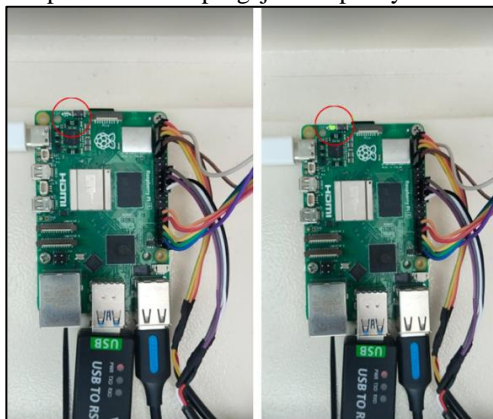
No	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	Lux Meter
1.	12.5	0.30	3.8	9120
2.	13.11	0.35	4.5	10800
3.	14.87	0.33	4.9	11760
4.	17.05	0.32	5.4	12960
5.	18.5	0.31	5.7	13680
6.	19.03	0.30	5.7	13700

3. **Pengujian Sensor Cahaya BH1750:** Sensor ini berfungsi sebagai indikator transisi pergantian sumber energi. Pengujian membuktikan bahwa sensor bekerja responsif terhadap perubahan iluminansi. Sistem dirancang dengan ambang batas (*threshold*) sebesar 50 lux; nilai di bawah angka ini akan menginstruksikan sistem bahwa kondisi telah gelap dan beralih ke mode turbin angin.



Gambar 4. Sensor BH1750

4. **Pengujian MPPT:** Modul *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) diuji untuk memastikan kemampuannya dalam menstabilkan tegangan keluaran. Saat panel surya menghasilkan tegangan kotor sebesar 19,05 V, sisi *output* MPPT berhasil menstabilkannya menjadi 18,65 V. Penyesuaian ini sangat vital agar tegangan yang masuk ke baterai tetap berada pada titik yang aman dan optimal.
5. **Pengujian Modul Kontrol dan Baterai:** Baterai penyimpanan menunjukkan tegangan terisi sebesar 12,74 V hingga 12,92 V saat diukur menggunakan multimeter. Modul *Relay 6 Channel* sebagai saklar elektronik otomatis juga bekerja presisi dalam memutus dan menyambungkan arus dari PLTS ke PLTB tanpa indikasi kegagalan *switching*.
6. **Pengujian Raspberry Pi**
 Dalam sistem ini, Raspberry Pi berperan sebagai pusat kendali utama yang mengoordinasikan operasional serta pembacaan data dari berbagai sensor. Pada tahap pengujian, aktivitas perangkat ditandai dengan menyala lampu indikator LED. Hal ini menunjukkan bahwa sistem pencatu daya telah bekerja dengan baik, di mana tegangan sumber 220 V diturunkan menjadi 5 V melalui unit step-down agar sesuai dengan kebutuhan operasional Raspberry Pi. Visualisasi perangkat ini dapat dilihat pada Gambar 3 pengujian Raspberry Pi di bawah



Gambar 5. Pengujian Raspberry Pi

7. **Pengujian PZEM-017**
 Pengujian PZEM-017 dilaksanakan guna memverifikasi akurasi pembacaan data tegangan, arus, dan daya, sehingga parameter yang dihasilkan benar-benar merepresentasikan kondisi operasional sistem secara aktual.. Pengujian dilakukan pada jalur pengisian baterai dengan variasi sumber energi dan waktu pengujian. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai tegangan dan arus yang terbaca berubah sesuai dengan kondisi sumber energi, sehingga PZEM-017 mampu memantau performa sistem secara real-time.

Monitoring				Monitoring				
Aplikasi IoT Raspberry				Aplikasi IoT Raspberry				
<i>Monitoring Pembangkit Listrik</i>				<i>Monitoring Pembangkit Listrik</i>				
VPLTS 13.11 V	VPLTB 0 V	VPLTS 19.03 V	VPLTB 0 V	VPLTS 19.03 V	VPLTB 0 V	VPLTS 19.03 V	VPLTB 0 V	
APLTS 0.35 A	APLTB 0 A	APLTS 0.3 A	APLTB 0 A	APLTS 0.3 A	APLTB 0 A	APLTS 0.3 A	APLTB 0 A	
WPLTS 4.5 W	WPLTB 0 W	WPLTS 5.7 W	WPLTB 0 W	WPLTS 5.7 W	WPLTB 0 W	WPLTS 5.7 W	WPLTB 0 W	
VBAT 13.04 V	ABAT 0 A	WBAT 0 W	VBAT 13.04 V	ABAT 0 A	WBAT 0 W	VBAT 13.6 V	ABAT 0 A	WBAT 0 W
STATE : SENSOR MODE : AUTO				STATE : SENSOR MODE : AUTO				

Gambar 6. Pengujian PZEM-017 di Pagi dan Siang

Pengujian Dinamis

Pengujian dinamis dilakukan untuk melihat performa aktual panel surya dan turbin angin secara *real-time* dengan memantau perubahan parameter terhadap waktu.

1. **Dinamika Panel Surya:** Panel diuji secara kontinu hingga batas waktu ketika sensor BH1750 berhenti mendeteksi cahaya matahari. Pada pengujian hari pertama, produksi daya paling optimal tercatat pada pukul 13.00 WIB. Pada waktu tersebut, iluminansi mencapai 14.880 lux, menghasilkan tegangan puncak 19,03 V, arus 0,30 A, dan daya maksimal 6,2 W. Menjelang sore (pukul 17.00 WIB), intensitas cahaya merosot menjadi 3.840 lux, menekan produksi daya hingga ke angka 1,60 W.
2. **Dinamika Turbin Angin:** Saat sistem beralih ke mode turbin, pengujian difokuskan pada malam hari untuk memantau kontinuitas pengisian. Pada rentang pukul 18.00 hingga 23.00 WIB, performa turbin mengalami fluktuasi seiring dengan kecepatan angin. Puncak kinerja harian turbin tercatat pada pukul 23.00 WIB dengan kecepatan angin 6,9 km/h, menghasilkan tegangan 3,8 V, arus 0,08 A, dan daya 0,30 W.

Tabel 3. Pengujian Turbin Angin

No.	Waktu	Kecepatan angin (km,h)	Tegangan(V)	Arus(A)	Daya(W)
1	18.00	2.1	1.0	0.02	0.02
2	19.00	2.8	1.5	0.03	0.05
3	20.00	3.6	2.7	0.05	0.15
4	21.00	4.2	2.5	0.05	0.13
5	22.00	5.4	3.1	0.07	0.22
6	23.00	6.9	3.8	0.08	0.30

- Kapasitas Pengisian (Charging):** Untuk menghitung kapasitas energi spesifik per siklus pengujian (10 menit), digunakan persamaan dasar $Energy(Wh) = Daya(W) \times \frac{10}{60}$. Berdasarkan sampel pengujian selama 40 menit, panel surya mampu memproduksi energi total 3,809 Wh , sedangkan turbin angin di malam hari memproduksi energi sebesar 2,433 Wh.

Pengujian Terintegrasi

Pengujian terintegrasi dilaksanakan untuk memverifikasi bahwa seluruh rangkaian sirkuit dapat beroperasi secara sinkron dalam kondisi lapangan yang sebenarnya. Pada pengujian ini, MPPT mengoptimalkan konversi energi matahari, dan saat intensitas cahaya meredup, sistem langsung mengandalkan turbin angin yang juga dikendalikan oleh MPPT.

Dalam fase awal pengujian (mode PLTS), sistem memiliki tegangan input *real-time* di kisaran 17,8 V hingga 19,1 V dengan daya 4,98 W hingga 6,49 W. Untuk menguji respons sistem, sensor BH1750 secara sengaja ditutup agar transisi sumber daya (*switching*) terjadi. Setelah perpindahan ke mode PLTB, tegangan input menurun secara wajar ke kisaran 11,9 V hingga 13,1 V dengan daya 3,57 W hingga 4,98 W. Total energi terintegrasi yang berhasil dihasilkan selama 100 menit pengujian (0,833 jam) adalah 50,47 W, yang berarti daya rata-rata sistem (*Pavg*) berada di angka 60,57 W sesuai kalkulasi $Pavg = \frac{50.47}{0.833} = 60.57 W$. Angka ini membuktikan bahwa mekanisme perpindahan EBT berjalan mulus tanpa mengganggu suplai daya baterai.

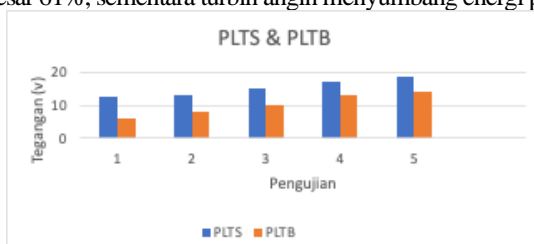
Tabel 4. Pengujian Terintegrasi Sistem Hibrida PLTS-PLTB

No	Waktu	Kecepatan angin km/h	Nilai Flus meter (Lux)	Tegangan Input (V)	Arus Input (A)	Daya (W)
1	12:06:00	-	14.088	17.8	0.33	5.87
2	12:18:00	-	15.576	19.1	0.34	6.49
3	12:29:00	-	13.560	18.5	0.30	5.65
4	12:40:00	-	11.952	17.8	0.28	4.98
5	12:52:00	-	13.536	18.2	0.31	5.64
6	13:07:00	11.8	-	12.8	0.35	4.48
7	13:19:00	12.5	-	13.1	0.38	4.98
8	13:30:00	12.1	-	12.9	0.36	4.64
9	13:41:00	11.4	-	12.4	0.33	4.09
10	13:53:00	10.7	-	11.9	0.30	3.57

Analisis Data

Analisis perbandingan menunjukkan adanya dominasi kontribusi dari salah satu sumber daya.

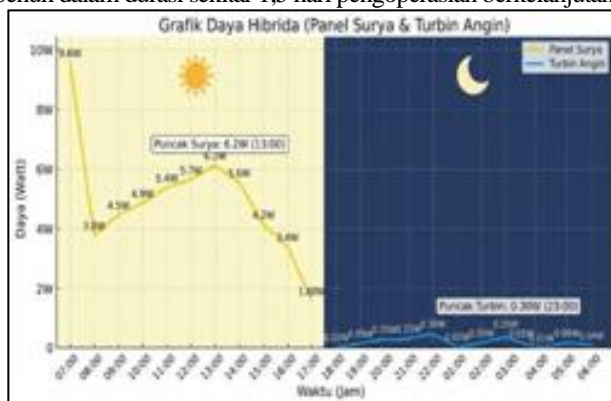
- Rasio Perbandingan Kelistrikan:** Berdasarkan perhitungan total tegangan kumulatif, panel surya menghasilkan $\sum V_{PLTS} = 75 V$, sedangkan turbin angin memproduksi $\sum V_{PLTB} = 48 V$ Rasio perbandingan ini membuktikan bahwa $R = 1.56$. Secara persentase, kontribusi panel surya memegang porsi dominan sebesar 61%, sementara turbin angin menyumbang energi pendukung sebesar 39%.



Gambar 7. Grafik Perbandingan Panel surya dengan turbin angin

- Performa Siklus 24 Jam & Lama Pengisian:** Dalam satu hari penuh, total produksi daya hibrida tercatat sebesar 56,15 Wh (54,9 Wh dari PLTS dan 1,25 Wh dari PLTB). Kapasitas baterai yang digunakan memiliki spesifikasi total 84 Wh

($12\text{ V} \times 7\text{ Ah} = 84\text{ Wh}$) Dengan membagi kapasitas baterai dan produksi energi harian, diperoleh estimasi waktu bahwa baterai dapat terisi hingga penuh dalam durasi sekitar 1,5 hari pengoperasian berkelanjutan



Gambar 8. Pengujian Sehari-hari

Kajian Produk

Berdasarkan hasil pengujian selama 24 jam di wilayah Surabaya, panel surya menunjukkan kontribusi daya yang lebih unggul dibandingkan dengan turbin angin. Performa panel surya ini dipengaruhi secara signifikan oleh letak geografis, dimensi panel, serta intensitas radiasi matahari yang diterima. Di sisi lain, meskipun daya berbanding lurus dengan kecepatan angin, kondisi angin yang fluktuatif atau sangat kencang dalam waktu singkat cenderung hanya menghasilkan tegangan tinggi tanpa diikuti kenaikan arus dan daya yang proporsional. Perangkat hibrida ini sangat representatif untuk diimplementasikan di wilayah pesisir yang memiliki kecepatan angin yang stabil dan area terbuka untuk paparan cahaya optimal. Keunggulannya terletak pada desain turbin vertikal yang mampu menangkap angin dari segala arah tanpa titik buta (*dead zone*), serta integrasi langsung antara turbin dan poros generator yang meminimalkan kerugian mekanis.

Analisis Performa dan Kalkulasi Energi

Dalam mengevaluasi keluaran kelistrikan, daya keluaran dari kedua sumber energi dihitung secara periodik menggunakan persamaan dasar arus searah (DC):

$$P = V \times I$$

Di mana P adalah daya (Watt), V adalah tegangan (Volt), dan I adalah arus (Ampere). Untuk mengetahui kapasitas energi harian (Watt-hour/Wh) yang berhasil dihimpun oleh baterai dalam durasi spesifik

Dari pengujian dinamis terintegrasi, purwarupa ini mampu menghasilkan akumulasi energi rata-rata sebesar $\pm 68,16\text{ Wh}$ dalam satu siklus harian. Mengingat kapasitas baterai yang digunakan adalah 84 Wh ($12\text{ V} \times 7\text{ Ah}$), sistem hibrida ini memiliki tingkat efisiensi yang sangat baik karena sanggup mengisi daya baterai hingga $+72\%$ dari total kapasitas penyimpanannya dalam waktu 24 jam.

Analisis Komparatif dan Interpretasi Dominasi Energi

Dari total akumulasi tegangan yang dihasilkan, tercatat bahwa Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) mendominasi suplai sistem sebesar 61% (akumulasi 75 V) dengan rata-rata daya $\pm 5,28\text{ W}$. Di sisi lain, Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) berkontribusi sebesar 39% (akumulasi 48 V) dengan rata-rata daya $\pm 0,72\text{ W}$.

Interpretasi analitis atas dominasi panel surya ini disebabkan oleh konsistensi paparan radiasi foton Matahari di wilayah pesisir pada rentang waktu siang hari (08.00–16.00), dipadukan dengan efisiensi area penampang panel 50 WP yang mampu melakukan konversi secara lebih konsisten. Sebaliknya, meskipun VAWT memiliki sifat *self-starting* yang sangat baik, energi kinetik hembusan angin pesisir pada malam hari sangat fluktuatif dan tidak selalu stabil pada kecepatan putaran nominal generator. Akibatnya, turbin angin lebih berfungsi sebagai sistem pendukung (*back-up*) yang menyuntikkan daya krusial untuk mencegah penurunan tegangan baterai secara drastis (*deep discharge*) pada malam hari

Jika dikomparasikan dengan studi sistem energi tunggal konvensional (misalnya penelitian Laksana dkk yang hanya menggunakan satu sumber), rancangan hibrida terintegrasi IoT ini menunjukkan keunggulan komparatif yang signifikan. Sistem tunggal umumnya mengalami pemutusan daya mutlak saat sumber daya alam terhenti (seperti pada malam hari pada PLTS). Sebaliknya, sistem cerdas ini sukses mempertahankan injeksi arus secara terus-menerus (*seamless charging*) dengan nilai tegangan yang berhasil dijaga konstan oleh modul MPPT.

Keterbatasan Penelitian (Limitations)

Meskipun purwarupa ini beroperasi secara optimal sesuai dengan objektif perancangan, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, durasi pengujian dinamis yang dibatasi pada siklus 1×24 jam belum sepenuhnya mencerminkan kemampuan sistem dalam menghadapi variabilitas lingkungan ekstrem dalam jangka panjang (seperti anomali musim hujan lebat atau angin badai yang berkelanjutan). Evaluasi jangka panjang dibutuhkan untuk memvalidasi generalisasi umur pakai baterai dan komponen mekanis turbin. Kedua, pada skala purwarupa (*prototype scale*), desain ini menggunakan beban daya

yang masih tergolong kecil. Untuk diimplementasikan pada infrastruktur pelabuhan pintar yang sesungguhnya (meliputi operasional sensor masif, CCTV, dan aktuator derek), kapasitas produksi komponen PLTS dan PLTB harus diekskalasi ke skala industri.

Simpulan

Penelitian ini telah berhasil merancang sistem pembangkit listrik hibrida yang memadukan panel surya dan *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) sebagai satu daya utama untuk purwarupa pelabuhan pintar [23]. Sistem ini sepenuhnya dikendalikan oleh Raspberry Pi dan didukung oleh berbagai instrumen cerdas. Secara khusus, penggunaan sensor cahaya BH1750 dengan ambang batas 50 lux terbukti berhasil memicu *switching* siang-malam secara otomatis. Selain itu, kehadiran modul MPPT pada rangkaian juga berhasil menstabilkan tegangan *output* dari kedua sumber energi tersebut hingga mencapai titik daya maksimal sebelum dialirkan ke penyimpanan.

Hasil pengujian 1x24 jam membuktikan sistem mampu menghasilkan total energi $\pm 68,16$ Wh ($\pm 5,24$ Ah), memenuhi $\pm 72\%$ kapasitas baterai 12 V. Panel surya mendominasi suplai sebesar 61% dengan rata-rata daya $\pm 5,28$ W pada siang hari. Turbin angin berkontribusi sebesar 39% dengan rata-rata daya $\pm 0,72$ W sebagai sumber pendukung di malam hari. Sensor cahaya BH1750 dengan ambang batas 50 lux berhasil menjadi pemicu *switching* otomatis antara siang dan malam. Modul MPPT juga berhasil menstabilkan tegangan *output* dari kedua sumber pada titik daya maksimum. Secara keseluruhan, sistem beroperasi sesuai dengan tujuannya.

Guna menyempurnakan rancangan ini di masa mendatang, sangat disarankan untuk memperbesar kapasitas panel surya maupun turbin angin agar produksi energi menjadi jauh lebih maksimal dan waktu pengisian baterai menjadi lebih singkat. Pembaruan pada sisi penyimpan daya juga perlu dipertimbangkan, misalnya dengan beralih ke baterai jenis LiFePO4 atau Lithium yang terbukti memiliki efisiensi serta siklus hidup yang lebih panjang. Selain itu, penerapan Sistem Manajemen Energi (EMS) tingkat lanjut akan sangat membantu sistem dalam mengatur prioritas distribusi beban secara lebih cerdas dan adaptif.

Terakhir, dari segi pengawasan dan ketahanan operasional, sistem ini perlu diintegrasikan lebih dalam dengan teknologi *Internet of Things* (IoT) agar data kelistrikan, status baterai, dan performa modul dapat dipantau secara *real-time* guna meningkatkan efisiensi operasional serta kemudahan akses data melalui jaringan internet [24]. Agar purwarupa ini benar-benar tangguh dan siap diaplikasikan, pengujian lanjutan harus dilakukan pada kondisi lingkungan yang lebih ekstrem dan bervariasi, seperti di perairan lepas atau pegunungan dengan angin kencang, guna memvalidasi keandalan sistem pada skala yang lebih besar.

Daftar Pustaka

- [1] M. Z. Abidin and R. S. Dewi, "Analisis Kesiapan Pelabuhan di Indonesia Menuju Konsep Smart Port Terintegrasi," *Jurnal Maritim Nusantara*, vol. 5, no. 2, pp. 112-120, 2023.
- [2] K. H. Pratama, "Kebutuhan Satu Daya dan Stabilitas Energi Pada Infrastruktur Pelabuhan Modern," *Jurnal Teknik Elektro dan Sistem Otomasi*, vol. 8, no. 1, pp. 45-52, 2024.
- [3] M. Reza, "Studi Kelayakan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid Di Pelabuhan Perikanan Pantai (Ppp) Morodemak Dengan Menggunakan Software Homer," *Jurnal Kelautan*, vol. 4, no. 1, pp. 22-30, 2021.
- [4] S. Ayu Arsita, G. Eko Saputro, and S. Susanto, "Perkembangan Kebijakan Energi Nasional dan Energi Baru Terbarukan Indonesia," *Jurnal Syntax Transformation*, vol. 2, no. 12, pp. 1779-1788, 2021.
- [5] M. S. Alim, S. Thamrin, and R. L. W., "Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya sebagai Alternatif Ketahanan Energi Nasional Masa Depan," *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat Nusantara (JPKMN)*, vol. 4, no. 3, pp. 2427-2435, 2023.
- [6] T. Berliana *et al.*, "Analisis Perbandingan Efisiensi Buck-Boost Converter Dengan Cuk Converter Pada Panel Surya," *KOLONI: Jurnal Multidisiplin Ilmu*, vol. 3, no. 2, pp. 2828-6863, 2024.
- [7] R. Baihaqi, "Pengaruh Variasi Sudut Blade pada Vertical Wind Turbine Darrieus Tipe," *Jurnal Flywheel*, vol. 16, no. 1, pp. 1-6, 2025.
- [8] S. Fakhira and A. Henukh, "Karakteristik Turbin Angin Sumbu Vertikal pada Area Berkecepatan Angin Rendah," *Jurnal Energi Terbarukan*, vol. 6, no. 2, pp. 11-19, 2024.
- [9] B. U. Maulana, "Optimalisasi Konversi Energi Hibrida Surya dan Angin di Wilayah Pesisir," *ABDIMAS Lectura*, pp. 14-22, 2025.
- [10] B. Harianto and M. Karjadi, "Kombinasi Panel Surya dan Generator Konvensional untuk Pemenuhan Beban Listrik," *Jurnal Elektro Terapan*, vol. 7, no. 4, pp. 3011-3019, 2025.
- [11] A. Laksana and S. Nursuwars, "Implementasi Kontrol Sistem Charging Pembangkit Tenaga Listrik Secara Keseluruhan," *Jurnal Lentera Bumi Nusantara*, vol. 3, 2021.
- [12] H. D. Wicaksono, D. Djuniadi, and E. Apriaskar, "Monitoring Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin berbasis IoT," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 8, no. 1, 2023.

- [13] A. Razaqi, "Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid dan Ekonomi Teknik di MSTP UNDIP Jepara," *Jurnal Teknologi Ramah Lingkungan*, 2025.
- [14] Y. A. Putri and E. Astrid, "Peningkatan Kinerja Sistem Photovoltaic Dengan Mengaplikasikan Algoritma Incremental Conductance Yang Ditingkatkan," *MSI Transaction on Education*, vol. 6, no. 1, pp. 15-28, 2025.
- [15] M. Azmi *et al.*, "Pengendalian Kecepatan Sistem Propulsi Hybrid Pada Model Kapal Trimaran Berbasis Neural Network," *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 12, no. 3, 2020.
- [16] Okpatrioka, "Research And Development (R&D) Penelitian Yang Inovatif Dalam Pendidikan," *Dharma Acariya Nusantara: Jurnal Pendidikan, Bahasa Dan Budaya*, vol. 1, no. 1, pp. 86-100, 2023.
- [17] I. O. D. Brata, "Analisis Dan Perancangan Sistem 'Study Literasi Merancang Masukan Yang Efektif'," *Jurnal Akuntansi Bisnis Dan Ekonomi*, vol. 7, no. 1, pp. 1831-1854, 2021.
- [18] R. Latifah, "Pengembangan Robot Pemilah Sampah Menggunakan Convolutional Neural Network," *Institutional Repository UIN Syarif Hidayatullah*, vol. 1, no. 1, 2022.
- [19] B. Ath-thaariq, B. Liswanto, and M. Diki, "Perancangan Sistem Recloser Untuk Memantau Konsumsi Daya Listrik Rumah Tangga Menggunakan Modifikasi Arduino Mega," *Jurnal Otomasi*, pp. 80-89, 2025.
- [20] A. Rahman, "Penerapan Sensor Cahaya Digital BH1750 pada Sistem Kendali Penerangan Otomatis Berbasis Mikrokontroler," *Jurnal Ilmu Komputer dan Elektronika*, vol. 5, no. 3, pp. 201-209, 2023.
- [21] M. A. Pradhana, "Pengisi Daya Baterai LiFePO4 Sebagai Sumber Energi Pada Sepeda Listrik," *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 11, no. 2, pp. 70-74, 2022.
- [22] R. A. Muharam *et al.*, "Motor DC Menggunakan PID Dengan Metode Tuning Trial & Error," *Jurnal Teknik Kendali*, 2025.
- [23] A. Firmansyach, H. Nurdiansari, dan W. M. Sandi, "Implementasi Sistem Streaming Sebagai Upaya Pemantauan dan Penunjang Keselamatan Proses Sandar Kapal Pada Pelabuhan Pintar," *Jurnal Sains dan Teknologi Maritim (JSTM)*, vol. 26, no. 2, pp. 334-342, Mar. 2026, doi: 10.33556/jstm.v26i2.617.
- [24] Mochamad Andri Prassetyo, Henna Nurdiansari, and Kuntoro Bayu Ajie, "Rancang Bangun Alat Pemilah Ikan Berbasis Internet Of Things (IoT)", *JTMEI*, vol. 3, no. 2, pp. 35-52, May 2024.