

**Pemantauan Pembangkit Listrik *Hybrid* Tenaga Surya-Angin Sistem Off-grid Berbasis Internet of Things (IoT) untuk Rumah Tinggal**

*Monitoring Solar-Wind Hybrid Power Plants Off-Grid Systems Based on Internet of Things (IoT) for Residential Homes*

**Rangga Julfian Hakim<sup>1\*</sup>, Nur Ishaq Mahmudi<sup>2</sup>, Nike Sartika<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup>Teknik Elektro UIN Sunan Gunung Djati Bandung

Jl. A.H. Nasution No. 105A, Cibiru, Kota Bandung, Jawa Barat, Indonesia

ranggajulfianhakim07@gmail.com<sup>1\*</sup>, nurishaq1000@gmail.com<sup>2</sup>, nikesartika@uinsgd.ac.id<sup>3</sup>

**Abstrak** – Penerapan sumber energi terbarukan dalam sistem pembangkit listrik telah menjadi fokus utama dalam upaya mengurangi emisi gas rumah kaca dan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil yang terus mengalami fluktuasi. Beberapa tahun terakhir, Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) menjadi sebuah solusi dalam kategori pembangkit listrik terbarukan untuk mengatasi pengurangan gas emisi rumah kaca akibat pembangkitan sumber daya listrik konvensional. Namun, penggunaan masing-masing pembangkit listrik terbarukan ini masih memiliki keterbatasan dalam mengatasi fluktuasi pasokan energi dan penyimpanannya. Penelitian ini merancang Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid (PLTH) yang dipadukan dengan teknologi Internet of Things (IoT) untuk mengetahui efisiensi masing-masing pembangkit dan efisiensi maksimal yang didapatkan ketika dua pembangkit tersebut dipadukan menjadi satu sistem yang sama. Internet of Things digunakan untuk memaksimalkan pemantauan jarak jauh sebagai implementasi sistem otomasi yang memiliki teknologi yang dapat dipantau secara langsung, real-time, dimanapun, dan kapanpun. Hasil penelitian menunjukkan penggunaan PLTH memiliki nilai efisiensi konversi energi yang tinggi dengan rata-rata efisiensi yang dicapai sebesar 20.004%. Rata-rata efisiensi PLTS sebesar 14.12% dan rata-rata efisiensi PLTB sebesar 0.85%. Daya yang digunakan pada penelitian ini yaitu sebuah lampu 9Watt dengan rentang pengujian dimulai pukul 8.00 – 16.00 WIB, dari waktu tersebut didapat rentang efisiensi sebesar 14.17% - 22.96%.

**Kata Kunci:** Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid, Pembangkit Listrik Tenaga Surya, Pembangkit Listrik Tenaga Bayu, Internet of Things, Efisiensi Energi.

**Abstract** – The application of renewable energy sources in electricity generation systems has become the main focus in efforts to reduce greenhouse gas emissions and dependence on fossil fuels which continue to fluctuate. In recent years, Solar Power Plants (PLTS) and Wind Power Plants (PLTB) have become a solution in the renewable electricity generation category to overcome the reduction of greenhouse gas emissions due to conventional electricity generation. However, the use of each of these renewable power plants still has limitations in dealing with fluctuations in energy forces and storage. This research designs a Hybrid Power Plant (PLTH) combined with Internet of Things (IoT) technology to determine the efficiency of each generator and the maximum efficiency obtained when the two generators are combined into the same system. The Internet of Things is used to maximize remote monitoring as an implementation of an automation system that has technology that can be monitored directly, in real-time, anywhere and at any time. The research results show that the use of PLTH has a high energy conversion efficiency value with an average efficiency achieved of 20,004%. The average efficiency of PLTS is 14.12% and the average efficiency of PLTB is 0.85%. The power used in this research was a 9Watt lamp with a testing range starting at 8.00 - 16.00 WIB, from this time an efficiency range of 14.17% - 22.96% was obtained.

**Keywords:** Hybrid Power Plants, Solar Power Plants, Wind Power Plants, Internet of Things, Energy Efficiency.

## 1. Pendahuluan

Dalam beberapa tahun terakhir, konsumsi listrik di Indonesia terus meningkat secara signifikan. Menurut data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), selama tahun 2022 penggunaan listrik di Indonesia per Kapita berada di angka 1.172 kilowatt hour (kWh). Angka tersebut naik sebesar 4,5% dibandingkan pada tahun 2021 [1]. Hal ini mendorong upaya manusia untuk mengeksplorasi berbagai potensi energi yang tersedia di negara ini. Meskipun saat ini energi listrik masih didominasi oleh sumber konvensional seperti batu bara dan minyak bumi, namun terdapat keterbatasan dalam hal pasokan sumber daya konvensional dan dampak negatifnya terhadap lingkungan [2]. Oleh karena itu, di Indonesia telah muncul dorongan untuk mengembangkan sumber energi alternatif. Salah satu potensi yang menjanjikan adalah energi terbarukan seperti angin, surya, air, dan yang lainnya.

Sebagai negara tropis, Indonesia memiliki tingkat radiasi matahari yang tinggi dengan rata-rata harian sebesar 4,8 kWh/m<sup>2</sup>/hari [3]. Selanjutnya, potensi energi angin di Indonesia juga memiliki nilai yang besar dalam mendukung upaya pemanfaatan energi bersih untuk masa depan. Menurut Dewan Energi Nasional, Indonesia memiliki potensi pembangkitan energi angin mencapai 154,9 gigawatt (GW) [4]. Energi terbarukan pada saat ini memiliki peluang yang sangat bagus untuk di terapkan di Indonesia, karena sesuai dengan misi Indonesia pada tahun 2045 yaitu menuju Indonesia emas. Potensi ini dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi alternative yang murah dan tersedia sepanjang tahun. Selain itu, kondisi geografis Indonesia yang terdiri dari ribuan pulau menyebabkan masih banyak daerah terpencil yang belum terjangkau oleh listrik PLN [3].

Adanya energi terbarukan tidak menutup kemungkinan untuk memaksimalkan penggunaan pembangkit listrik terbarukan dengan menggunakan segala cara yang ada. Misalnya, pembangkitan energi listrik dengan cara *hybrid* artinya menggabungkan 2 ataupun lebih pembangkit tenaga listrik menjadi satu sistem yang sama. Potensi pembangkit listrik tenaga *hybrid* ini sangat penting diterapkan karena dapat menggantikan dan memaksimalkan pemakaian energi fosil. Hal ini menjadi inovasi yang penting untuk terus mengembangkan pembangkit listrik dengan energi bersih dan terbarukan [5].

Selain pemanfaatan teknologi *hybrid* pada pembangkitan tenaga listrik, untuk mengoptimalkan penggunaan energi bisa dilakukan dengan menggunakan teknologi *Internet of Things* (IoT). *Internet of Things* digunakan untuk melakukan pemantauan kinerja pembangkit listrik secara *real-time*. Data yang dihasilkan dalam pemantauan bersifat terus-menerus yang artinya operator tidak perlu melakukan pemantauan secara berkala dengan pengujian secara manual.

Dalam konteks instalasi penerangan rumah tinggal, penerapan sistem pembangkit listrik tenaga *hybrid* angin dan surya dengan metode *off-grid* menjadi salah satu solusi yang cocok untuk diimplementasikan. Sistem ini dapat menyediakan listrik yang diperlukan untuk penerangan rumah secara mandiri, tanpa harus bergantung pada jaringan listrik PLN saja [6].

Namun, dalam penerapan teknologi ini, perlu ada panduan yang praktis dalam merancang dan memilih komponen yang sesuai untuk memastikan masyarakat dapat mengimplementasikan dan menikmati listrik yang dibuat seperti masyarakat yang sudah terjangkau oleh listrik PLN. Oleh karena itu dilakukan penelitian untuk merancang sistem pembangkit listrik *hybrid* surya dan angin untuk rumah tinggal yang dimaksimalkan dengan teknologi *Internet of Things*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui inovasi yang tepat dan nilai efisiensi dari penggunaan pembangkit listrik tenaga *hybrid* sebagai salah satu pemanfaatan energi bersih dan terbarukan.

Penelitian mengenai pembangkit listrik tenaga *hybrid* telah banyak dilakukan. Diana Hidayanti, Galih Dewangga, Prakash Yoreniko M. P, Ineke Sarita, F. Gatot Sumarno, Wiwik Purwati [7] menguji kinerja pembangkit *hybrid* dengan pemasangan mikrokontroler untuk

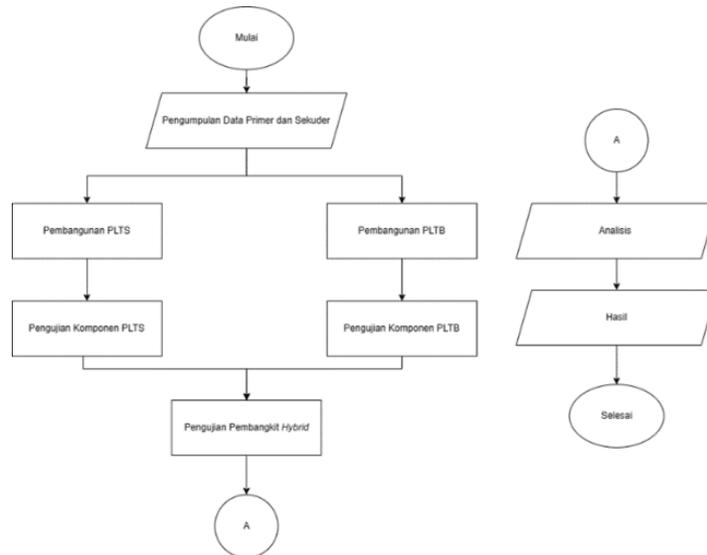
penggerak panel surya. Hasil uji karakteristik pada masing-masing beban didapatkan efisiensi tertinggi pada kecepatan 2,5 m/s. Efisiensi pada beban 15 Watt sebesar 20,968%, beban 19 Watt sebesar 39,48%, beban 23 Watt sebesar 49,57%, dan pada beban 33 Watt sebesar 78,39%. Sedangkan efisiensi terendah didapatkan pada kecepatan 5 m/s . Efisiensi pada beban 15 Watt sebesar 11,27%, beban 19 Watt sebesar 21,64%, beban 23 Watt sebesar 27,96%, beban 33 Watt sebesar 44,29%. Hasil dari pengujian yaitu penggunaan PLTH menghasilkan efisiensi yang lebih baik dibanding penggunaan PLTB maupun PLTS yang digunakan secara terpisah. Berdasarkan hasil pengujian pembangkit *hybrid* dengan pemberian kecepatan angin yang semakin besar nilainya maka efisiensi yang didapatkan semakin kecil dan dengan dipasangnya mikrokontroler pada panel surya, panel surya dapat menangkap energi matahari secara optimal. Semakin besar beban yang diberikan maka semakin besar efisiensi yang didapatkan.

Penelitian Wijaya Kusuma Nasution, Natalia Pratamasari, Sinta Wiranda, Tiurmarizky Waruwu [8] membahas mengenai Pembangkit Listrik Tenaga *Hybrid* (Angin dan Surya) menggunakan Metode *Brainstorming* untuk mengatasi permasalahan biaya listrik yang besar pada UMKM sarang burung walet. Setelah dilakukan kegiatan *brainstorming*, dilakukan pembuatan *mind mapping*. Dari *brainstorming* didapatkan hasil perancangan produk pembangkit listrik tenaga *hybrid* (surya dan angin), fungsi utama pembangkit listrik tenaga surya, fungsi pendukung adalah pembangkit listrik tenaga angin, tenaga yang dikeluarkan 18 volt, kapasitas panel surya 100 watt, menggunakan mikrokontroler arduino uno, penopang kincir angin dan panel surya menggunakan bahan PVC, bahan penopang produk secara keseluruhan adalah kayu, dan bahan pendukung adalah *step-up* (16 A).

**2. Metode Penelitian**

**2.1. Alur Penelitian**

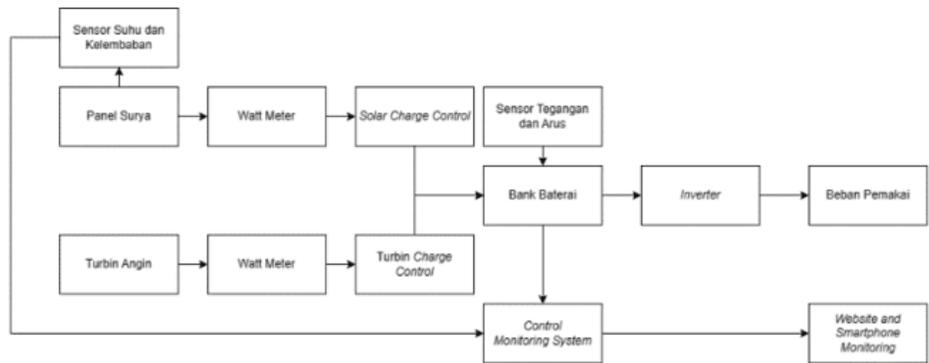
Alur penelitian dari proses pembuatan rancangan pembangkit *hybrid* ini dimulai dari pengumpulan data dan kajian literatur untuk menentukan sumber informasi yang dapat digunakan sebagai bahan uji coba serta dijadikan sebagai parameter utama dalam pembentukan rancangan sistem pembangkit listrik *hybrid* ini. Alur penelitian ditunjukkan pada gambar 1.



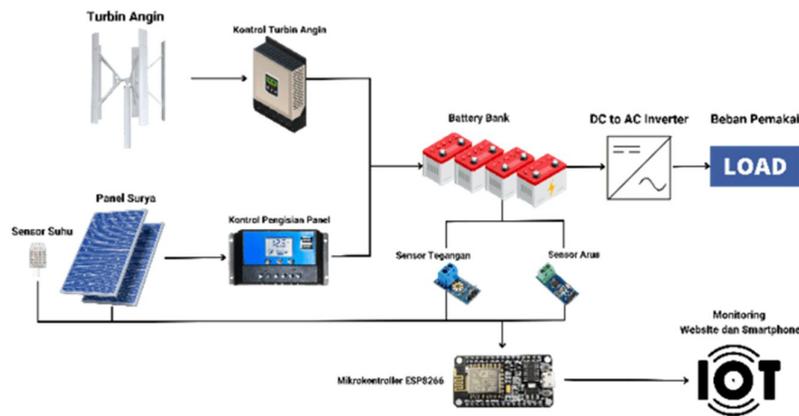
Gambar 22. Diagram alir penelitian.

**2.2. Skema Rancangan Pembangkit *Hybrid Off-Grid***

Desain sistem *off-grid* pembangkit listrik *hybrid* tenaga surya dan angin terdiri dari 1 buah panel surya dengan kapasitas 60Wp, 4 buah kincir turbin angin vertikal dengan generator 120 VDC 300 Watt, *inverter* DC ke AC 1000 Watt, 1 buah baterai aki 12VDC, *Solar Charge Control*, *Wind Turbin Control*, Watt meter, sensor suhu dan kelembaban, tegangan. Sedangkan beban yang dijadikan objek menggunakan dua skema, yaitu pengujian dengan beban lampu 9 Watt dan pengujian rumah tinggal sesuai dengan kondisi nyatanya dengan total KWh sebesar 9800 KWh/Hari atau jika dikonversi kedalam satuan watt maka total daya yang dibutuhkan oleh satu rumah tinggal sesuai dengan kebutuhan sebesar 194 Watt. Skema rancangan pembangkit listrik *hybrid off-grid* ditunjukkan pada gambar 2. Gambar 3 merupakan visualisasi dari skema rancangan yang dibuat.



Gambar 23. Skema rancangan pembangkit listrik *hybrid off-grid*.



Gambar 24. Visualisasi skema rancangan pembangkit listrik *hybrid off-grid*.

Efisiensi dari PLTH dapat ditentukan dengan menggunakan rumus berdasarkan Hukum Termodinamika II sebagai berikut [9]:

$$\eta_{PLTH} = \frac{P_{beban}}{P_{K+E}} \times 100\% \tag{1}$$

Keterangan:

$P_{beban}$  = Daya pada beban (W)

Pk = Daya kinetik turbin angin (W)  
 E = Daya masukan pada panel surya (W)

**2.3. Skema Beban yang Digunakan**

Skema pertama pengujian dilakukan hanya menggunakan 1 buah lampu dengan daya 9 Watt. Total beban yang digunakan kemudian diakumulasikan dengan menggunakan *software* PVSYSYST untuk analisis daya dalam sebuah sistem yang digunakan dalam pembangkit listrik tenaga surya. Jumlah beban yang digunakan ditunjukkan pada gambar 4.

Total daya yang digunakan dalam rumah tinggal untuk penelitian ini ialah sebesar 108 Wh/hari dengan total peralatan rumah tinggal yang digunakan untuk 1 lampu 9 Watt total kebutuhan energi sebesar 108 Wh. Pada gambar 4 kebutuhan energi juga telah diatur waktu penggunaanya mulai dari selama 12 Jam pemakaian.

Daily consumptions						
Number	Appliance	Power	Daily use	Hourly distrib.	Daily energy	
1	Lamps (LED or fluo)	9 W/lamp	12.0 h/day	OK	108 Wh	
0	TV / PC / Mobile	0 W/app	0.0 h/day		0 Wh	
0	Domestic appliances	0 W/app	0.0 h/day		0 Wh	
0	Fridge / Deep-freeze	0.00 kWh/day	0.0		0 Wh	
0	Dish- and Cloth-washer	0.0 W aver.	0.0 h/day		0 Wh	
0	Magic Com (Penanak Nasi)	0 W/app	0.0 h/day		0 Wh	
0	Kipas Angin	0 W/app	0.0 h/day		0 Wh	
	Stand-by consumers	0 W tot	24 h/day		0 Wh	
<b>Total daily energy</b>					<b>108 Wh/day</b>	
<b>Monthly energy</b>					<b>3.2 kWh/mth</b>	

Gambar 25. Data penggunaan beban.

**2.4. Desain Solar Panel**

Desain solar panel yang digunakan menggunakan perhitungan dengan bantuan sebuah website Global Solargis untuk menentukan *Peak Sun Hour* (PSH) yang terhitung. Di Indonesia, proses panel surya bekerja secara optimal dalam menangkap sinar matahari berlangsung selama 5 jam saja. Hal ini sesuai dengan hasil yang di tetapkan oleh Global Solargis dengan nilai 5.007 kWh/m<sup>2</sup> per hari [10].

SITE INFO		
Map data <span style="float: right;">Per day -</span>		
Specific photovoltaic power output	PVOUT specific	4.039 kWh/Wp per day
Direct normal irradiation	DNI	3.396 kWh/m <sup>2</sup> per day
Global horizontal irradiation	GHI	5.007 kWh/m <sup>2</sup> per day
Diffuse horizontal irradiation	DIF	2.499 kWh/m <sup>2</sup> per day
Global tilted irradiation at optimum angle	GTI opta	5.079 kWh/m <sup>2</sup> per day
Optimum tilt of PV modules	OPTA	12 / 0 °
Air temperature	TEMP	23.6 °C
Terrain elevation	ELE	706 m

Gambar 26. (1) *Peak Sun Hour* di Cipadung, Bandung, (2) Sudut kemiringan solar panel.

Penentuan jumlah nilai Wp pada solar panel yang akan digunakan dapat dihitung dengan rumus persamaan berikut [11]:

$$Watt\ peak\ (Wp)\ sunny\ weather = \frac{DEC}{PSH} \tag{2}$$

Keterangan:

DEC = Total energi dalam sehari (Wh)

PSH = Jumlah jam sinar matahari puncak (jam)

Pengujian skema 1 menggunakan beban 1 buah lampu dengan daya 9 Watt dengan durasi pemakaian 6 jam sehingga total besar pemakaian listrik adalah sebesar 54 Wh/hari. Penentuan jumlah panel yang digunakan berdasarkan persamaan (2) adalah:

$$Watt\ peak\ (Wp)\ sunny\ weather = \frac{DEC}{PSH} = \frac{54\ Wh}{5\ jam} = 10.8\ Wp$$

Hasil perhitungan diambil ketika cuaca sedang mendung dan disesuaikan dengan penggunaan solar panel yang dimiliki yaitu dengan kapasitas 60Wp. Maka kebutuhan jumlah solar panel yang digunakan dapat dihitung dengan persamaan (3) [12]:

$$\Sigma PV = \frac{DEC}{Cap_{pv} \times PSH} \tag{3}$$

Keterangan:

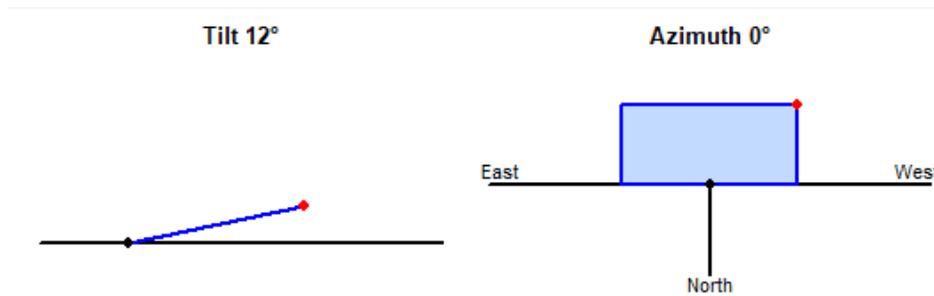
DEC = Total energi dalam sehari (Wh)

Cap<sub>pv</sub> = Kapasitas panel surya pada beban puncak

PSH = Jumlah jam sinar matahari puncak (Jam)

$$\Sigma PV = \frac{DEC}{Cap_{pv} \times PSH} = \frac{54\ Wh}{60\ Wp \times 5} = 0.18 \approx 1\ Buah$$

Penentuan sudut kemiringan berdasarkan hasil analisis dengan menggunakan *software* Global Solargis menghasilkan bawa sudut *tilt* (sudut antara panel surya dan permukaan bumi) sebesar 12° dengan *azimuth* (arah mata angin dari cahaya matahari datang) sebesar 0°. Maka skema penentuannya seperti ditunjukkan pada gambar 6.



Gambar 27. Skema sudut *tilt* dan *azimuth*.

Efisiensi dari solar panel dapat ditentukan dengan menggunakan rumus berdasarkan Hukum Termodinamika II sebagai berikut [9]:

$$\eta_{PLTS} = \frac{Vm \times Im}{Pi \times a} \times 100\% \tag{4}$$

Keterangan:

- $V_m$  = Tegangan maksimum (V)
- $I_m$  = Arus maksimum (A)
- $P_i$  = Intensitas radiasi matahari ( $W/m^2$ )
- $A$  = Luas penampang panel surya ( $m^2$ )

### 2.5. Desain Solar Charge Control

Desain solar panel terdapat 3 buah koneksi yang masing masing terhubung sesuai dengan fungsinya. Koneksi pertama yaitu untuk disambungkan oleh solar panel, koneksi kedua disambungkan ke dalam baterai yang digunakan, dan koneksi ketiga adalah sambungan untuk ke beban yang dipakai.



Gambar 28. Desain solar charge control

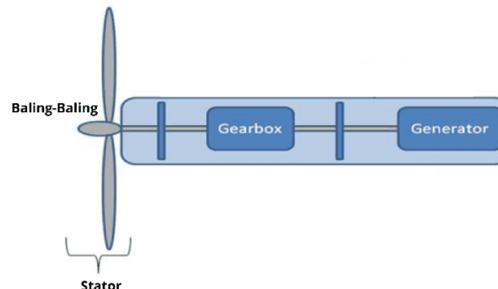
Perhitungan kebutuhan arus maksimal dari solar charge control yang digunakan bisa menggunakan rumus berikut [13]:

$$SCC = \frac{Capt_{pv}}{V_{batt}} \quad (5)$$

$$SCC = \frac{Capt_{pv}}{V_{batt}} = \frac{60 W}{12 v} = 5 \text{ Ampere}$$

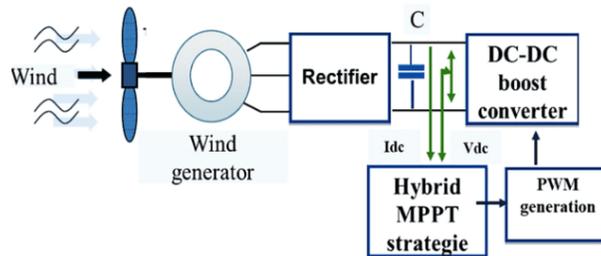
### 2.6. Desain Turbin Angin

Desain mekanis turbin angin terdiri dari 4 buah bilang kincir dengan bentuk vertikal, gearbox, dan generator DC. Bahan turbin angin yang digunakan menggunakan paralon PVC dengan diameter 3 inch. Desain turbin angin dapat dilihat pada gambar 8 [14].



Gambar 29. Desain turbin angin.

Untuk menstabilkan tegangan keluaran dari turbin angin digunakan rangkaian elektronika berupa rangkaian DC-DC Converter (DC Chopper). Konverter ini berperan untuk mengubah tegangan DC dari sumber yang tetap ataupun berubah-ubah menjadi tegangan keluaran yang tetap dengan cara mengatur faktor kerja (*duty cycle*). Konverter ini memanfaatkan sistem *charging* dan *discharging* pada induktor dengan metode *switching*. Bentuk rangkaian konverter dapat dilihat pada gambar 9 [15].



Gambar 30. Konverter DC-DC turbin angin.

Daya yang dihasilkan oleh turbin kincir angin yang dibuat dapat dihitung dengan menggunakan rumus persamaan matematis berdasarkan Hukum Kekekalan Energi. Maka dapat diketahui bahwa [16]:

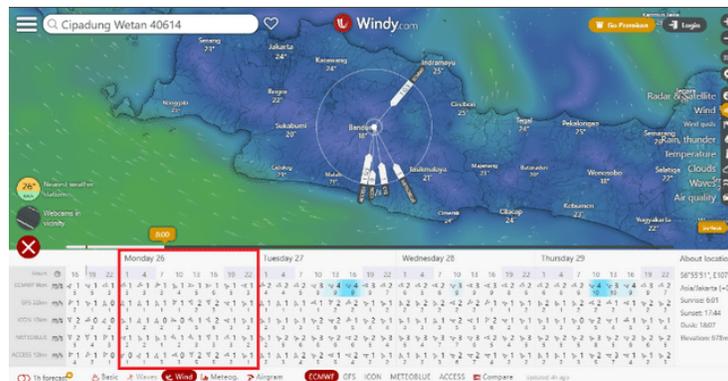
$$P_k = \frac{1}{2} \rho \times p \times A \times V^3 \tag{6}$$

Keterangan:

- $P_k$  = Daya kinetik (W)
- $\rho$  = massa jenis udara ( $\text{Kg/m}^3$ )
- $A$  = Luas sapuan baling-baling turbin ( $\text{m}^2$ )
- $V$  = kecepatan angin (m/s)

### 2.7. Skema Perhitungan Kecepatan Angin

Penentuan kecepatan angin pada suatu wilayah dapat dilakukan pengukuran dengan menggunakan 2 cara yaitu dengan menggunakan alat ukur berupa anemometer ataupun dengan melakukan pemantauan pada sebuah aplikasi berbasis *website*. Pada penelitian ini pengukuran arah dan kecepatan angin diukur dengan menggunakan sebuah aplikasi yang bernama windy.com dimana aplikasi ini menyediakan berbagai fitur yang lengkap untuk mendapatkan parameter pengukuran kecepatan angin yang diinginkan. Data pengukuran kecepatan angin diambil pada hari minggu tanggal 25 Juni 2023 dengan rentang waktu pengukuran dimulai dari jam 08:00 – 16:00 WIB. Hasil penentuan kecepatan angin ditunjukkan pada gambar 10.



Gambar 31. Penentuan kecepatan angin.

Tegangan keluaran yang dihasilkan oleh turbin menggunakan generator DC. Maka untuk penentuan daya keluaran angin dapat menggunakan Hukum Kekalan Energi dengan rumus [17]:

$$P_{keluaran\ angin} = V_a \times I_a \tag{7}$$

Keterangan:

- $P_{keluaran\ angin}$  = Daya keluaran generator DC (W)
- $V_a$  = Tegangan keluaran generator DC (V)
- $I_a$  = Arus keluaran generator DC (A)

Efisiensi dari PLTB dapat ditentukan dengan menggunakan rumus berdasarkan Hukum Termodinamika II sebagai berikut [18]:

$$\eta_{PLTB} = \frac{P_{keluaran\ Angin}}{P_k} \times 100\% \tag{8}$$

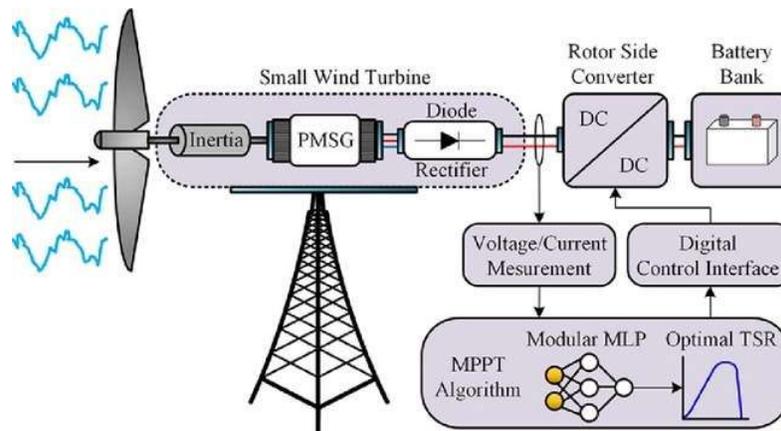
Keterangan:

- $V_m$  = Tegangan maksimum (V)
- $I_m$  = Arus maksimum (A)
- $P_i$  = Intensitas radiasi matahari ( $W/m^2$ )
- $A$  = Luas penampang panel surya ( $m^2$ )

### 2.8. Desain Wind Turbin Control

*Maximum Power Point Tracking* (MPPT) merupakan sebuah metodologi yang biasa digunakan pada pembangkit tenaga angin atau pembangkit tenaga tenaga surya sehingga dapat memaksimalkan pemanenan daya dari sumber energi terbarukan [19].

Perbandingan daya sebelum dan setelah proses perturbasi digunakan sebagai referensi untuk menyesuaikan tegangan pada langkah berikutnya dan mencapai titik daya maksimum (MPP) [19]. Gambar desain *wind turbine controller* dan konsep nya di tampilkan pada gambar 11 [20].



Gambar 32. Desain MPPT *wind turbine controller*.

### 2.9. Desain Inverter

*Inverter* adalah alat yang berguna untuk mengubah arus DC menjadi AC [21]. Acuan penggunaan *inverter* ada pada beban. Beban yang digunakan untuk penelitian antara 9 watt,

sehingga inverter yang digunakan harus lebih dari 9 watt. Inverter yang digunakan pada penelitian ini memiliki kapasitas 1000 Watt dan bertipe *pure sine wave* (PSW).

### 2.10. Desain Baterai

Pada penelitian ini baterai digunakan pada siang hari, sehingga pada saat proses *charging* selesai, baterai digunakan sebagai *storage* dan untuk memuat *router* agar proses pengambilan data berjalan dengan baik. Baterai memiliki kutub negatif dan positif yang terhubung ke *inverter* dan jalur ke SCC dan WTC. Persyaratan nilai minimal arus baterai yang digunakan adalah sebagai berikut [22]:

$$\text{Kapasitas Baterai} = \frac{DEC}{V_{batt}} \tag{10}$$

$$\text{Kapasitas Baterai} = \frac{108Wh}{12 V} = 1.5 \text{ Ah.}$$

Batas debit baterai disebut *Depth of Discharge* (DoD), yang dinyatakan dalam satuan persen. Baterai memiliki DOD 80%, artinya hanya 80% dari energi yang tersedia yang dapat digunakan dan 20% tersisa sebagai cadangan. Semakin dalam DoD diterapkan pada baterai, semakin pendek siklus baterai. Jika baterai tidak menyimpan daya yang cukup untuk memenuhi permintaan selama periode tanpa matahari, sistem akan kehabisan daya dan tidak dapat memenuhi konsumsi beban.

Salah satu caranya adalah dengan memperkirakan jumlah hari sistem beroperasi secara mandiri atau otonom. Pada penelitian ini, karena beban yang digunakan kecil, estimasi jumlah hari adalah 2 hari. Kapasitas baterai dengan DoD dan otonomi diketahui, maka baterai yang dibutuhkan adalah [23]:

$$\Sigma_{Batt} = \left( \frac{DEC}{Cap_{Batt} \times DOD} \times \text{days of autonomy} \right) \tag{11}$$

$$\frac{54}{12 V \times 3,5 Ah \times 80\%} \times 2 = 1.6$$

Karena penelitian ini menggunakan baterai VRLA 12 V, 3.5 Ah maka perhitungannya adalah sebagai berikut:

$$\Sigma_{Batt} = \frac{54}{12 V \times 3.5 Ah \times 80\%} \times 2 = 3.2 \approx 4 \text{ pcs}$$

### 2.11. Implementasi

Sistem PLTH *off-grid* diimplementasikan dengan merangkai hasil desain berupa gambar atau diagram untuk direalisasikan menjadi perangkat keras. Pada sistem PLTH *off-grid*, panel surya dengan kapasitas 60 Wp dan kincir angin vertikal digunakan sebagai alat utama yang dapat mengubah energi matahari menjadi energi listrik. Keluaran yang dihasilkan pada panel surya dan kincir angin berupa arus listrik DC yang tersimpan di dalam baterai dan dikendalikan menggunakan *solar charge controller* dan *wind turbin controller*. Arus listrik yang dibutuhkan untuk beban rumah tangga adalah listrik AC, maka penelitian ini menggunakan inverter 1000 Watt sebagai penyearah DC ke AC. Pada tahap awal penerapan alat yaitu pemasangan solar panel di atap rumah tinggal. Gambar 12 menunjukkan implementasi pemasangan panel surya dan kincir angin beserta instalasi nya.



Gambar 12. Implementasi pembangkit listrik tenaga *hybrid*.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1. Data Hasil Pengujian

Data hasil pengujian diperoleh dari berbagai macam pengukuran dari turbin angin, panel surya, baterai, dan beban dengan menggunakan berbagai macam alat ukur seperti sensor tegangan, sensor arus, anemometer dan integrasi *website*, sensor suhu, sensor kelembaban dan sensor intensitas cahaya. Tabel 1 menunjukkan hasil pengukuran beberapa parameter yang diuji sedangkan hasil pengujian sistem pembangkit *hybrid* ditunjukkan pada tabel 3.

Tabel 1. Data hasil pengujian sistem pembangkit *hybrid*.

Waktu	Turbin Angin			Panel Surya		Baterai		Beban	
	Kecepatan Angin (m/s)	Tegangan (V)	Arus (A)	Tegangan (V)	Arus (A)	Tegangan (V)	Arus (A)	Tegangan (V)	Daya (W)
08:00	2	5	0.08	17.5	2.17	13.66	0.3	0.04	9
09:00	2	5.2	0.08	18.2	2.36	13.66	0.3	0.04	9
10:00	6.5	6	0.1	20	2.48	13.64	0.3	0.04	9
11:00	6.5	6.9	0.11	21.5	2.66	13.64	0.3	0.04	9
12:00	6.5	7	0.11	21.9	2.71	13.59	0.3	0.04	9
13:00	11.5	10	0.16	22	2.73	13.59	0.3	0.04	9
14:00	11.5	10.1	0.16	19.4	2.41	13.59	0.3	0.04	9
15:00	11.5	10.2	0.17	19	2.36	13.54	0.3	0.04	9
16:00	11.5	10.4	0.17	18	2.24	13.54	0.3	0.04	9

Pengujian dilakukan selama 9 jam dalam waktu 1 hari dimulai pada pukul 08:00 hingga 16:00. Nilai kecepatan angin yang terukur memiliki rata-rata sebesar 7.72 m/s, nilai rata-rata tegangan yang dihasilkan oleh turbin angin, panel surya, baterai, dan beban berturut-turut adalah 7.86 V, 19.72 V, 13.6 V, dan 0.04 V. Nilai arus yang dihasilkan oleh turbin angin, panel surya, dan aki berturut-turut adalah 0.12 A, 2.45 A, 0.3 A.

Tabel 2. Data hasil pengujian sistem pembangkit *hybrid*.

Waktu	Intensitas Matahari (W/m <sup>2</sup> )	Kelembaban (%)	Suhu (°C)
08:00	890	79.09	26.79
09:00	907	79.19	26.79
10:00	915	79.3	26.79
11:00	1023	79.4	29.74
12:00	1023	79.5	29.74
13:00	1023	79.59	29.74
14:00	895	79.69	26.7
15:00	880	79.59	26.7
16:00	870	79.4	26.7

Data hasil pengukuran lanjutan terdapat pada 3 berupa hasil pengukuran dari intensitas matahari, kelembaban lingkungan, dan suhu. Nilai rata-rata yang didapatkan pada parameter intensitas matahari, kelembaban, dan suhu berturut-turut adalah 936.2 W/m<sup>2</sup>, 79.4 %, dan 27.74 °C. Nilai parameter yang diukur mempunyai peran pada masing-masing hasil yang nanti digunakan untuk menentukan efisiensi dari setiap pembangkit listrik yang dibuat.

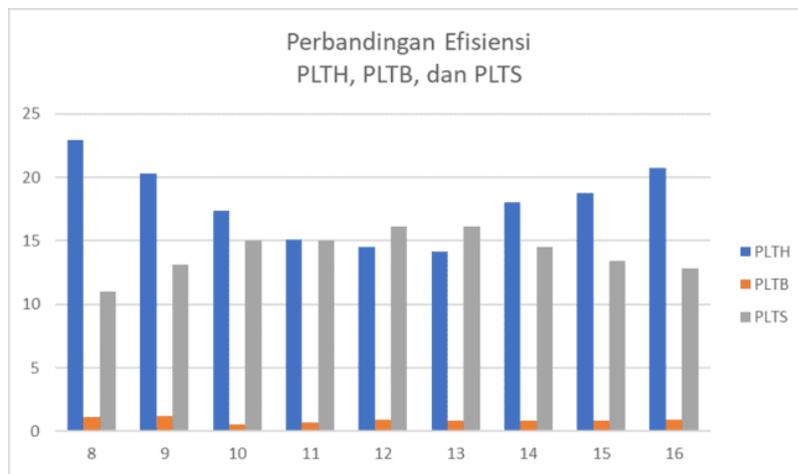
Tabel 3. Data hasil pengujian sistem pembangkit *hybrid*.

Waktu	Massa Udara (Kg/m <sup>3</sup> )	Pk (W)	E (W)	Pkeluaran (W)	Efisiensi PLTH (%)	Efisiensi PLTB (%)	Efisiensi PLTS (%)
08:00	11.7	0.35	37.97	8.8	22.96	1.14	11
09:00	11.7	0.35	42.95	8.8	20.32	1.18	13.15
10:00	11.7	1.14	49.6	8.8	17.34	0.52	15.05
11:00	11.7	1.14	57.19	8.8	15.08	0.66	15
12:00	11.7	1.14	59.42	8.76	14.53	0.87	16.11
13:00	11.7	2.01	60.06	8.76	14.17	0.79	16.11
14:00	11.7	2.01	46.75	8.8	18.04	0.8	14.51
15:00	11.7	2.01	44.84	8.76	18.78	0.86	13.4
16:00	11.7	2.01	40.32	8.76	20.78	0.87	12.8

Data hasil pengukuran dan perhitungan berikut diambil sesuai dengan kondisi nya masing-masing. Nilai efisiensi ditampilkan pada PLTH, PLTS, dan PLTB. Nilai rata-rata efisiensi PLTB sebesar 0.85%, sedangkan nilai rata-rata efisiensi PLTS yang digunakan sebesar 14.12% Nilai efisiensi PLTH sebesar 20.004%. Hal ini menandakan bahwa penggunaan PLTS berhasil digunakan dan menaikkan nilai efisiensi dari pembangkit listrik surya dan angin.

### 3.2. Analisis Karakteristik Waktu Terhadap Efisiensi

Analisis waktu terhadap efisiensi digunakan untuk mengetahui perbandingan atau tingkat efisiensi pada saat penerapan PLTH dengan PLTB, dan PLTS. Pada gambar 13 terlihat bahwa penggunaan PLTH menghasilkan rata-rata efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan penggunaan PLTB ataupun PLTS nya saja. Hal ini telah dibuktikan dengan tabel perhitungan yang tertera pada data tabel Pengujian pada tabel 1 dan 2 serta tabel 3 untuk hasil perbandingan efisiensi penggunaan PLTH terhadap PLTB dan PLTS nya saja.

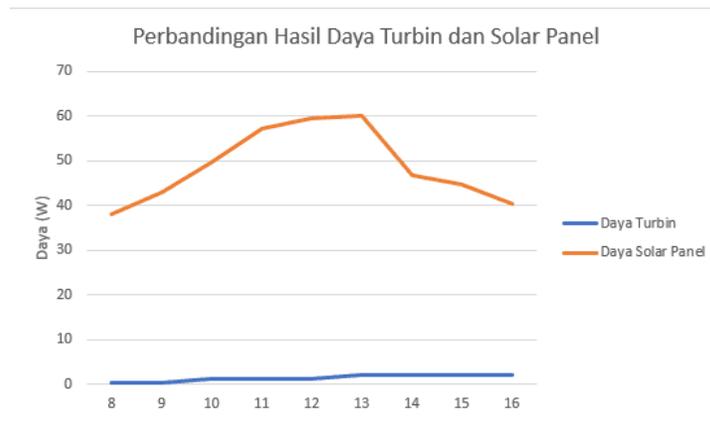


Gambar 33. Grafik perbandingan waktu dan efisiensi PLTH, PLTS, dan PLTB.

### 3.3. Analisis Daya Turbin dan Solar Panel Terhadap Waktu

Gambar 14 menunjukkan bahwa daya yang dihasilkan solar panel lebih besar dibandingkan daya yang dihasilkan oleh turbin angin. Hal ini dipengaruhi oleh kondisi lingkungan sekitar pengukuran. Pada pukul 8.00 perbandingan daya turbin yang dihasilkan dengan daya yang dihasilkan pada solar panel memiliki selisih persentase sebesar 62.70%. Pada pukul 9.00 memiliki selisih sebesar 71%. Pada pukul 10.00 memiliki selisih sebesar 80.77%. Pada pukul 11.00 memiliki selisih sebesar 93.42%. Pada pukul 12.00 memiliki selisih sebesar 97.13%. Pada pukul 13.00 memiliki selisih sebesar 96.65%. Pada pukul 14.00 memiliki selisih sebesar 74.57%. Pada pukul 15.00 memiliki selisih sebesar 71.38%. Pada pukul 16.00 memiliki selisih sebesar 63.85%.

Nilai daya maksimum pada panel surya dengan persentase terbesar berada pada pukul 12.00 atau siang hari. Hal ini menandakan bahwa intensitas cahaya matahari pada pukul 12.00 di daerah Cipadung sangat terik dan terang yang membuat solar panel mampu mengeluarkan daya maksimalnya. Sedangkan pada penggunaan turbin angin, daya maksimum dengan persentase terbesar berada pada rentang pukul 13.00 sampai 16.00, ini menandakan bahwa pada pukul tersebut kecepatan angin lebih besar dari pada pukul 8.00 hingga 12.00 sehingga membuat turbin dapat menghasilkan daya yang terbesar dari waktu lainnya.



Gambar 34. Grafik perbandingan hasil daya turbin dan solar panel

### 3.4. Sistem Monitoring Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid

Sistem *monitoring* pada sistem pembangkit listrik tenaga *hybrid* berfungsi untuk memantau kapasitas dari perangkat yang digunakan seperti tegangan baterai, arus baterai, tegangan yang dikeluarkan oleh panel surya dan turbin, arus yang dikeluarkan oleh panel surya dan turbin, nilai suhu dan kelembaban lingkungan yang digunakan. Sehingga memudahkan para pengguna untuk melakukan analisis data untuk mengetahui kesehatan ataupun riwayat pengukuran yang dihasilkan oleh sistem pembangkit *hybrid* ini.

Sistem *monitoring* ini menggunakan Platform Ubidots, dimana platform ini memiliki berbagai macam keunggulan dan mudah digunakan seperti pengguna lain bisa melakukan *monitoring* secara langsung tanpa harus memiliki akun. Akan tetapi tidak bisa mengubah desain ataupun parameter yang diukur oleh sistem *monitoring* ini. Hasil tampilan sistem *monitoring* terdapat pada gambar 15.



Gambar 35. Sistem *monitoring* pembangkit listrik tenaga *hybrid*.

Keluaran data ini berupa data *logger* yang tersimpan di dalam *platform* tersebut yang dapat diakses oleh pemilik yang sudah memiliki akun tersebut. Sehingga data *logger* yang didapatkan bisa dilakukan analisis kesehatan ataupun penyakit ketika terdapat nilai yang terukur tidak sesuai standar yang telah ditetapkan.

#### 4. Kesimpulan

Sistem pembangkit listrik *hybrid* yang menggunakan tenaga angin dan surya dapat memaksimalkan produksi energi dan mengurangi ketergantungan pada sumber daya yang biasa digunakan (PLN) ketika beban yang digunakan sebesar 9Watt pada lampu penerangan, nilai efisiensi didapatkan pada penggunaan sistem pembangkit listrik *hybrid* sebesar 14.17% - 22.96%.

Kombinasi tenaga angin dan surya dalam sistem ini memungkinkan untuk produksi energi yang lebih stabil. Ketika satu sumber energi sedang tidak aktif atau mengalami penurunan produksi, sumber energi lainnya masih dapat memberikan pasokan listrik. Hal ini membantu memastikan ketersediaan energi yang konsisten untuk penerangan rumah tinggal, terlepas dari kondisi cuaca atau waktu. Untuk jangka waktu yang panjang, sistem pembangkit listrik *hybrid* tenaga angin dan surya *off-grid* dapat menghasilkan penghematan biaya yang signifikan.

Secara keseluruhan, sistem pembangkit listrik *hybrid* tenaga angin dan surya *off-grid* merupakan solusi yang efisien, ekonomis, ramah lingkungan, dan memberikan kemandirian energi. Dengan memanfaatkan sumber energi terbarukan, sistem ini dapat menjadi alternatif yang menarik untuk memenuhi kebutuhan penerangan rumah tinggal.

#### Referensi

- [1] A. M. H. Putri, "Tak Sampai Target, Konsumsi Listrik RI Naik 4,45% pada 2022," CNBC Indonesia.
- [2] M. Yu, "Assessment on the Environmental Impact of Conventional Energy Forms," *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 680, no. 1, p. 012002, Mar. 2021, doi: 10.1088/1755-1315/680/1/012002.
- [3] "Matahari untuk PLTS di Indonesia," Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- [4] Dewan Energi Nasional, *Outlook Energi Indonesia 2022*. Jakarta, 2022.
- [5] "Mengenal Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid," Fakultas Teknologi Maju dan Multidisiplin Universitas Airlangga.
- [6] N. Q. Nawafilah, H. R. Agustapraja, and N. Purnomo, "Penerapan Sistem Hybrid Pembangkit Listrik Tenaga Angin Dan Tenaga Surya Di Desa Pataan, Kec.Sambeng, Kab.Lamongan," *Jurnal Mandala Pengabdian Masyarakat*, vol. 3, no. 2, pp. 174–180, Dec. 2022, doi: 10.35311/jmpm.v3i2.91.

- [7] Hidayanti Diana, G. Dewangga, P. Yoreniko, I. Sarita, G. Sumarno, and W. Purwati, "Rancang Bangun Pembangkit Hybrid Tenaga Angin dan Surya dengan Penggerak Otomatis Pada Panel Surya," *EKSERGI*, vol. 15, no. 3, pp. 93–101, 2019.
- [8] W. K. Nasution, N. Pratamasari, S. Wiranda, and T. Waruwu, "Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid (Angin dan Surya) Menggunakan Metode Brainstorming," *Talenta Conference Series: Energy and Engineering (EE)*, vol. 5, no. 2, pp. 427–432, Dec. 2022.
- [9] University of Wisconsin Steven Points, "Energy Efficiency and the Second Law of Thermodynamics," <https://www.uwsp.edu/wcee/wcee/pd/keep-pd/energy-module/unit-2-section-d/>.
- [10] Cakrawala, "Cara Menghitung Kebutuhan PLTS Skala Rumahan," GESAINSTECH.
- [11] Z. Hyder, "What is a peak sun hour? What are peak sun hour numbers for your state?," <https://www.solarreviews.com/blog/peak-sun-hours-explained>.
- [12] M. Y. Mappedasse, Mustakim, and Firdaus, "Studi Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Sebagai Sumber Listrik untuk Kapal Pinisi," *Jurnal Media Elektrik*, vol. 19, no. 3, pp. 194–199, Aug. 2022.
- [13] A. Jaenul, S. Wilyanti, A. L. Rifai, and F. Anjaya, "Rancang Bangun Pemanfaatan Solar Cell 100Wp untuk Charger Handphone di Taman Bambu Jakarta Timur," *Seminar Nasional Penelitian dan Pengabdian pada Masyarakat*, pp. 194–198, Sep. 2021.
- [14] Emerson, "Wind Turbine Control Methods," <https://www.ni.com/en/solutions/energy/condition-monitoring/wind-turbine-control-methods.html#:~:text=You%20can%20use%20different%20control,pitch%20and%20yaw%20control%2C%20respectively>.
- [15] K. Dahmane *et al.*, "Hybrid MPPT Control: P&O and Neural Network for Wind Energy Conversion System," *Journal of Robotics and Control (JRC)*, vol. 4, no. 1, pp. 1–11, Jan. 2023, doi: 10.18196/jrc.v4i1.16770.
- [16] PennState College of Earth and Mineral Sciences, "Wind Energy and Power Calculations," <https://www.e-education.psu.edu/emsc297/node/649>.
- [17] Windy Nation, "Wind Turbine Dump and Diversion Loads: What They Do and How to Choose the Right System," <https://www.windnation.com/blogs/articles/wind-turbine-dump-and-diversion-loads-what-they-do-and-how-choose-right-s>.
- [18] Y. Charabi and S. Abdul-Wahab, "Wind turbine performance analysis for energy cost minimization," *Renew Wind Water Sol*, vol. 7, no. 1, p. 5, Dec. 2020, doi: 10.1186/s40807-020-00062-7.
- [19] M. L. D. Kadarnis and A. Hamzah, "Desain Dan Simulasi Maximum Power Point Tracking (Mppt) Perturb And Observe (P&O) Dengan Kendali Arduino Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Angin Kecepatan Rendah," *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Teknik*, vol. 6, no. 1, pp. 1–7, Jun. 2019.
- [20] D. R. Lopez-Flores, J. L. Duran-Gomez, and M. I. Chacon-Murguia, "A Mechanical Sensorless MPPT Algorithm for a Wind Energy Conversion System based on a Modular Multilayer Perceptron and a Processor-in-the-Loop Approach," *Electric Power Systems Research*, vol. 186, p. 106409, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106409.
- [21] Ardiansa and A. A. Akbar, "PERANCANGAN ALAT PENGUBAH ARUS DC KE AC BERBASIS MIKROKONTROLER SEBAGAI PENGGANTI PAGAR KEBUN," *Antivirus: Jurnal Ilmiah Teknik Informatika*, vol. 15, no. 2, pp. 199–208, Nov. 2021, doi: 10.35457/antivirus.v15i2.1721.
- [22] Yamato and B. B. Rijadi, "Analisis Kebutuhan Modul Surya Dan Baterai Pada Sistem Penerangan Jalan Umum (PJU)," *JET Jurnal Elektro Teknik*, vol. 1, no. 1, pp. 30–38, Mar. 2021.