

## RANCANG BANGUN *PROTOTYPE PORTABLE* PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA DAN BAYU DENGAN SISTEM *HYBRID*

Heri Kiswanto<sup>1\*</sup>, Purwanto<sup>2</sup>, Indah Nurhidayati<sup>3</sup>, Wahyu Ari Putranto<sup>1</sup>, Susanto<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik, Politeknik Maritim Negeri Indonesia

<sup>2</sup>Program Studi Nautika, Politeknik Maritim Negeri Indonesia

Jl. Pawiyatan Luhur I No 1 Bendan Duwur, Gajah Mungkur, Semarang 50233

<sup>3</sup>Program Studi Nautika, Politeknik Ilmu Pelayaran Semarang

Jl. Singosari Raya No.2A, Wonodri, Kec. Semarang Selatan, Semarang, 50242

\*Email: hkiswanto@polimarin.ac.id

### Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan menguji sebuah prototipe pembangkit listrik portabel dengan sistem hybrid yang menggabungkan energi surya dan angin, dengan tujuan meningkatkan efisiensi dan keandalan pasokan energi di lingkungan dengan variabilitas cuaca tinggi. Sistem ini dirancang untuk memanfaatkan dua sumber energi terbarukan secara simultan, guna mengatasi keterbatasan masing-masing sumber ketika digunakan secara terpisah. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kombinasi energi dari kedua sumber memberikan kinerja yang lebih stabil, dengan daya output maksimum yang lebih tinggi dibandingkan penggunaan satu sumber energi saja. Penerapan sistem hybrid ini diharapkan dapat mendukung upaya penyediaan energi yang lebih efisien dan berkelanjutan di daerah terpencil maupun lokasi yang memiliki tantangan cuaca dinamis.

**Kata kunci:** *prototype, portable, hybrid, surya, angin*

### PENDAHULUAN

Energi terbarukan semakin berperan penting dalam upaya global mengatasi perubahan iklim dan kelangkaan sumber energi fosil (Kiswanto, 2022). Dua sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar adalah energi surya dan angin. Indonesia, dengan garis pantai yang panjang dan intensitas cahaya matahari yang tinggi, merupakan lokasi strategis untuk pengembangan kedua sumber energi ini. Namun, integrasi efektif antara energi surya dan angin dalam satu sistem masih menghadapi sejumlah kendala, terutama dalam aspek teknologi, biaya, dan efisiensi. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengatasi hambatan-hambatan ini (Ganguly et al., 2018; Ketut Parti et al., 2020).

Penelitian sebelumnya telah membahas pengembangan sistem *hybrid* yang menggabungkan energi surya dan angin (Annam, 2022; Sukandi et al., 2020). Sebagai contoh, Soedibyo dkk. (Soedibyo et al., 2020) menunjukkan bahwa kombinasi kedua sumber ini dapat meningkatkan stabilitas dan keandalan pasokan energi, sedangkan Nawafillah dkk. (Nawafillah et al., 2022) menemukan bahwa sistem *hybrid* surya-angin dapat menyediakan energi yang lebih efisien di daerah pedesaan dibandingkan penggunaan satu sumber energi secara terpisah (Aziz et al., 2019; Custer &

Lianda, 2018; Suprajitno et al., 2022). Namun, sebagian besar penelitian terkait sistem *hybrid* ini berfokus pada skala besar, sementara kajian tentang sistem *hybrid* yang bersifat *portable* masih terbatas, terutama dalam hal rancang bangun dan pengujian performa pada skala kecil.

Kesenjangan penelitian ini menyoroti perlunya pengembangan lebih lanjut pada sistem *hybrid* yang bersifat *portable*, dengan tujuan untuk memenuhi kebutuhan energi di lokasi yang sulit dijangkau dan memiliki variabilitas cuaca tinggi. Sistem *hybrid portable* ini diharapkan dapat memberikan solusi yang lebih efisien dan andal dalam menyediakan energi terbarukan, terutama untuk daerah terpencil. Penelitian ini akan berfokus pada pengembangan teknologi konversi energi yang mampu mengintegrasikan sumber energi surya dan angin secara optimal dalam sistem *hybrid* yang *portable*, dengan mempertimbangkan efisiensi dan keandalan sistem dalam berbagai kondisi operasional.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah merancang dan membangun sebuah *prototype* sistem *hybrid* yang menggabungkan energi surya dan angin dalam skala kecil yang *portable*. Pengembangan *prototype* ini diharapkan dapat memberikan data yang relevan untuk pengembangan sistem *hybrid* pada skala yang lebih besar, serta memberikan solusi yang

fleksibel, efisien, dan mudah diimplementasikan dalam berbagai kondisi lingkungan. Karakteristik portabilitas dari sistem ini memungkinkan pengujian yang lebih fleksibel, efisien, dan rendah risiko, serta memberikan data yang lebih komprehensif untuk evaluasi performa sistem.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini mengadopsi metode eksperimen dengan pendekatan kuantitatif untuk mengevaluasi kinerja sistem *hybrid* pembangkit listrik *portable* berbasis tenaga surya dan angin. Fokus utama dari penelitian ini adalah merancang, membangun, dan menguji prototipe sistem *hybrid* dalam skala kecil, yang bertujuan untuk menyimulasikan sistem skala penuh dengan cara yang lebih terkelola dan efisien.

### 1. Tahapan Penelitian

#### a. Studi Literatur

Tahap awal penelitian ini dimulai dengan studi pustaka yang mendalam, mengacu pada berbagai sumber akademik terpercaya seperti jurnal ilmiah, prosiding konferensi, buku teks, dan laporan teknis terkait sistem pembangkit listrik *hybrid*. Studi ini bertujuan untuk mengidentifikasi kesenjangan dalam penelitian terdahulu, memilih konfigurasi optimal, dan menentukan material serta teknologi yang sesuai untuk sistem yang efisien dan portabel. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kombinasi tenaga surya dan angin dapat meningkatkan efisiensi sistem secara signifikan pada kondisi cuaca yang bervariasi (Ganguly et al., 2018; Hassan et al., 2023).

#### b. Perancangan dan Pembuatan Prototipe

Prototipe sistem dirancang untuk mengintegrasikan panel surya dan turbin angin dalam satu unit yang kompak. Diagram sirkuit yang menyatukan panel surya, turbin angin, mikrokontroler, dan perangkat penyimpanan energi (baterai) dikembangkan untuk memastikan integrasi yang efektif dari semua komponen. Prototipe ini dipilih berdasarkan pertimbangan efisiensi dan portabilitas untuk mendukung sistem yang optimal.

Komponen utama yang digunakan dalam prototipe meliputi Panel Surya tipe monokristalin merk INScorn, model KMM-29720, dengan spesifikasi daya maksimum 20 W, tegangan pada daya maksimum ( $V_{mp}$ ) 18,5 V, arus pada daya maksimum ( $I_{mp}$ ) 1,89 A, dimensi 520 x 360 x 17 mm, dan berat 2,3 kg. Panel ini

dipilih karena efisiensinya yang tinggi, sekitar 15-20%, bahkan dalam kondisi cahaya rendah (Elgi Octavianto et al., 2021; Koay et al., 2020).

Turbin dengan diameter bilah 60 cm dan empat bilah, dirancang untuk menangkap energi angin pada kecepatan rendah dengan efisiensi yang optimal (Hassan et al., 2023; Wen et al., 2021). *Solar Charge Controller* (SCC) dengan fitur *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) digunakan untuk mengoptimalkan konversi energi dari panel surya dan turbin angin. MPPT berfungsi untuk menjaga agar sistem beroperasi pada titik daya maksimum dengan mengikuti algoritma konversi energi yang optimal. Mikrokontroler Berbasis Arduino yang mengatur distribusi energi serta mengumpulkan data dari sensor yang terhubung.

Pemilihan komponen dilakukan dengan mempertimbangkan efisiensi, biaya, ketersediaan, dan kesesuaian dengan tujuan penelitian. Panel surya monokristalin dipilih karena efisiensinya yang lebih tinggi dibandingkan dengan jenis polikristalin, sementara turbin angin berdiameter besar memungkinkan konversi energi yang lebih baik pada kecepatan angin rendah (Maulana Ariamuda & Ansori, 2020; Zambak et al., 2022).

Daya listrik yang dihasilkan dari panel surya dan turbin angin dihitung menggunakan rumus dasar:

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

dimana  $P$  adalah daya (W),  $V$  adalah tegangan (V), dan  $I$  adalah arus (A). MPPT memastikan bahwa energi dikonversi pada titik daya maksimum.

### 2. Skema Rancangan dan Pengujian Prototipe

Diagram sirkuit sistem dirancang untuk menghubungkan panel surya, turbin angin, baterai, mikrokontroler, dan sensor. Setelah perakitan prototipe, dilakukan pengujian awal untuk memverifikasi fungsi setiap komponen. Pengujian ini meliputi pengukuran tegangan, arus, dan daya yang dihasilkan dari panel surya dan turbin angin, baik secara terpisah maupun dalam konfigurasi sistem *hybrid*.

Pengujian dilakukan dengan memantau parameter tegangan dan arus yang dihasilkan oleh kedua sumber energi. Daya *output* ( $P_{output}$ ) yang dihitung menggunakan rumus:

$$P_{output} = P_{surya} + P_{angin} \quad (2)$$

Data dikumpulkan secara *real-time* menggunakan sensor yang terhubung dengan mikrokontroler dan disimpan oleh data logger. Sensor mengukur intensitas cahaya, kecepatan angin, serta tegangan dan arus keluaran, yang digunakan untuk menghitung efisiensi konversi energi.

Berikut ini adalah pengujian *prototype hybrid portable* seperti yang ditunjukkan pada gambar 1 dan 2 di bawah ini.



Gambar 1. *Prototype portable hybrid*



Gambar 2. Uji coba *prototype hybrid*

### 3. Pengolahan dan Analisis Data

Data yang dikumpulkan diolah menggunakan metode statistik untuk mengevaluasi kinerja sistem dalam berbagai kondisi operasional. Efisiensi konversi energi

dihitung dengan membandingkan daya *input* dari panel surya dan turbin angin dengan daya *output* sistem *hybrid*. Efisiensi konversi ditentukan dengan rumus:

$$\eta = \frac{P_{output}}{P_{input}} \times 100\% \quad (3)$$

di mana  $\eta$  adalah efisiensi sistem,  $P_{output}$  adalah daya yang dihasilkan, dan  $P_{input}$  adalah energi yang diterima dari sumber surya dan angin.

$P_{input}$  pada panel surya adalah jumlah energi matahari yang diterima oleh permukaan panel surya. Rumus untuk menghitung  $P_{input}$  adalah:

$$P_{input} = E_{solar} \times A \quad (4)$$

Dimana  $E_{solar}$  adalah intensitas radiasi matahari, biasanya diukur dalam  $W/m^2$ . Pada kondisi standar, nilainya adalah sekitar  $1.000 W/m^2$ . Sedangkan  $A$  adalah luas permukaan panel surya ( $m^2$ ).

Untuk  $P_{input}$  pada turbin angin adalah energi kinetik yang terkandung dalam angin yang melewati area sapuan baling-baling turbin. Rumus untuk menghitung  $P_{input}$  adalah:

$$P_{input} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (5)$$

Dimana  $\rho$  adalah densitas udara, umumnya sekitar  $1.225 kg/m^3$  pada suhu dan tekanan standar.  $A$  adalah area sapuan baling-baling turbin angin ( $m^2$ ), dan  $v$  adalah kecepatan angin ( $m/s$ ), yang mempengaruhi seberapa besar energi yang dibawa angin.

### 4. Validasi Data

Validasi data dilakukan dengan melakukan pengujian ulang di berbagai kondisi operasional untuk memastikan konsistensi dan akurasi hasil. Pengujian diulang sebanyak tiga kali untuk setiap set kondisi operasional, dan hasil yang diperoleh dibandingkan dengan standar internasional serta penelitian terdahulu (Ganguly et al., 2018; Wen et al., 2021). Pengulangan ini bertujuan untuk meminimalkan kesalahan pengukuran dan memastikan keandalan data yang diperoleh.

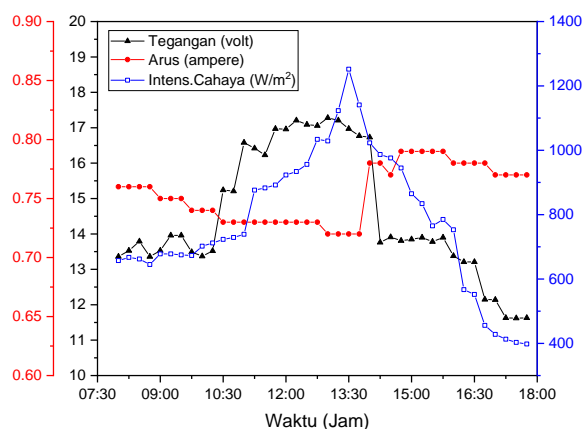
### HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk menguji kinerja prototipe pembangkit listrik *hybrid* yang menggabungkan panel surya dan turbin angin secara terpisah serta dalam kondisi kombinasi. Pengujian dilakukan di kampus Politeknik Maritim Negeri Indonesia (Polimarin) selama bulan Juli 2024, di atas *rooftop* laboratorium Jurusan Teknik. Lokasi ini dipilih karena

memiliki paparan sinar matahari yang optimal dan angin yang relatif konstan, sehingga ideal untuk pengujian kedua sumber energi ini. Data yang diperoleh meliputi pengukuran tegangan dan arus pada panel surya dan turbin angin, yang masing-masing diuji dalam kondisi terpisah sebelum diuji dalam kondisi *hybrid*.

### 1. Hasil Pengujian Panel Surya

Hasil pengukuran tegangan dan arus rata-rata yang dihasilkan panel surya disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Hasil Pengujian Panel Surya

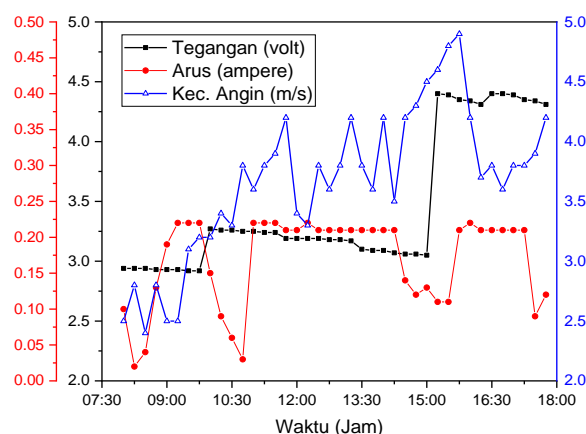
Berdasarkan Gambar 3, terlihat bahwa intensitas cahaya matahari memiliki korelasi positif yang kuat terhadap tegangan, arus, dan daya yang dihasilkan. Pada puncak intensitas cahaya matahari sebesar 1252 W/m<sup>2</sup>, daya keluaran panel surya mencapai 12,22 W, sedangkan pada intensitas terendah (398 W/m<sup>2</sup>), daya turun menjadi 8,96 W. Fluktuasi ini menekankan pentingnya intensitas cahaya sebagai faktor utama yang mempengaruhi efisiensi panel surya, seperti yang didukung oleh penelitian sebelumnya terkait hubungan langsung antara intensitas cahaya dan daya listrik yang dihasilkan.

Secara teoritis, intensitas cahaya matahari yang tinggi akan meningkatkan jumlah foton yang mencapai permukaan sel surya, sehingga meningkatkan arus yang dihasilkan melalui efek fotovoltaiik. Hasil ini sejalan dengan literatur yang menekankan bahwa daya panel surya secara langsung dipengaruhi oleh variasi intensitas cahaya, terutama di daerah tropis dengan tingkat pencahayaan yang fluktuatif. Namun, meskipun intensitas cahaya adalah faktor kunci, pengaturan sudut panel dan adanya bayangan dapat menurunkan efisiensi konversi

energi, yang mungkin menjelaskan fluktuasi data yang diperoleh dalam periode pengujian ini.

### 2. Hasil Pengujian Turbin Angin

Rata-rata hasil pengukuran tegangan dan arus yang dihasilkan oleh turbin angin disajikan pada Gambar 4. Berdasarkan Gambar 4, hasil pengujian turbin angin menunjukkan bahwa kecepatan angin merupakan faktor kritis dalam menentukan daya yang dihasilkan. Pada kecepatan angin tertinggi sebesar 4,9 m/s, daya *output* mencapai 0,04 W, sedangkan pada kecepatan angin terendah 2,4 m/s, daya *output* turun menjadi 0,03 W. Meskipun perubahan daya terlihat relatif kecil, namun secara teoretis, daya yang dihasilkan turbin angin berbanding lurus dengan pangkat tiga dari kecepatan angin (persamaan 5), sehingga peningkatan kecil dalam kecepatan angin dapat menghasilkan peningkatan daya yang signifikan.



Gambar 4. Hasil Pengujian Turbin Angin

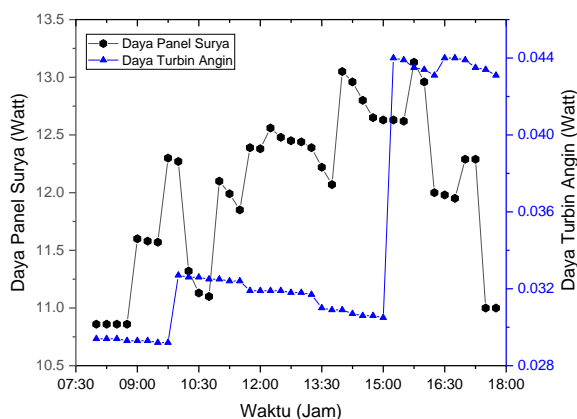
Pengujian turbin angin menunjukkan bahwa kecepatan angin adalah faktor utama yang menentukan tegangan, arus, dan daya keluaran turbin angin. Pada hari dengan kecepatan angin tertinggi (4,9 m/s), daya *output* mencapai 0,04 Watt, sementara pada kecepatan angin rendah (2,4 m/s), daya *output* sekitar 0,03 Watt. Perbedaan ini menunjukkan bagaimana peningkatan kecil dalam kecepatan angin dapat menghasilkan peningkatan daya (Afidah et al., 2023).

Performa turbin angin yang fluktuatif ini disebabkan oleh ketergantungannya pada kecepatan dan konsistensi angin, sesuai dengan studi-studi sebelumnya yang menunjukkan bahwa variabilitas angin dapat mengakibatkan *output* energi yang tidak stabil. Oleh karena itu, pengoperasian turbin angin di lokasi dengan

kecepatan angin yang tinggi dan konsisten sangatlah penting untuk memaksimalkan efisiensi.

### 3. Pengujian Sistem Hybrid

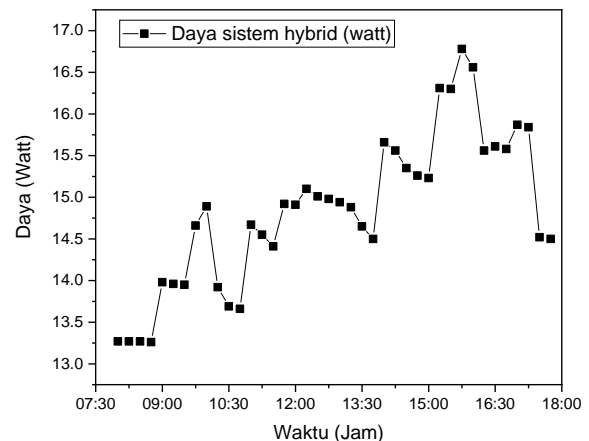
Hasil pengujian kinerja panel surya dan turbin angin secara terpisah ditampilkan pada Gambar 5. Berdasarkan Gambar 5, terlihat fluktuasi yang signifikan pada kedua sumber energi. Daya *output* panel surya berkisar antara 10,5 W hingga 13,5 W, dengan puncak daya terjadi pada intensitas cahaya tertinggi, kemungkinan pada hari-hari cerah tanpa awan. Sebaliknya, daya terendah tercatat saat intensitas cahaya berkurang, seperti pada hari berawan. Fluktuasi ini mencerminkan sensitivitas panel surya terhadap intensitas cahaya, yang konsisten dengan penelitian terdahulu tentang pengaruh intensitas cahaya matahari dalam kondisi tropis.



Gambar 5. Daya *ouput* panel surya dan turbin angin ketika digunakan secara terpisah

Di sisi lain, daya *output* turbin angin berkisar antara 0,028 kW hingga 0,046 kW. Puncak daya terjadi ketika kecepatan angin tinggi, dan daya terendah saat angin berhembus lemah. Fluktuasi ini sejalan dengan hukum kubik, di mana daya turbin angin meningkat seiring dengan kecepatan angin. Hal ini menunjukkan ketergantungan besar turbin angin pada variasi kecepatan angin.

Hasil pengujian sistem *hybrid* disajikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Daya *output* sistem *hybrid*

Berdasarkan Gambar 6, terlihat bahwa daya *output* sistem *hybrid* berkisar antara 11 W hingga 13,5 W, dengan puncak daya maksimum mencapai 16,78 W. Fluktuasi daya *output* dalam sistem *hybrid* lebih kecil dibandingkan dengan pengujian terpisah, menunjukkan keunggulan integrasi teknologi ini.

Kombinasi sumber energi surya dan angin dalam sistem *hybrid* terbukti memberikan keunggulan signifikan. Saat intensitas cahaya matahari atau kecepatan angin berada dalam kondisi optimal, *output* daya yang dihasilkan meningkat secara substansial. Sebaliknya, ketika salah satu sumber energi berada dalam kondisi kurang optimal, sistem ini tetap mampu menghasilkan daya yang lebih stabil dan andal. Hal ini terutama bermanfaat di wilayah dengan kondisi cuaca yang fluktuatif.

Keunggulan utama dari sistem *hybrid* terletak pada kemampuannya beradaptasi terhadap perubahan lingkungan. Sebagai contoh, ketika intensitas cahaya menurun namun kecepatan angin meningkat, turbin angin mampu menutupi kekurangan *output* dari panel surya, dan sebaliknya. Adaptabilitas ini menjadikan sistem *hybrid* sebagai solusi yang efektif untuk daerah dengan variabilitas cuaca yang tinggi.

Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem *hybrid* berpotensi menjadi solusi energi terbarukan yang andal dan berkelanjutan, terutama di wilayah terpencil dengan keterbatasan akses ke sumber energi konvensional. Kombinasi kedua sumber energi ini mampu meningkatkan efisiensi dan keandalan pasokan energi, sekaligus mendukung peningkatan penggunaan energi terbarukan secara lebih luas.



#### 4. Efisiensi Sistem Hybrid

Berdasarkan hasil pengujian dari panel surya dan turbin angin seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4, efisiensi sistem *hybrid* tenaga surya dan angin dihitung dengan membandingkan daya *output* dari panel surya dan turbin angin dengan daya input yang diterima dari sumber energi masing-masing.

Pada panel surya, data menunjukkan bahwa intensitas cahaya secara bertahap meningkat dari pagi hingga tengah hari, mencapai puncaknya pada pukul 13:30 dengan intensitas  $1252 \text{ W/m}^2$  dan daya *output* yang dihasilkan mencapai 17,28 V dan 0,72 A. Dengan menggunakan rumus efisiensi pada persamaan (3), efisiensi sistem panel surya dapat dihitung berdasarkan total daya yang dihasilkan selama rentang waktu tersebut. Secara umum, efisiensi panel surya cenderung meningkat seiring peningkatan intensitas cahaya, menunjukkan bahwa performa sistem sangat bergantung pada kondisi sinar matahari yang optimal.

Di sisi lain, pengujian turbin angin pada Gambar 4 menunjukkan bahwa kecepatan angin bervariasi antara 2,4 m/s hingga 4,9 m/s, dengan daya *output* maksimum yang dihasilkan pada pukul 15:45 ketika kecepatan angin mencapai 4,9 m/s. Walaupun daya *output* dari turbin angin relatif lebih kecil dibandingkan panel surya, efisiensi turbin masih mengikuti pola umum di mana peningkatan kecepatan angin menghasilkan peningkatan daya, sesuai dengan hukum kubik daya angin.

Hasil penelitian ini mendukung temuan-temuan sebelumnya terkait keuntungan dari penggunaan sistem *hybrid* energi terbarukan. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kombinasi sumber energi surya dan angin mampu mengatasi masalah ketidakstabilan masing-masing sumber, terutama di lokasi dengan variasi cuaca yang signifikan. Hasil ini juga memberikan kontribusi tambahan dalam pengembangan teknologi energi *hybrid* skala kecil, khususnya dalam aplikasi di daerah terpencil atau dengan keterbatasan infrastruktur energi.

Di sisi lain, masih terdapat beberapa tantangan, terutama terkait dengan efisiensi komponen individual seperti turbin angin yang memerlukan kecepatan angin yang tinggi untuk kinerja optimal. Penelitian lanjutan diperlukan

untuk meningkatkan efisiensi sistem *hybrid* ini, baik melalui optimasi desain turbin maupun penggunaan teknologi penyimpanan energi yang lebih baik.

#### PENUTUP

##### Simpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa prototipe pembangkit listrik *hybrid* yang menggabungkan panel surya dan turbin angin dapat mencapai daya *output* maksimum sebesar 16,78 W dalam kondisi optimal. Dalam perbandingan, daya *output* panel surya secara terpisah mencapai 13,5 W, sedangkan turbin angin secara terpisah mencapai 0,046 kW. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem *hybrid* ini menghasilkan daya *output* yang lebih stabil, dengan fluktuasi antara 11 W hingga 13,5 W, yang mengatasi kelemahan masing-masing sumber energi dan meningkatkan efisiensi pasokan energi di lokasi dengan variabilitas cuaca tinggi.

Temuan ini menegaskan bahwa integrasi panel surya dan turbin angin dalam satu sistem *hybrid* secara signifikan meningkatkan efisiensi dan keandalan pasokan energi listrik, terutama pada skala kecil. Sistem ini tidak hanya mengurangi kekurangan dari masing-masing sumber energi tetapi juga meningkatkan daya *output* keseluruhan. Model *hybrid* ini menawarkan solusi potensial untuk mengatasi masalah kelangkaan energi di daerah terpencil dan memberikan dasar yang kuat untuk pengembangan teknologi energi terbarukan yang lebih efisien dan skalabel di masa depan.

##### Saran

Berdasarkan hasil penelitian ini, beberapa langkah konkret dapat diambil untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem pembangkit listrik tenaga surya dan angin. Pertama, disarankan untuk melakukan analisis lokasi yang lebih mendetail guna memilih area dengan paparan sinar matahari optimal dan kecepatan angin yang konsisten. Penelitian lebih lanjut dapat mengevaluasi metode penempatan yang terbaik untuk kedua sumber energi ini guna memaksimalkan *output* daya.

Selain itu, pengembangan dan penerapan sistem pemantauan berbasis teknologi canggih misalnya *Internet of Things* (IoT), harus

diprioritaskan. Sistem ini dapat mencakup sensor untuk melakukan *monitoring* secara *real-time* dan pengembangan perangkat lunak analitik untuk deteksi dini kendala di lapangan serta optimasi perawatan. Dengan ini diharapkan bahwa efisiensi dan keandalan pembangkit listrik tenaga surya dan angin dapat ditingkatkan secara signifikan sehingga teknologi ini dapat lebih dioptimalkan untuk aplikasi nyata di masa mendatang.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih pada Direktorat Akademik Pendidikan Tinggi Vokasi, Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi yang telah mendanai penelitian ini dengan Surat Keputusan Nomor 17/D4/O/2024 dan Perjanjian / Kontrak Nomor 079/PL38/TU-P3M/III/2024.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Afidah, Z., Yushardi, Y., & Sudarti, S. (2023). Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu dengan Turbin Angin Sumbu Vertikal di Kecamatan Sangkapura Kabupaten Gresik. *Jurnal Engine: Energi, Manufaktur Dan Material*, 7(1), 8–14. <https://dataonline.bmkg.go.id>.
- Annam, C. (2022). *Sistem Kontrol dan Monitoring Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid Turbin Angin dan Modul Surya*. Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Aziz, H., Pawenary, & Sitorus, M. (2019). Analisis Hasil Uji Pembangkit Listrik Hybrid Turbin Angin 1kWh Dan Panel Surya 100 WP. *Jurnal Ilmiah SUTET*, 9(1), 16–25. <https://doi.org/10.33322/sutet.v9i1.384>
- Custer, J., & Lianda, J. (2018). Rancang Bangun Pembangkit Listrik Hybrid Angin Dan Surya di Pulau Bengkalis. *Jurnal PROTek*, 5(2), 67–71.
- Elgi Octavianto, D., Fauzi Rahman, A., Firdaus Adji Arrazaq, A., Sondia, F., Ulfiana, A., Ekayuliana, A., Studi Teknik Konversi Energi, P., Teknik Mesin, J., Negeri Jakarta, P., & A Siwabessy, J. G. (2021). Analisa Perbandingan Daya Keluaran Solar Panel Dengan Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid ( Surya-Angin). In *Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta*. <http://prosiding.pnj.ac.id>
- Ganguly, P., Kalam, A., & Zayegh, A. (2018). 12 - Solar–wind hybrid renewable energy system: current status of research on configurations, control, and sizing methodologies. In A. H. Fathima, N. Prabakaran, K. Palanisamy, A. Kalam, S. Mekhilef, & Jackson. J. Justo (Eds.), *Hybrid-Renewable Energy Systems in Microgrids* (pp. 219–248). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102493-5.00012-1>
- Hassan, Q., Algburi, S., Sameen, A. Z., Salman, H. M., & Jaszczur, M. (2023). A review of hybrid renewable energy systems: Solar and wind-powered solutions: Challenges, opportunities, and policy implications. *Results in Engineering*, 20, 101621. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101621>
- Ketut Parti, I., Noman Mudiana, I., & Wayan Rasmini, N. (2020). Sistem Hybrid Pembangkit Listrik Tenaga Surya dan Tenaga Angin. *Seminar Nasional Terapan Riset Inovatif (SENTRINOV)*.
- Kiswanto, H. (2022). *Fisika Lingkungan: Memahami Alam Dengan Fisika*. Syiah Kuala University Press. [https://books.google.co.id/books?id=J\\_dxEAAQBAJ](https://books.google.co.id/books?id=J_dxEAAQBAJ)
- Koay, Y. Y., Tan, J. D., Koh, S. P., Chong, K. H., Tiong, S. K., & Ekanayake, J. (2020). Optimization of wind energy conversion systems – an artificial intelligent approach. *International Journal of Power Electronics*

- and Drive Systems*, 11(2), 1040–1046.  
<https://doi.org/10.11591/IJPEDS.V11.I2.P1040-1046>
- Maulana Ariamuda, V., & Ansori, A. (2020). Rancang Bangun Sistem Pembangkit Listrik Hybrid Solar Cell dan Turbin Angin Vertikal Model Darrieus Tipe H di Pesisir Pantai Tamban Kabupaten Malang. *JTM: Jurnal Teknik Mesin*, 8(1), 111–118.
- Nawafilah, N. Q., Agustapraja, H. R., & Purnomo, N. (2022). Penerapan Sistem Hybrid Pembangkit Listrik Tenaga Angin Dan Tenaga Surya Di Desa Pataan, Kec.Sambeng, Kab.Lamongan. *Jurnal Mandala Pengabdian Masyarakat*, 3(2), 174–180.  
<https://doi.org/10.35311/jmpm.v3i2.91>
- Soedibyo, S., Delfianti, R., Pamuji, F. A., & Ashari, M. (2020). Kontrol Tegangan pada Sistem Hybrid Panel Surya-Turbin Angin Menggunakan Manajemen Penyimpanan Baterai. *Jurnal Rekayasa Elektrika*, 16(3).  
<https://doi.org/10.17529/jre.v16i3.16010>
- Sukandi, A., Ridwan, E., Andini, D., Naufal Gifari, H., Irawan, I., & Fikri Iriansyah, M. (2020). Rancang Bangun Kontroler Pembangkit Listrik Hybrid Angin Dan Surya Berbasis Arduino. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin*, 62–72. <http://jurnal.pnj.ac.id>
- Suprajitno, A., Utomo, S. B., Nugroho, D. D., & Elektro, J. T. (2022). Optimasi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid Energi Angin dan Surya Melalui Sistem Battery Charging Switching. *Cyclotron: Jurnal Teknik Elektro*, 5(1), 14–20.
- Wen, Q., He, X., Lu, Z., Streiter, R., & Otto, T. (2021). A comprehensive review of miniaturized wind energy harvesters. *Nano Materials Science*, 3(2), 170–185.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.noms.2021.04.001>
- Zambak, M. F., Surianto, S., & Faisal, A. (2022). Kajian Efektifitas Daya Pada Pembangkit Listrik Tenaga Angin Dengan Pembangkit Listrik Tenaga Surya. *Jurnal Teknologi Elektro*, 13(3), 155.  
<https://doi.org/10.22441/jte.2022.v13i3.005>