



## Analisis Potensi dan Perancangan Sistem Hybrid PV/Wind Untuk Motor Board di Perlis, Malaysia

Reza Juliannga<sup>1</sup>, Muhammad Ikhwan Fahmi<sup>2</sup>, Syofyan Anwar Syahputra<sup>3</sup>,  
Muhammad Fadlan Siregar<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Universitas Pembangunan Panca Budi Medan, Indonesia

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Prima Indonesia

<sup>3</sup>Program Studi Teknik Elektro, Akademi Teknik Deli Serdang

<sup>4</sup>Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Medan Area

Email : [rezajuliangga@dosen.pancabudi.ac.id](mailto:rezajuliangga@dosen.pancabudi.ac.id)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 10 September 2025

Revised: 28 Oktober 2025

Accepted: 30 November 2025

#### Keywords:

Sistem Hybrid PV/Wind

Iridiasi Matahari

Energi Terbarukan

Optimasi Sistem

Mikrokontroler ATmega8535

#### Published by

Impressio : Jurnal Teknologi dan Informasi

Copyright © 2025 by the Author(s) | This is an open-access article distributed under the Creative Commons Attribution which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



### ABSTRACT

Penelitian ini menganalisis potensi iradiasi matahari, temperatur, dan kecepatan angin sebagai sumber energi untuk sistem hybrid photovoltaic (PV)/wind powered motor board di Perlis, Malaysia. Data dikumpulkan selama periode Agustus hingga Desember 2018 di Centre of Excellence for Renewable Energy (CERE), Universiti Malaysia Perlis. Hasil menunjukkan bahwa iradiasi matahari rata-rata harian adalah  $371,97 \text{ W/m}^2$  dengan temperatur rata-rata  $28,06^\circ\text{C}$ , mengindikasikan potensi yang baik untuk pembangkit PV. Namun, kecepatan angin rata-rata hanya  $1,05 \text{ m/s}$  yang tergolong sangat rendah. Simulasi menggunakan PSpice untuk modul PV 12V 3W menghasilkan error dibawah 10% dibandingkan datasheet. Perancangan optimal sistem menggunakan 17 modul PV, 1 turbin angin, charge controller 6,38A, dan 17 baterai 12V 1,2Ah untuk mensuplai beban motor DC 10W yang beroperasi 24 jam. Prototype sistem berhasil dibuat dengan monitoring berbasis mikrokontroler ATmega8535. Hasil pengujian menunjukkan output tegangan PV berkisar  $13,42\text{-}19,61\text{V}$  dengan arus  $0,05\text{-}0,4\text{A}$  pada iradiasi  $107,5\text{-}893,6 \text{ W/m}^2$ .

This study analyzes the potential of solar irradiation, temperature, and wind speed as energy sources for a hybrid photovoltaic (PV)/wind powered motor board system in Perlis, Malaysia. Data were collected during the period from August to December 2018 at the Centre of Excellence for Renewable Energy (CERE), Universiti Malaysia Perlis. The results show that the average daily solar irradiation was  $371.97 \text{ W/m}^2$  with an average temperature of  $28.06^\circ\text{C}$ , indicating good potential for PV generation. However, the average wind speed was only  $1.05 \text{ m/s}$ , which is classified as very low. Simulation using PSpice for a 12V 3W PV module produced an error of less than 10% compared to the datasheet. The optimal system design utilizes 17 PV modules, 1 wind turbine, a 6.38A charge controller, and 17 12V 1.2Ah batteries to supply a 10W DC motor load operating 24 hours. A prototype system was successfully built with monitoring based on an ATmega8535 microcontroller. Test results showed that the PV output voltage ranged from  $13.42\text{-}19.61\text{V}$  with a current of  $0.05\text{-}0.4\text{A}$  at irradiation levels of  $107.5\text{-}893.6 \text{ W/m}^2$ .

#### Corresponding Author:

#### Author

Universitas Pembangunan Panca Budi Medan, Indonesia

Jl. Jend. Gatot Subroto Km. 4,5 Sei Sikambing 20122. Kota Medan, Propinsi Sumatera Utara, Indonesia

Email: [rezajuliangga@dosen.pancabudi.ac.id](mailto:rezajuliangga@dosen.pancabudi.ac.id)

## PENDAHULUAN

Energi terbarukan menjadi solusi penting dalam menghadapi krisis energi global dan perubahan iklim. Sistem hybrid yang menggabungkan photovoltaic (PV) dan pembangkit listrik tenaga angin (wind power) menawarkan keunggulan dalam memanfaatkan sumber energi alami yang saling melengkapi. Malaysia, khususnya wilayah Perlis, memiliki potensi energi surya yang signifikan dengan letak geografis di kawasan tropis. Namun, karakteristik angin di wilayah ini perlu dikaji lebih lanjut untuk menentukan kelayakan sistem hybrid.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa sistem hybrid PV/wind dapat meningkatkan reliabilitas pasokan energi dibandingkan sistem standalone. Perancangan yang optimal memerlukan analisis mendalam terhadap potensi sumber energi lokal, perhitungan sizing komponen yang tepat, dan validasi melalui simulasi serta prototype. Beberapa penelitian telah mengkaji sistem hybrid di berbagai lokasi, namun studi spesifik untuk wilayah Perlis dengan fokus pada aplikasi motor board masih terbatas.

Kebaruan penelitian ini terletak pada analisis komprehensif potensi energi surya dan angin di Perlis selama periode lima bulan, perancangan optimal sistem hybrid menggunakan metode perhitungan matematis dan simulasi PSpice, serta implementasi prototype dengan sistem monitoring berbasis mikrokontroler ATmega8535. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi iradiasi matahari, temperatur, dan kecepatan angin sebagai sumber energi, merancang sizing optimal komponen sistem hybrid PV/wind untuk aplikasi motor board, dan mengimplementasikan prototype sistem dengan monitoring real-time.

## **URAIAN TEORI**

## Sistem Photovoltaic (PV)

Modul photovoltaic mengkonversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaik. Performa modul PV sangat dipengaruhi oleh iradiasi matahari dan temperatur operasi. Pada kondisi Standard Test Condition (STC), modul PV diuji pada iradiasi  $1000 \text{ W/m}^2$  dan temperatur  $25^\circ\text{C}$ . Karakteristik listrik modul PV dapat digambarkan melalui kurva I-V dan kurva P-V yang menunjukkan hubungan antara arus, tegangan, dan daya keluaran.

## Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Daya yang dihasilkan turbin angin proporsional terhadap pangkat tiga kecepatan angin dan sebanding dengan luas sapuan bilah turbin. Perhitungan daya angin menggunakan persamaan:

dimana  $\rho$  adalah densitas udara ( $\text{kg/m}^3$ ),  $A$  adalah luas sapuan bilah ( $\text{m}^2$ ),  $V$  adalah kecepatan angin ( $\text{m/s}$ ), dan  $C_p$  adalah koefisien daya turbin. Klasifikasi kecepatan angin menurut Irwanto et al. (2014) menunjukkan bahwa kecepatan dibawah 3 m/s tergolong sangat rendah untuk pembangkit listrik tenaga angin.

## Sistem Hybrid PV/Wind

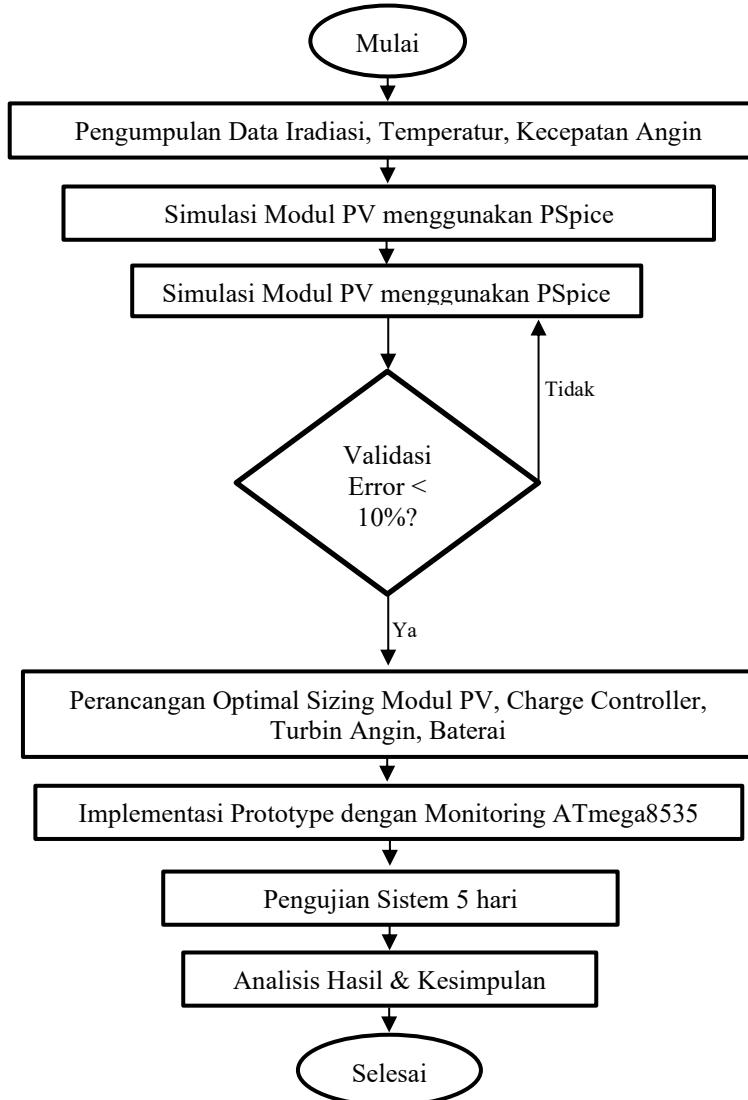
Sistem hybrid menggabungkan dua atau lebih sumber energi untuk meningkatkan keandalan sistem. Kombinasi PV dan wind power memberikan komplementaritas temporal, dimana PV optimal pada siang hari sedangkan wind power dapat beroperasi sepanjang waktu. Komponen utama sistem meliputi modul PV, turbin angin, charge controller, baterai penyimpanan, dan beban. Perancangan optimal memerlukan perhitungan sizing yang tepat untuk memastikan keseimbangan antara pembangkitan dan konsumsi energi.

## Mikrokontroler ATmega8535

ATmega8535 adalah mikrokontroler 8-bit dari keluarga AVR yang memiliki 8KB flash memory, 512 byte EEPROM, dan 512 byte SRAM. Mikrokontroler ini dilengkapi dengan ADC 10-bit yang dapat

digunakan untuk monitoring parameter listrik seperti tegangan dan arus. Pemrograman dapat dilakukan menggunakan CodeVisionAVR dengan interface USB ISP untuk proses burning program.

## METODE PENELITIAN



Gambar 1. Flowchart Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Centre of Excellence for Renewable Energy (CERE), Universiti Malaysia Perlis (UniMAP) dari bulan Agustus hingga Desember 2018. Metode penelitian terdiri dari empat tahap utama yaitu pengumpulan data, simulasi, perancangan optimal, dan implementasi prototype.

Pengumpulan data dilakukan dengan merekam iradiasi matahari, temperatur ambient, dan kecepatan angin secara harian menggunakan weather station. Data iradiasi matahari dan temperatur digunakan untuk menghitung output daya modul PV, sedangkan data kecepatan angin digunakan untuk menghitung daya pembangkit angin menggunakan MATLAB.

Simulasi karakteristik modul PV 12V 3W polycrystalline silicon dilakukan menggunakan software PSpice pada kondisi STC. Hasil simulasi divalidasi dengan datasheet menggunakan analisis persentase error untuk parameter open circuit voltage (Voc), short circuit current (Isc), dan daya

maksimum ( $P_{max}$ ). Kurva I-V dan P-V dihasilkan untuk analisis karakteristik modul.

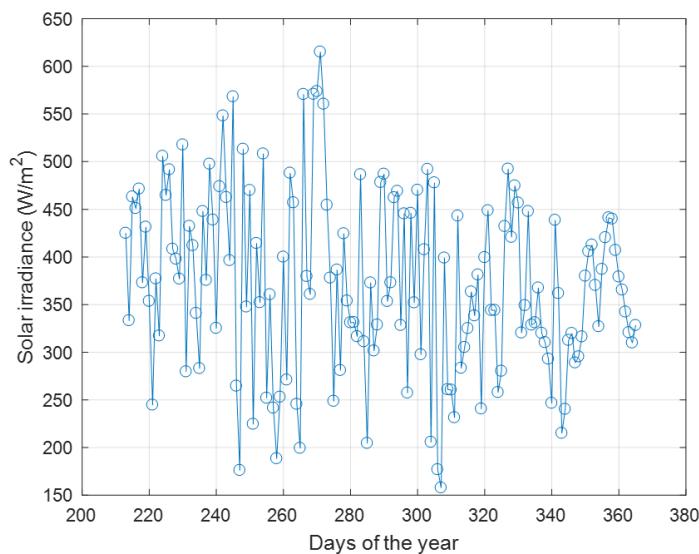
Perancangan optimal sizing komponen sistem dilakukan menggunakan perhitungan matematis berdasarkan energi kebutuhan beban dan energi yang dibangkitkan. Beban sistem adalah dua motor DC masing-masing 5W yang beroperasi 24 jam per hari, sehingga total energi yang dibutuhkan adalah 240 Wh per hari. Jumlah optimal modul PV ditentukan dengan menyeimbangkan energi yang dibangkitkan dengan kebutuhan energi beban. Sizing charge controller dihitung berdasarkan arus hubung singkat total dengan faktor keamanan 1,25. Jumlah baterai ditentukan berdasarkan kapasitas penyimpanan energi dengan days of autonomy tiga hari dan depth of discharge 80%.

Implementasi prototype dilakukan dengan merakit komponen sistem pada PCB board. Sistem monitoring menggunakan mikrokontroler ATmega8535 yang diprogram menggunakan CodeVisionAVR. Program disimulasikan terlebih dahulu menggunakan Proteus sebelum di-burning ke mikrokontroler menggunakan USB ISP. Pengujian sistem dilakukan selama lima hari dengan interval pembacaan setiap 10 menit dari pukul 10:30 sampai 17:00 untuk mengukur iradiasi matahari, tegangan tanpa beban, dan arus keluaran modul PV.

## HASIL PENELITIAN

### Potensi Iradiasi Matahari dan Temperatur

Hasil pengukuran menunjukkan temperatur harian selama periode penelitian berkisar antara 25,4°C hingga 29,6°C dengan rata-rata 28,06°C. Temperatur minimum terjadi pada 16 Desember 2018 yang mengindikasikan kondisi cuaca berawan dan hujan. Temperatur maksimum tercatat pada 18 Agustus 2018 dengan kondisi langit cerah. Pola temperatur harian selama periode Agustus hingga Desember 2018 menunjukkan fluktuasi yang mengikuti kondisi cuaca. Secara bulanan, temperatur terendah terjadi pada bulan Desember dengan rata-rata 27,62°C, sedangkan tertinggi pada bulan Agustus. Temperatur mempengaruhi performa pembangkitan daya modul PV dimana performa terbaik terjadi pada bulan Agustus karena memiliki temperatur bulanan tertinggi yang selalu diikuti dengan peningkatan iradiasi matahari.



Gambar 2. Iradiasi matahari harian selama periode Agustus hingga Desember 2018

Iradiasi matahari harian menunjukkan variasi signifikan dengan nilai minimum 157,81 W/m<sup>2</sup> pada 3 November 2018 dan maksimum 615,15 W/m<sup>2</sup> pada 28 September 2018. Rata-rata iradiasi harian adalah 371,97 W/m<sup>2</sup>, nilai yang masih memadai untuk pembangkitan PV karena

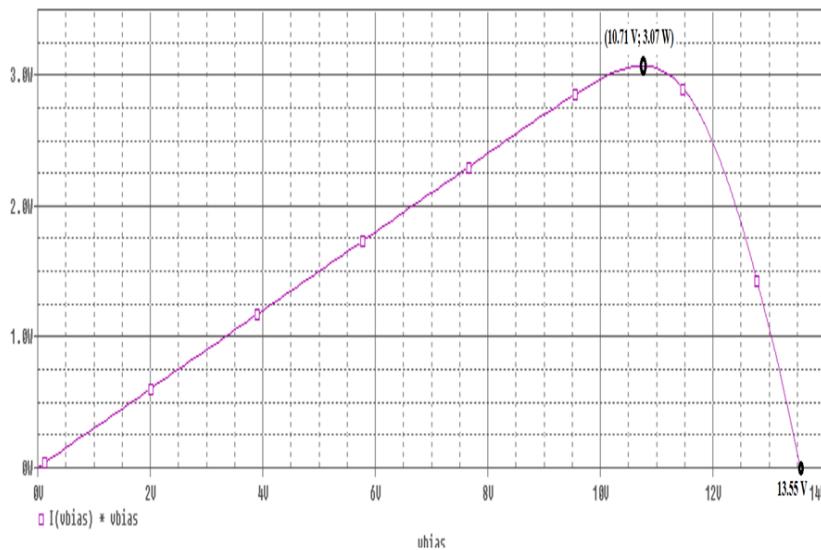
berada diatas persyaratan minimum  $300 \text{ W/m}^2$ . Fluktuasi iradiasi matahari harian sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca terutama keberadaan awan dan hujan. Secara bulanan, iradiasi terendah terjadi pada November dengan rata-rata  $344,95 \text{ W/m}^2$  karena merupakan periode hujan terberat, sedangkan tertinggi pada September dengan  $615,15 \text{ W/m}^2$ .

### Output Daya Modul PV

Validasi simulasi PSpice menunjukkan hasil yang akurat dengan persentase error untuk  $V_{oc}$  sebesar 2,27%,  $I_{sc}$  sebesar 0%, dan  $P_{max}$  sebesar 2,33%. Nilai error dibawah 10% mengindikasikan bahwa model simulasi dapat diterima dan digunakan untuk analisis lebih lanjut sesuai standar Daut et al. (2011). Hasil simulasi kurva I-V menunjukkan  $V_{oc}$  sebesar 13,5V dan  $I_{sc}$  sebesar 300mA, sedangkan kurva P-V menunjukkan daya maksimum 3,07W yang mendekati spesifikasi datasheet. Perbandingan hasil simulasi dengan datasheet ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan hasil simulasi dengan datasheet modul PV 12V 3W

Parameter	Simulasi	Datasheet	Error (%)
Open circuit voltage (V)	13,5	13,2	2,27
Short circuit current (mA)	300	300	0
Power (W)	3,07	3	2,33



Gambar 3. Kurva I-V hasil simulasi modul PV 12V 3W polycrystalline silicon

Daya keluaran modul PV harian bervariasi mengikuti kondisi iradiasi matahari dan temperatur. Daya minimum 0,49W terjadi pada 3 November 2018 bersamaan dengan iradiasi minimum. Daya maksimum 1,79W tercatat pada 27 September 2018 dengan iradiasi  $573,67 \text{ W/m}^2$  dan temperatur  $28,6^\circ\text{C}$ . Rata-rata daya harian adalah 1,17W, nilai yang berada dibawah setengah daya puncak modul karena iradiasi rata-rata juga dibawah setengah iradiasi STC. Secara bulanan, daya terendah terjadi pada November (0,50W) dan tertinggi pada September (1,79W) sesuai dengan pola iradiasi matahari.

### Kecepatan Angin dan Daya Pembangkit Angin

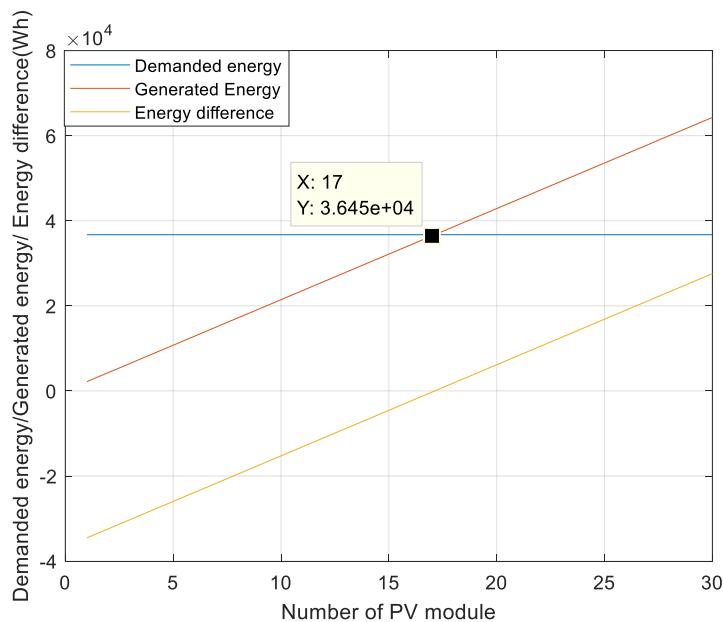
Kecepatan angin harian berkisar antara 0,43 m/s hingga 2,08 m/s dengan rata-rata 1,05 m/s. Nilai rata-rata ini tergolong sangat rendah menurut klasifikasi Irwanto et al. (2014), mengindikasikan bahwa Perlis tidak memiliki potensi baik untuk pembangkit listrik tenaga angin. Kecepatan minimum terjadi pada 22 September 2018 sedangkan maksimum pada 7 Desember 2018 selama periode monsun. Pola kecepatan angin harian menunjukkan variasi yang cukup besar namun secara keseluruhan tetap

dalam kategori sangat rendah. Secara bulanan, kecepatan angin terendah terjadi pada September dan tertinggi pada Desember yang bertepatan dengan musim monsun.

Dengan diameter bilah turbin 0,115m, daya yang dihasilkan sangat kecil yaitu minimum 0,00052W dan maksimum 0,057W dengan rata-rata harian 0,0098W. Nilai ini jauh dibawah kebutuhan praktis untuk sistem pembangkit listrik komersial. Fluktuasi daya pembangkit angin harian mengikuti pola kecepatan angin dengan hubungan kubik sesuai persamaan daya angin. Secara bulanan, daya terendah terjadi pada September dan tertinggi pada Desember sesuai dengan pola kecepatan angin.

### Sizing Optimal Sistem Hybrid

Kebutuhan energi harian untuk dua motor DC masing-masing 5W yang beroperasi 24 jam adalah konstan sebesar 240 Wh. Dengan kontribusi pembangkit angin yang sangat kecil, sistem dirancang menggunakan hanya satu turbin angin dan optimasi dilakukan pada jumlah modul PV. Total energi yang dibangkitkan oleh sistem hybrid PV/wind per hari merupakan penjumlahan dari energi satu modul PV yang beroperasi 12 jam per hari dan energi satu pembangkit angin yang beroperasi 24 jam per hari. Total energi harian berfluktuasi mengikuti kondisi cuaca terutama iradiasi matahari, temperatur, dan kecepatan angin.



Gambar 4. Optimasi jumlah modul PV

Perhitungan menunjukkan bahwa jumlah optimal modul PV adalah 17 unit untuk menyeimbangkan energi yang dibangkitkan dengan kebutuhan beban seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Dengan 17 modul PV, perbedaan energi antara pembangkitan dan kebutuhan mendekati nol, yang mengindikasikan sizing yang optimal. Sizing charge controller dihitung berdasarkan total arus hubung singkat 17 modul yang terhubung paralel yaitu  $17 \times 0,3\text{A} = 5,1\text{A}$ , kemudian dikalikan faktor keamanan 1,25 menghasilkan rating 6,38A. Jumlah baterai dihitung menggunakan persamaan dengan kapasitas baterai 1,2Ah, tegangan sistem 12V, days of autonomy 3 hari, dan depth of discharge 80%, menghasilkan kebutuhan 17 baterai yang dapat dirangkai seri-paralel sesuai konfigurasi sistem. Tabel 2 menunjukkan ringkasan sizing optimal seluruh komponen sistem.

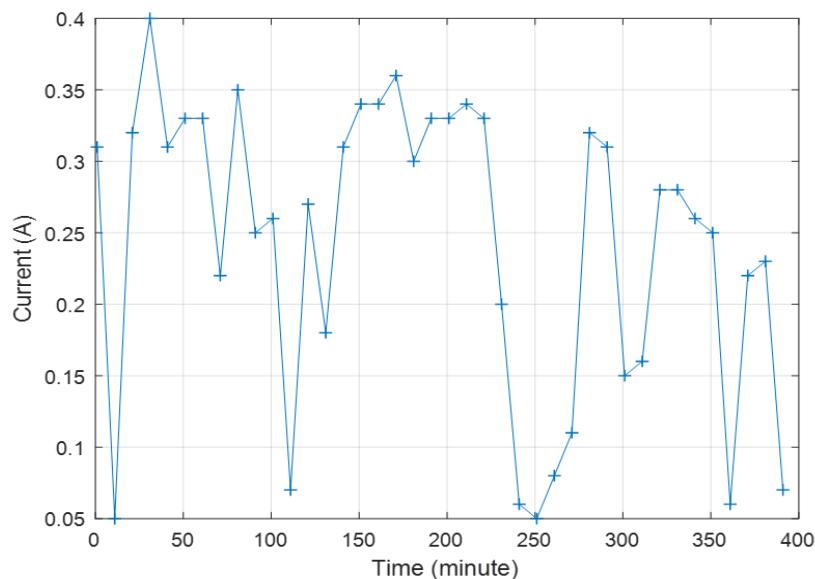
Table 2 Sizing optimal sistem hybrid PV/wind powered motor board

Jumlah Pembangkit Angin	Jumlah Modul PV	Sizing Charge Controller	Jumlah Baterai
1	17	6,38 A	17

### Hasil Pengujian Prototype

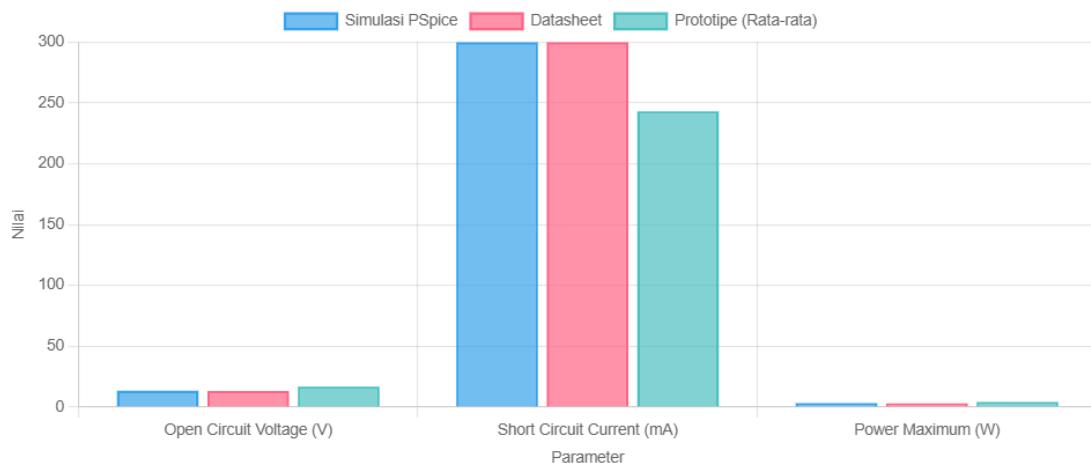
Prototype sistem berhasil diimplementasikan dengan ukuran yang disesuaikan dengan keterbatasan biaya. Sistem monitoring menggunakan mikrokontroler ATmega8535 dengan program yang telah di-burning menggunakan USB ISP. Rangkaian sistem terdiri dari bagian eliminasi untuk penyearah dan regulator tegangan 12V dengan arus hubung singkat 0,6A, serta bagian monitoring yang dilengkapi dengan port downloader untuk pemrograman mikrokontroler. Proses burning program ke mikrokontroler ATmega8535 dilakukan menggunakan USB ISP setelah program disimulasikan menggunakan Proteus dan ditransfer ke CodeVisionAVR.

Pengujian dilakukan selama lima hari dengan pengambilan data setiap 10 menit dari pukul 10:30 hingga 17:00. Hasil pengujian menunjukkan iradiasi matahari berkisar 107,5-893,6 W/m<sup>2</sup> dengan rata-rata 568,02 W/m<sup>2</sup>. Tegangan keluaran PV tanpa beban berkisar 13,42-19,61V dengan rata-rata 16,8V. Tegangan ini merupakan tegangan langsung dari modul PV sebelum terhubung dengan beban. Arus keluaran PV berkisar 0,05-0,4A dengan rata-rata 0,243A. Nilai-nilai ini mengkonfirmasi bahwa modul PV bekerja sesuai karakteristik yang diharapkan pada kondisi iradiasi aktual.

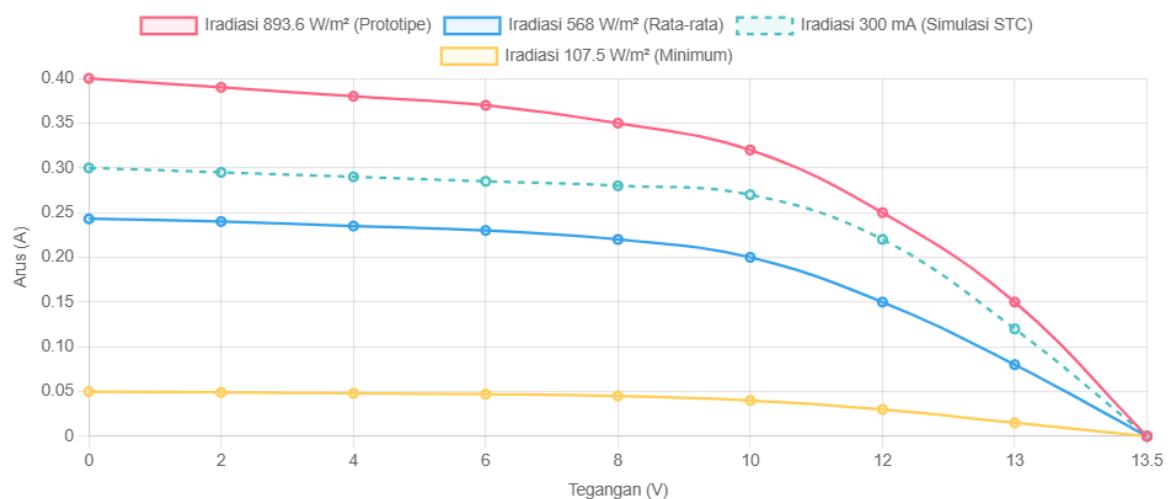


Gambar 5. Arus Keluaran Fotovoltaik (A)

Keterbatasan implementasi prototipe meliputi ukuran sistem yang dikurangi karena keterbatasan biaya, sehingga hanya menggunakan 3 modul PV dibandingkan dengan perancangan optimal 17 modul. Hal ini menyebabkan perbedaan antara hasil pengujian aktual dengan prediksi simulasi, terutama pada nilai tegangan rata-rata prototipe (16,8V) yang lebih tinggi dibandingkan simulasi STC (13,5V) karena kondisi iradiasi yang lebih tinggi selama pengujian (rata-rata 568,02 W/m<sup>2</sup>). Meskipun demikian, validasi model tetap dapat dilakukan dengan mempertimbangkan perbedaan kondisi operasi ini.



**Gambar 6. Perbandingan Hasil Simulasi PSpice vs Hasil Pengujian Prototipe**



**Gambar 7. Kurva Tegangan dan Arus pada Berbagai Kondisi Iradiasi**

## PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa Perlis memiliki potensi yang baik untuk pembangkitan energi menggunakan sistem PV dengan iradiasi rata-rata harian  $371,97 \text{ W/m}^2$  dan temperatur rata-rata  $28,06^\circ\text{C}$ . Nilai iradiasi ini masih berada diatas ambang batas minimum  $300 \text{ W/m}^2$  yang diperlukan untuk sistem PV, meskipun lebih rendah dari kondisi STC. Temperatur operasi yang relatif tinggi akan sedikit menurunkan efisiensi modul PV, namun dampaknya tidak signifikan dibandingkan dengan pengaruh iradiasi.

Validasi simulasi PSpice dengan persentase error dibawah 10% menunjukkan bahwa metode simulasi dapat diandalkan untuk memprediksi kinerja modul PV pada berbagai kondisi operasi. Hal ini penting untuk tahap perancangan sistem karena memungkinkan evaluasi kinerja tanpa harus melakukan pengujian fisik yang memakan waktu dan biaya. Model simulasi yang valid kemudian digunakan untuk menghitung output daya harian dengan memasukkan data iradiasi dan temperatur aktual.

Kontribusi pembangkit angin dalam sistem hybrid sangat kecil karena kecepatan angin rata-rata hanya  $1,05 \text{ m/s}$ , jauh dibawah kecepatan minimum yang diperlukan untuk pembangkit angin komersial. Daya rata-rata harian hanya  $0,0098 \text{ W}$  praktis tidak memberikan kontribusi signifikan terhadap total

energi sistem. Hasil ini mengindikasikan bahwa untuk wilayah Perlis, sistem standalone PV atau hybrid dengan sumber lain mungkin lebih efektif dibandingkan hybrid PV/wind. Namun, turbin angin tetap dipertahankan dalam desain untuk tujuan pembelajaran dan demonstrasi konsep sistem hybrid.

Perancangan optimal menghasilkan konfigurasi sistem dengan 17 modul PV, 1 turbin angin, charge controller 6,38A, dan 17 baterai 12V 1,2Ah. Jumlah modul PV yang cukup besar diperlukan karena output daya rata-rata per modul hanya 1,17W, sekitar 39% dari rating nameplate 3W. Hal ini disebabkan iradiasi rata-rata lokasi penelitian juga sekitar 37% dari iradiasi STC. Days of autonomy tiga hari dipilih untuk memastikan sistem dapat beroperasi selama periode cuaca buruk yang umum terjadi di wilayah tropis.

Implementasi prototype dengan monitoring berbasis mikrokontroler ATmega8535 memungkinkan pengambilan data real-time untuk evaluasi kinerja sistem. Hasil pengujian menunjukkan korelasi yang baik antara iradiasi matahari dengan tegangan dan arus keluaran PV. Pada iradiasi tinggi, tegangan open-circuit meningkat dan arus meningkat secara proporsional. Data pengujian ini dapat digunakan untuk validasi lebih lanjut terhadap model simulasi dan untuk optimasi strategi kontrol sistem.

Keterbatasan penelitian ini adalah periode pengumpulan data yang relatif singkat (lima bulan) sehingga belum mencakup variasi musiman secara lengkap. Selain itu, prototype dibuat dengan skala kecil karena keterbatasan biaya, sehingga tidak semua komponen sesuai dengan hasil perhitungan optimal. Untuk implementasi sistem skala penuh, diperlukan evaluasi ekonomi yang mencakup analisis biaya investasi, biaya operasional dan pemeliharaan, serta payback period.

## PENUTUP

Penelitian ini berhasil menganalisis potensi sumber energi dan merancang sistem hybrid PV/wind untuk aplikasi motor board di Perlis, Malaysia. Hasil menunjukkan bahwa Perlis memiliki potensi baik untuk sistem PV dengan iradiasi rata-rata 371,97 W/m<sup>2</sup> dan temperatur 28,06°C, namun potensi angin sangat rendah dengan kecepatan rata-rata hanya 1,05 m/s. Perancangan optimal menghasilkan sistem dengan 17 modul PV, 1 turbin angin, charge controller 6,38A, dan 17 baterai untuk mensuplai beban 10W selama 24 jam. Prototype sistem dengan monitoring mikrokontroler ATmega8535 berhasil diimplementasikan dan diuji dengan hasil yang memvalidasi model simulasi.

Penelitian ini memiliki keterbatasan pada periode pengumpulan data yang belum mencakup satu tahun penuh dan ukuran prototype yang dikurangi karena keterbatasan biaya. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk melakukan pengumpulan data minimal satu tahun penuh untuk mencakup variasi musiman, melakukan analisis ekonomi komprehensif untuk evaluasi kelayakan investasi, mengeksplorasi konfigurasi hybrid dengan sumber energi terbarukan lain yang lebih sesuai dengan kondisi lokal, dan mengimplementasikan strategi kontrol MPPT untuk meningkatkan efisiensi sistem.

## REFERENSI

- Daut, I., Irwanto, M., Irwan, Y. M., Gomesh, N., & Ahmad, N. S. (2011). Combination of Hargreaves method and linear regression as a new method to estimate solar radiation in Perlis, Northern Malaysia. *Solar Energy*, 85(11), 2871-2880.
- Irwanto, M., Gomesh, N., Mamat, M. R., & Yusoff, Y. M. (2014). Assessment of wind power generation potential in Perlis, Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 296-308.
- Kalantar, M., & Mousavi, S. M. (2010). Dynamic behavior of a stand-alone hybrid power generation system of wind turbine, microturbine, solar array and battery storage. *Applied Energy*, 87(10), 3051-3064.
- Kumar, R., & Kumar, A. (2021). Solar and wind power generation systems: A review. *Materials Today: Proceedings*, 46, 5234-5239.

- Olatomiwa, L., Mekhilef, S., Ismail, M. S., & Moghavvemi, M. (2016). Energy management strategies in hybrid renewable energy systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 821-835.
- Alnaimi, F. B. I., Kazem, H. A., Alzakri, A. B., & Alatir, A. M. (2024). Design and implementation of smart integrated hybrid Solar-Darrieus wind turbine system for in-house power generation. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, 9(2), 1-15.
- Awan, M. M. A., Javed, M. Y., Asghar, A. B., & Ejsmont, K. (2022). Performance optimization of a ten check MPPT algorithm for an off-grid solar photovoltaic system. *Energies*, 15(6), 2104.
- Elkazaz, M., Sumner, M., & Thomas, D. (2020). Energy management system for hybrid PV-wind-battery microgrid using convex programming, model predictive and rolling horizon predictive control with experimental validation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 115, 105483.
- Kumar, J. C. R., & Majid, M. A. (2023). Advances and development of wind-solar hybrid renewable energy technologies for energy transition and sustainable future in India. *Energy & Environment*, 35(2), 845-872.
- Ludwig, D., Breyer, C., Solomon, A. A., & Seguin, R. (2020). Evaluation of an onsite integrated hybrid PV-Wind power plant. *AIMS Energy*, 8(5), 988-1006.
- Mishra, S., Pullaguram, D., Buragappu, S. A., & Ramasubramanian, D. (2023). A review of hybrid renewable energy systems: Solar and wind-powered solutions: Challenges, opportunities, and policy implications. *Results in Engineering*, 20, 101621.
- Naderipour, A., Abdul-Malek, Z., Ramachandaramurthy, V. K., Kalam, A., & Miveh, M. R. (2022). Hierarchical control strategy for a three-phase 4-wire microgrid under unbalanced and nonlinear load conditions. *ISA Transactions*, 127, 123-135.
- Rahman, M. M., Hashem, M. A., & Hasan, M. N. (2024). The performance of a solar panel with maximum power point tracking (MPPT) system. *European Journal of Energy Research*, 4(1), 1-4.
- Saeed, M. A., Ahmed, M., Irshad, M., & Islam, M. S. (2024). Optimal control and optimization of grid-connected PV and wind turbine hybrid systems using electric eel foraging optimization algorithms. *Energies*, 17(8), 1923.
- Yang, B., Wang, J., Zhang, X., Yu, T., Yao, W., Shu, H., ... & Sun, L. (2022). Recent advances of wind-solar hybrid renewable energy systems for power generation: A review. *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*, 9, 12-27.
- Zhao, Y., Xiang, C., Liu, Y., Chen, Y., & Xu, X. (2024). Experimental validation of a low-cost maximum power point tracking technique based on artificial neural network for photovoltaic systems. *Scientific Reports*, 14, 17856.