

Hybrid Matahari-Angin Skala Laboratorium: Analisis Performa dan Korelasi Linier dengan Variabel Cuaca

Dhea Intan Patya^{1*}, Karina Chintya Lestari¹, Ade Suhara², Amallia Amallia², Agus Supriyanto¹, Rizki Aulia Nanda¹, Abbiyu Insa Shabir¹, Rafli Septian¹, Dika Candra¹, Muhammad Faiz Ramadhan¹ dan Dimas Arif Murtadho¹

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Buana Perjuangan Karawang, Karawang, Indonesia

²Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Buana Perjuangan Karawang, Karawang, Indonesia

*E-Mail korespondensi: dhea.intan@ubpkarawang.ac.id

Abstract: *This study aims to develop and analyze the performance of a small-scale hybrid power generation prototype based on solar and wind energy designed for household applications. The system integrates solar panels and a wind turbine through a charge controller connected to a single battery storage unit, enabling continuous electricity supply under varying weather conditions. The experimental tests were conducted by measuring current, voltage, solar irradiance intensity, and wind speed throughout the day. The results show that the solar system achieved a maximum power output of 20.32 W at 12:00 PM with an irradiance intensity of 776 W/m², while the wind turbine generated a maximum power of 3.41 W at a wind speed of 2.6 m/s. The energy conversion efficiency of the solar panel ranged between 2.40–2.62%, whereas the wind turbine efficiency remained relatively stable at 30–34%. Linear regression analysis revealed a very strong correlation between irradiance intensity and power output ($R^2 = 0.9867$; $r = 0.9933$), as well as between wind speed and power output ($R^2 = 0.9883$; $r = 0.9941$). These results indicate that both systems exhibit consistent and responsive performance toward environmental changes. The developed hybrid system effectively utilizes the complementary advantages of each energy source, resulting in a more stable and sustainable power supply. This study highlights the potential implementation of a solar–wind hybrid system to support autonomous electrification in regions with high solar radiation and moderate wind speeds.*

Keywords: *Linear regression; energy efficiency; renewable energy; hybrid solar-wind.*

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan menganalisis performa prototipe pembangkit listrik hybrid berbasis energi matahari dan angin skala kecil yang dirancang untuk aplikasi rumah tangga. Sistem ini mengintegrasikan panel surya dan turbin angin melalui pengatur pengisian daya menuju satu sistem penyimpanan baterai, sehingga mampu mempertahankan kontinuitas suplai energi listrik pada kondisi cuaca bervariasi. Pengujian dilakukan secara eksperimental dengan mengukur arus, tegangan, intensitas iradiasi, dan kecepatan angin selama periode harian. Hasil penelitian menunjukkan bahwa daya maksimum sistem surya mencapai 20,32 W pada pukul 12.00 dengan intensitas iradiasi 776 W/m², sedangkan turbin angin menghasilkan daya maksimum 3,41 W pada kecepatan angin 2,6 m/s. Efisiensi konversi energi panel surya berkisar antara 2,40–2,62%, sedangkan efisiensi turbin angin relatif stabil pada 30–34%. Analisis regresi linear menunjukkan hubungan yang sangat kuat antara intensitas iradiasi dan daya keluaran ($R^2 = 0,9867$; $r = 0,9933$) serta antara kecepatan angin dan daya keluaran ($R^2 = 0,9883$; $r = 0,9941$). Hasil ini mengindikasikan bahwa kedua sistem memiliki performa yang konsisten dan responsif terhadap perubahan kondisi lingkungan. Sistem hybrid yang dikembangkan mampu memanfaatkan keunggulan komplementer dari masing-masing sumber energi, menghasilkan suplai daya yang lebih stabil dan berkelanjutan. Penelitian ini menegaskan potensi implementasi sistem hybrid surya–angin untuk mendukung elektrifikasi mandiri di daerah dengan intensitas radiasi tinggi dan kecepatan angin sedang.

Kata kunci : Regresi linear; efisiensi energi; energi terbarukan; hybrid matahari-angin.

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk, perkembangan teknologi, serta meningkatnya aktivitas industri dan transportasi [1]-[3]. Namun, ketergantungan terhadap sumber energi fosil masih sangat tinggi, padahal ketersediaannya semakin menipis dan penggunaannya menimbulkan dampak negatif berupa emisi gas rumah kaca yang berkontribusi terhadap perubahan iklim [4]. Berdasarkan data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM),

konsumsi listrik nasional rata-rata sekitar 4,9% per tahun, sedangkan cadangan energi fosil terus menurun [5]. Kondisi ini mendorong perlunya pengembangan sumber energi alternatif yang bersifat terbarukan, ramah lingkungan, dan dapat dimanfaatkan secara berkelanjutan. Beberapa jenis energi terbarukan yang banyak dikembangkan diantaranya energi air [6], panas bumi [7], biomassa [8], matahari [9], dan angin [10]. Namun, dari berbagai jenis energi terbarukan yang tersedia, energi yang paling potensial untuk dikembangkan adalah energi matahari dan angin. Indonesia sebagai negara tropis mendapatkan paparan sinar matahari hampir sepanjang tahun dengan intensitas yang tinggi, sehingga energi matahari dapat dimanfaatkan secara optimal sebagai sumber listrik [11]. Di sisi lain, pada wilayah pesisir, dataran tinggi, maupun daerah terbuka, kecepatan angin relatif stabil sehingga memungkinkan pemanfaatan energi angin melalui turbin [12]. Oleh karena itu, energi matahari dan energi angin telah banyak dikembangkan oleh beberapa peneliti, namun masing-masing sumber energi tersebut masih memiliki keterbatasan yang perlu diatasi untuk memperoleh ketersediaan listrik yang stabil sepanjang waktu.

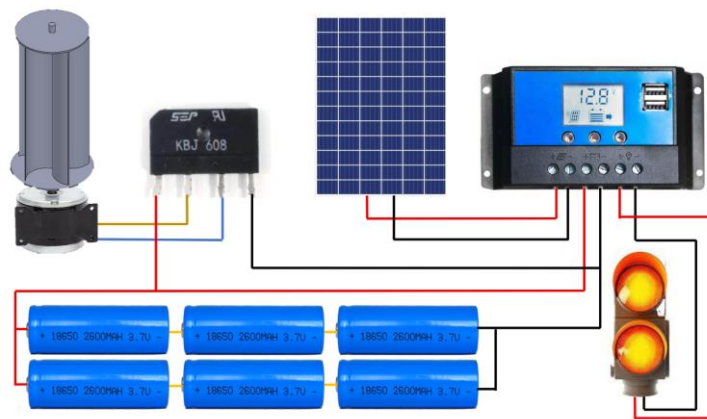
Beberapa penelitian terkait energi terbarukan yang memanfaatkan energi matahari dan energi angin pernah dilakukan oleh beberapa peneliti. Arif dan Suaedi (2021), memanfaatkan perangkat lunak RETScreen untuk mengevaluasi potensi energi matahari di Palopo. Hasilnya menunjukkan bahwa radiasi matahari rata-rata mencapai $4,95 \text{ kWh/m}^2$ per hari, dan sistem PLTS 10 kW on-grid dapat menghasilkan listrik rata-rata sekitar 13,347 MWh per bulan dengan faktor kapasitas 15,27% [13]. Penelitian serupa dilakukan oleh Sihombing (2023) dengan mengevaluasi penggunaan sistem PLTS off-grid untuk rumah tinggal. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa perumahan rata-rata membutuhkan sekitar 2,069 kWh per hari [14]. Namun begitu, kekurangan energi matahari salah satunya masih bergantung pada cuaca dan waktu, sehingga listrik dapat dihasilkan saat terdapat sinar matahari. Kekurangan tersebut dapat diselesaikan oleh energi angin karena keunggulannya, yaitu mampu menghasilkan listrik secara kontinu baik siang maupun malam hari, tergantung pada kecepatan angin [15]. Sebagai contoh, potensi energi angin pernah diteliti oleh Mukhrizal dan Mulkan (2021) dan mengklaim bahwa potensi daya yang dihasilkan oleh energi angin yaitu sekitar 108,5 W dengan turbin baling-baling berdiameter 3 m. Namun begitu, penelitiannya menginformasikan bahwa kecepatan angin sekitar 3 m/s masih terbatas dan belum layak untuk kebutuhan energi dalam skala yang lebih besar [16]. Berdasarkan hal tersebut, Mawardi et al (2021), menyarankan pengembangan sistem hybrid matahari-angin, di mana turbin angin dapat berperan sebagai sumber cadangan ketika intensitas matahari rendah [17]. Selain itu, sistem hybrid dapat mengurangi ketergantungan pada jaringan listrik utama, sehingga sangat sesuai untuk daerah terpencil atau lokasi yang sulit dijangkau PLN. Keunggulan lainnya adalah efisiensi pemanfaatan energi terbarukan, karena energi matahari dan angin digunakan secara optimal sesuai kondisi lingkungan. Dengan penerapan yang tepat, sistem hybrid ini juga berpotensi mengurangi emisi karbon dan mendukung penggunaan energi yang ramah lingkungan secara lebih luas [18].

Berdasarkan uraian tersebut, dalam penelitian ini dilakukan pengembangan pembangkit listrik hybrid berbasis matahari-angin skala prototipe. Pembangkit ini dirancang untuk menjadi sumber energi listrik mandiri yang dapat digunakan untuk berbagai aplikasi, khususnya di lokasi yang tidak memiliki akses jaringan listrik. Pengembangan prototipe ini diharapkan mampu menggabungkan keunggulan energi matahari dan angin, sehingga ketersediaan listrik menjadi lebih stabil dan berkelanjutan. Selanjutnya, untuk mengoptimalkan kinerja pembangkit listrik yang dikembangkan, dalam penelitian ini dimunculkan kebaruan berupa pendekatan statistik berupa regresi linear untuk mengetahui pengaruh kondisi cuaca, pendekatan yang masih sangat jarang diterapkan dalam mengevaluasi sistem hybrid skala prototipe. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menawarkan kontribusi teknis, tetapi juga metodologis melalui penerapan analisis statistik yang lebih komprehensif.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini bersifat eksperimental dengan pendekatan kuantitatif, yaitu mengembangkan dan menguji prototipe pembangkit listrik hybrid matahari-angin skala kecil. Prototipe diuji pada kondisi lapangan dengan variasi cuaca untuk mengevaluasi performa keluaran energi. Langkah pertama yang

dilakukan yaitu merancang rangkaian prototipe pembangkit listrik hybrid matahari-angin yang menggabungkan kedua sumber energi ke dalam satu sistem penyimpanan baterai, serta menentukan konfigurasi dan kapasitas komponen agar sesuai dengan kebutuhan. **Gambar 1** merupakan visualisasi dari rancangan rangkaian yang dibuat dalam penelitian ini. Energi listrik dari panel surya diatur melalui kontrol pengisian, sedangkan energi dari turbin angin disalurkan melalui modul pengatur sebelum masuk ke baterai. Kedua sumber energi tersebut kemudian disimpan dalam baterai untuk menjaga ketersediaan daya. Energi yang tersimpan selanjutnya digunakan untuk menyalakan lampu indikator sebagai beban. Dengan demikian, rancangan prototipe pembangkit listrik ini menunjukkan penerapan sederhana sistem hybrid energi terbarukan untuk kebutuhan listrik skala kecil.



Gambar 1. Rancangan rangkaian pembangkit listrik hybrid matahari-angin.

Pembangkit listrik hybrid matahari-angin yang dibuat dalam penelitian ini dikenai uji performa melalui evaluasi nilai efisiensi yang dihasilkan. Data yang diperoleh merupakan arus (A) dan tegangan (V) yang dihasilkan oleh sistem. Selanjutnya, data tersebut diproses sebagai nilai daya yang dibangkitkan oleh sistem. Nilai daya tersebut diperoleh dari perhitungan menggunakan Persamaan 1 [19], berlaku untuk sistem pembangkit listrik berbasis energi matahari maupun energi angin.

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

dengan P merupakan daya yang dibangkitkan oleh sistem, dinyatakan dengan watt (W), sedangkan I dan V masing-masing merujuk pada nilai arus dan tegangan yang dibangkitkan oleh sistem, masing-masing dinyatakan dalam ampere (A) dan volt (V).

Selanjutnya, perhitungan nilai efisiensi dari sistem pembangkit listrik hybrid matahari-angin yang dirancang dilakukan dengan menggunakan persamaan 2 [20]. Nilai efisiensi (η) dinyatakan dalam persen (%), dengan P_{out} merupakan daya listrik keluaran yang dihasilkan oleh sistem pembangkit listrik, dinyatakan dalam watt (W), dan P_{in} merupakan daya masukan yang berasal dari sumber pembangkit listrik, yaitu matahari dan angin, dinyatakan dalam watt (W).

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2)$$

Adapun nilai P_{in} untuk sistem pembangkit listrik hybrid matahari-angin diperoleh dari perhitungan menggunakan Persamaan 3 berikut ini:

$$P_{in} = P_{matahari} + P_{angin} \quad (3)$$

dengan P_{matahari} merupakan daya masukan pada sistem pembangkit listrik berbasis matahari dan P_{angin} merupakan daya masukan pada sistem pembangkit listrik berbasis angin, keduanya dinyatakan dalam watt (W). Nilai P_{matahari} dan P_{angin} dapat diperoleh menggunakan Persamaan 4 dan 5 berikut ini [21]-[22]:

$$P_{\text{matahari}} = G \times A \quad (4)$$

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

dengan G merupakan intensitas radiasi matahari, dinyatakan dalam W/m^2 , sedangkan A merupakan luas permukaan panel, dinyatakan dalam m^2 . Selanjutnya, ρ merupakan nilai massa jenis udara ($1,29 \text{ kg/m}^3$), A merupakan luasan baling-baling dari pembangkit listrik berbasis angin, dinyatakan dalam m^3 , dan v merupakan kecepatan angin, dinyatakan dalam m/s .

Setelah nilai efisiensi diperoleh, evaluasi pengaruh berbagai faktor terhadap kinerja pembangkit listrik dilakukan menggunakan analisis regresi linear. Regresi linear memberikan model prediktif yang lebih informatif dan jarang digunakan dalam studi performa prototipe pembangkit listrik hybrid. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya melihat perbedaan efisiensi antar sistem, tetapi juga menghasilkan pemahaman kuantitatif mengenai faktor-faktor yang paling berpengaruh, sehingga meningkatkan nilai kebaruan penelitian.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Prototipe pembangkit listrik hybrid matahari-angin yang dikembangkan pada penelitian ini berhasil beroperasi sesuai rancangan. Ilustrasi dari prototipe yang dibuat ditunjukkan oleh Gambar 2. Kedua sumber energi, yaitu panel surya dan turbin angin, terintegrasi melalui sistem pengatur pengisian menuju satu sistem penyimpanan baterai. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menggabungkan kedua sumber energi secara efektif dan menjaga kontinuitas suplai daya meskipun salah satu sumber mengalami penurunan output. Selama pengamatan lapangan, aliran energi dari panel surya dominan pada kondisi cerah, sedangkan kontribusi energi angin meningkat pada kondisi berangin atau mendung. Pola tersebut memperlihatkan bahwa rancangan sistem hybrid telah berfungsi sesuai prinsip kerja yang diharapkan, yaitu menghasilkan suplai listrik yang lebih stabil dibanding sistem tunggal.



Komponen
Panel surya / solar cell 3,4~5V 1.1W
Generator / Dinamo DC model 300 output 3,4~5V 1A
Module Charger TP4056
Battery 18650 3,7V 9900 mAH
Small swtich KCD1-101 21mm x 15mm 2kaki max 6A 250V
High power LED HPL 3wat 3,4~5V

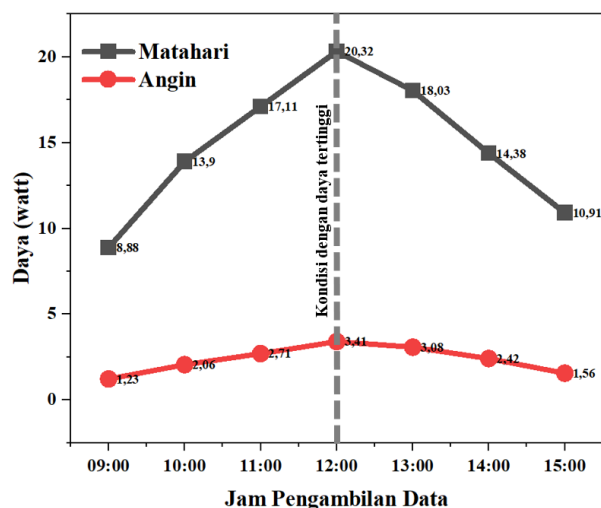
Gambar 2. Ilustrasi prototipe pembangkit listrik hybrid matahari-angin.

Berdasarkan data pengujian yang ditampilkan pada Tabel 2 dan Gambar 3, terlihat bahwa daya yang dihasilkan oleh pembangkit listrik berbasis matahari menunjukkan pola kenaikan seiring peningkatan intensitas iradiasi hingga mencapai puncak pada pukul 12.00 dengan nilai 20,32 watt, kemudian mengalami penurunan hingga pukul 15.00 menjadi 10,91 watt. Pola ini sesuai dengan karakteristik harian intensitas radiasi matahari yang umumnya mencapai maksimum saat posisi matahari berada di zenit [23]. Hubungan linier antara iradiasi dan daya keluaran menegaskan bahwa efisiensi sel surya sangat dipengaruhi oleh intensitas cahaya yang diterima. Selain itu, faktor suhu panel yang meningkat pada tengah hari dapat menyebabkan sedikit penurunan efisiensi meskipun iradiasi masih tinggi.

Sementara itu, pembangkit listrik berbasis angin menunjukkan fluktuasi daya yang relatif kecil, dengan daya tertinggi sebesar 3,41 watt pada pukul 12.00 ketika kecepatan angin mencapai 2,6 m/s. Pola ini menggambarkan bahwa konversi energi pada turbin angin skala kecil sangat bergantung pada kecepatan angin, yang bersifat tidak stabil secara temporal [24]. Daya angin meningkat seiring kenaikan kecepatan angin. Namun, nilai daya yang relatif rendah menunjukkan bahwa pada kondisi kecepatan angin di bawah 3 m/s, efisiensi turbin masih terbatas [25]. Secara keseluruhan, kombinasi puncak daya pada kedua sistem terjadi pada pukul 12.00, menandakan waktu paling optimal untuk sistem hibrid surya-angin, yang dapat meningkatkan kontinuitas suplai energi terbarukan.

Tabel 2. Data arus dan tegangan hasil pengujian pada waktu tertentu.

Waktu	Pembangkit Listrik Berbasis Matahari			Pembangkit Listrik Berbasis Angin		
	Iradiasi (W/m^2)	Arus (A)	Tegangan (V)	Kecepatan (m/s)	Arus (A)	Tegangan (V)
09:00	360	0.71	12.5	1.8	0.11	11.20
10:00	560	1.13	12.3	2.2	0.16	12.88
11:00	704	1.18	14.5	2.4	0.22	12.32
12:00	776	1.27	16.0	2.6	0.29	11.76
13:00	720	1.21	14.9	2.5	0.22	14.00
14:00	600	1.16	12.4	2.3	0.18	13.44
15:00	440	0.88	12.4	2.0	0.13	12.00



Gambar 3. Daya yang dihasilkan oleh masing-masing pembangkit pada waktu tertentu.

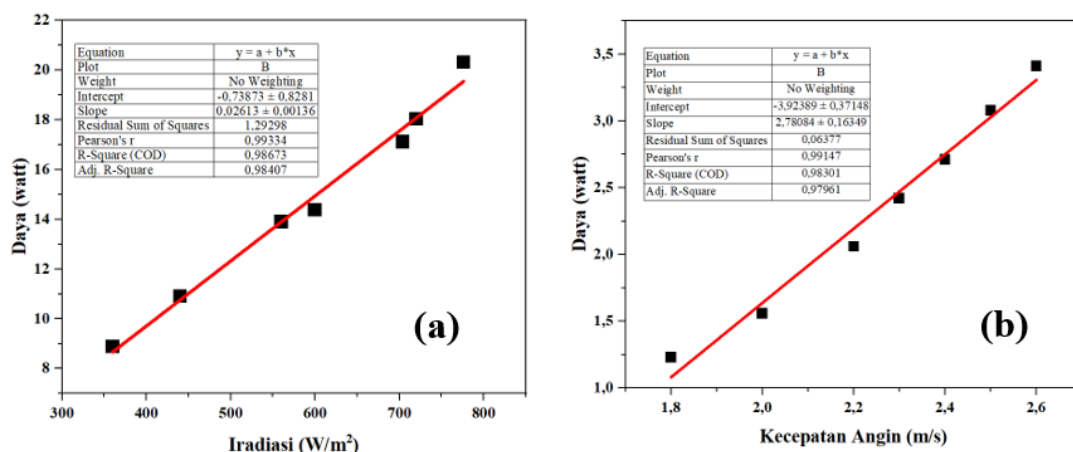
Hasil pengujian menunjukkan bahwa efisiensi konversi energi pada pembangkit listrik berbasis matahari mengalami variasi seiring perubahan intensitas iradiasi harian. Nilai efisiensi berkisar antara 2,40–2,62%, dengan puncak terjadi pada pukul 12.00 saat iradiasi mencapai 776 W/m^2 dan daya keluaran mencapai 20,32 W. Pola ini memperlihatkan bahwa efisiensi meningkat seiring kenaikan intensitas radiasi hingga kondisi optimum, kemudian menurun perlahan meskipun iradiasi masih relatif tinggi. Penurunan ini disebabkan oleh efek peningkatan suhu panel yang menurunkan tegangan output akibat perubahan band gap semikonduktor silikon. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian Fernando [26] yang melaporkan bahwa efisiensi panel surya tanpa sistem pendinginan di daerah tropis bergantung pada kondisi penyinaran dan orientasi modul. Dengan demikian, hasil penelitian ini mengonfirmasi karakteristik umum sistem fotovoltaik skala kecil yang memiliki efisiensi relatif rendah namun cukup stabil pada kisaran tengah hari.

Sementara itu, efisiensi konversi energi pada pembangkit listrik berbasis angin relatif lebih stabil, berkisar 30–34%, dengan nilai tertinggi pada pukul 09.00 sebesar 34,4% dan rata-rata harian sekitar 32%. Meskipun daya keluaran absolutnya rendah (maksimum 3,41 W), kestabilan efisiensi menunjukkan bahwa sistem turbin angin mini ini mampu memanfaatkan energi kinetik udara secara konsisten meskipun kecepatan angin hanya berkisar 1,8–2,6 m/s. Karakteristik ini menunjukkan bahwa turbin bekerja dalam zona cut-in namun tetap menghasilkan daya listrik berkat torsi awal yang kecil.

Dibandingkan penelitian terdahulu, hasil studi ini menunjukkan bahwa sistem hibrid surya–angin yang diuji memiliki potensi performa sinergis. Kondisi optimum kedua sistem terjadi secara bersamaan pada pukul 12.00, ketika daya total gabungan mencapai puncak ($\approx 23,73$ W). Hal ini menandakan peluang besar untuk penerapan sistem hybrid terbarukan yang mampu menjaga kontinuitas suplai energi listrik skala rumah tangga pada kondisi radiasi tinggi dan angin sedang. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memperkuat bukti empiris mengenai efisiensi rendah tetapi stabil pada sistem fotovoltaik tropis dan efisiensi tinggi namun fluktuatif pada sistem angin mikro, tetapi juga memperlihatkan kinerja komplementer kedua sumber energi, yang dapat dioptimalkan untuk aplikasi energi bersih berkelanjutan.

Selanjutnya, untuk mengetahui pengaruh dari masing-masing pembangkit, dilakukan analisis regresi linear seperti yang diilustrasikan pada Gambar 4. Hasil analisis regresi linear menunjukkan bahwa hubungan antara intensitas iradiasi dan daya keluaran panel surya bersifat sangat kuat dan signifikan secara statistik. Berdasarkan persamaan $P = -0,7387 + 0,02613I$ dengan nilai $R^2 = 0,9867$ dan koefisien korelasi $r = 0,9933$, diketahui bahwa sekitar 98,7% variasi daya dapat dijelaskan oleh perubahan iradiasi. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan iradiasi matahari secara langsung meningkatkan daya yang dihasilkan oleh panel surya. Nilai slope sebesar 0,02613 mengindikasikan bahwa setiap kenaikan 100 W/m² iradiasi dapat meningkatkan daya sekitar 2,61 W. Intercept negatif tidak memiliki makna fisik yang signifikan, melainkan hanya hasil perhitungan matematis akibat keterbatasan model linier pada rentang data pengamatan.

Sementara itu, hubungan antara kecepatan angin dan daya keluaran turbin angin juga menunjukkan korelasi yang sangat tinggi, dengan persamaan $P = -3,9239 + 2,7808v$, nilai $R^2 = 0,9883$, dan $r = 0,9941$. Hasil ini menunjukkan bahwa sekitar 98,8% variasi daya dapat dijelaskan oleh perubahan kecepatan angin. Slope sebesar 2,7808 menandakan bahwa setiap kenaikan kecepatan angin sebesar 0,1 m/s mampu meningkatkan daya keluaran sekitar 0,278 W. Walaupun secara teori daya angin berbanding lurus dengan pangkat tiga dari kecepatan angin, pendekatan linear masih relevan digunakan dalam rentang kecepatan 1,8–2,6 m/s karena perubahan relatif kecil dan pola hubungan yang hampir linier.



Gambar 4. Hubungan antara daya keluaran dengan kondisi lingkungan: (a) pembangkit listrik berbasis matahari, serta (b) sistem pembangkit listrik berbasis angin.

Secara keseluruhan, kedua model regresi tersebut memperlihatkan kecocokan yang sangat tinggi dengan nilai residual yang kecil, menandakan bahwa sistem beroperasi secara konsisten terhadap

variabel cuaca utama. Model regresi ini dapat digunakan untuk memprediksi daya keluaran baik dari sistem tunggal maupun sistem hybrid dengan tingkat keandalan tinggi dalam rentang pengujian. Nilai koefisien determinasi yang tinggi memperkuat kesimpulan bahwa iradiasi dan kecepatan angin merupakan faktor dominan dalam menentukan performa sistem pembangkit energi terbarukan. Dengan demikian, integrasi panel surya dan turbin angin dalam sistem hybrid berpotensi menghasilkan daya yang lebih stabil karena masing-masing komponen menunjukkan sensitivitas tinggi terhadap variabel lingkungan yang berbeda.

IV. KESIMPULAN

Prototipe sistem pembangkit listrik hybrid berbasis matahari–angin yang dikembangkan berhasil beroperasi sesuai dengan rancangan dan mampu menggabungkan dua sumber energi terbarukan secara efektif. Hasil pengujian menunjukkan bahwa panel surya memberikan kontribusi utama pada kondisi cerah dengan daya puncak 20,32 W, sedangkan turbin angin berperan penting pada kondisi mendung atau berangin dengan daya maksimum 3,41 W. Efisiensi konversi energi panel surya berkisar 2,40–2,62%, sedangkan turbin angin mencapai 30–34%, menandakan performa yang stabil pada kecepatan angin rendah. Analisis regresi linear menghasilkan nilai R^2 di atas 0,98 untuk kedua sistem, menunjukkan hubungan yang sangat kuat antara daya keluaran dengan variabel lingkungan utama, yaitu intensitas iradiasi dan kecepatan angin. Integrasi kedua sistem memungkinkan suplai energi yang lebih kontinu dan stabil dibanding sistem tunggal. Dengan demikian, sistem hybrid surya–angin ini berpotensi menjadi solusi energi bersih dan berkelanjutan untuk kebutuhan listrik rumah tangga di wilayah tropis yang memiliki fluktuasi cuaca harian.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Universitas Buana Perjuangan Karawang atas dukungan dan fasilitas yang telah diberikan sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Puspita, D., & Nugrahe, N. (2024). Energi Bersih Terjangkau Dalam Mewujudkan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (Sdgs). *Jurnal Sosial Dan Sains (Sosains)*, 4(3).
- [2] Jamilatun, S., Rhomadoni, F. R., Astuti, E., Wardhana, B. S., Idris, M., & Auliasari, P. A. (2025). Peran Manajemen Energi Terhadap Efisiensi Konsumsi Listrik Rumah Tangga Di Indonesia. *Prosiding Semnastek*.
- [3] Dwisari, V., Sudarti, S., & Yushardi, Y. (2023). Pemanfaatan Energi Matahari: Masa Depan Energi Terbarukan. *Optika: Jurnal Pendidikan Fisika*, 7(2), 376-384.
- [4] Hanifah, P. R., & Purbadarmaja, I. P. (2025). Analisis Pengaruh Konsumsi Listrik Dan Konsumsi Bahan Bakar Fosil Terhadap Eksternalitas Negatif Emisi Gas Rumah Kaca Di Indonesia. *Jurnal Visi Manajemen*, 11(2), 298-314.
- [5] Ruslan, R. (2021). Status Pemanfaatan Energi Baru Terbarukan Dan Opsi Nuklir Dalam Bauran Energi Nasional. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 23(1), 39-49.
- [6] Anwar, S., Tamam, M. T., & Kurniawan, I. H. (2021). Rancang Bangun Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Air Menggunakan Konsep Hydrocat. *Resistor (Elektronika Kendali Telekomunikasi Tenaga Listrik Komputer)*, 4(1), 7-10.
- [7] Ewar, H. A., Nasar, A., & Ika, Y. E. (2023). Pengembangan Alat Peraga Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (Pltp) Sebagai Media Pembelajaran Fisika Pada Materi Sumber Energi Terbarukan. *Optika: Jurnal Pendidikan Fisika*, 7(1), 128-139.
- [8] Haqiqi, A. Z. (2023). Penggunaan Biomassa Sebagai Energi Alternatif Pembangkit Listrik Di Wilayah Pedesaan. *Journal Of Optimization System And Ergonomy Implementation*, 1(1), 42-51.

- [9] Pasaribu, C., Tharo, Z., & Tarigan, A. D. (2021). Analisa Pengaruh Pendinginan Permukaan Panel Surya Terhadap Daya Keluaran Pada Pembangkit Listrik Tenaga Matahari. *Fakultas Sains Dan Teknologi Universitas Pembangunan Panca Budo*, 4(1), 88-100.
- [10] Ivannuri, F., Nugraha, A. T., & Subiyanto, L. (2022). Prototype Turbin Ventilator Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Angin. *Journal Of Computer Electronic And Telecommunication*, 3(2).
- [11] Niwanda, A., Kardiana, E., Arif, M., Rahmadani, P., Saufi, R. A., & Manik, S. M. (2025). Analisis Potensi Pemanfaatan Energi Matahari Melalui Panel Surya Di Kota Medan. *Sosial: Jurnal Ilmiah Pendidikan Ips*, 3(3), 01-11.
- [12] Montolalu, S. C. M., Mawitjere, A. L., Handaru, D. V., & Pangkey, R. (2024). Review Jurnal: Efisiensi Penggunaan Pltb Pada Kondisi Struktur Geografis Indonesia. *Jurnal Elektrik*, 3(1), 23-37.
- [13] Arif, N., Suaedi, S., Rahmadi, M., & Siregar, F. M. (2020). Potensi Energi Surya sebagai Energi Listrik Alternatif berbasis RETScreen di Kota Palopo, Indonesia. *Dewantara Journal of Technology*, 1(1), 38-42.
- [14] Sihombing, G. (2023). Analisis Penggunaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (Plts) Secara Ekonomis Untuk Rumah Tinggal. *Jurnal Teknik Elektro dan Informatika*, 18(1), 96.
- [15] Widyanto, S. W., Wisnugroho, S., & Agus, M. (2018). Pemanfaatan Tenaga Angin Sebagai Pelapis Energi Surya pada Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid di Pulau Wangi-Wangi. *Prosiding Semnastek*.
- [16] Mukhrijal, T. Z., & Mulkan, A. (2021). Analisis Potensi Energi Angin Sebagai Sumber Energi Listrik Untuk Menggerakkan Pompa Air Di Areal Persawahan Desa Blang Krueng Kecamatan Baitussalam. *Jurnal Ilmiah Teknik Unida*, 2(1), 1-10.
- [17] Mawardi, M., Wiguna, M. K., Azis, F., & Mukhlisin, M. (2021). Teknologi Hybrid Energi angin dan Energi Matahari Sebagai Sumber Energi Listrik. *Joule (Journal of Electrical Engineering)*, 2(2), 100-105.
- [18] Syahputra, I., & Rahmat, M. (2024). Optimalisasi Penggunaan Energi Terbarukan dalam Sistem Pembangkit Listrik Hibrida untuk Komunitas Pedesaan. *Jurnal Kolaborasi Sains Dan Ilmu Terapan*, 3(1), 17-20.
- [19] Sutrisno, S., Witjahjo, H., & Saputra, M. F. (2025). Perancangan Tenaga Air Tenaga Surya. *INFOTEX: Jurnal Ilmiah Bidang Ilmu Teknik*, 3(2), 126-135.
- [20] Syafari, M. M., Ulhakim, M. T., & Sukarman, S. (2024). Performance Analysis of a Laboratory-Scale Wind Turbine: Blade Angle and Its Effect on Efficiency. *Jurnal Teknik Mesin Mechanical Xplore*, 5(2), 113-123.
- [21] Maulana, Q., Sudrajat, M. H., Saputra, R. R., Panutun, E. B., & Setiyono, J. (2025). Unjuk Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid Panel Surya dan Turbin Angin untuk Pembangkit Daya pada Pompa Kolam Budidaya Ikan Mas. *Jurnal Inovasi Ilmu Pengetahuan Dan Teknologi (JIPTEK)*, 6(2), 68-74.
- [22] Hidayanti, D., & Dewangga, G. (2019). Rancang bangun pembangkit hybrid tenaga angin dan surya dengan penggerak otomatis pada panel surya. *Eksergi*, 15(3), 93-101.
- [23] Naryanto, R. F., Delimayanti, M. K., & Baride, L. (2025). Studi karakteristik energi surya untuk pemanenan energi: studi awal di Kota Kendari. *PISTON: Jurnal Teknologi*, 10(1), 8-18.
- [24] Harianto, B., & Karjadi, M. (2024). Pengembangan Turbin Angin Skala Kecil untuk Energi Terbarukan untuk Daerah Terpencil. *Ranah Research: Journal of Multidisciplinary Research and Development*, 7(1), 468-476.
- [25] Adam, M., Harahap, P., & Nasution, M. R. (2019). Analisa pengaruh perubahan kecepatan angin pada pembangkit listrik tenaga angin (PLTA) terhadap daya yang dihasilkan generator DC.
- [26] Fernando, Y. (2021). *Studi Kinerja Panel Surya Tipe 180 WP Berdasarkan Air Cooling System Dan Perpindahan Panas Pada Permukaan Panel* (Doctoral dissertation, Universitas Islam Riau).