



Optimalisasi Turbin Angin Savonius Vertikal Berbasis MPPT Algoritma *Perturb and Observe* (P&O) sebagai Suplai Sistem Pemanas Air di Kapal

Aryo Dwi Pinanggola^{1*}, Henna Nurdiansari², Maulidiah Rahmawati³

¹⁻³ Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Kelistrikan Kapal, Politeknik Pelayaran Surabaya, Indonesia

E-mail: aryom193@gmail.com ^{1*}

Alamat : Jl. Gunung Anyar Lor No.1, Gn. Anyar, Kec. Gn. Anyar, Surabaya, Jawa Timur 60294

*Penulis Korespondensi

Abstract. As an archipelagic country, Indonesia has significant potential for the utilization of renewable energy, particularly wind energy in maritime areas with low wind speeds (3–6 m/s). This study aims to design and test a vertical Savonius wind turbine system equipped with a *Perturb and Observe* (P&O) Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithm as a power source for shipboard water heating systems. The research method applied is Research and Development (R&D), integrating several components such as a DC generator, full-wave bridge rectifier, INA219 current sensor, anemometer cup sensor, ESP32 microcontroller, and a monitoring interface utilizing Google Spreadsheet and a 20x4 LCD. The system was tested under two operating conditions: without MPPT and with MPPT. The experimental results show that the application of the MPPT algorithm successfully increased power output by up to 272.64% while maintaining voltage stability despite varying wind speeds. Nevertheless, the average output power of 2.605 W remained insufficient to meet water heating requirements within a short time. For example, charging a 12V 50Ah battery would require approximately 9.6 consecutive days of operation, highlighting the system's limitations in high-demand scenarios. Despite these constraints, the findings demonstrate that the vertical Savonius wind turbine integrated with MPPT has strong potential as a clean and environmentally friendly alternative energy solution for maritime applications, particularly for small-scale onboard electrical loads. This study contributes to renewable energy utilization in the shipping sector and provides a foundation for further technological development and optimization.

Keywords: ESP32; MPPT; P&O; Renewable Energy; Savonius Wind Turbine; Ship Water Heater.

Abstrak. Sebagai negara kepulauan, Indonesia memiliki potensi yang signifikan dalam pemanfaatan energi terbarukan, khususnya energi angin di wilayah maritim dengan kecepatan angin rendah (3–6 m/s). Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menguji sistem turbin angin vertikal tipe Savonius yang dilengkapi dengan algoritma Maximum Power Point Tracking (MPPT) *Perturb and Observe* (P&O) sebagai sumber energi untuk sistem pemanas air di kapal. Metode penelitian yang digunakan adalah Research and Development (R&D), dengan mengintegrasikan beberapa komponen seperti generator DC, penyearah jembatan gelombang penuh, sensor arus INA219, sensor anemometer cup, mikrokontroler ESP32, serta sistem pemantauan berbasis Google Spreadsheet dan LCD 20x4. Sistem diuji dalam dua kondisi operasi: tanpa MPPT dan dengan MPPT. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penerapan algoritma MPPT mampu meningkatkan daya keluaran hingga 272,64% serta menjaga kestabilan tegangan meskipun terjadi fluktuasi kecepatan angin. Namun demikian, rata-rata daya keluaran sebesar 2,605 Watt masih belum mencukupi untuk memenuhi kebutuhan pemanas air dalam waktu singkat. Sebagai contoh, proses pengisian baterai 12V 50Ah memerlukan sekitar 9,6 hari operasi secara terus-menerus, sehingga menunjukkan adanya keterbatasan pada skenario kebutuhan energi tinggi. Meskipun demikian, hasil penelitian ini membuktikan bahwa turbin angin Savonius vertikal yang terintegrasi dengan MPPT memiliki potensi besar sebagai solusi energi alternatif yang ramah lingkungan untuk aplikasi kelistrikan di kapal, khususnya pada beban listrik skala kecil. Penelitian ini memberikan kontribusi terhadap pemanfaatan energi terbarukan di sektor maritim serta menjadi dasar bagi pengembangan dan optimasi teknologi lebih lanjut.

Kata Kunci: Energi Terbarukan; ESP32; MPPT; P&O; Pemanas Air Kapal; Turbin Angin Savonius.

1. PENDAHULUAN

Indonesia sebagai negara kepulauan terbesar di dunia, dengan lebih dari 17.000 pulau dan garis pantai sepanjang 95.000 km (Kementrian Perhubungan, 2020), Menjadikan armada laut memainkan peranan penting dalam distribusi barang, transportasi penumpang, dan kegiatan ekonomi. Dalam operasionalnya, kapal membutuhkan sistem yang efisien dan ramah lingkungan, khususnya untuk kebutuhan domestik seperti pemanas air. Namun, pemanas air konvensional yang masih menggunakan bahan bakar fosil berdampak pada meningkatnya biaya operasional dan emisi karbon, sehingga diperlukan alternatif yang lebih berkelanjutan.

Salah satu pendekatan yang telah banyak dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi sistem pemanas air adalah penerapan *Phase Change Material* (PCM). PCM dapat diterapkan pada berbagai jenis pemanas air, yang menggunakan berbagai konstruksi dan material tanki penyimpanan panas. Untuk mengurangi emisi karbon dan biaya operasional, *Paraffin Wax* dan pasir silika dapat digunakan sebagai media penyimpan panas. *Paraffin Wax* adalah senyawa hidrokarbon padat hasil pemurnian minyak bumi dengan titik leleh stabil dan kapasitas panas laten tinggi, sedangkan pasir silika (SiO_2) merupakan material kristalin dengan konduktivitas termal tinggi yang berfungsi sebagai bahan aditif untuk mempercepat perpindahan panas. Penerapan PCM bermaterial *paraffin wax* dan pasir silika akan menjadi pengembangan alat pada pengujian ini yang akan diterapkan pada sistem pemanas air, khususnya diterapkan dikapal (Sharma et al., 2009).

Beberapa penelitian sebelumnya telah mencoba menjawab tantangan pemanas air ramah lingkungan di kapal. Rega Ardian Syah (2013) merancang sistem pemanas air berbasis solar water heater dikapal penumpang, yang dinilai efisiensi tetapi sangat bergantung pada intensitas cahaya matahari. Di sisi lain, (Herlambang et al., 2020) mengkaji potensi turbin angin Savonius sebagai pembangkit listrik di wilayah laut dengan kecepatan angin rendah, dan terbukti mampu bekerja stabil dalam kondisi angin tak menentu. Untuk meningkatkan efisiensi konversi daya, Wahyudi (2021) menyarankan penggunaan algoritma MPPT Perturb and Observe, yang dapat meningkatkan efisiensi daya keluaran turbin angin secara signifikan. Penelitian-penelitian ini menjadi acuan sekaligus pembanding dalam mengembangkan sistem pemanas air alternatif berbasis energi angin pada kapal.

Namun, pendekatan-pendekatan tersebut umumnya masih bergantung pada pemanas langsung dari energi surya, yang tidak selalu tersedia secara merata di laut, terutama saat malam hari atau kondisi mendung. Oleh karena itu, dibutuhkan sistem alternatif yang mampu menghasilkan energi pemanfaatan energi angin sebagai sumber energi terbarukan, terutama di wilayah perairan Indonesia yang memiliki kecepatan angin rendah, yaitu sekitar 3–6 m/s

(Herlambang et al., 2020) Salah satu teknologi yang sesuai untuk kondisi tersebut adalah turbin angin Savonius tipe vertikal, yang dirancang untuk menangkap angin dari berbagai arah dan beroperasi pada kecepatan rendah, Secara aerodinamis, Savonius adalah turbin tipe vertikal yang memiliki bentuk blade seperti huruf “S” dan jenisnya terdiri dari 1 blade sampai 4 blade.

Untuk meningkatkan efisiensi turbin angin, diperlukan teknologi Maximum Power Point Tracking (MPPT) berbasis algoritma Perturb and Observe (P&O). Teknologi ini mampu meningkatkan efisiensi sistem hingga 20–30% dengan memastikan daya keluaran berada pada titik maksimum, dan tetap stabil (Jurnal rekayasa mesin, 2021). Dengan penerapan MPPT, daya listrik yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius dapat dimanfaatkan secara lebih optimal.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Energi Terbarukan dan Turbin Angin

Energi terbarukan merupakan energi yang berasal dari sumber daya alam yang dapat diperbarui secara alami dalam jangka waktu yang relative singkat, seperti matahari, angin, air, dan biomassa. Pemanfaatan energi terbarukan menjadi Solusi utama dalam menghadapi krisis energi dan dampak negatif penggunaan energi fosil. Menurut (Wicaksono et al., 2023), Pembangkit Listrik tenaga Bayu (PLTB) merupakan salah satu bentuk pemanfaatan energi terbarukan yang potensial dikembangkan di Indonesia karena memiliki potensi kecepatan angin yang cukup stabil di beberapa wilayah Indonesia.

Turbin angin Savonius *Double Blade*

Turbin angin Savonius *Double Blade* adalah jenis turbin angin dengan sumbu vertikal yang dirancang khusus untuk dapat beroperasi pada kecepatan angin rendah. Turbin ini memiliki rotor yang tersusun tegak lurus, memungkinkan konversi energi angin menjadi energi listrik secara efisien pada kondisi angin yang tidak terlalu kencang. Kelebihan utama dari turbin Savonius adalah kemampuannya untuk menangkap energi angin bahkan pada kecepatan yang lebih rendah dibandingkan dengan turbin angin jenis lainnya (Herlambang et al., 2020)

Generator DC

Generator DC adalah perangkat elektromekanis yang mengubah energi gerak (mekanik) menjadi energi listrik searah (DC) melalui prinsip induksi elektromagnetik. Generator ini terdiri dari kumparan yang berputar dalam medan magnet, di mana tegangan searah dihasilkan melalui komutator yang terhubung ke *brush*. Salah satu keunggulan utama generator DC adalah kemampuannya untuk menghasilkan tegangan pada kecepatan putaran rendah (*low RPM*), sehingga cocok digunakan dalam sistem pembangkit tenaga angin dengan turbin berputaran lambat seperti Savonius (Susanto & Perdamean Sebayang, 2018)

Full-Wave Bridge Rectifier

Full-Wave Bridge Rectifier adalah konfigurasi dari empat diode penyearah yang dirangkai untuk mengonversi seluruh siklus tegangan AC menjadi DC. Konfigurasi ini memungkinkan dua diode aktif disetiap siklus, sehingga arus DC yang dihasilkan lebih stabil dan efisien. Dalam penelitian ini, *Full-Wave Bridge Rectifier* dimodifikasi dari empat *Diode Rectifier* yang disusun pada PCB. Penggunaan Bridge Rectifier ini penting pada Turbin Angin yang berfungsi untuk menjaga pada arus DC yang disalurkan pada MPPT disaat putaran Turbin Angin terbalik(Petrović & Tatović, 2025).

Sensor INA219

Sebagaimana Sensor INA219 alat pengukur arus dan tegangan digital pada sisi positif, menggunakan resistor shunt dan antarmuka I²C dengan resolusi 12-bit. Sensor ini dapat mengukur arus hingga 3,2A dan tegangan hingga 26V dengan akurasi tinggi 0,5-1% serta konsumsi daya rendah(Hareendran, 2021). Dalam penelitian “*Energy efficiency investigation of sun-path tracker system*” (2025), empat unit INA219 digunakan secara bersamaan pada rangkaian ESP32, menunjukkan kemampuan sensor ini dalam pemantauan daya secara *real-time* pada sistem energi terbarukan(Abdellatif et al., 2025).

Maximum Power Point Tracking (MPPT)

MPPT sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.5 adalah metode yang digunakan *Perturb and Observe* untuk mengoptimalkan ekstraksi daya dari Turbin angin. MPPT berfungsi untuk menemukan titik daya maksimum yang bervariasi seiring dengan perubahan Tegangan yang dihasilkan dari Turbin angin. Dengan menggunakan algoritma *Perturb and Observe*, sistem dapat menyesuaikan operasinya untuk mencapai efisiensi maksimum, sehingga meningkatkan total daya yang dihasilkan oleh sistem *Perturb* dan dimonitoring oleh sistem *Observe*(Ananda et al., 2024).

Baterai Lithium-ion

Baterai adalah perangkat yang menyimpan energi listrik yang dihasilkan oleh Turbin angin, berfungsi untuk menyediakan pasokan listrik saat dibutuhkan. Baterai memerlukan tegangan yang cukup agar dapat terisi dengan baik, sehingga sistem MPPT diperlukan untuk menjaga agar tegangan keluaran dari Turbin angin tetap di atas batas minimum yang diperlukan untuk pengisian(Saputro et al., 2019).

Sensor Anemometer Cup

Sensor Anemometer Cup alat ukur yang digunakan dalam bidang meteorologi dan energi angin. Sensor ini terdiri dari 3 cangkir kecil yang dipasang secara simetris pada poros vertikal. Yang akan berputar ketika tertiup angin. Kecepatan rotasi ini dikonversi menjadi frekuensi sinyal pulsa digital, dan digunakan untuk menghitung kecepatan angin. Sensor ini tetap populer karena menawarkan kombinasi terbaik antara akurasi, biaya rendah, ketahanan, dan keandalan, dibandingkan dengan jenis anemometer lain seperti sonic, LIDAR, atau SODAR(Alfonso-Corcuera et al., 2022)

Step Down DC LM2596

Step-down adalah konverter DC-DC yang berfungsi untuk mengurangi tegangan dari tingkat yang lebih tinggi ke tingkat yang lebih rendah. Juga dikenal sebagai buck converter, perangkat ini mengonversi tegangan input menjadi tegangan output yang lebih sesuai dengan kebutuhan sistem, dengan efisiensi tinggi. Di dalam sistem pembangkit listrik tenaga angin, konverter step-down sangat penting untuk memastikan energi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan secara efektif oleh komponen lain, seperti baterai dan beban .(Saputro et al., 2019)

ESP32

ESP32 adalah sebuah mikrokontroler yang dikembangkan oleh Espressif Systems, yang dirancang untuk aplikasi Internet of Things (IoT). Mikrokontroler ini memiliki keunggulan berupa konektivitas Wi-Fi dan Bluetooth, serta dilengkapi dengan banyak pin GPIO, yang memungkinkan pengguna untuk menghubungkan berbagai perangkat dan sensor. Kecepatan clock yang tinggi dan kemampuan pemrograman yang fleksibel juga menjadikannya pilihan populer untuk proyek-proyek berbasis IoT.

Konverter *Transistor-Transistor Logic* (TTL) to RS-485

Konverter TTL to RS-485 yang berfungsi sebagai pengubah sinyal level logika TTL menjadi sinyal diferensial RS-485. Konversi ini dibutuhkan karena sinyal TTL hanya cocok digunakan untuk komunikasi jarak dekat, sedangkan RS-485 lebih tahan terhadap gangguan dan dapat digunakan untuk komunikasi jarak jauh. RS-485 bekerja menggunakan dua jalur sinyal secara diferensial, sehingga lebih andal dibanding sinyal TTL yang bersifat *single-ended*. Dalam perancangan sistem, konverter ini berfungsi sebagai Penghubung antara mikrokontroler dengan perangkat komunikasi RS-485, agar data dapat dikirimkan dengan lebih stabil(Claudio Sansoè Ing Luca Bongiovanni, 2024).

Google Spreadsheet

Spreadsheet merupakan aplikasi pengelola data berbasis cloud yang dapat dimanfaatkan sebagai sistem monitoring data secara *real-time*. Dalam sistem berbasis mikrokontroler, Spreadsheet digunakan untuk menampilkan data lain secara langsung dan fleksibel. Penggunaan Google Spreadsheet sebagai media monitoring memungkinkan pengguna untuk mengakses data dari jarak jauh, serta memantau kondisi perangkat atau sistem secara terus menerus melalui jaringan internet (Zealita et al., 2025).

Liquid Crystal Display (LCD) 20x4

Liquid Crystal Display (LCD) 20x4, adalah jenis tampilan elektronik yang dirancang untuk menampilkan informasi dalam format teks. Layar ini dapat menampilkan hingga 20 karakter dalam tiap baris, sehingga total dapat menampilkan 80 karakter dalam 4 baris sekaligus. LCD bekerja dengan memanfaatkan Cahaya yang dipancarkan atau dipantulkan, dan sering digunakan dalam berbagai aplikasi elektronik untuk menunjukkan data secara visual. Dalam sistem yang menggunakan modul MPPT, LCD berfungsi untuk menampilkan informasi penting seperti tegangan, arus, dan daya yang dihasilkan oleh Turbin angin, sehingga memudahkan pengguna dalam memantau kinerja sistem secara *real-time*. (Seminar Hasil Elektro S1 ITN Malang, n.d.)

3. METODE PENELITIAN

Karya tulis Ilmiah ini menggunakan metode penelitian *Research and Development (R&D)* sebagai pendekatan utama dalam penelitian ini. Pengujian pada penelitian ini menggunakan pengujian statis dan dinamis. Pengujian statis dilakukan untuk memastikan bahwa seluruh komponen yang dijalankan bekerja dengan baik sebelum dilakukan integrasi sistem dan pengujian dinamis. Komponen yang di uji pada tahap ini mencakup, generator DC 12V, sensor Anemometer. Pengujian dinamis dilakukan untuk mengetahui kinerja sistem turbin angin Savonius dalam kondisi lingkungan nyata, baik dengan maupun tanpa menggunakan MPPT, dan ditambahkan dengan pengujian charger baterai yang dilakukan dengan dan tanpa MPPT. Pengujian dilakukan secara langsung dengan mencatat dari spreadsheet dan multimeter untuk mengetahui perubahan kecepatan angin, tegangan serta arus dengan keluaran sistem secara *real-time* dan manual.

4. HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

Pengujian Statis

Pengujian Turbin Angin

Pengujian turbin angin tersambung dengan Generator DC yang berfungsi sebagai sumber pembangkit listrik dari konversi energi kinetik angin oleh turbin, metode pengujian ini dilakukan dengan blower untuk mensimulasikan hembusan dan juga membutuhkan multimeter digital yang dihubungkan pada katub positif dan negatif dari generator DC untuk menentukan data tegangan yang diamati pada beban kosong, Pada pengujian ini generator DC berfungsi dengan semestinya.

Tabel 1. Pengujian Generator DC 12V.

Percobaan	Anemometer	Voltage Input (V)	Keterangan Angin
1	2.34 Knot	11.28	Lemah
2	2.54 Knot	11.64	Lemah
3	3.00 Knot	11.85	Sedang
4	3.34 Knot	12.07	Sedang
5	3.80 Knot	12.24	Kuat
6	4.34 Knot	12.78	Kuat

Pengujian Sensor Anemometer

Sensor anemometer berfungsi untuk membaca kecepatan angin dengan sinyal pulsa yang dikirim pada ke ESP32 dengan satuan Knot. Pada pengujian ini, untuk mengetahui hasil dari sensor anemometer membutuhkan ESP 32 untuk disambungkan pada layar LCD dengan data hasil yang ditampilkan dengan rata-rata kecepatan angin hingga 2-3knot, Pada pengujian ini Anemometer berfungsi dengan baik.

Tabel 2. Pengujian Anemometer Ditampilkan Pada LCD.

Percobaan	Anemometer	Keterangan Angin
1	2.34 Knot	Lemah
2	2.54 Knot	Lemah
3	3.00 Knot	Sedang
4	3.34 Knot	Sedang
5	3.80 Knot	Kuat

Pengujian MPPT

Pada sistem ini MPPT berfungsi untuk menstabilkan dan menghasilkan titik maksimum tegangan dari output Turbin angin. MPPT juga dapat membaca arus dari output turbin angin, pada pengujian ini dilakukan dengan cara menyambungkan output dari generator DC 12V pada kutub positif dan negative MPPT yang bergambar solar panel, dengan hasil yang ditampilkan pada layar MPPT menunjukkan 12,7V, Sebagaimana Pengujian MPPT ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Pengujian MPPT.

Sumber: Dokumentasi Penelitian

Pengujian Baterai

Pada sistem ini Baterai berfungsi untuk menyimpan daya yang dihasilkan dari Turbin angin. Pada pengujian ini bertujuan menentukan kapasitas baterai dan berfungsi dengan baik. Pengujian dilakukan dengan mengukur kapasitas tegangan baterai menggunakan multimeter digital dengan kemampuan *voltage* sebesar 12.74V.



Gambar 2. Pengujian Baterai.

Sumber: Dokumentasi Penelitian

Pengujian Full-Wave Bridge Rectifier

Rangkaian penyearah gelombang penuh dengan konfigurasi Diode Bridge telah dimodifikasi untuk memperbaiki kestabilan tegangan input ke rangkaian regulator DC. Pengujian dilakukan menggunakan multimeter digital untuk mengukur tegangan DC keluran dari Diode Bridge setelah proses penyearah dari sumber AC adaptor. Pada pengujian dilakukan menggunakan multimeter digital untuk mengetahui pada putaran turbin angin jika putarannya terbalik maka tegangan DC tetap masuk pada MPPT. Pada pengujian ini hasil pengukuran menunjukkan tegangan DC sebesar 11.51V, yang berarti rangkaian penyearah telah bekerja secara optimal.



Gambar 3. Pengujian Full-Wave Bridge Rectifier.

Sumber: Dokumentasi Penelitian

Pengujian LCD

LCD 20x4 digunakan sebagai media untuk menampilkan data tegangan dan status sistem. Modul ini dikendalikan melalui protocol I2C yang disambungkan ke mikrokontroler ESP32. Pengujian dilakukan untuk memastikan tampilan bekerja secara normal, termasuk format teks dan respons terhadap perintah dari mikrokontroler. Hasil pada pengujian ini LCD dapat menyala dan menampilkan data sesuai program, tidak ditemukan karakter error ataupun pixel mati, LCD berjalan sebagaimana mestinya.

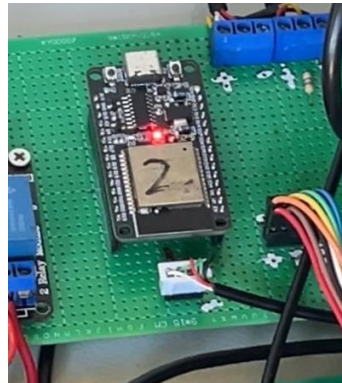


Gambar 4. Pengujian LCD.

Sumber: Dokumentasi Penelitian

Pengujian ESP32

Pada sistem ini ESP 32 menjadi pusat kendali utama yang dapat mengatur dan pembaca sensor. Pada pengujian ini ditandai lampu indikator LED menyala dikarenakan tegangan yang dihasilkan dari baterai 12V dihubungkan melalui *stepdown* menjadi 5V yang akan menjadi power ESP32 sehingga berjalan dengan semestinya. Berikut Esp32 sebagaimana ditunjukkan pada gambar 5.

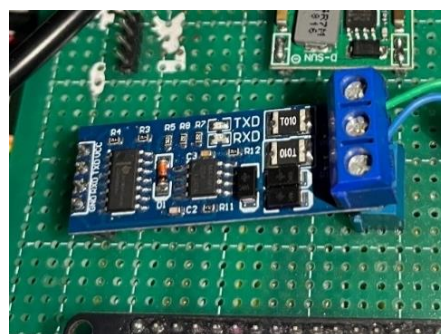


Gambar 5. Pengujian ESP32.

Sumber: Dokumentasi Penelitian

Pengujian Konverter Transistor-Transistor Logic (TTL) to RS-485

Pada sistem ini Konverter TTL RS-485 menghubungkan komunikasi antara ESP32 dan perangkat penerima menggunakan protokol RS-485. ESP32 dihubungkan dengan modul TTL to RS-485, dan perangkat dapat monitoring melalui *Spreadsheet* berbasis aplikasi/web agar data tegangan dan arus dapat dikirim dan ditampilkan secara *real-time*. Pengujian diambil dari record spreadsheet secara real-time. Berikut Konverter transistor-transistor Logic ditunjukan pada gambar 6 & 7.



Gambar 6. Pengujian Konverter TTL to RS-485.

Sumber: Dokumentasi Penelitian

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Date & Time	Input Voltage	Input Current	Battery Voltage	Battery Current	Temperature	AC Voltage	AC Current	AC Power	Knot	Lux
2	7/3/2025 12:10:18	12.86	0.00	12.69	0.00	29.06	0.00	0.05	0.00	04.07	0.00
3	7/3/2025 12:10:31	12.90	0.00	12.69	0.00	29.07	0.00	0.11	0.00	3.80	0.00
4	7/3/2025 12:10:45	12.82	0.00	12.71	0.00	29.06	0.00	0.06	0.00	04.07	0.00
5	7/3/2025 12:10:59	12.69	0.00	12.71	0.00	29.08	0.00	0.16	0.00	4.34	0.00
6	7/3/2025 12:11:13	12.86	0.00	12.69	0.00	29.08	0.00	0.09	0.00	3.80	0.00
7	7/3/2025 12:11:27	12.78	0.00	12.69	0.00	29.09	0.00	0.12	0.00	4.34	0.00
8	7/3/2025 12:11:41	12.73	0.00	12.69	0.00	29.09	0.00	0.10	0.00	3.80	0.00
9	7/3/2025 12:11:54	12.07	0.00	12.69	0.00	29.10	0.00	0.00	0.00	04.07	0.00
10	7/3/2025 12:12:08	11.62	0.00	12.69	0.00	29.12	0.00	0.00	0.00	04.07	0.00
11	7/3/2025 12:12:21	11.70	0.00	12.69	0.00	29.13	0.00	0.02	0.00	3.54	0.00
12	7/3/2025 12:12:35	12.49	0.00	12.69	0.00	29.11	0.00	0.00	0.00	3.80	0.00
13	7/3/2025 12:12:48	12.94	0.00	12.69	0.00	29.11	0.00	0.17	0.00	3.80	0.00
14	7/3/2025 12:13:02	12.28	0.00	12.69	0.00	29.11	0.00	0.02	0.00	3.80	0.00
15	7/3/2025 12:13:16	12.53	0.00	12.69	0.00	29.11	0.00	0.03	0.00	3.80	0.00
16	7/3/2025 12:13:29	12.90	0.00	12.69	0.00	29.11	0.00	0.07	0.00	3.54	0.00
17	7/3/2025 12:13:43	12.57	0.00	12.69	0.00	29.11	0.00	0.03	0.00	3.80	0.00
18	7/3/2025 12:13:57	12.73	0.00	12.69	0.00	29.11	0.00	0.10	0.00	3.54	0.00
19	7/3/2025 12:14:10	12.98	0.00	12.69	0.00	29.12	0.00	0.70	0.00	3.54	0.00
20	7/3/2025 12:14:24	12.78	0.00	12.69	0.00	29.12	0.00	0.06	0.00	3.80	0.00
21	7/3/2025 12:14:38	12.61	0.00	12.69	0.00	29.11	0.00	0.02	0.00	3.54	0.00
22	7/3/2025 12:14:52	12.82	0.00	12.69	0.00	29.11	0.00	0.02	0.00	3.54	0.00
23	7/3/2025 12:15:06	12.36	0.00	12.69	0.00	29.11	0.00	0.00	0.00	3.80	0.00
24	7/3/2025 12:15:19	12.45	0.00	12.69	0.00	29.12	0.00	0.02	0.00	3.80	0.00

Gambar 7. Tampilan Google Spreatsheet.*Sumber: Dokumentasi Penelitian*

Pengujian Dinamis

Pengujian tanpa MPPT

Pada konfigurasi ini, generator DC langsung dihubungkan ke Multimeter tanpa melalui modul MPPT. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa tegangan dan daya bersifat fluktuatif terhadap perubahan kecepatan angin, sebagaimana Pengujian Tanpa MPPT ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Pengujian Tanpa MPPT.

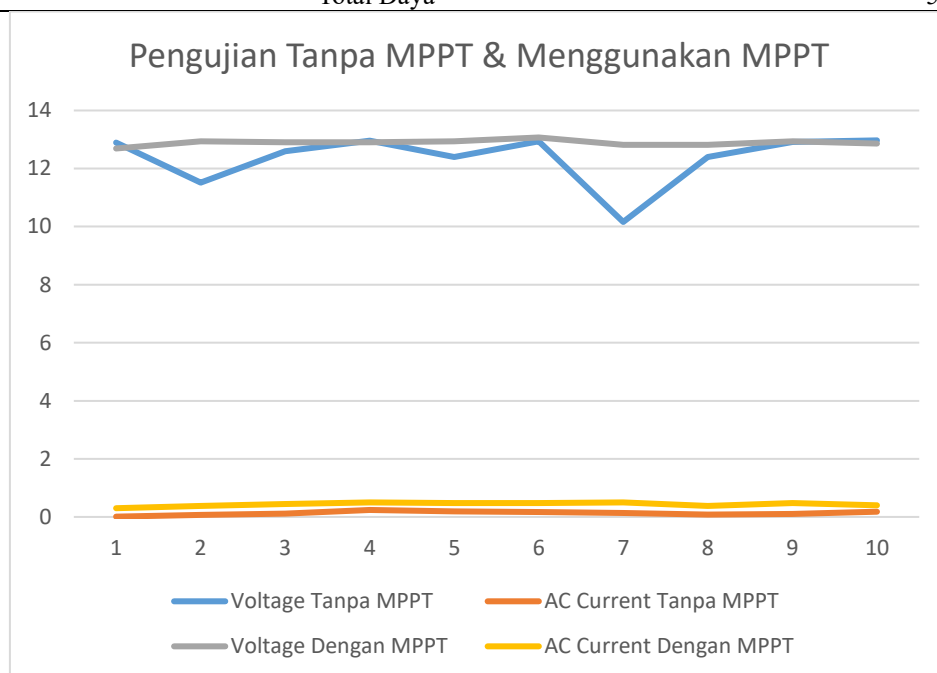
NO	Tanpa MPPT					
	Time	Knot	m/s	Input Voltage (V)	Input Current (I)	Daya (Watt)
1	13:52:00	3.80	1.95	12.89	0,01	0.13
2	13:53:09	3.54	1.82	11.51	0,07	0.80
3	13:53:50	3.54	1.82	12.60	0,11	1.39
4	13:54:17	3.80	1.95	12.96	0,24	3.11
5	13:54:59	3.80	1.95	12.40	0,19	2.36
6	13:55:29	3.80	1.95	12.94	0,17	2.20
7	13:56:51	3.54	1.82	10.16	0,14	1.42
8	13:57:04	3.80	1.95	12.40	0,08	1.02
9	13:58:13	3.80	1.95	12.91	0,10	1.29
10	13:58:53	3.54	1.82	12.97	0,18	2.33
Total daya						15.05

Pengujian Menggunakan MPPT

Dalam konfigurasi ini, generator DC terhubung ke MPPT yang berfungsi untuk menjaga agar sistem tetap bekerja di titik daya maksimum. Hasil pengujian menunjukkan tegangan lebih stabil, dan daya yang dihasilkan lebih optimal karena MPPT menyesuaikan arus dan tegangan agar berada di titik kerja maksimum, Ditunjukkan pada Tabel 4. untuk Pengujian Menggunakan MPPT.

Tabel 4. Pengujian Menggunakan MPPT.

Menggunakan MPPT						
NO	Time	Knot	m/s	Input Voltage(V)	Input Current(I)	Daya (Watt)
1	13:52:00	3.80	1.95	12.69	0.30	3.81
2	13:53:09	3.54	1.82	12.94	0.38	4.91
3	13:53:50	3.54	1.82	12.90	0.45	5.80
4	13:54:17	3.80	1.95	12.90	0.50	6.45
5	13:54:59	3.80	1.95	12.94	0.48	6.21
6	13:55:29	3.80	1.95	13.07	0.48	6.27
7	13:56:51	3.54	1.82	12.82	0.50	6.41
8	13:57:04	3.80	1.95	12.82	0.38	4.87
9	13:58:13	3.80	1.95	12.94	0.48	6.21
10	13:58:53	3.54	1.82	12.86	0.40	5.14
Total Daya						56.08



Gambar 8. Grafik Pengujian Tanpa MPPT & MPPT.

Sumber: Dokumentasi Penelitian

Analisis data pengujian yang dilakukan tanpa menggunakan MPPT menunjukkan bahwa daya yang diperoleh turbin angin pada jam 13:52:00 WIB sampai dengan 13:58:53 WIB dengan total yaitu 15.05 Watt dengan rata-rata kecepatan angin 3.54 knot (1.82 m/s) sampai dengan 38.80 knot (1.95 m/s), sedangkan analisis data daya yang dihasilkan menggunakan MPPT pada jam 13:52:00 WIB sampai dengan 13:58:53 WIB dengan total yaitu 56.08 Watt dengan rata-rata kecepatan angin 3.54 knot (1.82 m/s) sampai dengan 3.80 knot (1.95 m/s).

Pengujian Charger Baterai

Dalam Konfigurasi ini, Turbin Angin terhubung pada *Full-wave bridge rectifier* yang disalurkan pada MPPT untuk mengisi daya baterai, dengan bertujuan kapasitas daya baterai cukup untuk menjalankan operasional pemanas air. Pada pengujian ini dilakukan uji coba selama 10mnt x 4 untuk menentukan Energi Watt/hour (Wh) setiap percobaan membutuhkan rumus:

$$\text{Energy(Wh)} = \text{Daya(W)} \times \frac{10}{60} \dots\dots\dots(1)$$

Sebagaimana Pengujian *Charger* baterai ditunjukkan pada tabel 5.

Tabel 4. Pengujian Charger Baterai

Percobaan	Time	Daya (Watt)	1. ...Energi (Wh)
1	11:49:00	0	0
2	11:54:00	2.43	0.405
3	12:04:00	2.55	0.425
4	12:14:00	2.56	0.267
5	12:24:00	2.88	0.48
Energi Total			1.7367Wh

Pada pengujian ini durasi total pengujian adalah 40mnt, yang dikonversi menjadi 0,6667 jam yang akan digunakan untuk menentukan daya rata”.

Pengujian Terintegrasi

Seluruh komponen diuji dalam satu sistem kerja terintegrasi, dimulai dari konversi energi angin melalui turbin, kemudian dikontrol oleh MPPT untuk menjaga agar daya keluaran berada pada titik maksimum, hingga akhirnya energi tersebut dialirkan ke beban pemanas air. Dalam proses ini, data kecepatan angin, tegangan input, serta daya output tercatat secara real-time melalui apk spreadsheet dan Layar LCD.

Pada tahap pengujian ini, dilakukan selama beberapa siklus waktu tertentu, dengan parameter utama yang dimonitor meliputi stabilitas tegangan input (V), respon MPPT terhadap fluktuasi kecepatan angin, besaran daya yang dihasilkan, dan kecepatan angin yang dikonversi dalam satuan knot ke m/s. berikut pengujian terintegrasi pada tabel 6.

Tabel 5. Pengujian Terintegrasi.

Pengujian Terintegrasi						
NO	Time	Knot	m/s	Input Voltage(V)	Input Current(I)	Daya (Watt)
1	13:52:00	3.80	1.95	12.69	0.30	3.81
2	13:53:09	3.54	1.82	12.94	0.38	4.91
3	13:53:50	3.54	1.82	12.90	0.45	5.80
4	13:54:17	3.80	1.95	12.90	0.50	6.45
5	13:54:59	3.80	1.95	12.94	0.48	6.21
6	13:55:29	3.80	1.95	13.07	0.48	6.27
7	13:56:51	3.54	1.82	12.82	0.50	6.41
8	13:57:04	3.80	1.95	12.82	0.38	4.87

9	13:58:13	3.80	1.95	12.94	0.48	6.21
10	13:58:53	3.54	1.82	12.86	0.40	5.14
Total Daya						57.40

Dari data diatas terlihat bahwa sistem mampu mempertahankan tegangan keluaran dan daya secara relative stabil, meskipun kecepatan angin bervariasi dalam rentang +- 3.54 knot. Hal ini menunjukkan bahwa MPPT mampu mengatur titik kerja turbin angin agar berada dalam area daya maksimum.

Analisis Data

Analisis Turbin angin berbasis MPPT& tanpa MPPT

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, sistem turbin angin sanonius vertikal menunjukkan performa yang positif setelah di integrasikan dengan metode MPPT algoritma P&O. pengujian ini dilakukan dalam dua kondisi utama, yaitu tanpa menggunakan MPPT dan dengan MPPT aktif, hasil dari masing-masing pengujian menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan dari segi efisiensi daya yang dihasilkan dan kestabilan sistem.

Pada kondisi tanpa MPPT, sisitem hanya mampu menghasilkan daya sebesar 15.05 Watt. Nilai ini diperoleh dari penjumlahan seluruh data daya hasil pengukuran pada sepuluh kali pencatatan. Daya yang dihasilkan cenderung fluaktif dan sangat dipengaruhi oleh perubahan kecepatan angin, tanpa Adaya sistem yang mengatur titik daya maksimum secara otomatis.

Sementara itu, pada pengujian dengan penerapan MPPT, sistem menunjukkan peningkatan yang signifikan, dengan total daya sebesar 56.08 Watt. Perbedaan ini terjadi karena MPPT secara aktif mengatur titik kerja sistem agar selalu berada di kondisi optimal, meskipun terjadi perubahan kecepatan angin. Tegangan dan arus menjadi lebih stabil.

Berikut rumus berapa persen efisien dan selisih daya yang dihasilkan antara sistem MPPT dan non MPPT:

$$Efisiensi(\%) = \left(\frac{P_{MPPT} - P_{NON MPPT}}{P_{NON MPPT}} \right) \times 100\% \dots \dots \dots (2)$$

$$Selisih(\%) = \left(\frac{Selisih \text{ daya}}{P_{Non MPPT} - P_{MPPT}} \right) \times 100\% \dots \dots \dots (3)$$

KETERANGAN:

$Efisien (\%) = Keefisienanan \text{ menggunakan MPPT}$

$Selisih (\%) = Selisih \text{ daya dengan MPPT dan non MPPT}$

$P_{MPPT} = \text{Daya Turbin Angin melalui MPPT}$

$P_{NON MPPT} = \text{Daya Turbin Angin Tanpa MPPT}$

Substitusi Nilai:

$$(2) = \left(\frac{56,08 - 15,05}{15,05} \right) \times 100\% \\ = (272,64\%)$$

Selisih daya Non MPPT dan MPPT = 56,08 – 15,05 = 41,03 Watt

$$(3) \text{ Selisih}(\%) = \left(\frac{41,03}{15,05} \right) \times 100\% \\ = (272,64 \%)$$

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penggunaan MPPT meningkat daya sistem dari 15.05Watt menjadi 56.08Watt. Selisih daya sebesar 41.03Watt ini menunjukkan adanya peningkatan efisiensi sebesar 272.64% terhadap sistem tanpa MPPT.

Peningkatan ini tidak hanya berpengaruh terhadap besaran daya, tetapi juga terhadap kestabilan kerja sistem secara menyeluruh. Sistem menjadi lebih handal, efisien dan mampu menyesuaikan diri dengan kondisi angin yang berubah-ubah. Dalam aplikasi di atas kapal, hal ini menjadi nilai tambah yang sangat penting, mengingat kebutuhan akan suplai energi yang stabil dan berkelanjutan.

Analisis Charger Baterai & Penambahan beban Sistem Pemanas Air

Pada Pengujian Charger Baterai, sistem beroperasi selama 10mnt x 4 untuk menentukan daya yang signifikan, dengan rata-rata daya yang dimulai dari 0Watt sampai dengan 2,88Watt. jadi untuk menentukan Waktu *Charging* dengan kapasitas baterai 12v, 50aH, dan 600Wh maka rumus yang dibutuhkan:

$$\text{Daya rata – rata (W)} = \frac{\text{Energi Total}}{\text{Waktu (Jam)}} \dots \dots \dots (4)$$

$$\text{Waktu (Hours)} = \left(\frac{\text{Kapasitas Baterai (Wh)}}{\text{Daya rata – rata (W)}} \right) \dots \dots \dots (5)$$

Substitusi Nilai:

$$(4) = \frac{1,7367}{0,6667} \\ = 2,605W$$

$$(5) = \left(\frac{600}{2,605} \right) \\ = 230,3 \text{ Hours} / 9,6 \text{ hari nonstop}$$

Berdasarkan hasil pengujian, daya listrik rata-rata yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius hasil rancang bangun mandiri oleh penulis adalah sekitar 2,605 Watt dengan total energi 1,7367Wh membutuhkan 230,3Hours/14 hari secara *nonstop* untuk mengisi baterai dari 0 sampai full secara teoritis.

Sistem pemanas air yang dijadikan referensi dalam analisis ini merupakan bagian dari rancangan kelompok yang digunakan sebagai penambahan beban, dengan spesifikasi daya heater sebesar 500Watt untuk sekali siklus pemanas air. Jika diasumsikan heater bekerja selama 1 jam menggunakan baterai 12V 50Ah 600Wh, Sedangkan untuk pengisian baterai 12V 50Ah 600Wh membutuhkan 9,6 hari, maka energi yang dibutuhkan dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa dalam kondisi pengujian saat ini daya yang dihasilkan oleh turbin angin belum mampu mencukupi kebutuhan pemanas air secara langsung, dan hanya dapat digunakan sebagai sumber energi tambahan atau cadangan.

Analisis Generator AC dan DC

Penggunaan generator DC dalam sistem ini disesuaikan dengan karakteristik turbin angin Savonius yang bekerja pada kecepatan putaran rendah (3-6m/s). Hasil pengujian menunjukkan bahwa meskipun putaran turbin tidak tinggi, generator tetap mampu menghasilkan tegangan dan arus searah (DC) yang stabil, yang kemudian disalurkan kerangkaian MPPT dan baterai 12V.

Secara teknis, generator DC dapat langsung menghasilkan tegangan searah bahkan pada RPM rendah, karena tidak bergantung pada frekuensi seperti pada generator AC. Hal ini membuatnya lebih sesuai untuk sistem pembangkit berbasis turbin angin vertikal Savonius, yang secara alamiah memiliki kecepatan putaran rendah dan torsi tinggi. Hal ini sejalan dengan penjelasan dalam landasan teori (Lihat Bab II), di mana generator DC dipaparkan sebagai komponen yang ideal untuk pembangkit kecil dengan sumber energi tidak stabil. Dalam penelitian (Susanto & Perdamean Sebayang, 2018), dijelaskan bahwa generator DC menunjukkan kinerja lebih stabil dibanding AC pada kecepatan angin rendah, dengan tegangan dan arus yang mulai terbentuk sejak putaran awal.

Analisis Perbandingan Dengan Penelitian Terdahulu

Penelitian ini relevan dengan beberapa studi sebelumnya yang juga membahas peningkatan efisiensi pembangkit listrik tenaga angin menggunakan metode MPPT. Salah satunya adalah penelitian oleh (Saputro et al., 2019) yang menerapkan berbasis MPPT algoritma P&O pada sistem *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT), dengan peningkatan daya dari 78, 24Watt menjadi 112,32 Watt atau sekitar 43,5%, dalam kondisi angin konstan dan diuji pada beban baterai.

Berbeda dengan itu, penelitian ini menggunakan turbin angin Savonius vertikal yang lebih cocok untuk kecepatan angin rendah dan fluktuatif, seperti di lingkungan maritim. Pengujian menunjukkan peningkatan daya dari 15,05 Watt menjadi 56,08 Watt, dengan efisiensi mencapai 272,64%, yang menandakan bahwa algoritma MPPT tetap efektif meski dalam kondisi angin tidak stabil.

Sama seperti saputro, sistem ini juga menggunakan baterai 12V 50Ah sebagai media penyimpanan, namun dengan tujuan lebih aplikatif, yaitu menyuplai pemanas air di kapal. Sistem tidak hanya difokuskan untuk menyimpan energi, tetapi juga untuk menghidupkan beban aktif berupa elemen pemanas, meskipun belum mampu mengoperasikan pemanas secara kontinu, sistem telah menunjukkan bahwa integritas turbin Savonius dan MPPT dapat bekerja secara efektif sebagai energi alternatif untuk kapal. Prototipe ini dinilai sesuai dengan tujuan penelitian karena berhasil meningkatkan efisiensi sistem, dan menjadi dasar pengembangan lanjut seperti memperbesar dimensi turbin.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian, pengujian, dan analisis data terhadap turbin angin dengan sistem mikrokontroler dan monitoring yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa perancangan turbin angin Savonius vertikal berhasil dilakukan dan mampu menghasilkan energi listrik pada kecepatan angin rendah (3–6 m/s). Dengan konfigurasi vertikal, turbin mampu menangkap kecepatan angin rata-rata sebesar 1,82–1,94 m/s dan menghasilkan tegangan antara 10,16–12,97 V, sehingga membuktikan bahwa turbin dapat bekerja secara efektif di wilayah perairan Indonesia yang umumnya memiliki kecepatan angin rendah. Selanjutnya, penerapan teknologi MPPT dengan algoritma Perturb and Observe (P&O) terbukti mampu meningkatkan efisiensi daya turbin angin. Berdasarkan hasil pengujian dinamis, daya yang dihasilkan tanpa MPPT sebesar 15,05 Watt, sedangkan dengan penerapan MPPT meningkat menjadi 56,08 Watt. Hal ini menunjukkan adanya peningkatan efisiensi sistem sebesar 272,64%, yang membuktikan bahwa MPPT efektif menjaga sistem pada titik daya maksimum meskipun terjadi fluktuasi kecepatan angin. Meskipun demikian, daya listrik yang dihasilkan masih belum sepenuhnya mampu memenuhi kebutuhan energi sistem pemanas air di kapal secara langsung. Rata-rata daya yang diperoleh sebesar 2,605 Watt dalam durasi pengujian menunjukkan bahwa pengisian penuh baterai 12V 50Ah memerlukan waktu sekitar 9,6 hari operasi nonstop. Oleh karena itu, sistem ini belum dapat dijadikan sumber utama energi untuk pemanas air, tetapi lebih sesuai dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif atau pendukung.

Saran

Agar penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut dan diterapkan secara luas, terdapat beberapa saran yang dapat diperhatikan. Pertama, pengembangan sistem hybrid dengan menggabungkan sumber energi lain, seperti panel surya, dapat dilakukan untuk meningkatkan efisiensi sekaligus memastikan kontinuitas suplai energi, terutama pada saat kecepatan angin sangat rendah. Selain itu, integrasi sistem kontrol cerdas dengan memanfaatkan logika fuzzy atau kecerdasan buatan sederhana juga dapat diterapkan agar sistem MPPT lebih adaptif terhadap perubahan cepat pada kecepatan angin. Kedua, diperlukan uji coba lapangan jangka panjang di kapal sungguhan, sehingga sistem dapat diuji secara menyeluruh dalam kondisi lingkungan maritim yang sebenarnya, termasuk aspek ketahanan terhadap korosi dan fluktuasi cuaca laut. Ketiga, disarankan untuk memparalelkan dua atau lebih generator DC 12V dengan spesifikasi yang sama, guna meningkatkan total arus dan daya listrik yang dihasilkan. Dengan konfigurasi paralel ini, pengisian baterai dapat berlangsung lebih cepat dan sistem menjadi lebih andal dalam menyuplai daya untuk beban besar, seperti pemanas air.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdellatif, H., Ali, H., Abdellah, E. F., & Oussama, A. (2025). Energy efficiency investigation of sun-path tracker systems. *EPJ Web of Conferences*, 326, 05010. <https://doi.org/10.1051/epjconf/202532605010>
- Alfonso-Corcuera, D., Lopez-Nuñez, E., Ogueta-Gutiérrez, M., Vega, E., Curea, O., Sanz-Andrés, Á., & Pindado, S. (2022). Design of a cup anemometer performance simulator. *Sensors*, 22(9), 3334. <https://doi.org/10.3390/s22093334>
- Ananda, B. P., Faqih, F. M., Alkindi, M. F., Pribadi, F. S., & Aprilianto, R. A. (2024). Tren algoritma InC, PID dan FLC untuk MPPT pada sistem fotovoltaik: Systematic review. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, 5(2), 78–89. <https://doi.org/10.14710/jebt.2024.23089>
- Bongiovanni, C. S., & Sansoè, L. (2024). Control board design for dual voltage source inverters in automotive applications. *Politecnico di Torino*.
- Hareendran, T. K. (2021). INA219 current sensor module primer. *Electronicsforu.com*. <https://edn.com/ina219-current-sensor-module-primer>
- Herlambang, Y. D., Hendrawati, D., Agustin, A. D., Kusuma, K. A., Wahyuningsih, S., & Wigiantoro, W. (2020). Model turbin angin Savonius untuk meningkatkan kinerja PLTB. *Eksergi*, 16(1), 1–10. <https://doi.org/10.32497/eksergi.v16i1.2203>
- Li, Q., Yang, Y., & Chen, X. (2022). Advances in maximum power point tracking techniques for photovoltaic systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 153, 111788. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111788>

- Petrović, P., & Tatović, M. (2025). New full-wave/half-wave rectifier with electronic control. *Journal of Electrical Engineering*, 76(2), 147–158. <https://doi.org/10.2478/jee-2025-0015>
- Saputro, D., Nugroho, D., & Utomo, S. B. (2019). Analisa optimalisasi pembangkit listrik tenaga angin dengan menggunakan maximum power point tracking (MPPT). *Prosiding Konferensi Ilmiah Mahasiswa Unissula (KIMU) 2*, Universitas Islam Sultan Agung.
- Seminar Hasil Elektro S1 ITN Malang. (n.d.). *Proceedings of the Seminar Hasil Elektro S1 ITN Malang*.
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318–345. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>
- Susanto, D., & Sebayang, P. (2018). Rancang bangun dan analisa kinerja generator fluks aksial magnet permanen putaran rendah untuk turbin angin sumbu vertikal tipe Savonius. *Piston: Journal of Technical Engineering*, 2(1), 12–17. <https://doi.org/10.32493/pjte.v2i1.3222>
- Wicaksono, D. H., Djuniadi, D., & Apriaskar, E. (2023). Monitoring sistem pembangkit listrik tenaga angin berbasis Internet of Things. *Jurnal Teknologi Elektro*, 14(2), 118–127. <https://doi.org/10.22441/jte.2023.v14i2.010>
- Yusoff, Y., Ibrahim, I., & Abdullah, M. (2021). Development of Savonius vertical axis wind turbine for low wind speed application. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1101(1), 012003. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1101/1/012003>
- Zealita, Z., Prasetya, V., & Zaenurrohman. (2025). Monitoring konsumsi daya listrik menggunakan Google Spreadsheet. *Infotekmesin*, 16(1), 256–262. <https://doi.org/10.35970/infotekmesin.v16i1.2523>