

Analysis of Excess Energy Production in Hybrid Vertical Axis Wind Turbine-Solar Cell di Jalan Tol Sayung Demak

INFORMASI ARTIKEL

NASKAH DITERIMA: 26 Oktober 2024

DIREVISI: 14 November 2024

DISETUJUI: 7 Desember 2024

*KORESPONDENSI PENULIS:

Email: nanangc332@gmail.com

DOI: 10.5281/zenodo.824398

Nanang Candra Kurniawan¹, Safrizal², Zaenal Arifin³

¹)Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Nahdlatul Ulama Jepara, Jawa Tengah, Indonesia.

²)Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Nahdlatul Ulama Jepara, Jawa Tengah, Indonesia.

³)Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Nahdlatul Ulama Jepara, Jawa Tengah, Indonesia.

Abstract

This study analyzes the excess production of electrical energy from a hybrid system combining a 500W vertical axis wind turbine and 2 x 250W solar panels implemented on the Den 14 Nanang Toll Road. The system is designed to meet the electricity needs of toll road infrastructure, particularly for lighting and traffic monitoring. Wind speed and solar radiation data were collected using NASA's LARD (Langley Atmospheric Research Data) from January to December 2023. The calculation method used involves linear interpolation on the wind turbine power curve and the calculation of solar panel output power based on panel area and hourly solar radiation.

The analysis results show that the hybrid system generates a total energy of 2662.93 Wh per day, while the lighting load requires 1680 Wh per day. Thus, there is an excess energy production of 982.93 Wh per day. This surplus energy can be stored in a 24V 90Ah LiFePO4 battery for use during periods of low energy production or at night. The excess energy production varies each month, with the highest peak occurring in February (46.296 kWh) and the lowest in April (15.793 kWh).

This hybrid system not only improves the reliability of the energy supply but also reduces dependence on conventional grid electricity. The study demonstrates that the hybrid system of vertical axis wind turbines and solar panels is an effective and sustainable solution for meeting energy needs in transportation infrastructure, particularly on toll roads. The results of this study are expected to serve as a reference for further development in the implementation of renewable energy in the transportation sector.

Keywords: Renewable energy, hybrid system, vertical axis wind turbine, solar panel, excess energy, energy efficiency.

Abstrak

Penelitian ini menganalisis kelebihan produksi energi listrik dari sistem hybrid yang menggabungkan turbin angin vertikal 500W dan panel surya 2 x 250W yang diterapkan di Jalan Tol Demak-Semarang. Sistem ini dirancang untuk memenuhi kebutuhan listrik infrastruktur jalan tol, terutama untuk penerangan dan pemantauan lalu lintas. Data kecepatan angin dan radiasi matahari dikumpulkan menggunakan LARD NASA (Langley Atmospheric Research Data) dari Januari hingga Desember 2023. Metode perhitungan yang digunakan melibatkan interpolasi linier pada kurva daya turbin angin serta perhitungan daya keluaran panel surya berdasarkan luas panel dan radiasi matahari per jam.

Hasil analisis menunjukkan bahwa sistem hybrid menghasilkan total energi sebesar 2662,93 Wh per hari, sementara beban penerangan lampu membutuhkan 1680 Wh per hari. Dengan demikian, terdapat kelebihan produksi energi sebesar 982,93 Wh per hari. Energi surplus ini dapat disimpan dalam baterai LiFePO4 24V 90Ah untuk digunakan saat produksi energi rendah atau pada malam hari. Kelebihan produksi energi bervariasi setiap bulannya, dengan puncak tertinggi terjadi pada Februari (46,296 kWh) dan terendah pada April (15,793 kWh).

Sistem hybrid ini tidak hanya meningkatkan keandalan suplai energi, tetapi juga mengurangi ketergantungan terhadap listrik dari jaringan konvensional. Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem hybrid turbin angin vertikal dan panel surya merupakan solusi yang efektif dan berkelanjutan untuk memenuhi kebutuhan energi di infrastruktur transportasi, khususnya jalan tol. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi pengembangan lebih lanjut dalam implementasi energi terbarukan di sektor transportasi.

Kata Kunci: Energi terbarukan, sistem hybrid, turbin angin vertikal, panel surya, kelebihan energi, efisiensi energi.

I. PENDAHULUAN

Energi terbarukan menjadi solusi utama dalam mengatasi krisis energi dan isu lingkungan global. Analisis ini menggunakan sistem pembangkit listrik *hybrid* yang menggabungkan *wind turbine* dan *solar cell* sebagai sumber energi alternatif[1]. Penggabungan beberapa jenis pembangkit listrik baik antara pembangkit listrik konvensional dengan pembangkit listrik dengan energi terbarukan atau penggabungan antara pembangkit listrik dengan energi terbarukan berbeda jenis mampu memberikan sejumlah keuntungan seperti meningkatkan produksi energi listrik dengan penambahan biaya produksi yang rendah, menjamin ketersediaan energi listrik, meningkatkan keandalan sistem, dan sebagainya[2]. Tentu saja, sifat energi angin yang terbarukan menawarkan keunggulan energi angin terus ada dan tidak hilang jika digunakan terus menerus, berbeda dengan batu bara yang bisa habis di masa depan[3]. Hal ini didukung dengan letak geografis Indonesia yang berada di kawasan garis khatulistiwa yang memiliki potensi besar mengenai pemanfaatan sumber energi baru dan terbarukan[4]. Salah satu lokasi yang potensial untuk penerapan sistem ini adalah Jalan Tol Demak-Semarang, yang memiliki karakteristik geografis dengan paparan sinar matahari yang tinggi serta potensi angin yang cukup kuat di daerah pesisir. Keunggulan ini menjadikan sistem *hybrid* sebagai solusi energi yang berkelanjutan dan efisien untuk memenuhi kebutuhan listrik di sepanjang jalan tol tersebut.

Sistem *hybrid* ini menghasilkan listrik yang dapat digunakan untuk berbagai kebutuhan, seperti penerangan jalan tol, pemantauan lalu lintas, dan infrastruktur pendukung lainnya. Pemanfaatan energi terbarukan dalam sistem transportasi ini tidak hanya membantu mengurangi ketergantungan terhadap listrik dari jaringan konvensional, tetapi juga dapat meningkatkan efisiensi operasional jalan tol. Implementasi sistem ini memiliki potensi kelebihan produksi listrik, terutama ketika intensitas sinar matahari dan kecepatan angin berada pada tingkat optimal. Analisis ini bertujuan untuk menghitung surplus listrik yang dihasilkan serta menentukan strategi terbaik dalam pemanfaatannya.

Sistem pembangkit yang digunakan untuk di *hybrid* pada penelitian ini adalah pembangkit listrik tenaga surya dengan turbin angin[5]. Sistem ini menawarkan keuntungan dalam hal keberlanjutan karena dapat terus menghasilkan listrik baik pada siang maupun malam hari, dengan variasi produksi yang bergantung pada kondisi cuaca dan lingkungan. Pemahaman mengenai pola produksi listrik dari sistem *hybrid* ini menjadi sangat penting untuk memastikan penggunaannya yang optimal di

infrastruktur jalan tol. Di Jalan Tol Demak-Semarang, potensi pemanfaatan energi terbarukan sangat besar mengingat kondisi geografisnya yang terbuka serta memiliki intensitas sinar matahari yang tinggi dan kecepatan angin yang relatif stabil. Turbin angin *vertical* memanfaatkan kapasitas 500W dan panel surya 2 X 250W dalam satu sistem hybrid, diharapkan energi listrik yang dihasilkan dapat mencukupi kebutuhan penerangan jalan dan mendukung infrastruktur lainnya. Analisis lebih lanjut diperlukan untuk memahami pola produksi energi, kemungkinan kelebihan daya yang dihasilkan, serta bagaimana energi surplus ini dapat dimanfaatkan secara maksimal, baik melalui penyimpanan energi maupun integrasi dengan jaringan listrik lainnya.

Analisis ini, dilakukan untuk pengambilan data penghitungan kelebihan produksi energi dari sistem *hybrid wind turbine* 500W dan *solar cell* 2 X 250W yang diterapkan di jalan tol Demak. Data ini dikumpulkan menggunakan *LARD NASA (Langley Atmospheric Research Data)* untuk mendukung analisis efisiensi energi dan potensi kelebihan daya yang dihasilkan.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kelebihan produksi listrik yang dihasilkan oleh sistem *hybrid*, baik dalam kondisi optimal maupun dalam *skenario variabel* cuaca. Melalui analisis ini, saya berharap dapat memberikan wawasan yang lebih jelas mengenai efektivitas sistem *hybrid* dalam memenuhi kebutuhan energi di jalan tol serta bagaimana surplus energi dapat dimanfaatkan secara efisien. Hasil penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi referensi bagi pengembangan teknologi energi terbarukan di infrastruktur transportasi lainnya, sehingga dapat berkontribusi dalam mendukung transisi menuju sistem energi yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Wind Turbine Vertical

Turbin angin merupakan teknologi energi alternatif yang mampu mengkonversi energi angin pada jalan tol menjadi energi listrik[6]. Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV) adalah jenis turbin angin yang tidak memerlukan pengarahannya ke sumber angin. Turbin jenis ini memiliki poros atau sumbu rotor utama yang disusun tegak lurus[7]. Prinsip kerja TASV sangat sederhana, energi angin menggerakkan turbin angin dan menggerakkan poros turbin nantinya akan dirubah arah gerakannya oleh gearbox lalu diteruskan oleh rantai ke poros generator untuk dirubah menjadi energi Listrik[8]. Berbeda dengan turbin angin horizontal yang harus diarahkan mengikuti arah angin, turbin angin vertikal dapat menangkap angin dari segala arah (*omnidirectional*). Dalam

pemanfaatannya, diperlukan data mengenai potensi energi angin aktual yang tersedia di lokasi pemasangan. Kondisi topografi di suatu daerah sangat menentukan kontur atau distribusi kecepatan angin di daerah tersebut, dan dengan demikian juga akan mempengaruhi potensi yang tersedia[9]. Turbin angin vertikal umumnya memiliki desain yang lebih kompak dan sederhana, sehingga cocok untuk berbagai lokasi, termasuk daerah perkotaan, pedesaan, dan wilayah terpencil. Selain itu, posisi generator yang biasanya terletak di bagian bawah turbin memudahkan proses perawatan dan pengoperasian, sekaligus meningkatkan keamanan.

Listrik Tenaga Angin mengkonversikan energi angin menjadi energi listrik dengan menggunakan turbin angin atau kincir angin. Cara kerjanya cukup sederhana, energi angin yang memutar turbin angin, diteruskan untuk memutar rotor pada generator dibelakang bagian turbin angin, sehingga akan menghasilkan energi listrik[10].



Gambar 1. wind Turbin Vertical

B. Solar Cell

Solar cell atau sel surya adalah perangkat elektronik yang mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui efek *fotovoltaik*[11]. Efek *fotovoltaik* adalah fenomena di mana cahaya (foton) yang mengenai bahan semikonduktor menghasilkan arus listrik. Teknologi ini menjadi salah satu sumber energi terbarukan yang paling populer karena memanfaatkan energi matahari yang berlimpah dan ramah lingkungan. Panel surya ialah suatu konverter energi yang dapat mengonversi cahaya matahari menjadi energi listrik DC dengan kapasitas tertentu sesuai dengan jenis material dan luasan dari panel surya. Penggunaan pembangkit energi ini sangat bermanfaat dan menguntungkan karena selain tidak menghasilkan kebisingan dan polusi udara juga tidak memakai energi fosil sebagai bahan bakarnya[12]. Solar cell merupakan komponen utama dalam panel surya, yang biasanya terdiri dari banyak solar cell yang dirangkai secara seri atau paralel untuk menghasilkan daya listrik yang lebih besar.



Gambar 2. Solar Cell

III. METODE

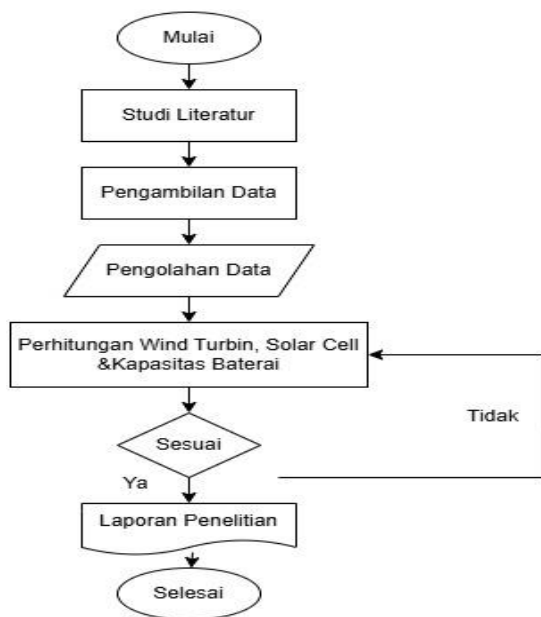
A. Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan metode observasi lapangan dan wawancara dengan narasumber, yang didampingi oleh pembimbing industri. Selain itu, penulis mendapatkan sumber literatur tentang topik penelitian dari berbagai jurnal nasional dan internasional, buku referensi, skripsi, dan artikel lainnya yang relevan dengan topik penelitian. Selanjutnya, Data dikumpulkan menggunakan *LARD NASA (Langley Atmospheric Research Data)* dengan koordinat *Latitude* - 6.9431 dan *Longitude* 110.4417. Data ini mencakup produksi listrik dari solar cell dan *wind turbine* per jam selama periode Januari hingga Desember 2023. pengumpulan data dilakukan secara berkala untuk memastikan akurasi dan konsistensi dalam analisis produksi energi. Data meliputi *variabel* utama seperti kecepatan angin, intensitas radiasi matahari, dan keluaran daya dari masing-masing komponen sistem *hybrid*. Dengan menggunakan metode ini, keandalan hasil penelitian dapat ditingkatkan.

Data Radiasi Matahari dan kecepatan angin menggunakan LARD NASA dengan koordinat Latitude -6.9431 dan Longitude 110.4417 Pada tanggal 01.01.2023 jam 00:00 – 23:00 WIB.

Sebelum penghitungan dilakukan, satu baris diagram dibuat untuk menganalisis system peneliti. Metode *Production hybrid Vertical Axis Wind Turbine-Solar Cell* digunakan sebagai tahapan penelitian untuk mencapai tujuan penelitian.

Diagram alir metode penelitian terlihat pada Gambar 3



Gambar 3. Flowchart Penelitian

B. Solar Cell

Clustering data pada *solar cell SOLANA 2 x 250W* melalui LARD NASA di Tol Demak mengacu pada proses pengelompokan data terkait kinerja panel surya berdaya 500 watt yang dipantau menggunakan sistem LARD (*Lidar Assisted Resource Detection*) dari NASA. Teknologi ini memungkinkan analisis sumber daya energi surya dengan memanfaatkan data penginderaan jauh dan algoritma pembelajaran mesin untuk mengelompokkan berbagai parameter operasional [12].

$$P(\text{output}) = A \times G \times \eta$$

P_{output} = Daya keluaran (dalam Watt)

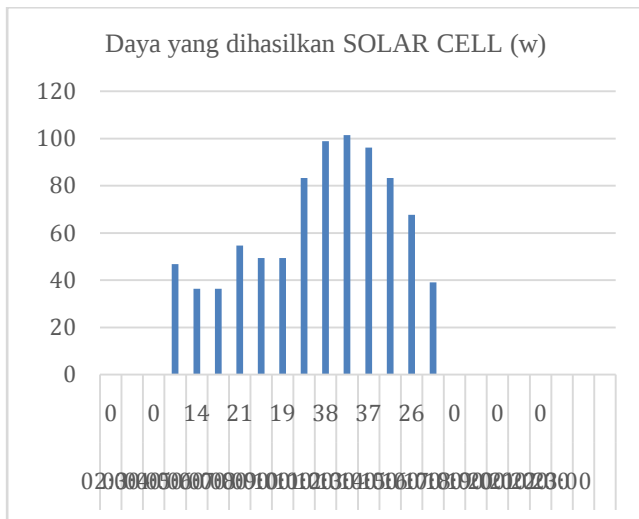
A = Luas total panel surya (m^2) $1652\text{mm} \times 986\text{mm}$
 $= 1,628\text{ m}^2 \times 2\text{ panel} = 3,25\text{ m}^2$

G = Radiasi matahari rata-rata (dalam Watt/ m^2)

Waktu WIB	Data radiasi matahari per jam (Watt/ m^2)	Data kecepatan angin per jam (m/s)
00:00	0	5,69
01:00	0	5,52
02:00	0	4,66
03:00	0	5,49
04:00	0	3,60
05:00	18	2,59
06:00	14	1,59
07:00	14	1,76
08:00	21	2,11
09:00	10	1,96
10:00	19	1,97
11:00	32	2,16
12:00	38	1,84
13:00	39	2,24
14:00	37	2,79
15:00	32	3,38
16:00	26	3,71
17:00	15	2,08
18:00	0	2,58
19:00	0	1,85
20:00	0	1,36
21:00	0	1,81
22:00	0	2,59
23:00	0	2,08

η = Efisiensi total sistem 80%

Tabel 1. Data Radiasi Matahari Dan Kecepatan Angin



Gambar 4. Grafik Daya yang dihasilkan Solar Cell

Grafik ini menunjukkan daya yang dihasilkan oleh panel surya (*solar cell*) dalam satu hari, dengan satuan watt (W), berdasarkan intensitas radiasi matahari. Pada pukul 00:00 hingga 04:00 WIB, tidak ada daya yang dihasilkan karena panel surya tidak beroperasi tanpa sinar matahari. Baru pada pukul 05:00 WIB, mulai terdapat sedikit daya sebesar 18 W, menandakan bahwa cahaya matahari mulai tersedia meskipun masih lemah. Seiring berjalannya waktu, daya terus meningkat. Pada pukul 10:00 WIB, daya mencapai 32 W, dan terus meningkat hingga puncaknya pada pukul 12:00 – 13:00 WIB dengan daya tertinggi sekitar 39 W. Ini menunjukkan bahwa intensitas cahaya matahari mencapai titik optimal pada tengah hari.

Setelah pukul 14:00 WIB, daya mulai mengalami penurunan bertahap. Pada pukul 16:00 WIB, daya yang dihasilkan turun menjadi 32 W, dan semakin berkurang hingga hanya 15 W pada pukul 17:00 WIB. Setelah pukul 18:00 WIB, daya kembali menjadi 0 W, menandakan bahwa matahari telah terbenam dan panel surya tidak lagi menghasilkan listrik.

Secara keseluruhan, grafik ini menunjukkan pola produksi daya yang sesuai dengan siklus matahari. Panel surya mulai menghasilkan daya di pagi hari, mencapai puncaknya pada siang hari, dan menurun hingga berhenti sepenuhnya saat matahari terbenam. Hal ini menggambarkan bahwa kinerja panel surya sangat bergantung pada intensitas sinar matahari sepanjang hari.

C. Wind Turbin

Clustering data wind turbine vertikal 500W pada ketinggian 20 meter bertujuan untuk mengelompokkan data berdasarkan karakteristik pola angin yang diperoleh dari sistem *LIDAR (Light Detection and Ranging)* atau *LARD NASA* di wilayah Tol Demak. Metode *clustering* ini digunakan untuk mengidentifikasi pola kecepatan angin, arah angin, dan

fluktuasi turbulensi yang dapat mempengaruhi kinerja turbin angin vertikal berkapasitas 500W[13].

$$P = P^1 + \frac{(V - V_1) \times (P^2 - P^1)}{V_2 - V_1}$$

Dimana :

P = Daya keluaran yang ingin dicari

P1 = Daya keluaran pada kecepatan angin terdekat yang lebih kecil

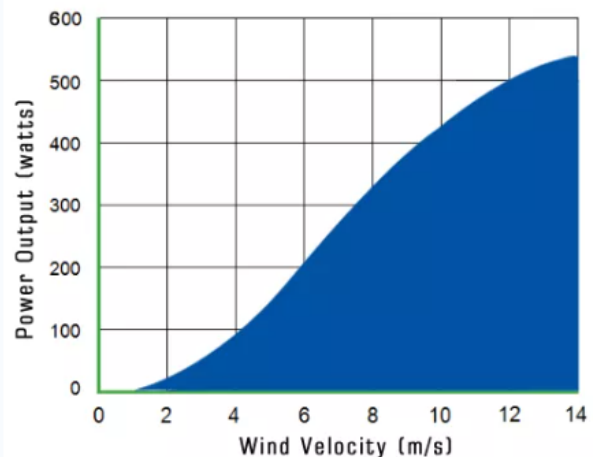
P2 = Daya keluaran pada kecepatan angin terdekat yang lebih besar

V = Kecepatan angin yang ingin dicari dayanya

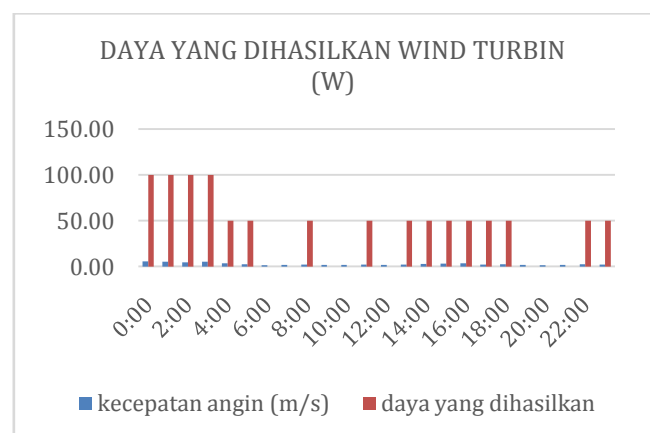
V1 = Kecepatan angin terdekat yang lebih kecil

V2 = Kecepatan angin terdekat yang lebih besar

EN-500W-Q4 Wind turbine Power Curve Test



Gambar 5. Data Sheet Wind Turbin



Gambar 6. Grafik Daya yang dihasilkan Wind Turbin

Pada grafik wind turbin ini, terlihat bahwa daya yang dihasilkan oleh turbin angin berfluktuasi sepanjang hari, mengikuti pola kecepatan angin.

Pada pukul 00:00 hingga 04:00 WIB, daya yang dihasilkan mencapai nilai tertinggi, yaitu sekitar 100% dari kapasitas turbin. Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan angin pada rentang waktu tersebut cukup tinggi dan stabil, sehingga turbin mampu menghasilkan daya maksimal.

Memasuki pukul 05:00 hingga 10:00 WIB, daya yang dihasilkan mengalami penurunan yang signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa kecepatan angin berkurang drastis, sehingga turbin tidak dapat menghasilkan daya dalam jumlah besar.

Pada pukul 11:00 WIB, terjadi sedikit lonjakan daya, yang menandakan adanya peningkatan sementara dalam kecepatan angin. Namun, setelah itu, daya kembali menurun.

Selanjutnya, mulai dari pukul 14:00 hingga 19:00 WIB, terjadi beberapa lonjakan daya yang menunjukkan bahwa kecepatan angin kembali meningkat secara sporadis. Puncak-puncak daya ini menandakan adanya kondisi angin yang lebih optimal dibandingkan dengan pagi hingga siang hari.

Menjelang malam, pada pukul 20:00 hingga 23:00 WIB, daya kembali meningkat secara bertahap, meskipun tidak setinggi periode awal hari. Ini menunjukkan bahwa angin kembali bertiup lebih kuat pada malam hari, meskipun tidak sebesar saat dini hari.

Secara keseluruhan, grafik ini menunjukkan bahwa produksi daya turbin angin sangat bergantung pada pola kecepatan angin harian. Periode dini hari hingga subuh merupakan waktu dengan produksi daya tertinggi, sementara pada pagi hingga siang hari, daya yang dihasilkan cenderung lebih rendah dengan beberapa lonjakan di sore dan malam hari.

d. Baterai

Baterai *LiFePO₄ (Lithium Iron Phosphate)* dalam sistem *hybrid wind turbine-solar cell* adalah jenis baterai lithium yang digunakan untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan oleh turbin angin dan panel surya[14]. Baterai ini berfungsi sebagai sumber daya cadangan saat produksi energi dari angin atau matahari tidak mencukupi, memastikan pasokan listrik yang stabil dan berkelanjutan[15].

Penentuan kapasitas battery dapat menggunakan rumus sebagai berikut :[16]

$$C_{\text{baterai}} = \frac{E_{\text{harian}}}{V_{\text{baterai}} \times \text{DoC} \times \eta_{\text{inverter}}}$$

Dimana:

C_{baterai} = Kapasitas baterai yang dibutuhkan (Ah)

V_{baterai} = Tegangan baterai (12V, 24V, 48V, dll.)

DoD = Depth of Discharge (untuk LiFePO₄, gunakan 0.9)

η_{inverter} =Efisiensi inverter 0,9

D. DAYA YANG DIHASILKAN

- a. Untuk menghitung Daya yang dihasilkan solar cel menggunakan rumus :

Output solar cell

$$P(\text{output}) = A \times G \times \eta$$

Dimana :

P_{output} = Daya keluaran (dalam Watt)

A = Luas total panel surya (m²) 1652mm x 986 mm = 1,628 m² x 2 panel = 3,25 m²

G = Radiasi matahari (dalam Watt/m²) 18 W/m²

η = Efisiensi total sistem 80%

$$P(\text{output}) = 3,25 \text{ m}^2 \times 18 \text{ W/m}^2 \times 0,8 \\ = 46,8 \text{ W}$$

- b. Turbin angin menghasilkan listrik berdasarkan kecepatan angin. Untuk mengetahui berapa daya yang dihasilkan, kita menggunakan kurva daya yang disediakan oleh pabrik turbin angin. Kurva daya menunjukkan hubungan antara kecepatan angin (m/s) dan daya keluaran (W).Metode interpolasi linier memberikan daya keluaran yang lebih akurat dibandingkan tanpa interpolasi

Interpolasi linier menggunakan rumus:

$$P = P^1 + \frac{(V - V_1)X(P^2 - P^1)}{V_2 - V_1}$$

Dimana :

P = Daya keluaran yang ingin dicari

P^1 = Daya keluaran pada kecepatan angin terdekat yang lebih kecil

P^2 = Daya keluaran pada kecepatan angin terdekat yang lebih besar

V = Kecepatan angin yang ingin dicari dayanya

V_1 = Kecepatan angin terdekat yang lebih kecil

V_2 = Kecepatan angin terdekat yang lebih besar

$$P = P^1 + \frac{(V - V_1)X(P^2 - P^1)}{V_2 - V_1}$$

$$P = 100 + \frac{(5,69 - 4)X(200 - 100)}{6 - 4}$$

$$P = 100 + \frac{1,69 \times 100}{2}$$

$$P = 100 + 84,5$$

$$P = 184,5 \text{ W}$$

Tabel 2. kurva Daya Wind Turbin

Data Sheet Kurva Daya	
Kecepatan Angin (m/s)	Daya Keluaran (W)
0	0
2	50
4	100

6	200
8	300
10	400
12	500
14	600

c. Baterai

$$C_{\text{baterai}} = \frac{E_{\text{harian}}}{V_{\text{baterai}} \times \text{DoC} \times \eta_{\text{inverter}}}$$

$$C_{\text{baterai}} = \frac{1680 \text{ w}}{24 \text{ v} \times 0,9 \times 0,9}$$

$$C_{\text{baterai}} = \frac{1680}{19,4}$$

$$C_{\text{baterai}} = 86,5 \text{ Ah}$$

Dari hasil perhitungan, baterai LiFePO4 dengan tegangan 24V dan kapasitas minimal 86.5 Ah diperlukan untuk memenuhi kebutuhan energi harian sebesar 1680 Wh.

Untuk keamanan dan cadangan energi, disarankan memilih baterai dengan kapasitas sedikit lebih besar, misalnya 24V 90Ah atau 100Ah.

Tabel 3. Data Output Wind Turbin & Solar Cell

Output wind turbin + solar cell			
Waktu WIB	Wind turbin per jam (watt)	Solar cell per jam (watt)	Hasil (watt)
00:00	184,5	0	184,60
01:00	176,28	0	176,28
02:00	133,01	0	133,01
03:00	174,62	0	174,62
04:00	90,15	0	90,15
05:00	64,91	46,8	111,71
06:00	39,94	36,4	76,34
07:00	44,11	36,4	80,51
08:00	52,98	54,6	107,58
09:00	49,1	49,4	98,50
10:00	49,38	49,4	98,78
11:00	54,09	83,2	137,29

12:00	44,11	98,8	142,91
13:00	56,03	101,4	157,43
14:00	69,90	96,2	166,1
15:00	84,6	83,2	167,8
16:00	92,93	67,6	160,53
17:00	52,15	39	91,15
18:00	64,63	0	64,63
19:00	46,32	0	46,32
20:00	34,12	0	34,12
21:00	45,49	0	45,49
22:00	64,91	0	64,91
23:00	52,15	0	52,15
Daya yang dihasilkan per hari			2662,93
Beban lampu 2 x 70w			1680
Kelebihan produksi			982,93 Wh

Tabel tersebut menunjukkan bahwa energi dihasilkan dari kombinasi turbin angin dan panel surya. Pada tengah malam hingga dini hari, listrik sepenuhnya dihasilkan oleh turbin angin, dengan daya tertinggi mencapai 184,5 watt pada pukul 00:00 dan perlahan menurun hingga 90,15 watt pada pukul 04:00.

Saat matahari mulai terbit pada pukul 05:00, panel surya mulai berkontribusi dengan menghasilkan 46,8 watt, sehingga total daya yang dihasilkan meningkat menjadi 111,71 watt. Seiring berjalannya waktu, output panel surya terus meningkat, mencapai puncaknya pada pukul 13:00 dengan 101,4 watt, sementara turbin angin masih memberikan tambahan daya 56,03 watt, menghasilkan total 157,43 watt.

Setelah pukul 15:00, daya dari panel surya mulai menurun secara bertahap, hingga akhirnya berhenti beroperasi setelah pukul 17:00. Pada malam hari, turbin angin kembali menjadi satu-satunya sumber listrik dengan daya yang bervariasi antara 34,12 watt hingga 92,93 watt.

Secara keseluruhan, dalam sehari sistem ini berhasil menghasilkan 2662,93 watt-jam energi listrik. Dari jumlah tersebut, 1680 watt-jam digunakan untuk menyalakan dua lampu berdaya 70 watt selama 12 jam. Dengan demikian, masih terdapat kelebihan produksi sebesar 982,93 watt-jam, yang dapat disimpan dalam baterai atau dimanfaatkan untuk keperluan lainnya.

Dengan sistem ini, suplai energi menjadi lebih stabil karena memanfaatkan kombinasi sumber daya angin dan matahari, sehingga dapat memenuhi kebutuhan listrik sehari-hari dengan lebih efisien.

Tabel 4. Data Kelebihan Produksi Per Bulan

Data Kelebihan Produksi Per Bulan	
Bulan	kWh (Kilowatt-hour)
Januari	33,288
Februari	46,296
Maret	22,107
April	15,793
Mei	29,503
Juni	32,551
Juli	42,468
Agustus	40,492
September	45,754
Oktober	37,751
November	25,767
Desember	19,819

Tabel tersebut menunjukkan bahwa Sepanjang tahun terjadi fluktuasi dalam kelebihan produksi energi setiap bulannya. Pada awal tahun, bulan Januari mencatat surplus sebesar 33,288 kWh, diikuti oleh lonjakan signifikan pada Februari yang mencapai 46,296 kWh, angka tertinggi dalam setahun. Namun, produksi kembali turun di bulan Maret dengan 22,107 kWh, dan terus menurun hingga mencapai titik terendah di bulan April dengan hanya 15,793 kWh.

Memasuki pertengahan tahun, kelebihan produksi mulai meningkat lagi. Mei mencatat 29,503 kWh, disusul Juni dengan 32,551 kWh. Pada bulan Juli, produksi melonjak kembali ke 42,468 kWh, hampir menyamai Februari. Agustus dan September juga mencatat angka tinggi, masing-masing 40,492 kWh dan 45,754 kWh.

Menjelang akhir tahun, produksi mulai mengalami penurunan bertahap. Oktober masih mencatat angka cukup tinggi dengan 37,751 kWh, namun pada November turun menjadi 25,767 kWh, dan akhirnya mencapai angka terendah kedua di bulan Desember dengan 19,819 kWh.

Secara keseluruhan, kelebihan produksi energi tertinggi terjadi di Februari dengan 46,296 kWh, sementara bulan dengan surplus terendah adalah April, dengan hanya 15,793 kWh. Fluktuasi ini menunjukkan adanya pengaruh faktor eksternal yang memengaruhi produksi energi setiap bulannya.

Dengan sistem ini, suplai energi menjadi lebih stabil karena memanfaatkan kombinasi sumber daya angin dan matahari, sehingga dapat memenuhi kebutuhan listrik sehari-hari dengan lebih efisien

IV. Kesimpulan

28

Penelitian ini menganalisis kelebihan produksi energi listrik dari sistem hybrid yang menggabungkan turbin angin vertikal 500W dan panel surya 2 x 250W yang diterapkan di Jalan Tol Demak-Semarang. Sistem ini dirancang untuk memenuhi kebutuhan listrik infrastruktur jalan tol, terutama untuk penerangan dan pemantauan lalu lintas. Data kecepatan angin dan radiasi matahari dikumpulkan menggunakan LARD NASA dari Januari hingga Desember 2023, dan metode perhitungan yang digunakan melibatkan interpolasi linier pada kurva daya turbin angin serta perhitungan daya keluaran panel surya berdasarkan luas panel dan radiasi matahari per jam.

Hasil analisis menunjukkan bahwa sistem hybrid menghasilkan total energi sebesar 2662,93 Wh per hari, sementara beban penerangan lampu membutuhkan 1680 Wh per hari. Dengan demikian, terdapat kelebihan produksi energi sebesar 982,93 Wh per hari. Energi surplus ini dapat disimpan dalam baterai LiFePO₄ 24V 90Ah untuk digunakan saat produksi energi rendah atau pada malam hari.

Sistem hybrid ini tidak hanya meningkatkan keandalan suplai energi, tetapi juga mengurangi ketergantungan terhadap listrik dari jaringan konvensional. Kelebihan produksi energi bervariasi setiap bulannya, dengan puncak tertinggi terjadi pada Februari (46,296 kWh) dan terendah pada April (15,793 kWh).

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa sistem hybrid turbin angin vertikal dan panel surya merupakan solusi yang efektif dan berkelanjutan untuk memenuhi kebutuhan energi di infrastruktur transportasi, khususnya jalan tol. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi pengembangan lebih lanjut dalam implementasi energi terbarukan di sektor transportasi

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penyusunan jurnal ini. Terima kasih khusus kepada dosen pembimbing atas bimbingannya, para reviewer dan editor atas masukan konstruktifnya, serta keluarga dan teman atas dukungan moral yang tak ternilai. Kami juga menghargai kontribusi berbagai pihak yang membantu, baik dalam bentuk saran, fasilitas, maupun semangat. Semoga jurnal ini bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang energi terbarukan dan sistem hybrid.

REFERENSI

- [1] L. Qomaria i S. Sudarti, „Analisis Optimalisasi Sistem Solar Cell Sebagai Energi Alternatif Pada Pompa Air Sebagai Pemenuhan Kebutuhan Air Di Lahan Pertanian“, *J. Penelit. Fis. dan Ter.*, sv. 2, izd. 2, str. 58, 2021, doi: 10.31851/jupiter.v2i2.5732.
- [2] A. Suprajitno, S. B. Utomo, D. D. Nugroho, i J. T. Elektro, „CYCLOTRON : Jurnal Teknik Elektro

- Optimasi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid Energi Angin dan Surya Melalui Sistem Battery Charging Switching“, *Cyclotr. J. Tek. Elektro*, sv. 5, izd. 1, str. 14–20, 2024.
- [3] D. D. R. W, M. Rijal, T. J. Saputra, i R. P. Dewi, „PERANCANGAN TURBIN ANGIN BERPOROS HORIZONTAL“, str. 0–6, 2022.
- [4] A. F. Hernawan, E. Mulyana, i B. Trisno, „Evaluasi Kinerja Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Hybrid Pada Gedung Centre of Excellence Universitas“, *Transm. J. Ilm. Tek. Elektro*, sv. 26, izd. 1, str. 31–39, 2024, doi: 10.14710/transmisi.26.1.31-39.
- [5] M. Firman i M. Irfansyah, „Perancangan Sistem Hybrid Pembangkit Listrik Tenaga Surya Dengan Turbin Angin Terapung“, *Al-Jazari J. Ilm. Tek. Mesin*, sv. 6, izd. 2, str. 96–102, 2021, doi: 10.31602/al-jazari.v6i2.6057.
- [6] Ismail, E. Pane, i Triyanti, „Optimasi Perancangan Turbin Angin Vertikal Tipe Darrieus Untuk Penerangan Di Jalan Tol“, *Semin. Nas. Sains dan Teknol.*, sv. 1, izd. November, str. 12, 2017.
- [7] A. Akbar, P. A. Riyono, M. A. Delwizar, E. D. Malia, I. Kelana, i N. R. Alham, „Rancang Bangun Sistem Pembangkit Hybrid Dengan Tenaga Matahari Dan Tenaga Angin“, *MEDIA Perspekt. J. Technol.*, sv. 12, izd. 2, str. 71, 2021, doi: 10.46964/jtmp.v12i2.729.
- [8] S. E. Wardhana, „Rancang bangun pembangkit listrik hibrida menggunakan kincir angin sumbu vertikal savonius dan panel sel surya skala kecil“, *Inst. Teknol. Nas. Malang*, 2017, [Na internetu]. Dostupno na: <http://eprints.itn.ac.id/4095/>
- [9] Y. Yandri, K. H. Khwee, i R. Kurnianto, „Studi Komparatif Turbin Angin Berdaya Sama dengan Kurva Daya yang Berbeda Berbasis Distribusi Weibull“, *J. Teknol. Elektro*, sv. 15, izd. 1, str. 36, 2024, doi: 10.22441/jte.2024.v15i1.007.
- [10] A. Turbin, A. Sumbu, i V. Dengan, „Muhammad Suprpto“, sv. 02, izd. 01, str. 52–57, 2016.
- [11] B. H. Purwoto, J. Jatmiko, M. A. Fadilah, i I. F. Huda, „Efisiensi Penggunaan Panel Surya sebagai Sumber Energi Alternatif“, *Emit. J. Tek. Elektro*, sv. 18, izd. 1, str. 10–14, 2018, doi: 10.23917/emitor.v18i01.6251.
- [12] H. Hendrayana, „Simulasi Sistem Hibrid Pembangkit Energi Surya, Angin, dan Generator Untuk Mengoptimalkan Pemanfaatan Daya Energi Terbarukan“, *CIRCUIT J. Ilm. Pendidik. Tek. Elektro*, sv. 1, izd. 1, str. 26–43, 2017, doi: 10.22373/crc.v1i1.1381.
- [13] P. Gunoto i H. D. Hutapea, „Analisa Daya Pada Panel Surya Di Pembangkit Listrik Tenaga Surya Rooftop on Grid Kapasitas 30 Kva Gedung Kantor Pt. Energi Listrik Batam“, *Sigma Tek.*, sv. 5, izd. 1, str. 057–069, 2022, doi: 10.33373/sigmateknika.v5i1.4180.
- [14] A. Satriady, W. Alamsyah, H. I. Saad, i S. Hidayat, „PENGARUH LUAS ELEKTRODA TERHADAP KARAKTERISTIK BATERAI LiFePO₄“, *J. Mater. dan Energi Indones.*, sv. 06, izd. 02, str. 43–48, 2016.
- [15] P. Widjanarko, Wahyu Nugroho i A. Dani dan Nila Alia, „STUDI IMPLEMENTASI SMALL PLTS OFF GRID BERBASIS BATERAI LiFePO₄ PADA RUMAH TINGGAL DAYA TENAGA SURYA 200 W STUDY OF SMALL PLTS OFF GRID IMPLEMENTATION BASED ON LIFePO₄ BATTERY AT 200 SOLAR SURYA POWER HOUSE“, *J. Ilm. Teknol. FST Undana*, sv. 13, izd. 2, str. 10–14, 2019.
- [16] Safrizal, „Kajian TeknisPembangkit Listrik Hybrid (PV& WTG) PadaBase Transceiver Station (BTS) Di Pulau Karimunjawa“, *Mestro J.*, sv. 2, izd. 2, str. 8–13, 2020.