

PENGARUH KONTROLER *MAXIMUM POWER POINT TRACKING* (MPPT) TERHADAP EFISIENSI DAYA *VERTICAL AXIS WIND TURBINE* (VAWT) TIPE SAVONIUS DUA SUDU

Catur Wardana¹, Ir. Soeadgihardo Siswantoro¹, MT., Dr. Sugiyanto, S.T., M.Eng.¹

¹Departemen Teknik Mesin, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada, Indonesia;

Email : caturwardana@mail.ugm.ac.id (C.W), soeadgihardo@ugm.ac.id (S.S), sugiyanto_t@ugm.ac.id (S);

Abstrak : Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh controller Maximum Power Point Tracking (MPPT) terhadap efisiensi daya turbin angin sumbu vertikal (VAWT) tipe Savonius dua sudu dimensi diameter 0.9 m dan tinggi 1 meter dengan bahan bilah pelat stainless steel 1 mm. Controller MPPT diaplikasikan pada turbin angin Savonius dua sudu untuk menjaga turbin angin beroperasi pada titik daya maksimumnya. Controller MPPT yang digunakan adalah tipe Perturb & Observe Penelitian dilakukan membandingkan keluaran daya turbin angin savonius dua sudu pada saat sistem MPPT tidak aktif dan pada saat MPPT aktif dengan tiga variasi pembebanan dengan resistor berukuran 470 ohm, 560 ohm dan 1000 ohm. Penelitian dilakukan dengan memberikan tiga variasi dorongan angin pada bilah turbin berkecepatan 4.9 m/s, 5.8 m/s, dan 6.4 m/s. Pada pengujian tanpa menggunakan MPPT menghasilkan rata-rata daya 0.199 watt dan menggunakan MPPT menghasilkan rata-rata daya 0.620 watt. Hasil penelitian menunjukkan rata-rata selisih daya adalah 0.421 watt atau naik sebesar 317.713 %. Kenaikan efisiensi daya turbin rata-rata adalah 2.331% jika dibandingkan dengan perhitungan daya maksimal turbin angin savonius dua sudu berdasarkan perhitungan. Rata-rata koefisien daya (C_p) turbin angin savonius dua sudu tanpa menggunakan MPPT dan menggunakan MPPT masing masing adalah 0.159 % dan 0.509 %, sehingga MPPT memiliki pengaruh positif dikarenakan terjadi kenaikan koefisien daya rata-rata sebesar 0.350%.

Kata Kunci : Energi Baru Terbarukan, Turbin Angin Savonius, MPPT

Abstract : The purpose of this research is to determine the effect of Maximum Power Point Tracking (MPPT) controller on the power efficiency of a two-bladed Savonius vertical axis wind turbine (VAWT) with a dimensional diameter of 0.9 m and a height of 1 meter, using 1 mm thick stainless steel plate blades. The MPPT controller is applied to the two-bladed Savonius wind turbine to maintain its operation at the maximum power point. The Perturb & Observe type MPPT controller is used in the study to compare the power output of the Savonius wind turbine. The study compares the power output of the Savonius wind turbine at the maximum power point when the MPPT system is not active and when the MPPT system is active with three load variations using resistors of 470 ohm, 560 ohm, and 1000 ohm. The study is conducted by providing three wind speed variations on the turbine blades of 4.9 m/s, 5.8 m/s, and 6.4 m/s. The test without using MPPT produces an average power of 0.199 watt and using MPPT produces an average power of 0.620 watt. The research results show that the average power difference is 0.421 watt or an increase of 317.713%. The average power coefficient of the Savonius wind turbine is 2.331% if compared with the maximum power calculation of the Savonius wind turbine based on the calculation. The average power coefficient (C_p) of the Savonius wind turbine without using MPPT and using MPPT are 0.159% and 0.509%, respectively, so that MPPT has a positive influence because of the increase in the average power coefficient of 0.350%.

Jurnal Energi Baru & Terbarukan, 2023, Vol. 4, No. 3, pp 209 – 15

Received : 25 Juni 2023

Accepted : 18 September 2023

Published : 25 Oktober 2023



Copyright: © 2022 by the authors. [Jurnal Energi Baru dan Terbarukan](#) (p-ISSN: [2809-5456](#) and e-ISSN: [2722-6719](#)) published by Master Program of Energy, School of Postgraduate Studies. This article is an open access article distributed under the terms and condition of the [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](#) (CC BY-SA 4.0).

turbine when the MPPT system is inactive and when it is active, with three variations of load using resistors of 470 ohm, 560 ohm, and 1000 ohm. The research is conducted by subjecting the turbine blades to three variations of wind thrust at speeds of 4.9 m/s, 5.8 m/s, and 6.4 m/s. The testing without using MPPT resulted in an average power of 0.199 watt, while using MPPT resulted in an average power of 0.620 watt. The research findings indicate an average power difference of 0.421 watt, representing an increase of 317.713%. The average power efficiency of the turbine increased by 2.331% compared to the calculated maximum power of the two-bladed Savonius wind turbine. The average power coefficient (C_p) of the two-bladed Savonius wind turbine without MPPT and with MPPT is 0.159% and 0.509%, respectively, indicating a positive effect of MPPT as it led to an average increase in power coefficient of 0.350%.

Keywords : Renewable Energy, Savonius Wind Turbine, MPPT

1. Pendahuluan

Energi bayu adalah salah satu sumber energi terbarukan yang digunakan untuk pembangkit listrik (Fadila et al., 2019). Turbin angin digunakan untuk mengubah energi bayu menjadi energi mekanik yang kemudian digunakan untuk menghasilkan energi listrik melalui generator (Fauzi et al., 2019). Terdapat dua jenis turbin angin yaitu *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAVT) dan *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) (Trifiananto et al, 2022). Turbin angin tipe Savonius adalah jenis turbin VAWT tertua yang memiliki poros vertikal dan menerima aliran angin dari segala arah (Tawakal & Siregar, 2020). Turbin ini mudah dirawat dan cocok untuk kondisi angin rendah (Hidayat & Surbaki, 2021). Namun, turbin Savonius memiliki koefisien daya yang lebih rendah dibandingkan dengan jenis turbin lainnya, dengan koefisien daya sebesar 15% pada Tip Speed Ratio (TSR) ≈ 0.8 (Sahim et al., 2018).

Untuk meningkatkan efisiensi daya yang dihasilkan, perlu dilakukan improvisasi pada desain rotor turbin angin. Namun, penelitian sering hanya berfokus pada perubahan desain rotor tanpa mempertimbangkan komponen lain seperti gearbox, generator, sistem kontrol, dan unit pendukung tambahan (Hau, 2013). Salah satu komponen penting dalam turbin angin adalah kontroller Maximum Power Point Tracking (MPPT), yang digunakan untuk menjaga daya keluaran turbin angin tetap maksimum (Arief & Musafa, 2019). Penerapan kontroler MPPT juga dapat meningkatkan perolehan daya pada turbin angin (Nugroho et al., 2021).

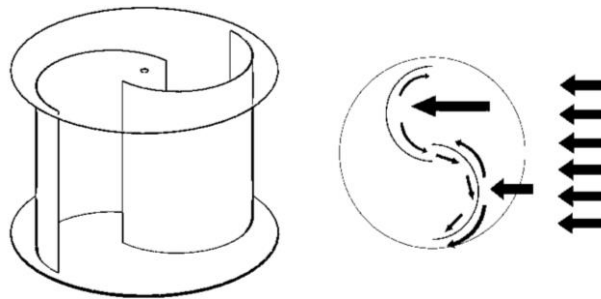
Kontroller *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) memiliki berbagai jenis, salah satunya adalah MPPT Perturb & Observe (P&O). MPPT P&O menggunakan algoritma untuk mengatur variabel dalam sistem turbin angin, seperti kecepatan rotor dan tegangan pada *DC-DC converter*. Algoritma MPPT P&O bekerja untuk meningkatkan daya pada kecepatan putar generator hingga mencapai titik daya maksimum (MPP), dengan memperbaiki kemiringan kurva daya menjadi nol. MPPT P&O mengontrol variabel dan mendeteksi daya yang dihasilkan untuk mencapai MPP. Jika perubahan daya berada di sebelah kiri kurva MPP, MPPT mengatur variabel kontrol agar daya bergerak menuju MPP, dan sebaliknya jika perubahan daya berada di sebelah kanan kurva MPP (Mousa et al., 2021).

Penelitian terdahulu telah dilakukan simulasi untuk menguji kontroller MPPT tipe P&O pada turbin angin. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan efisiensi rata-rata sebesar 8.14% dibandingkan tanpa MPPT (Otong & Bajuri 2017). Penelitian lain menunjukkan bahwa penggunaan kontroller MPPT P&O pada turbin dengan kapasitas 300 watt meningkatkan daya maksimal menjadi 7.71 watt dibandingkan 1.05 watt tanpa MPPT (Arief & Musafa, 2019). Namun, belum ada penelitian yang secara langsung mengaplikasikan kontroller MPPT P&O pada turbin VAWT tipe Savonius dua sudu.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh kontroller MPPT terhadap efisiensi keluaran daya yang dihasilkan oleh VAWT tipe Savonius dua sudu.

1.1. Vertikal Axis Wind Turbine Tipe Savonius

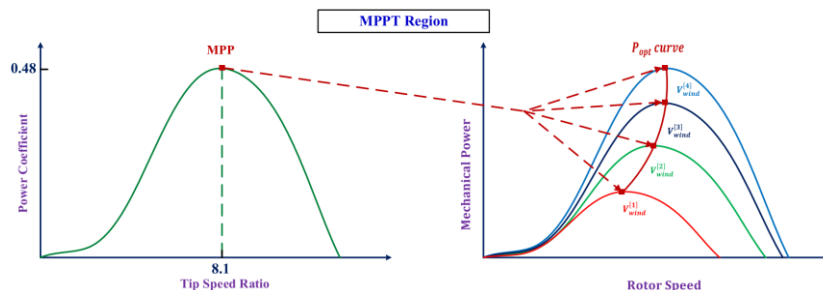
VAWT memiliki sumbu rotor utama yang berdiri tegak. Keunggulan utama dari turbin VAWT adalah turbin tidak harus mengarah ke arah angin untuk bekerja secara efektif. Hal ini menguntungkan untuk lokasi yang memiliki arah angin berubah-ubah. Dengan sumbu yang vertikal, generator dan gearbox dapat diletakkan di dekat tanah, sehingga tidak perlu menara yang tinggi dan mudah diakses untuk perawatan. Turbin ini juga memiliki biaya perawatan rendah dan membuatnya lebih efisien (Setyawan, 2018). VAWT tipe Savonius adalah sebuah jenis turbin angin vertikal yang menggunakan prinsip gaya dorong aerodinamis dari aliran udara untuk memutar rotor. VAWT tipe Savonius memiliki bentuk yang sederhana dan mudah dibangun, VAWT tipe Savonius memiliki *coefcient power* (C_p) sebesar 15% pada *Tip Speed Ratio* (TSR) ≈ 0.8 (Sahim et al., 2018). Pada gambar 1 berikut ini merupakan ilustrasi konstruksi rotor turbin angin Savonius beerta arah aliran angin yang melewatinya (Kurniawan & Dharmawan, 2021).



Gambar 1. Turbin angin Savonius dan aliran angin (Kurniawan & Dharmawan, 2021)

1.2. Kontroller Turbin Angin MPPT

MPPT adalah sebuah teknik yang digunakan untuk mencari dan mempertahankan titik pembangkit daya maksimal dari sumber daya terbarukan, seperti turbin angin. MPPT memastikan bahwa sistem pembangkit listrik menghasilkan daya maksimal dengan mengukur, memantau variasi arus dan tegangan *input* untuk memodifikasi frekuensi pengoperasian agar sesuai dengan titik pembangkit daya maksimal di kecepatan rotor tertentu (Mubarok & Whiancaka, 2020). Pada gambar 2 ini merupakan ilustrasi letak MPP pada beberapa variasi kecepatan rotor (Mousa et al., 2021).

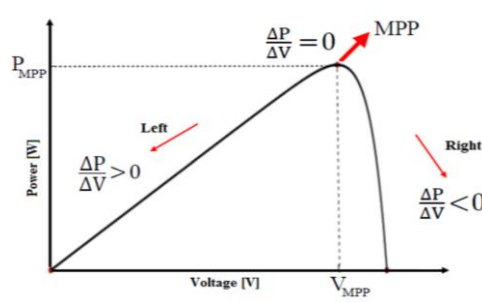


Gambar 2. Letak MPP pada variasi kecepatan rotor (Mousa et al., 2021)

Menurut Otong dan Bajuri (2017), MPPT pada sistem pembangkit listrik tenaga angin memiliki beberapa keuntungan. Diantaranya memastikan bahwa sistem bekerja pada titik operasi yang paling efisien dan memproduksi daya listrik maksimum, memperbaiki efisiensi pembangkit listrik dan

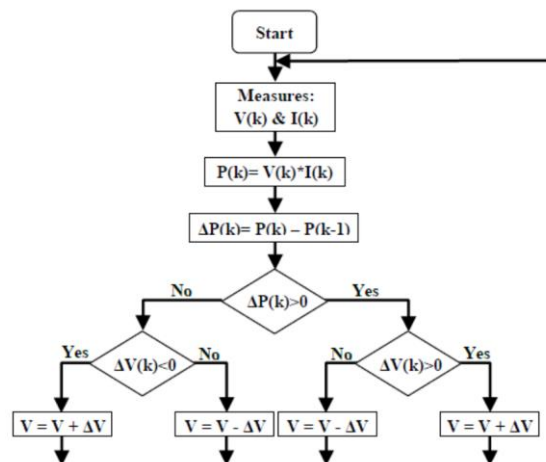
meningkatkan daya listrik yang dihasilkan sebuah pembangkit listrik dibandingkan tanpa dilengkapi MPPT, mengurangi beban pada sistem pembangkit listrik dan memperpanjang masa pakai peralatan. Selain hal yang telah disebutkan, MPPT juga memastikan bahwa sistem bekerja pada kondisi yang paling efisien dan meminimalkan hilangnya daya listrik selama transmisi.

Metode kerja sistem MPPT salah satunya adalah *Perturb and Observe* (P&O). Metode ini bekerja dengan membaca dan mengatur besaran tegangan *Direct Current* (DC) pada DC konverter. Metode pengaturan membuat nilai daya juga akan secara bersamaan berubah. Metode ini akan mengamati perubahan tegangan dan perubahan daya yang dihasilkan. Perubahan daya akan dibandingkan dengan daya sebelumnya untuk melakukan evaluasi, jika nilai perubahan daya bernilai positif maka variabel pengaturan sebelumnya akan tetap, dan sebaliknya jika nilai perubahan bernilai daya negatif maka variabel pengaturan akan diubah sebaliknya (Anugrah et al., 2016). Letak *Maximum Power Point* berdasarkan korelasi tegangan dan daya dapat dilihat pada grafik gambar 2.7 berikut ini (Mohamed & Sattar, 2019).



Gambar 3. Maximum power point (Mohamed & Sattar, 2019)

Penjelasan cara kerja MPPT P&O dapat digambarkan menggunakan alur proses seperti pada diagram gambar 2.8 berikut (Craene, 2021).



Gambar 4. Algoritma controller MPPT (Craene, 2021)

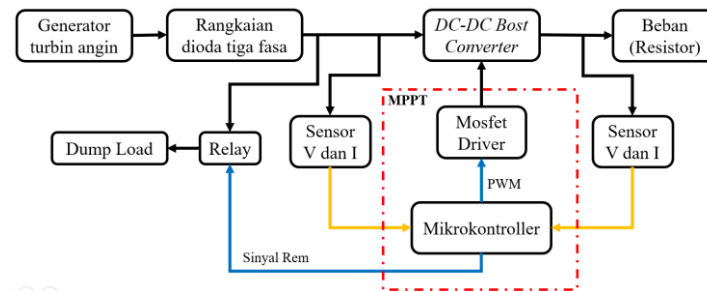
MPPT harus bekerja dengan syarat antara lain harus dapat mendeteksi *Maximum Power Point* (MPP) apapun kondisi dari kecepatan turbinnya, dan dapat melacak MPP secepat mungkin untuk mendapatkan pengaturan yang sempurna (Craene, 2021). Dengan begitu kontrol MPPT dapat melakukan pengaturan secara cepat dan akurat untuk mendapatkan daya turbin maksimal dengan sedikit kehilangan daya.

2. Metode Penelitian

Penelitian dilakukan pada turbin angin Savonius dua sudu dengan bahan bilah rotor adalah pelat stainless steel tebal 1mm dengan dimensi tinggi 1 meter dan diameter 0.9 meter. Penerus daya ke generator menggunakan *v-belt* dengan perbandingan roda puli adalah 1 inch untuk generator dan 7 inch untuk rotor. Pada bab dua dibahas mengenai sistem dan prosedur penelitian yang dilakukan.

2.1.1. Diagram Blok Sistem Keseluruhan

Perancangan sistem kerja MPPT disesuaikan dengan dengan alogaritma MPPT P&O *boost converter*. Kontrol *switching* mosfet pengendali *DC-DC boost converter* menggunakan arduino uno sebagai pembangkit sinyal *pulse width modulation* (PWM). Diagram controller ditunjukkan pada gambar 5.



Gambar 5. Diagram controller MPPT

2.2. Sensor Tegangan

Pemasangan sensor tegangan dilakukan untuk mengetahui tegangan DC setelah rangkaian penyearah dioda tiga fasa dan tegangan DC setelah *DC-DC converter*. Sensor tegangan yang digunakan pada MPPT ini menggunakan sistem rangkaian pembagi tegangan (*voltage divider*). Rangkaian pembagi tegangan yang dibuat dapat digunakan untuk mengukur tegangan DC V_{pri} (tegangan sebelum *DC-DC boost converter*) dan V_{sor} (tegangan setelah *DC-DC boost converter*) sampai maksimal 50 volt. Tegangan DC yang dapat diukur oleh ic Atmega328p yang ada pada arduino uno maksimal adalah 5 volt, maka diperlukan perhitungan untuk menurunkan tegangan maksimal yang dapat diukur menjadi maksimal adalah 5 volt.

Perhitungan untuk menurunkan tegangan menjadi tegangan dapat terbaca oleh ADC menggunakan pembagi tegangan dengan persamaan 1. Maka ukuran resistor yang dapat digunakan untuk diaplikasikan pada rangkaian pembagi tegangan ini adalah 10K untuk R_1 dan 91K untuk R_2 .

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{in} \quad (1)$$

Keterangan:

V_{in} = Tegangan yang diukur

V_{out} = Tegangan 0-5 volt untuk dibaca mikro kontroller

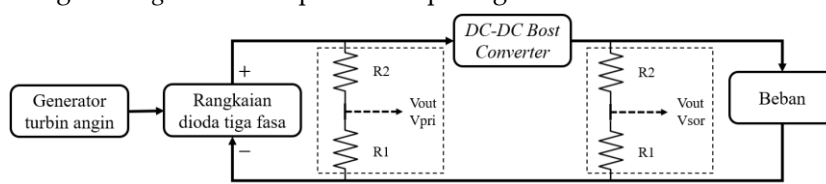
R_1 = Resistor

R_2 = Resistor

$$V_{out} = \frac{10000}{10000 + 91000} \times 50$$

$$V_{out} = 4.95 \text{ volt}$$

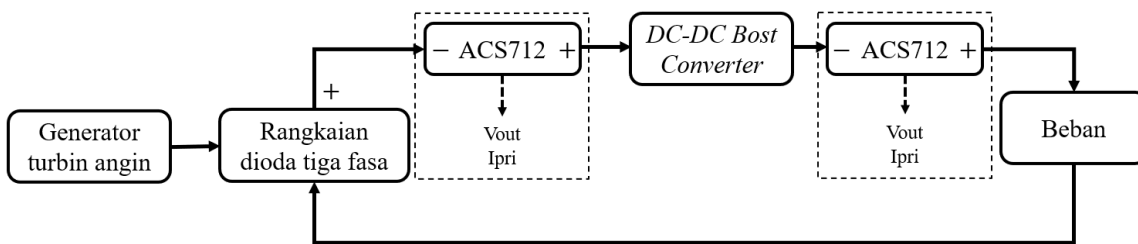
Rangkaian pemasangan *voltage divider* dapat dilihat pada gambar 6 berikut.



Gambar 6. Rangkaian pemasangan *voltage divider*

2.3. Sensor Arus

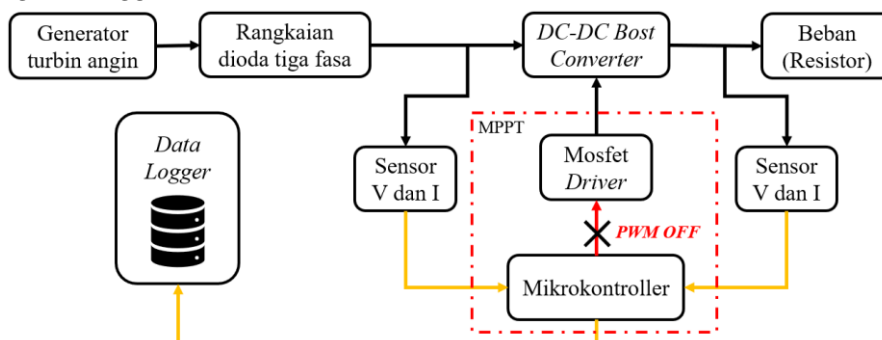
Sensor arus yang digunakan pada MPPT dan sebagai sensor pengambilan data adalah sensor arus ACS712 dengan tipe 20 Ampere. Sensor ini digunakan untuk mengukur arus pada V_{pri} dan V_{sor} . Rangkaian pemasangan sensor arus ACS712 dapat dilihat pada gambar 3.4 berikut.



Gambar 7. Rangkaian sensor arus ACS712

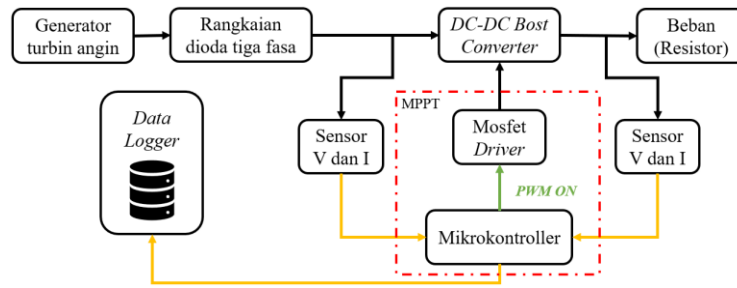
2.4. Pengambilan Data Pengujian

Hasil pengambilan data pada penelitian ini digunakan untuk mengetahui pengaruh implementasi dari sistem MPPT P&O terhadap efisiensi daya turbin angin Savonius dua sudu pada kondisi yang sudah ditentukan. Pengujian dilaksanakan dengan 2 metode yaitu saat MPPT diaktifkan dan MPPT di nonaktifkan, dengan variasi pembebanan berupa resistor 470 ohm, 560 ohm, dan 1000 ohm serta variasi kecepatan angin 4.9 m/s, 5.8 m/s, dan 6.4 m/s. Pada gambar 8 berikut ini merupakan ilustrasi rangkaian pengujian tanpa menggunakan sistem MPPT dan gambar 9 merupakan ilustrasi pengujian dengan menggunakan sistem MPPT.



Gambar 8. Rangkaian pengambilan data tanpa MPPT

Ilustrasi rangkaian pengambilan data pada gambar 8 mikro controller tidak dapat mengirimkan PWM ke mosfet driver dikarenakan jalurnya diputuskan, dengan begitu mosfet driver tidak dapat mengendalikan DC-DC boost converter sehingga tegangan yang telah melewati DC-DC boost coverter tidak dapat dikendalikan atau tidak akan berubah. Dengan pemutusan jalur PWM tersebut fungsi kontrol MPPT nonaktif.



Gambar 9. Rangkaian pengambilan data dengan MPPT

Ilustrasi rangkaian pengambilan data pada gambar 9 mikro kontroler dapat mengirimkan PWM ke mosfet driver, dengan begitu mosfet driver dapat mengendalikan mosfet yang ada didalam DC-DC boost converter sehingga tegangan yang melewati DC-DC boost coverter dapat dikendalikan. Dengan tersambungny jalur PWM tersebut maka fungsi kontrol MPPT aktif.

2.5. Metode Pengambilan Data

Metode pengambilan data daya turbin Savonius dua sudu dilakukan dengan variasi tiga kecepatan angin yang diperoleh dari kipas angin dan diukur kecepatan anginnya menggunakan anemometer digital dengan seri GM816, tiga ukuran pembebanan berupa resistor, dengan masing masing pengambilan data saat kontroller MPPT diaktifkan dan di *non*-aktifkan. Berikut ini tabel pengambilan data yang akan dilakukan.

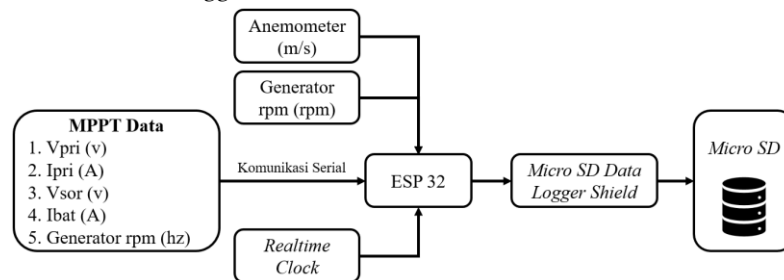
Tabel 1.

Tabel variasi pengujian

Variasi	Kecepatan angin (m/s)	MPPT	Pembebanan (Ohm)
1	4.9	ON	470
2	5.8	ON	470
3	6.4	ON	470
4	4.9	ON	560
5	5.8	ON	560
6	6.4	ON	560
7	4.9	ON	1000
8	5.8	ON	1000
9	6.4	ON	1000
10	4.9	OFF	470
11	5.8	OFF	470
12	6.4	OFF	470
13	4.9	OFF	560
14	5.8	OFF	560
15	6.4	OFF	560
16	4.9	OFF	1000
17	5.8	OFF	1000
18	6.4	OFF	1000

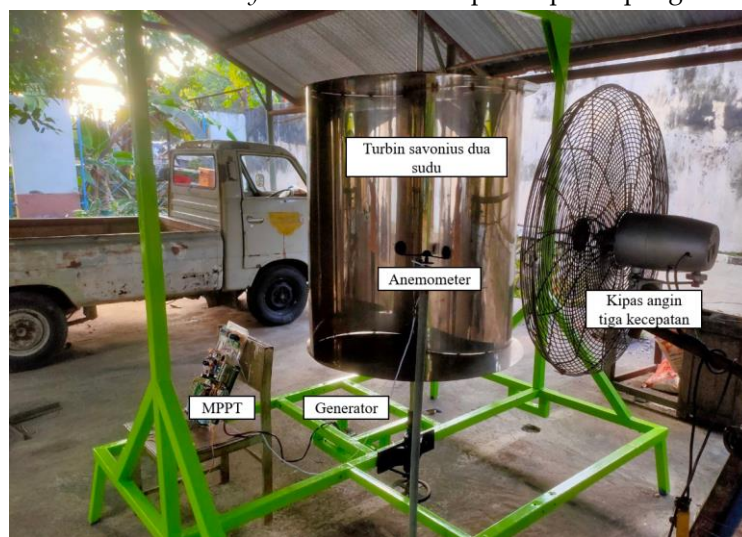
Pengambilan data daya turbin dilakukan dengan cara melakukan *data logging* berupa tegangan, arus, dan waktu pengambilan data menggunakan sensor. Data-data tersebut diterima dari kontroller MPPT melalui komunikasi serial dan disimpan dalam sebuah memori *micro SD* seperti yang terlihat

pada gambar 10 menggunakan mikrokontroler ESP32. Data direkam oleh sistem *data logger* satu kali dalam lima detik dengan perolehan satu data yang direkam merupakan rata-rata dari 50 data yang dikirim kontroler MPPT ke *data logger*.



Gambar 10. Alur data logger pengambilan data

Daya turbin berupa arus dibaca menggunakan sensor ACS712 dengan *Ipri* adalah arus sebelum melewati *DC-DC boost converter* dan *Ibat* merupakan arus setelah melewati *DC-DC boost converter*, data tegangan dibaca oleh sensor tegangan berupa *voltage divider* dengan *Vpri* merupakan tegangan sebelum melewati *DC-DC boost converter* dan *Vsor* merupakan tegangan setelah melewati *DC-DC boost converter*, dan data waktu diambil menggunakan *realtime clock* untuk memudahkan mengidentifikasi urutan data. Semua data tersebut diproses oleh mikro kontroler ESP32 kemudian direkam dalam sebuah file *text* didalam *micro SD* dalam bentuk *text array*. Gambar 11 merupakan posisi pengambilan data daya turbin.



Gambar 11. Posisi perlengkapan pengujian

3. Hasil

3.1. Hasil Pengambilan Nilai Daya Turbin Tanpa MPPT

Pengambilan data daya turbin tanpa MPPT ini dilakukan pada kecepatan angin tiga variasi kecepatan angin dan tiga variasi pembebanan menggunakan resistor berukuran masing masing 470 ohm, 560 ohm, dan 1000 ohm dengan masing masing pembebanan di uji pada tiga variasi kecepatan angin yaitu 4.9 m/s, 5.8 m/s, dan 6.4 m/s. Data arus dan tegangan diambil dari *Ipri* dan *Vpri* atau arus dan tegangan sebelum melewati *DC-DC boost converter*.

Pemaparan data hasil pengujian pada tabel 2 untuk pembebanan 470 ohm, tabel 3 untuk pembebanan 560 ohm, dan tabel 4 untuk pembebanan 1000 ohm.

Tabel 2.

Pengujian daya turbin tanpa MPPT dengan pembebanan 470 ohm			
Pembebanan resistor 470 ohm			
Kecepatan (m/s)	Tegangan (v)	Arus (i)	Daya (w)
4.9	3.390	0.048	0.163
5.8	5.343	0.040	0.214
6.4	9.831	0.030	0.295

Daya terbesar pada pengujian tanpa MPPT dengan pembebanan resistor 470 ohm pada tiga variasi kecepatan angin yaitu 0.295 watt pada kecepatan angin 6.4 m/s dan rata-rata daya adalah 0.224 watt.

Tabel 3.

Pengujian daya turbin tanpa MPPT dengan pembebanan 560 ohm			
Pembebanan resistor 560 ohm			
Kecepatan (m/s)	Tegangan (v)	Arus (i)	Daya (w)
4.9	3.986	0.010	0.040
5.8	8.307	0.021	0.174
6.4	10.137	0.029	0.294

Daya terbesar pada pengujian tanpa MPPT dengan pembebanan resistor 560 ohm pada tiga variasi kecepatan angin yaitu 0.294 watt pada kecepatan angin 6.4 m/s dan rata-rata daya adalah 0.169 watt.

Tabel 4.

Pengujian daya turbin tanpa MPPT dengan pembebanan 1000 ohm			
Pembebanan resistor 1000 ohm			
Kecepatan (m/s)	Tegangan (v)	Arus (i)	Daya (w)
4.9	5.081	0.006	0.030
5.8	8.305	0.012	0.100
6.4	10.940	0.044	0.481

Daya terbesar pada pengujian tanpa MPPT dengan pembebanan resistor 1000 ohm pada tiga variasi kecepatan angin yaitu 0.481 watt pada kecepatan angin 6.4 m/s dan rata-rata daya adalah 0.204 watt.

Tabel 2, 3, 4 menunjukkan bahwa rata-rata tegangan dari 9 pengujian sebesar 7.258 volt, rata-rata arus dari 9 pengujian adalah 0.027 Ampere, dan rata-rata daya yang dihasilkan turbin tanpa menggunakan sistem MPPT adalah 0.199 watt.

3.2. Hasil Pengambilan Nilai Daya Turbin dengan MPPT

Pengambilan data daya turbin dengan MPPT ini dilakukan pada kecepatan angin tiga variasi kecepatan angin dan tiga variasi pembebanan menggunakan resistor berukuran masing masing 470 ohm, 560 ohm, dan 1000 ohm dengan masing masing pembebanan di uji pada tiga variasi kecepatan angin yaitu 4.9 m/s, 5.8 m/s, dan 6.4 m/s. Pengujian ini dilakukan dengan menetapkan batas atas tegangan output DC-DC boost converter pada tegangan 15 volt, tujuan dari penetapan tegangan ini adalah untuk menjaga agar pengaturan tegangan oleh MPPT tidak melebihi tegangan yang ditetapkan dan menjaga agar arus mengalir tidak terlalu kecil, sesuai dengan persamaan daya yaitu tegangan

dikalikan dengan arus yang mengalir. Hal tersebut dilakukan karena nilai ketelitian pembacaan pada sensor adalah 0.01 Ampere. Pengambilan data daya sebelum dan sesudah *DC-DC boost converter* bertujuan untuk mengetahui daya akhir yang mengalir ke beban pengujian dikarenakan *DC-DC boost converter* memiliki nilai efisiensi saat melakukan kinerjanya.

Pengambilan Pada sub bab ini akan dipaparkan data hasil pengujian pada tabel 5 untuk pembebanan 470 ohm, tabel 6 untuk pembebanan 560 ohm, dan tabel 7 untuk pembebanan 1000 ohm.

Tabel 5.

Pengujian daya turbin dengan MPPT pembebanan 470 ohm

Pembebanan resistor 470 ohm							
Kecepatan (m/s)	Sebelum <i>DC-DC boost converter</i>			Setelah <i>DC-DC boost converter</i>			Efisiensi <i>Boost Converter</i> (%)
	Tegangan (v)	Arus (i)	Daya (w)	Tegangan (v)	Arus (i)	Daya (w)	
4.9	1.192	0.172	0.205	5.874	0.031	0.182	88.780
5.8	5.922	0.160	0.948	11.312	0.082	0.928	97.890
6.4	10.567	0.096	1.014	12.300	0.076	0.935	92.209

Daya listrik mengalami penurunan seperti yang terlihat pada tabel 5 dikarenakan *DC-DC boost converter* memiliki efisiensi kerja. Efisiensi daya sesudah melewati *DC-DC boost converter* pada pengujian ini rata-rata adalah 92.960 %. Daya tertinggi yang diperoleh pada pengujian dengan beban 470 ohm ini adalah 0.935 watt pada kecepatan 6.4 m/s dan rata-rata daya adalah 0.682 watt.

Tabel 6.

Pengujian daya turbin dengan MPPT pembebanan 560 ohm

Pembebanan resistor 560 ohm							
Kecepatan (m/s)	Sebelum <i>DC-DC boost converter</i>			Setelah <i>DC-DC boost converter</i>			Efisiensi <i>Boost Converter</i> (%)
	Tegangan (v)	Arus (i)	Daya (w)	Tegangan (v)	Arus (i)	Daya (w)	
4.9	1.832	0.157	0.288	8.172	0.028	0.229	79.514
5.8	5.535	0.162	0.897	12.077	0.074	0.894	99.666
6.4	9.914	0.099	0.981	12.503	0.072	0.900	91.743

Efisiensi daya sesudah melewati *DC-DC boost converter* pada pengujian ini rata-rata adalah 90.308 %. Daya tertinggi yang diperoleh pada pengujian dengan beban 560 ohm ini adalah 0.900 watt pada kecepatan 6.4 m/s dan rata-rata daya adalah 0.674 watt.

Tabel 7.

Pengujian daya turbin dengan MPPT pembebanan 1000 ohm

Pembebanan resistor 1000 ohm							
Kecepatan (m/s)	Sebelum <i>DC-DC boost converter</i>			Setelah <i>DC-DC boost converter</i>			Efisiensi <i>DC-DC boost converter</i> (%)
	Tegangan (v)	Arus (i)	Daya (w)	Tegangan (v)	Arus (i)	Daya (w)	
4.9	2.255	0.125	0.282	9.520	0.024	0.228	80.894
5.8	7.919	0.078	0.618	11.389	0.053	0.604	98.287
6.4	11.368	0.064	0.728	12.305	0.055	0.677	93.639

Efisiensi daya sesudah melewati *DC-DC boost converter* pada pengujian ini rata-rata adalah 90.940 %. Daya tertinggi yang diperoleh pada pengujian dengan beban 1000 ohm ini adalah 0.677 watt pada kecepatan 6.4 m/s dan rata-rata daya adalah 0.503 watt.

3.3. Perbandingan Daya Tanpa MPPT dan dengan MPPT

Perbandingan daya turbin yang diambil saat MPPT aktif dan MPPT nonaktif digunakan untuk melihat perbedaan atau selisih daya yang didapatkan saat MPPT diaktifkan dan dinonaktifkan pada kondisi pembebanan dan kecepatan angin yang sama. Selisih daya yang dihasilkan akan di persentasekan dan akan dirata-rata untuk mengetahui persentase kenaikan perubahan daya rata-rata. Perbandingan daya yang diambil pada saat MPPT non aktif dan MPPT aktif dengan pembebanan 470 ohm ditampilkan pada tabel 8, pembebanan 560 ohm pada tabel 9, dan pembebanan 1000 ohm pada tabel 10.

Tabel 8.

Perbandingan daya tanpa MPPT & dengan MPPT pembebanan 470 ohm

Kecepatan (m/s)	Pembebanan resistor 470 ohm			Persentase kenaikan (%)
	Tanpa MPPT	Dengan MPPT	Selisih	
4.9	0.163	0.182	0.019	11.656
5.8	0.214	0.928	0.714	333.645
6.4	0.295	0.935	0.640	216.949

Pada tabel 8 ditunjukkan rata-rata persentase kenaikan daya saat pengujian dilakukan dengan pembebanan 470 ohm adalah 187.417 %.

Tabel 9.

Perbandingan daya tanpa MPPT & dengan MPPT pembebanan 560 ohm

Kecepatan (m/s)	Pembebanan resistor 560 ohm			Persentase kenaikan (%)
	Tanpa MPPT	Dengan MPPT	Selisih	
4.9	0.040	0.229	0.189	472.500
5.8	0.174	0.894	0.720	413.793
6.4	0.294	0.900	0.606	206.122

Pada tabel 9 ditunjukkan rata-rata persentase kenaikan daya saat pengujian dilakukan dengan pembebanan 560 ohm adalah 364.138 %.

Tabel 10.

Perbandingan daya tanpa MPPT dengan MPPT pembebanan 1000 ohm

Kecepatan (m/s)	Pembebanan resistor 1000 ohm			Persentase kenaikan (%)
	Tanpa MPPT	Dengan MPPT	Selisih	
4.9	0.030	0.228	0.198	660.000
5.8	0.100	0.604	0.504	504.000
6.4	0.481	0.677	0.196	40.748

Pada tabel 10 ditunjukkan rata-rata persentase kenaikan daya saat pengujian dilakukan dengan pembebanan 1000 ohm adalah 401.583 %.

3.4. Perbandingan Efisiensi Daya Turbin Savonius Dua Sudu Tanpa MPPT dan dengan MPPT

Pada tabel 11 dibawah merupakan perbandingan daya yang diperoleh dari persamaan perhitungan daya turbin angin Savonius. Perhitungan daya turbin angin Savonius dua sudu berukuran tinggi 1 meter dengan diameter 0.9 meter pada kecepatan 4.9 m/s, 5.8m/s, dan 6.4 m/s dengan efisiensi daya rotor turbin Savonius dianggap maksimal 15% dengan faktor pengaruh efisiensi lain diabaikan, daya angin (P_{wind}) dari variasi kecepatan angin dapat dihitung menggunakan persamaan 4 berikut.

$$A = D \times H \quad (2)$$

Keterangan:

A = Area sapu tubin (m^2)

D = Diameter tubin (m)

H = Tinggi tubin (m)

$$P_{wind} = 0.5 \times \rho \times V^3 \times A \quad (3)$$

Keterangan:

ρ = Masa jenis angin, masa jenis angin adalah 1.225 kg/m^3 (kg/m^3)

V = Kecepatan angin (m/s)

P_{wind} = Daya yang tersedia (Watt)

$$P_{output} = \mu \times P_{wind} \quad (4)$$

Keterangan:

P_{output} = Power output

μ = Nilai efisiensi, 15% untuk jenis rotor turbin Savonius

P_{wind} = Daya angin

Tabel 11.

Daya turbin Savonius dua sudu pada koefisien daya maksimal

Kecepatan angin (m/s)	Daya Turbin (w)
4.9	9.73
5.8	17.92
6.4	24.08

Pada tabel 12 berikut ini merupakan data daya turbin Savonius dua sudu saat dilakukan uji tanpa MPPT dan MPPT diaktifkan. Daya tiap pengujian dilakukan bandingkan dengan daya turbin Savonius maksimal yang diperoleh dari persamaan 4. Daya hasil pengujian dilakukan persentase dengan menggunakan persamaan 5 berikut.

$$Efisiensi = \frac{P_{terukur}}{P_{output}} \times 100 \quad (5)$$

Keterangan:

$Efisiensi$ = Nilai persentase efisiensi

$P_{terukur}$ = Nilai daya hasil pengukuran

P_{output} = Daya turbin Savonius maksimal berdasarkan persamaan 3

Tabel 12.

Efisiensi daya turbin Savonius dua sudu terhadap koefisien daya maksimal berdasarkan perhitungan

V (m/s)	P Output (w)	Load (ohm)	Tanpa MPPT		Dengan MPPT		Selisih Daya (w)	Selisih Efisiensi (%)
			P Terukur (w)	Efisiensi (%)	P Terukur (w)	Efisiensi (%)		
4.9	9.73	470	0.163	1.675	0.182	1.871	0.019	0.195
5.8	17.92	470	0.214	1.194	0.928	5.179	0.714	3.984
6.4	24.08	470	0.295	1.225	0.935	3.883	0.640	2.658
4.9	9.73	560	0.040	0.411	0.229	2.354	0.189	1.942
5.8	17.92	560	0.174	0.971	0.894	4.989	0.720	4.018
6.4	24.08	560	0.294	1.221	0.900	3.738	0.606	2.517
4.9	9.73	1000	0.030	0.308	0.228	2.343	0.198	2.035
5.8	17.92	1000	0.100	0.558	0.604	3.371	0.504	2.813
6.4	24.08	1000	0.481	1.998	0.677	2.811	0.196	0.814
Rata-rata							0.421	2.331

Pada tabel 13 dapat dilihat bahwa semua variasi pengujian yang dilakukan dengan mengganti parameter pembebanan dan kecepatan angin menunjukkan bahwa pengaplikasian MPPT pada turbin angin Savonius dua sudu ini berpengaruh terhadap nilai efisiensi output daya yang dihasilkan turbin. Pengaruh tersebut dapat terlihat pada nilai daya yang dihasilkan pada saat pengujian menggunakan MPPT lebih besar dari pada saat MPPT tidak diaktifkan selisih daya terbesar terjadi pada pengujian turbin angin Savonius pada variasi kecepatan angin 6.4 m/s dan pembebanan 560 ohm, selisih daya menggunakan MPPT dan tidak menggunakan MPPT yaitu 0.720 watt dan kenaikan persentasenya efisiensi daya adalah 4.018 %. Sedangkan rata-rata persentase kenaikan efisiensi daya dari semua pengujian adalah 2.331%.

Perhitungan koefisien daya (C_p) dapat dilakukan menggunakan persamaan 6 dan hasil perhitungan koefisien daya ditampilkan pada tabel 13 berikut.

$$C_p = \frac{P_{\text{terukur}}}{P_{\text{wind}}} \quad (6)$$

Tabel 13.

Koefisien daya turbin Savonius dua sudu terhadap daya angin

V (m/s)	P wind (w)	Load (ohm)	Tanpa MPPT		Dengan MPPT		Selisih Cp (%)
			Daya terukur (Pt) (w)	Cp (%)	Daya terukur (Pt) (w)	Cp (%)	
4.9	64.85	470	0.163	0.251	0.182	0.281	0.029
5.8	119.5	470	0.214	0.179	0.928	0.777	0.597
6.4	160.56	470	0.295	0.184	0.935	0.582	0.399
4.9	64.85	560	0.040	0.062	0.229	0.353	0.291
5.8	119.5	560	0.174	0.146	0.894	0.748	0.603
6.4	160.56	560	0.294	0.183	0.900	0.561	0.377
4.9	64.85	1000	0.030	0.046	0.228	0.352	0.305
5.8	119.5	1000	0.100	0.084	0.604	0.505	0.422
6.4	160.56	1000	0.481	0.300	0.677	0.422	0.122
Rata-rata				0.159	0.509	0.350	

Tabel 13 menunjukkan bahwa rata-rata koefisien daya turbin savonius dua sudu pada kondisi tanpa menggunakan sistem MPPT dan menggunakan sistem MPPT masing masing adalah 0.159 % dan 0.509 %, sehingga didapatkan selisih koefisien daya rata-rata adalah 0.350%.

4. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan untuk mengetahui pengaruh pengaplikasian MPPT terhadap efisiensi daya keluaran turbin angin tipe Savonius dua sudu diperoleh kesimpulan penelitian sebagai berikut:

1. Pengambilan daya turbin Savonius dua sudu yang telah dilakukan tanpa menggunakan sistem MPPT mendapatkan rata-rata tegangan dari 9 pengujian sebesar 7.258 volt dan rata-rata arus dari 9 pengujian adalah 0.027 Ampere. Rata-rata daya yang diperoleh dari turbin Savonius dua sudu di 9 variasi pengujian adalah 0.199 watt.
2. Pengambilan daya turbin Savonius dua sudu yang telah dilakukan menggunakan sistem MPPT mendapatkan rata-rata tegangan dari 9 pengujian sebesar 10.606 volt dan rata-rata arus dari 9 pengujian adalah 0.055 Ampere. Rata-rata daya yang diperoleh dari turbin Savonius dua sudu di 9 variasi pengujian adalah 0.620 watt pada efisiensi *DC-DC boost converter* rata-rata sebesar 91.402 %.
3. Dapat disimpulkan bahwa pengaplikasian sistem MPPT P&O pada turbin angin tipe Savonius dua sudu pada penelitian ini memiliki pengaruh positif terhadap efisiensi daya yang dihasilkan dengan rata-rata selisih menggunakan sistem MPPT dan tidak menggunakan sistem MPPT adalah 0.421 watt dan kenaikan efisiensi rata-rata adalah 2.331% jika dibandingkan dengan koefisien daya maksimal pada turbin angin savonius dua sudu berdasarkan perhitungan.
4. Rata-rata koefisien daya (C_p) turbin angin savonius dua sudu tanpa menggunakan MPPT dan menggunakan MPPT masing masing adalah 0.159 % dan 0.509 %, sehingga MPPT memiliki pengaruh positif dikarenakan terjadi kenaikan koefisien daya rata-rata sebesar 0.350%.

Daftar Pustaka

- Anugrah, D., Nrp, E., Pujiantara, A. M., Prof, M. T., Mauridhi, I., Purnomo, H., & Eng, M. (2016). *Design Maximum Power Point Tracking for Wind Turbine Using Modified Perturb & Observe (P&O) Based on Wind Velocity Prediction*.
- Arief, M. F., & Musafa, A. (2019). Perancangan Sistem Mppt Untuk Dua Turbin Angin Kapasitas 300 Watt Pada Kondisi Kecepatan Angin Rendah Menggunakan Metode Perturb & Observe (P&O). *Maestro*, 2(2), 447–454. <https://jom.ft.budiluhur.ac.id/index.php/maestro/article/view/286%0Ahttps://jom.ft.budiluhur.ac.id/index.php/maestro/article/download/286/109>
- Craene, A. P. De. (2021). *How to build a Wind Turbine MPPT Regulator within Li-ion , LifePo4 or Acid Lead battery configuration*. <https://www.hackster.io/philippedc/a-wind-turbine-mppt-regulator-with-an-arduino-uno-783462>
- Fadila, A., Zakaria, I., Fauzan, M., Sahid, & Supriyo. (2019). Rancang Bangun Turbin Angin Tipe Darrieus Tiga Sudu Rangkap Tiga dengan Profil NACA 0006. *Eksergi*, 15(3), 102. <https://doi.org/10.32497/eksergi.v15i3.1785>
- Fauzi, I. R. W., Sugati, D., Yawara, E., & Subardi. (2019). Unjuk Kerja Turbin Angin Dengan Profil Sudu NACA 4412 Dengan Metode Simulasi. *Seminar Nasional Sains Teknologi dan Inovasi Indonesia (SENASTINDO AAU)*, 1(1), 19–26.
- Hau, E. (2013). *Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. Springer.

<https://doi.org/10.4324/9780203103289-9>

- Hidayat, M. F., & Surbaki, A. (2021). Turbin Angin Savonius 3 Sudu Untuk Lampu Perangkap Hama Untuk Masyarakat Kabupaten Cianjur, Jawa Barat. *KAMI MENGABDI*, 1, 38–55.
- Kurniawan, Y., & Dharmawan, I. B. (2021). Prototipe Turbin Angin Savonius Variasi Extra Layers dengan Pengujian Real Wind Condition Prototipe Savonius Wind Turbine Extra Layers Variation With Experiment Real Wind Condition. *Jurnal Polimesin*, 19(1), 48–52.
- Mohamed, S. A., & Sattar, M. A. El. (2019). A comparative study of P&O and INC maximum power point tracking techniques for grid-connected PV systems. *SN Applied Sciences*, 1(2), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s42452-018-0134-4>
- Mousa, H. H. H., Youssef, A. R., & Mohamed, E. E. M. (2021). State of the art perturb and observe MPPT algorithms based wind energy conversion systems: A technology review. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 126(PA), 106598. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106598>
- Mubarok, H., & Whiancaka, B. A. (2020). Optimasi Sistem Turbin Angin Menggunakan Maximum Power Point Tracking (MPPT) dengan Metode Particle Swarm Optimization (PSO). *Techne: Jurnal Ilmiah Elektroteknika*, 19(01), 1–10. <https://doi.org/10.31358/techne.v19i01.226>
- Nugroho, D., Utomo, S. B., & Suprajitno, A. (2021). *Desain Turbin Angin 1500 Watt dengan MPPT Berbasis Algoritma Perturb dan Observe untuk Mengoptimalkan Pembangkit Listrik Tenaga Angin*. 4.
- Otong, M., & Bajuri, R. M. (2017). Maximum Power Point Tracking (MPPT) Pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan Buck-Boost Converter. *Setrum: Sistem Kendali-Tenaga-elektronika-telekomunikasi-komputer*, 5(2), 103. <https://doi.org/10.36055/setrum.v5i2.1563>
- Sahim, K., Santoso, D., & Puspitasari, D. (2018). Investigations on the Effect of Radius Rotor in Combined Darrieus-Savonius Wind Turbine. *International Journal of Rotating Machinery*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/3568542>
- Tawakal, I., & Siregar, I. H. (2020). Uji Eksperimen Kinerja Model Turbin Angin Jenis Swirling Savonius Deflektor Diam Dengan Penambahan Free Drag Reducing Di Terowongan Angin. *Jurnal Teknik Mesin*, 8(1), 153–160.
- Trifiananto, M., Putra, I. S., & Ramadhan, M. E. (2022). Analisis Performa Turbin Angin Vawt (Vertical Axis Wind Turbine) Tipe Hybrid Savonius Darrieus Naca 4712. *Rotor*, 15(1), 1. <https://doi.org/10.19184/rotor.v15i1.29099>