

Kinerja Turbin Savonius Empat Sudu Horizontal Berbasis Udara Buang Exhaust Fan

Valiant Restu Morinho¹, Fadly Nur Azzidane², Aprianta Purba³, Oky Supriadi⁴, Ojak Abdul Rozak⁵

^{1,2,3,4,5} Teknik Elektro, Universitas Pamulang, Tangerang Selatan, Indonesia

Email: ¹valiantrestu@email.com, ²fadlynurazzidane@email.com.

Abstrak– Peningkatan kebutuhan energi listrik dan semakin berkurangnya cadangan energi fosil mendorong pengembangan sumber energi terbarukan yang dapat memanfaatkan energi terbuang. Salah satu potensi yang dapat dimanfaatkan adalah aliran udara buang dari exhaust fan yang umumnya belum dimanfaatkan secara optimal. Penelitian ini bertujuan untuk merancang, membangun, dan mengevaluasi kinerja turbin Savonius empat sudu tipe U yang dipasang secara horizontal dengan memanfaatkan udara buang exhaust fan sebagai sumber energi alternatif. Penelitian menggunakan metode eksperimental deskriptif yang meliputi tahap perancangan, fabrikasi, pengujian, dan analisis kinerja sistem. Pengujian dilakukan pada variasi kecepatan angin 2,1–7,2 m/s dengan parameter yang diukur meliputi kecepatan putar turbin, tegangan, arus, daya listrik, dan efisiensi sistem. Data dianalisis secara kuantitatif menggunakan perhitungan daya angin, daya turbin, daya generator, dan efisiensi sistem. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan angin meningkatkan performa sistem secara signifikan. Pada kecepatan angin maksimum 7,2 m/s diperoleh putaran turbin sebesar 743 rpm, tegangan keluaran 11,64 V, arus 1,43 A, serta daya listrik maksimum sebesar 16,65 W dengan efisiensi sistem mencapai 13,27%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemanfaatan udara buang exhaust fan berpotensi dikembangkan sebagai sumber energi alternatif skala kecil untuk mendukung penerapan teknologi energi berkelanjutan.

Kata Kunci: Pemanenan Energi, Konversi Energi, Ducting Ventilasi, Pembangkit Listrik Mikro, Generator Magnet Permanen.

Abstract– The rising demand for electrical energy and the depletion of fossil fuel reserves drive the development of renewable energy sources capable of utilizing waste energy. One potential source is the exhaust airflow from ventilation fans, which typically remains underutilized. This study aims to design, construct, and evaluate the performance of a horizontally mounted, four-blade U-type Savonius turbine that harnesses exhaust fan airflow as an alternative energy source. A descriptive experimental method was employed, encompassing design, fabrication, testing, and system performance analysis. Testing was conducted across a wind speed range of 2.1–7.2 m/s, measuring parameters such as turbine rotational speed, voltage, current, electrical power, and system efficiency. Data were analyzed quantitatively through calculations of wind power, turbine power, generator power, and system efficiency. The results indicate that increasing wind speed significantly enhances system performance. At a maximum wind speed of 7.2 m/s, the turbine achieved a rotational speed of 743 rpm, an output voltage of 11.64 V, a current of 1.43 A, and a maximum electrical power output of 16.65 W, with a system efficiency of 13.27%. The findings demonstrate that utilizing exhaust fan airflow holds potential for development as a small-scale alternative energy source to support the implementation of sustainable energy technologies.

Keywords: Energy Harvesting, Energy Conversion, Ventilation Ducting, Micro-Power Generation, Permanent Magnet Generator.

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan manusia akan sumber energi terutama energi listrik dari tahun ke tahun mengalami peningkatan yang signifikan seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduk dan perkembangan industri yang pesat. Dalam memenuhi kebutuhan energi listrik tersebut kebanyakan masih disuplai dengan menggunakan sumber energi yang tidak terbarukan, seperti minyak bumi, gas alam, batubara, dan lain sebagainya. Penggunaan sumber energi tidak terbarukan (energi fosil) tersebut memiliki dampak yang buruk terhadap lingkungan serta alam sekitarnya. Selain itu, penggunaan energi tak terbarukan secara terus-menerus juga berdampak pada semakin menipisnya cadangan sumber energi fosil tersebut. Sehingga untuk mengurangi jumlah pemakaian energi fosil, perlu dilakukan inovasi-inovasi baru untuk menemukan sumber energi lain yang sifatnya dapat diperbaharui serta ramah terhadap lingkungan.

Salah satu sumber energi baru terbarukan (EBT) yang saat ini sedang banyak dikembangkan adalah energi angin. Hal ini disebabkan karena energi angin merupakan salah satu sumber energi bersih yang dalam proses pemanfaatannya tidak merusak lingkungan sekitarnya, serta potensi energinya yang tidak terbatas. Namun hingga saat ini pemanfaatan energi listrik sebagai sumber energi listrik di Indonesia masih sangat terbatas. Hal ini disebabkan karena kecepatan angin di masing-masing wilayah Indonesia tergolong rendah, serta peralatan untuk mengeksplorasi energi angin yang masih sangat minim. Berdasarkan data pada tahun 2020 jumlah PLTB yang sudah selesai dibangun berada dikisaran 135 MW, dengan masing-masing tersebar di wilayah Sidrap sebesar 75 MW serta wilayah Janeponto sebesar 60 MW.

Ketersediaan data statistik tenaga angin yang akurat pada semua daerah Indonesia sangat dibutuhkan menjadi langkah awal pada identifikasi & pemilihan lokasi proyek pengembangan pemanfaatan energi angin. Data tersebut memuat tentang ciri energi angin yang tersedia di setiap daerah misalnya kecepatan angin rata-rata, kecepatan maksimum & minimum yg bisa dikonversi (pada kWh/ atau W/m²). Informasi tadi sangat bermanfaat menjadi dasar penentuan lokasi & pemilihan teknologi turbin yg tepat [1], [6].

Potensi sumber energi-angin jumlah pasokannya tersedia sangat-melimpah di Indonesia. Angin juga termasuk dalam salah satu energi baru terbarukan, sehingga dalam pengolahannya tidak merusak lingkungan. Dalam melakukan proses konversi energi angin menjadi energi listrik, dilakukan menggunakan kincir angin. Bilah-bilah kincir angin tersebut akan menangkap energi angin yang melewati area turbin angin, serta mengubahnya menjadi energi mekanik. Energi mekanik yang telah dihasilkan oleh turbin angin tersebutlah nantinya akan digunakan untuk memutar generator, yang berfungsi untuk mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Pada kesempatan kali ini, penulis akan membahas tentang turbin angin savonius 4 sudu yang ditempatkan secara horizontal [3], [7].

Selain memanfaatkan sumber energi angin alami, dapat juga dilakukan pengembangan pemanfaatan energi angin buatan, seperti energi angin buangan exhaust fan sebagai opsi untuk sumber energi alternatif. Berdasarkan beberapa hasil penelitian yang sudah dilakukan mengenai pemanfaatan energi angin hasil buangan exhaust fan, dapat dikatakan cukup efektif. Hal ini dikarenakan kecepatan angin yang stabil serta dapat diprediksi sehingga dapat memutar turbin angin dengan kecepatan yang tetap. Berdasarkan pada hasil peneliti yang melakukan penelitian mengenai pemanfaatan energi angin dilakukan menggunakan turbin angin vertikal dan horizontal [3], [7]. Namun dalam melakukan penelitian kali ini, penulis akan melakukan perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Angin savonius tipe U, tetapi ditempatkan secara horizontal [3], [7]. Dan dalam melakukan penelitian tersebut digunakan metode eksperimental, dimana ukuran dimensi turbin ditentukan mengikuti ukuran ducting keluaran udara exhaust fan. Dan untuk diameter turbin ditentukan mengikuti ukuran tidak lebih dari setengah ukuran ducting, hal ini dilakukan agar udara yang ada didalam ruangan panel LVMDV tidak terhambat, sehingga tidak mempengaruhi suhu ruangan tersebut.

Tinjauan Pustaka

a) Energi Angin sebagai Energi Terbarukan

Energi angin merupakan salah satu sumber energi baru terbarukan yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan, terutama pada wilayah dengan ketersediaan angin yang relatif stabil. Energi ini berasal dari pergerakan massa udara akibat perbedaan tekanan dan temperatur di atmosfer. Pemanfaatan energi angin dinilai ramah lingkungan karena tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca serta tidak menimbulkan limbah berbahaya. Dalam konteks transisi energi, pemanfaatan energi angin menjadi salah satu solusi strategis untuk mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil. Di Indonesia, potensi energi angin tersebar di berbagai wilayah, baik di daerah pesisir maupun non-pesisir. Meskipun kecepatan angin di Indonesia relatif lebih rendah dibandingkan negara subtropis, pemanfaatan turbin angin skala kecil hingga menengah tetap memungkinkan, khususnya dengan menggunakan desain turbin yang sesuai untuk kecepatan angin rendah [1], [6].

b) Turbin Angin Savonius

Turbin angin Savonius merupakan salah satu jenis turbin angin sumbu vertikal yang bekerja berdasarkan prinsip gaya hambat (drag). Turbin ini memiliki keunggulan utama berupa kemampuan beroperasi pada kecepatan angin rendah, konstruksi yang sederhana, serta kemudahan dalam perawatan. Karakteristik tersebut menjadikan turbin Savonius cocok untuk diaplikasikan pada lingkungan perkotaan maupun industri dengan keterbatasan kecepatan angin. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa variasi jumlah sudu, bentuk sudu, dan konfigurasi pemasangan sangat mempengaruhi kinerja turbin Savonius [7], [8], [10], [13], [15].

c) Pemanfaatan Udara Buang Exhaust Fan

Udara buang dari exhaust fan merupakan salah satu sumber energi angin buatan yang berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif. Exhaust fan umumnya menghasilkan aliran udara yang relatif stabil dan kontinu, sehingga dapat dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin angin skala kecil. Pemanfaatan udara buang ini juga memberikan nilai tambah dari sisi efisiensi energi, karena energi yang sebelumnya terbuang dapat dikonversi menjadi energi listrik [2], [4].

d) Generator DC pada Sistem Turbin Angin

Generator DC magnet permanen banyak digunakan pada sistem turbin angin skala kecil karena mampu menghasilkan tegangan listrik pada putaran rendah. Karakteristik ini sesuai dengan kondisi kerja turbin Savonius yang umumnya memiliki kecepatan putar lebih rendah dibandingkan turbin angin sumbu horizontal [3], [7]. Penggunaan generator DC juga mempermudah integrasi dengan sistem penyimpanan energi seperti baterai. Pemilihan generator yang tepat sangat berpengaruh terhadap efisiensi sistem pembangkit listrik tenaga angin. Generator dengan karakteristik torsi awal rendah lebih sesuai untuk diaplikasikan pada turbin angin yang beroperasi pada kecepatan angin rendah.

e) Sistem Penyimpanan dan Pengkondisian Daya

Sistem penyimpanan energi listrik pada pembangkit listrik tenaga angin skala kecil umumnya menggunakan baterai sebagai media penyimpanan. Untuk menjaga keandalan sistem dan mencegah kerusakan baterai, diperlukan perangkat pengatur seperti solar charge controller (SCC). SCC berfungsi mengatur proses pengisian dan pengosongan baterai agar tetap berada pada batas aman. Selain itu, inverter digunakan untuk mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC agar dapat digunakan oleh beban listrik konvensional. Integrasi antara generator, SCC, baterai, dan inverter harus dirancang secara tepat untuk memastikan sistem bekerja secara optimal dan efisien [3], [4].

f) Kerangka Pemikiran Penelitian

Berdasarkan kajian pustaka yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa turbin angin Savonius memiliki potensi untuk dikembangkan sebagai pembangkit listrik tenaga angin skala kecil, khususnya dengan memanfaatkan

sumber angin buatan seperti udara buang exhaust fan. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada perancangan, pengujian, dan analisis kinerja turbin angin Savonius empat sudu yang dipasang secara horizontal dengan memanfaatkan aliran udara buang exhaust fan.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen deskriptif dengan pendekatan kuantitatif. Metode eksperimen dipilih karena penelitian dilakukan melalui proses perancangan, pembuatan, dan pengujian secara langsung terhadap prototipe turbin Savonius empat sudu tipe U yang dipasang secara horizontal pada saluran udara buang (exhaust fan). Pendekatan kuantitatif digunakan untuk memperoleh data numerik yang dapat diukur, dianalisis, dan diinterpretasikan secara objektif berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan. Penelitian deskriptif bertujuan untuk menggambarkan secara sistematis karakteristik dan kinerja sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan energi udara buang exhaust fan. Melalui metode ini, peneliti dapat mendeskripsikan hubungan antara variabel-variabel penelitian, seperti kecepatan angin, putaran turbin, tegangan, arus, daya listrik, serta efisiensi sistem yang dihasilkan oleh turbin Savonius. Hasil pengujian kemudian dianalisis untuk mengetahui kemampuan turbin dalam mengkonversi energi kinetik udara buang menjadi energi listrik.

Variabel bebas (independent variable) dalam penelitian ini adalah kecepatan aliran udara buang yang dihasilkan oleh exhaust fan, sedangkan variabel terikat (dependent variable) meliputi putaran turbin (RPM), tegangan keluaran generator, arus listrik, daya keluaran, Tip Speed Ratio (TSR), koefisien daya (C_p), dan efisiensi sistem. Adapun variabel kontrol dalam penelitian ini meliputi jumlah sudu, dimensi turbin, jenis material sudu, posisi pemasangan turbin, jenis generator, serta spesifikasi exhaust fan yang digunakan selama proses pengujian agar kondisi pengujian tetap konstan. Pelaksanaan penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan yang tersusun secara sistematis. Tahap pertama adalah studi literatur yang bertujuan untuk mengumpulkan berbagai referensi terkait turbin Savonius, pemanfaatan energi angin, dan penelitian terdahulu yang relevan. Tahap kedua adalah perancangan desain turbin Savonius empat sudu tipe U beserta sistem pembangkit listrik yang akan digunakan. Selanjutnya dilakukan pembuatan dan perakitan prototipe sesuai dengan desain yang telah ditetapkan. Setelah sistem selesai dirakit, dilakukan pengujian awal untuk memastikan seluruh komponen berfungsi dengan baik. Apabila sistem telah beroperasi secara normal, maka dilanjutkan dengan pengambilan data pengujian berupa pengukuran kecepatan angin, putaran turbin, tegangan, dan arus keluaran generator. Data hasil pengujian kemudian dianalisis menggunakan persamaan matematis untuk memperoleh nilai daya angin, daya turbin, koefisien daya, dan efisiensi sistem. Tahap akhir penelitian adalah melakukan interpretasi hasil dan penyusunan kesimpulan berdasarkan data yang telah diperoleh.

Secara keseluruhan, desain penelitian ini diharapkan mampu memberikan gambaran yang komprehensif mengenai kinerja turbin Savonius empat sudu horizontal dalam memanfaatkan energi udara buang exhaust fan sebagai sumber energi alternatif skala kecil, sekaligus menjadi dasar pengembangan sistem pembangkit listrik berbasis energi terbarukan di masa mendatang.

2.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Power House Gedung Scientia Business Park, Tangerang, Banten, dengan memanfaatkan udara buang dari exhaust fan sebagai sumber aliran angin. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada keberadaan exhaust fan industri yang beroperasi secara kontinu dan menghasilkan aliran udara relatif stabil. Waktu penelitian mencakup tahap studi literatur, perancangan sistem, pembuatan dan perakitan alat, pengujian, pengambilan data, hingga analisis hasil penelitian. Seluruh tahapan tersebut dilakukan secara bertahap agar data yang diperoleh akurat dan dapat merepresentasikan kondisi kerja sistem yang sebenarnya.

2.2 Objek dan Variabel Penelitian

Objek penelitian ini adalah turbin angin Savonius empat sudu tipe U yang dipasang secara horizontal pada saluran ducting exhaust fan. Variabel penelitian terdiri dari: Variabel bebas, yaitu kecepatan angin (m/s) yang dihasilkan oleh exhaust fan. Variabel terikat, meliputi putaran turbin (rpm), tegangan (V), arus (A), daya listrik (W), dan efisiensi sistem (%). Variabel terkendali, yaitu dimensi turbin, jenis generator, konfigurasi rangkaian, dan posisi pemasangan turbin.

2.3 Alat dan Bahan Penelitian

Alat ukur yang digunakan dalam penelitian meliputi anemometer untuk mengukur kecepatan angin, tachometer untuk mengukur putaran poros turbin dan generator, serta multimeter digital untuk mengukur tegangan dan arus listrik. Peralatan pendukung lainnya digunakan dalam proses perakitan dan pemasangan sistem. Bahan utama yang digunakan adalah turbin angin Savonius empat sudu tipe U, generator DC magnet permanen, solar charge controller (SCC), baterai sebagai media penyimpanan energi, inverter, serta rangka dan dudukan turbin.

2.4 Tahapan Peneliti

Tahapan penelitian dilakukan secara sistematis sebagai berikut:

- Studi Literatur, yaitu mengkaji jurnal ilmiah, buku teks, dan laporan penelitian yang berkaitan dengan turbin angin Savonius, pemanfaatan udara buang exhaust fan, serta sistem pembangkit listrik tenaga angin.
- Perancangan Sistem, meliputi penentuan desain turbin, dimensi sudu, pemilihan generator, serta konfigurasi sistem kelistrikan yang disesuaikan dengan kondisi lokasi penelitian.
- Pembuatan dan Perakitan Alat, yaitu proses fabrikasi turbin angin dan perakitan seluruh komponen sistem pembangkit listrik tenaga angin.
- Pengujian Sistem, dilakukan dengan mengoperasikan exhaust fan dan mengamati respon sistem turbin angin terhadap variasi kecepatan angin.
- Pengambilan Data, meliputi pengukuran kecepatan angin, putaran turbin, tegangan, dan arus listrik pada kondisi beban.
- Pengolahan dan Analisis Data, data hasil pengujian diolah menggunakan persamaan matematis untuk menentukan daya angin, daya turbin, daya listrik, serta efisiensi sistem.

2.5 Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui pengukuran langsung di lokasi penelitian. Kecepatan angin diukur menggunakan anemometer, putaran turbin dan generator diukur menggunakan tachometer, sedangkan tegangan dan arus listrik diukur menggunakan multimeter digital. Pengukuran dilakukan berulang untuk memperoleh data yang lebih representatif.

2.6 Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan secara kuantitatif dengan menggunakan persamaan daya angin, daya turbin, dan daya listrik. Hasil perhitungan tersebut kemudian dianalisis secara deskriptif untuk menjelaskan hubungan antara kecepatan angin dengan daya listrik yang dihasilkan serta tingkat efisiensi sistem pembangkit listrik tenaga angin.

2.7 Diagram Alir Penelitian

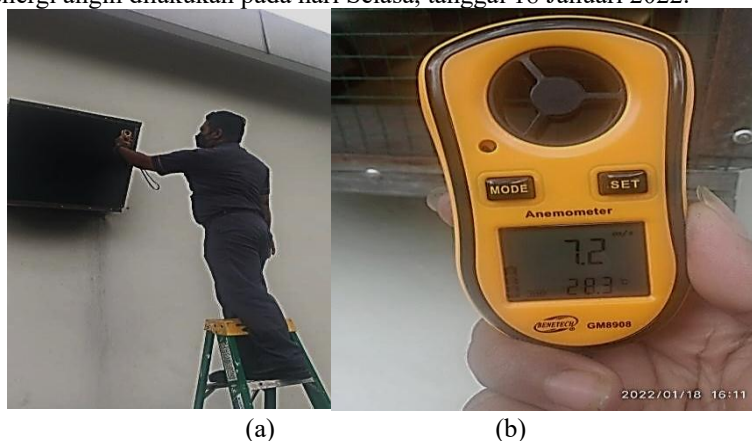
Alur penelitian dimulai dari studi literatur, perancangan sistem, pembuatan dan perakitan alat, pengujian, pengambilan data, analisis hasil, hingga penarikan kesimpulan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisa Potensi

3.1.1. Mengukur Potensi Energi Angin di Lokasi

Pengukuran kecepatan energi angin dilakukan pada hari Selasa, tanggal 18 Januari 2022.



Gambar 1. Pengukuran kecepatan angin (a), hasil pengukuran (b)

Setelah dilakukan pengukuran kecepatan angin di lokasi penelitian, maka diperoleh data-data kecepatan angin di lokasi penelitian. Dimana kecepatan angin dari buangan exhaust fan tersebut bervariasi, kecepatan angin terendah adalah 2,1 m/s serta kecepatan angin tertinggi yaitu 7,2 m/s.

3.1.2. Menentukan desain turbin

a. Menghitung luas sapuan sudu turbin

Luas sapuan sudu dapat dihitung menggunakan rumus:

$A = \pi \times r \times t$ Dimana:

A : Luas penampang sudu (m^2) t : panjang sudu (m)

r : jari-jari sudu (m) sehingga,

$$A = 3,14 \times 0,075 \times 0,6$$

$$A = 0,14 \text{ m}^2$$

Karena jumlah sudu yang digunakan adalah 4 sudu, maka total luas sapuan sudunya adalah: $A = 4 \times 0,14$

$$A = 0,56 \text{ m}^2$$

b. Menghitung daya angin maksimum

Untuk menghitung daya angin yang nantinya akan menggerakkan turbin angin dapat dihitung menggunakan rumus:

$$P_a = \frac{1}{2} \rho \times A \times v^3$$

sehingga,

$$P_a = \frac{1}{2} \times 1,1514 \times 0,56 \times 7,2^3$$

$$1,1514 \times 0,56 \times 7,2^3$$

$$P_a = \frac{\quad}{2}$$

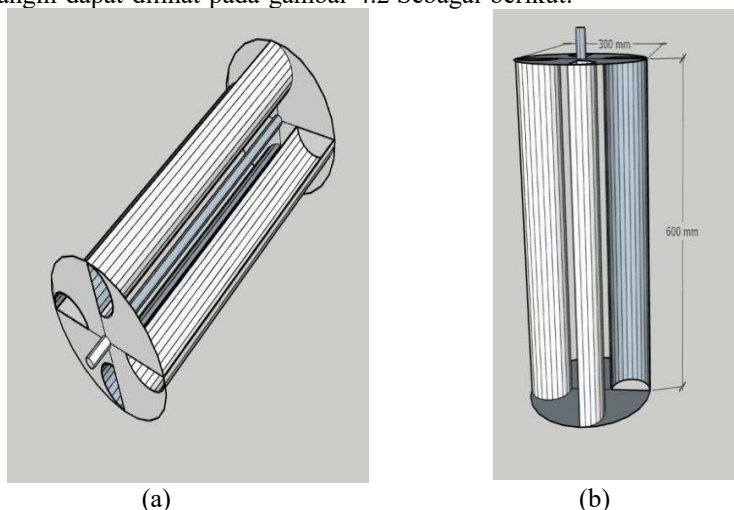
$$P_a = \frac{240,66}{2}$$

$$P_a = 120,33 \text{ watt}$$

3.2 Pembuatan dan Pemasangan Pembangkit Listrik

3.2.1 Desain Turbin Angin

Sebelum masuk ke dalam proses pembuatan turbin angin, maka terlebih dahulu dibuatkan gambar desain turbin angin yang akan difabrikasi. Sesuai dengan data perhitungan daya angin serta lokasi pemasangan turbin angin, maka ditentukan desain turbin angin dapat dilihat pada gambar 4.2 Sebagai berikut:



Gambar 2. Gambar desain turbin (a), dan Dimensi turbin (b)

Dari gambar 4.2 tampak desain turbin 4 sudu yang akan dibuat, dengan diameter turbin adalah 30 cm, diameter setiap sudunya 7,5 cm, dan panjang sudu adalah 60 cm. Dimana dengan turbin 4 sudu maka sudut dari setiap sudunya adalah sebesar 90° .

3.2.2 Pembuatan Turbin

Proses pembuatan turbin angin diawali dengan pembuatan rangka-rangka sudu yang gabungan dengan poros turbin. Pada proses pembuatan rangka turbin tersebut harus dilakukan dengan teliti, karena apabila jarak sudut dari setiap sudunya harus sama. Karena jika jarak sudut dari tiap sudunya tidak sama, maka turbin tidak akan dapat berputar secara optimal.



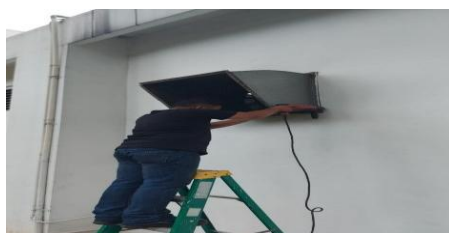
(a)



(b)

Gambar 3. Proses pembuatan turbin angin (a), proses pengelasan (b)

3.2.3 Pemasangan Turbin Angin pada *Ducting Exhaust Fan*



(a)



(b)

Gambar 4. Proses pemasangan turbin angin (a), setelah terpasang (b)

3.3 Pengujian dan Analisa Pembangkit Listrik

Setelah semua proses perancangan dan pembuatan turbin selesai, maka dilakukan tahap pengujian turbin. Pada pengujian penelitian yang dilakukan di ruangan *Power House Gedung Scientia Park*, Tangerang, Banten dengan kecepatan angin keluaran *Exhaust Fan* sebesar 2,1 – 7,2 m/s dengan pengukuran dilakukan pada tanggal 19 Februari 2022. Setelah data yang didapatkan terkumpul maka peneliti melakukan pengolahan dan analisa sesuai data yang di peroleh. Pengukuran yang dilakukan pada penelitian tersebut dilakukan sebanyak 5 kali, dengan memperoleh data kecepatan angin 2.1m/s, 3.2m/s 5.2m/s, 6.8m/s dan 7.2 m/s.

Setelah memperoleh data variabel penelitian dan pengukuran yang dilakukan pada turbin angin tersebut, selanjutnya hasil penelitian tersebut akan ditampilkan dalam bentuk tabel dan grafik. Grafik tersebut terdiri dari beberapa variabel seperti data kecepatan angin (v), kecepatan putaran turbin (RPM), arus generator (I), serta tegangan generator (V). Dalam pengujian turbin angin ini dilakukan dengan menggunakan pembebanan lampu LED 80watt dengan konstanta ρ udara: 1,1514 kg/m³. Berdasarkan kecepatan yang ada pada daerah tersebut, maka dapat dihitung daya angin yang dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan rumus:

Tabel 1. Hasil pengukuan kecepatan putaran turbin angin

No	Kecepatan Angin (m/s)	Putaran Turbin (Rpm)	Tegangan Generator (Volt)	Arus Generator (Ampere)
1	2,1	156	0.03	0.04
2	3,2	226	0.17	0.50
3	5,2	429	0.44	2.81
4	6,8	574	0.72	6.67
5	7,2	743	1.43	16.65

1. Menghitung Daya Angin

$$P_a = \frac{1}{2} \times m \times v^2 \rightarrow m = \rho \times v \times A$$

$$P_a = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \rightarrow A = \pi \times r \times t$$

$$P_a = 0,6 \times A \times v^3$$

a. Untuk Vangin = 2,1 m/s

$$P_a = \frac{1}{2} \times m \times v^2 \rightarrow A = \pi \times r \times t$$

$$P_a = 0,6 \times A \times v^3$$

$$P_a = 0,6 \times 0,56 \times 2,1^3$$

$$1. \quad P_a = 3,11 \text{ watt}$$

$$b. \quad \text{Untuk Vangin} = 3,2 \text{ m/s}$$

$$\frac{1}{2}$$

$$P_a = \frac{1}{2} \times m \times v^2 \rightarrow A = \pi \times r \times t$$

$$P_a = 0,6 \times A \times v^3$$

$$P_a = 0,6 \times 0,56 \times 3,2^3$$

$$2. \quad P_a = 11,01 \text{ watt}$$

$$c. \quad \text{Untuk Vangin} = 5,2 \text{ m/s}$$

$$\frac{1}{2}$$

$$P_a = \frac{1}{2} \times m \times v^2 \rightarrow A = \pi \times r \times t$$

$$P_a = 0,6 \times A \times v^3$$

$$P_a = 0,6 \times 0,56 \times 5,2^3 \quad P_a = 47,24 \text{ watt}$$

$$d. \quad \text{Untuk Vangin} = 6,8 \text{ m/s}$$

$$\frac{1}{2}$$

$$P_a = \frac{1}{2} \times m \times v^2 \rightarrow A = \pi \times r \times t$$

$$P_a = 0,6 \times A \times v^3$$

$$P_a = 0,6 \times 0,56 \times 6,8^3$$

$$3. \quad P_a = 105,65 \text{ watt}$$

$$e. \quad \text{Untuk Vangin} = 7,2 \text{ m/s}$$

$$\frac{1}{2}$$

$$P_a = \frac{1}{2} \times m \times v^2 \rightarrow A = \pi \times r \times t$$

$$P_a = 0,6 \times A \times v^3$$

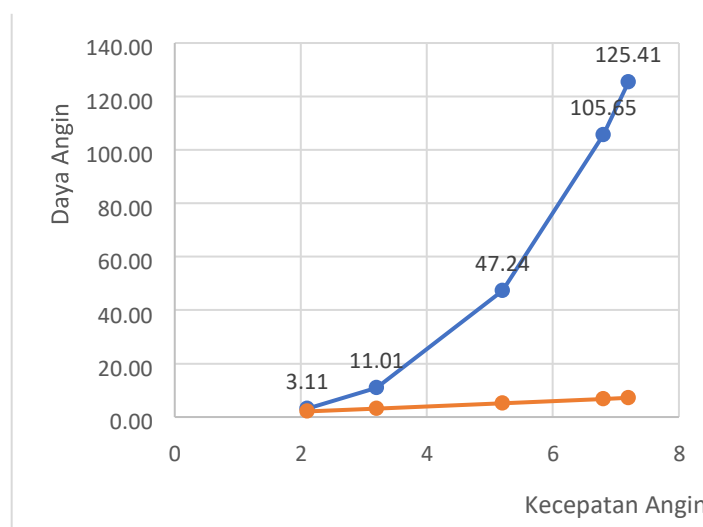
$$P_a = 0,6 \times 0,56 \times 7,2^3$$

$$4. \quad P_a = 125,41 \text{ watt}$$

Berdasarkan data perhitungan diatas, maka dapat diperoleh data daya angin yang dapat dihasilkan oleh angin yang dipengaruhi oleh kecepatan angin (v) seperti terlihat pada tabel 4.1.

Tabel 2. Pengaruh variasi angin terhadap daya angin

Kecepatan Angin	Daya Angin
2,1	3,11
3,2	11,01
5,2	47,24
6,8	105,65
7,2	125,41



Gambar 5. Grafik pengaruh kecepatan angin terhadap daya angin

2. Perhitungan Torsi Turbin

$m \times \Delta v$

$$T = \frac{m \times \Delta v}{\Delta t} \times r_{\text{lengan}} \rightarrow m = 2,4 \text{ kg}$$

Dengan:

$$m : \text{massa sudu} = 2,4 \text{ kg} \quad \Delta t : \text{Konstanta} \rightarrow \Delta t = 60 \text{ s} \quad r_{\text{lengan}} : 0,30 \text{ meter}$$

Sehingga,

a. Pada kecepatan angin 2,1 m/s

$m \times \Delta v$

$$T = \frac{m \times \Delta v}{\Delta t} \times r_{\text{lengan}}$$

Δt

$$\frac{2,4 \times 2,1}{60}$$

$$T = \frac{2,4 \times 2,1}{60} \times 0,30$$

$$1 \quad T = 0,025 \text{ Nm}$$

b. Pada kecepatan angin 3,2 m/s

$m \times \Delta v$

$$T = \frac{m \times \Delta v}{\Delta t} \times r_{\text{lengan}}$$

Δt

$$\frac{2,4 \times 3,2}{60}$$

$$T = \frac{2,4 \times 3,2}{60} \times 0,30$$

$$2 \quad T = 0,038 \text{ Nm}$$

c. Pada kecepatan angin 5,2 m/s

$m \times \Delta v$

$$T = \frac{m \times \Delta v}{\Delta t} \times r_{\text{lengan}}$$

Δt

$$\frac{2,4 \times 5,2}{60}$$

$$T = \frac{2,4 \times 5,2}{60} \times 0,30$$

$$3 \quad T = 0,062 \text{ Nm}$$

d. Pada kecepatan angin 6,8 m/s

$m \times \Delta v$

$$T = \frac{m \times \Delta v}{\Delta t} \times r_{\text{lengan}}$$

Δt

$$\frac{2,4 \times 6,8}{60}$$

$$T = \frac{2,4 \times 6,8}{60} \times 0,30$$

$$4 \quad T = 0,082 \text{ Nm}$$

e. Pada kecepatan angin 7,2 m/s

$m \times \Delta v$

$$T = \frac{m \times \Delta v}{\Delta t} \times r_{\text{lengan}}$$

Δt

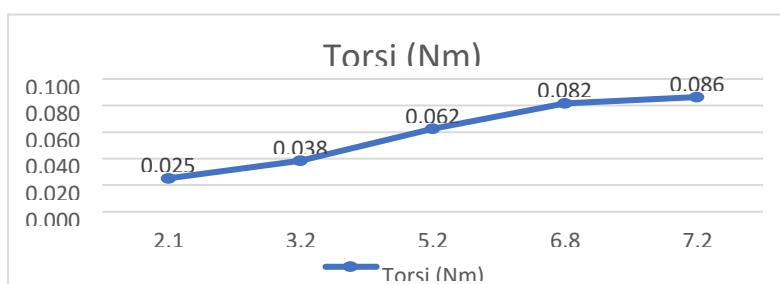
$$\frac{2,4 \times 7,2}{60}$$

$$T = \frac{2,4 \times 7,2}{60} \times 0,30$$

$$5 \quad T = 0,086 \text{ Nm}$$

Tabel 3. Torsi yang dihasilkan turbin berdasarkan kecepatan angin

Kecepatan Angin	Torsi(Nm)
2,1	0.025
3,2	0.038
5,2	0.062
6,8	0.082
7,2	0.086



Gambar 6. Grafik pengaruh kecepatan angin terhadap torsi

3. Perhitungan Daya Turbin

$$m \times \Delta v$$

$$PT = \frac{m \times \Delta v}{\Delta t} \times r_{\text{lengan}}$$

$$\Delta t$$

Dengan:

$$m = 0.6 \text{ kg/sudu maka untuk 4 sudu adalah } m = 2,4 \text{ kg}$$

$$\Delta t = \text{Konstanta} \rightarrow \Delta t = 60 \text{ s rlgan} = 0,30 \text{ m}$$

sehingga,

a. Untuk $v_{\text{angin}} = 2,1 \text{ m/s}$ $\omega = 156 \text{ rpm}$

$$PT = T \times \omega$$

$$m \times \Delta v \quad PT = \frac{m \times \Delta v}{\Delta t} \times r_{\text{lengan}} \times \omega$$

$$\Delta t$$

$$PT = \frac{2,4 \times 2,1}{60} \times 0,30 \times 156$$

$$1. \quad PT = 3,93 \text{ watt}$$

b. Untuk $v_{\text{angin}} = 3,2 \text{ m/s}$ $\omega = 226 \text{ rpm}$ $PT = T \times \omega$

$$m \times \Delta v$$

$$PT = \frac{m \times \Delta v}{\Delta t} \times r_{\text{lengan}} \times \omega$$

$$\Delta t$$

$$PT = \frac{2,4 \times 3,2}{60} \times 0,30 \times 226$$

$$2. \quad PT = 8,68 \text{ watt}$$

c. Untuk $v_{\text{angin}} = 5,2 \text{ m/s}$ $\omega = 429 \text{ rpm}$

$$PT = T \times \omega$$

$$m \times \Delta v$$

$$PT = \frac{m \times \Delta v}{\Delta t} \times r_{\text{lengan}} \times \omega$$

$$\Delta t$$

$$PT = \frac{2,4 \times 5,2}{60} \times 0,30 \times 429$$

$$3. \quad PT = 26,77 \text{ watt}$$

d. Untuk $v_{\text{angin}} = 6,8 \text{ m/s}$ $\omega = 574 \text{ rpm}$

$$PT = T \times \omega$$

$$m \times \Delta v$$

$$PT = \frac{m \times \Delta v}{\Delta t} \times r_{\text{lengan}} \times \omega$$

$$\Delta t$$

$$PT = \frac{2,4 \times 6,8}{60} \times 0,30 \times 574$$

$$4. \quad PT = 46,84 \text{ watt}$$

e. Untuk $v_{\text{angin}} = 7,2 \text{ m/s}$ $\omega = 743 \text{ rpm}$

$$PT = T \times \omega$$

$$m \times \Delta v$$

$$PT = \frac{m \times \Delta v}{\Delta t} \times r_{\text{lengan}} \times \omega$$

$$\Delta t$$

$$PT = \frac{2,4 \times 7,2}{60} \times 0,30 \times 743$$

$$5. \quad PT = 64,20 \text{ watt}$$

Tabel 4. Hasil perhitungan daya turbin berdasarkan perhitungan torsi turbin.

No	$v(m/s)$	$n(rpm)$	Torsi (Nm)	P_{Turbin} (Watt)
1.	2,1	156	0.025	3.93
2.	3,2	226	0.038	8.68
3.	5,2	429	0.062	26.77
4.	6,8	574	0.082	46.84
5.	7,2	743	0.086	64.20

4. Menghitung Daya Generator

a. Pada $v = 2,1$ m/s dihasilkan $V = 1,43V$ dan $I = 0,03A$, maka diperoleh daya turbin: $P_g = V \times I$

$$P_g = 1,43 \times 0,03$$

$$1. P_g = 0,04 \text{ watt}$$

b. Pada $v = 5,2$ m/s dihasilkan $V = 2,96V$ dan $I = 0,17A$, maka diperoleh daya turbin: $P_g = V \times I$

$$P_g = 2,96 \times 0,17$$

$$2. P_g = 0,50 \text{ watt}$$

c. Pada $v = 5,2$ m/s dihasilkan $V = 6,38V$ dan $I = 0,44A$, maka diperoleh daya turbin: $P_g = V \times I$

$$P_g = 6,38 \times 0,44$$

$$3. P_g = 2,81 \text{ watt}$$

d. Pada $v = 6,8$ m/s dihasilkan $V = 9,26V$ dan $I = 0,72A$, maka diperoleh daya turbin:

$$P_g = V \times I$$

$$P_g = 9,26 \times 0,72$$

$$4. P_g = 6,67 \text{ watt}$$

e. Pada $v = 7,2$ m/s dihasilkan $V = 11,64V$ dan $I = 1,43A$, maka diperoleh daya turbin:

$$P_g = V \times I$$

$$P_g = 11,64 \times 1,43$$

$$5. P_g = 16,65 \text{ watt}$$

Tabel 5. Hasil pengujian Sudu turbin Savonius Tipe Horizontal

No	$v(m/s)$	$n(rpm)$	$V(volt)$	$I(ampere)$	P_{4sudu} (Watt)
1	2,1	156	1.43	0.03	0.04
2	3,2	226	2.96	0.17	0.50
3	5,2	429	6.38	0.44	2.81
4	6,8	574	9.26	0.72	6.67
5	7,2	743	11.64	1.43	16.65

Setelah dilakukan perhitungan dan pengujian, maka kecepatan angin yang akan digunakan untuk penelitian tersebut adalah kecepatan angin tertinggi yaitu sebesar 7,2 m/s. Hal ini dilakukan karena 7,2 m/s merupakan kecepatan angin tertinggi yang ada di lokasi penelitian, sehingga berpengaruh pada potensi energi listrik yang dapat dihasilkan.

5. Menghitung Tip Speed ratio (TSR)

a. Untuk Vangin = 2,1 m/s dan $n = 156$ rpm

$$2\pi rn$$

$$TSR = \frac{2\pi rn}{60 \times v}$$

$$TSR = \frac{2 \times 3,14 \times 0,15 \times 156}{60 \times 2,1}$$

$$1. TSR = 1,17$$

b. Untuk Vangin = 3,2 m/s dan $n = 226$ rpm

$$2\pi rn$$

$$TSR = \frac{2\pi rn}{60 \times v}$$

$$TSR = \frac{2 \times 3,14 \times 0,15 \times 226}{60 \times 3,2}$$

$$2. TSR = 1,11$$

c. Untuk Vangin = 5,2 m/s dan $n = 429$ rpm

$$2\pi rn$$

$$TSR = \frac{2\pi rn}{60 \times v}$$

$$60 \times v \quad \frac{2 \times 3,14 \times 0,15 \times 429}{60 \times 5,2}$$

$$\text{TSR} =$$

$$3. \text{TSR} = 1,30$$

d. Untuk Vangin = 6,8 m/s dan n = 574 rpm

$$\frac{2\pi rn}{60 \times v}$$

$$\text{TSR} =$$

$$60 \times v \quad \frac{2 \times 3,14 \times 0,15 \times 574}{60 \times 6,8}$$

$$\text{TSR} =$$

$$4. \text{TSR} = 1,33$$

e. Untuk Vangin = 7,2 m/s dan n = 743 rpm

$$\frac{2\pi rn}{60 \times v}$$

$$\text{TSR} =$$

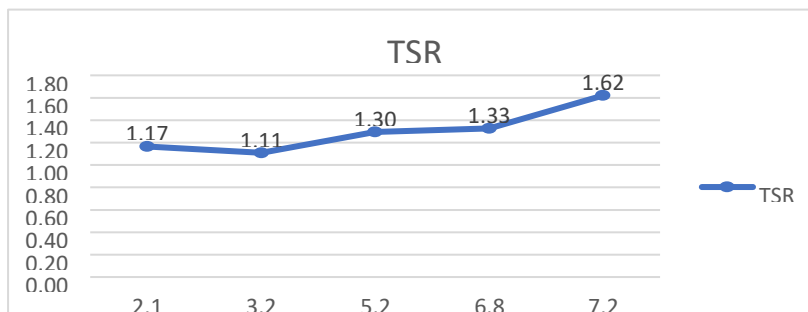
$$60 \times v \quad \frac{2 \times 3,14 \times 0,15 \times 743}{60 \times 7,2}$$

$$\text{TSR} =$$

$$5. \text{TSR} = 1,62$$

Tabel 6. *Tip Speed Ratio* Berdasarkan kecepatan angin

Kecepatan Angin	<i>Tip Speed Ratio</i>
2,1	1.17
3,2	1.11
5,2	1.30
6,8	1.33
7,2	1.62



Gambar 7. Pengaruh kecepatan angin terhadap *tip speed ratio*

6. Menghitung Koefisien Daya (C_p)

a. Untuk $V_{\text{angin}} = 2,1$ m/s

PT

$$C_p = \quad \times 100\%$$

Pa

$$\frac{15,70}{3,11 \times 100\%}$$

$$C_p =$$

$$1. \quad C_p = 5,05$$

b. Untuk $V_{\text{angin}} = 3,2$ m/s

PT

$$C_p = \quad \times 100\%$$

Pa

$$\frac{26,27}{11,01 \times 100\%}$$

$$C_p =$$

$$2. \quad C_p = 2,39$$

c. Untuk $V_{\text{angin}} = 5.2$ m/s

PT

$$C_p = \quad \times 100\%$$

Pa

$$\frac{45,93}{}$$

$$C_p = 47,24 \times 100\%$$

$$3. \quad C_p = 0,97$$

d. Untuk $V_{\text{angin}} = 6.8 \text{ m/s}$ *PT*

$$C_p = \quad \times 100\%$$

Pa

$$\frac{62,91}{}$$

$$C_p = 105,65 \times 100\%$$

$$4. \quad C_p = 0,60$$

e. Untuk $V_{\text{angin}} = 7.2 \text{ m/s}$ *PT*

$$C_p = \quad \times 100\%$$

Pa

$$\frac{71,63}{}$$

$$C_p = 125,41 \times 100\%$$

$$5. \quad C_p = 0,57$$

Tabel 7. Koefisien daya (C_p)

Kecepatan Angin (m/s)	Daya Turbin (watt)	Daya Angin (watt)	Koefisien Daya (C_p)
2,1	15,70	3,11	5,05
3,2	26,27	11,01	2,39
5,2	45,93	47,24	0,97
6,8	62,91	105,65	0,60
7,2	71,63	125,41	0,57

7. Efisiensi Sistem

a. Pada $V_{\text{angin}} = 2,1 \text{ m/s}$ *Pg*

$$\eta = \quad \times 100\%$$

Pa

$$\frac{0,04}{}$$

$$\eta = 3,11 \times 100\%$$

$$1. \quad \eta = 1,38\%$$

b. Pada $V_{\text{angin}} = 3,2 \text{ m/s}$ *Pg*

$$\eta = \quad \times 100\%$$

Pa

$$\frac{0,50}{}$$

$$\eta = 11,01 \times 100\%$$

$$2. \quad \eta = 4,57\%$$

c. Pada $V_{\text{angin}} = 5,2 \text{ m/s}$ *Pg*

$$\eta = \quad \times 100\%$$

Pa

$$\frac{2,81}{}$$

$$\eta = 47,24 \times 100\%$$

$$3. \quad \eta = 5,94 \%$$

d. Pada $V_{\text{angin}} = 6,8 \text{ m/s}$ *Pg*

$$\eta = \quad \times 100\%$$

Pa

$$\frac{6,67}{}$$

$$\eta = 105,65 \times 100\%$$

$$4. \quad \eta = 6,31\%$$

e. Pada $V_{\text{angin}} = 7,2 \text{ m/s}$

P_g

$$\eta = \frac{P_g}{P_a} \times 100\%$$

P_a

$$\eta = \frac{16,65}{125,41} \times 100\%$$

$$5. \eta = 13,27\%$$

Tabel 8. Efisiensi turbin angin

No	Kecepatan Angin	Daya Generator (watt)	Daya Angin (watt)	Efisiensi Sistem (%)
1	2,1	0,04	3,11	1,38
2	3,2	0,50	11,01	4,57
3	5,2	2,81	47,24	5,94
4	6,8	6,67	105,65	6,31
5	7,2	16,65	125,41	13,27

3.4 Perhitungan Waktu Pengisian Dan Penggunaan Aki

a. Hasil pengukuran pada output generator

Tabel 9. Hasil pengukuran pada generator dan *charge controller*

Pengujian Ke-	Pengujian pada generator		<i>Charge Controller</i> (Mengisi/Tidak Mengisi)	Kecepatan turbin (RPM)
	Multimeter (V)	Multimeter (A)		
1	1.43	0.03	Tidak Mengisi	156
2	2.96	0.17	Tidak Mengisi	226
3	6.38	0.44	Tidak Mengisi	429
4	9.26	0.72	Mengisi	574
5	11.64	1.43	Mengisi	743

Berdasarkan tabel 4.6 dapat dilihat bahwa pada saat pengujian ke-1, ke2, dan ke-3 tegangan yang dihasilkan oleh generator belum mampu untuk melakukan pengisian daya baterai. Tegangan minimum yang dibutuhkan untuk melakukan pengisian daya baterai adalah sebesar 8 V. Waktu yang dibutuhkan untuk mengisi daya baterai sampai penuh dapat diketahui dengan perhitungan berikut:

$$\begin{aligned} I_{\text{rata-rata}} &= 0,56 \text{ Ampere} \\ V_{\text{rata-rata}} &= 8,9 \text{ Volt} \\ P_{\text{rata-rata}} &= 4,98 \text{ wh} \\ P_{\text{aki}} &= 12\text{V}.40\text{A} \\ P_{\text{aki}} &= 480\text{wh} \end{aligned}$$

Maka waktu yang diperlukan untuk mengisi baterai sampai kondisi *full charge* adalah $480 : 4,98 = 96,38 \text{ jam}$.

3.5 Pengukuran waktu pemakaian baterai

Proses pengukuran ini dilakukan untuk mengetahui waktu pemakaian baterai dalam kondisi full apabila terjadi gangguan pada *exhaust fan* sehingga tidak dapat melakukan proses pengisian daya baterai. Untuk lampu penerangan area *power house* yang digunakan adalah lampu TL LED sebanyak 4 titik, dengan masing-masing daya 16 watt. Jadi total daya terpasang penerangan area *power house* adalah sebesar 64 watt. Sehingga pengukuran waktu pemakaian baterai tanpa proses pengisian dapat dilihat pada tabel 4.11 berikut:

Tabel 10. Pengukuran waktu pemakaian baterai

Pengukuran Ke-	Tegangan baterai (V)	Arus baterai (A)	Beban pemakaian (watt)
1	10,4	5,85	64
2	9,0	6,49	64

3	9,7	6,77	64
4	12,2	10,50	64
5	10,7	15,20	64
6	11,3	18,5	64

Dengan beban pemakaian sebesar 64 watt, serta rata-rata pemakaian 2 jam perhari, maka perhari menggunakan listrik:

$$64 \times 2 = 128 \text{ watt/hari} = \mathbf{0,128Kwh/hari}$$

Dengan daya *exhaust fan* sebesar 0,75Kw = 18Kwh perhari, maka *saving* daya yang dapat dihasilkan adalah $\frac{0,128}{18}$

$$\text{sebesar : } 18 \times 100\% = \mathbf{0,007\%/hari (128watt/hari)}$$

4. KESIMPULAN

Dari hasil pengujian dan analisa tentang rancang bangun pembangkit listrik tenaga angin sumbu horizontal tipe *savonius* 4 sudu memanfaatkan udara buang *exhaust fan*, penulis membuat beberapa kesimpulan, yaitu:

1. Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh penulis tentang pemanfaatan udara buang *exhaust fan*, maka dapat diketahui kapasitas daya angin yang ada di lokasi penelitian tersebut. Menurut hasil analisa dan perhitungan, diketahui potensi angin terendah adalah sebesar 3,11 watt pada kecepatan angin 2,1 m/s dan potensi angin tertinggi adalah sebesar 125,41 watt pada kecepatan angin 7,2 m/s.
2. Perancangan turbin angin *savonius* diketahui dengan diameter turbin adalah 30cm, panjang sudu 60 cm, dan massa turbin 2,4 kg. Bahan untuk membuat sudu menggunakan bahan galvalum, dan bahan untuk poros menggunakan besi pipa diameter 20 mm. Untuk sistem transmisi menggunakan puli aluminium yang disambungkan menggunakan *Van-Belt* dengan
3. perbandingan puli 10 : 1. Cara kerja pembangkit listrik tersebut adalah memanfaatkan udara yang dihasilkan oleh hembusan *exhaust fan* untuk memutar bilah sudu turbin, sehingga dapat memutar poros turbin tersebut. Ketika poros turbin tersebut berputar maka akan menghasilkan energi mekanik yang nantinya akan dimanfaatkan untuk menggerakkan generator.
4. Pemanfaatan udara buang *exhaust fan* menggunakan turbin angin *savonius* 4 sudu tipe U yang ditempatkan secara horizontal, sebagai pembangkit listrik tenaga angin di gedung *Scientia Park*. Adapun pengaruh kecepatan angin terhadap tegangan dan arus yang dihasilkan generator, dimana pada kecepatan angin terendah 2,1m/s menghasilkan tegangan 1,43V dan arus 0,03A serta pada kecepatan angin tertinggi 7,2 m/s menghasilkan tegangan sebesar 11,64V dan arus 1,43A dalam tidak berbeban.

Saran

Dari hasil penelitian tentang potensi energi angin dengan memanfaatkan udara buang *exhaust fan* menggunakan turbin angin *savonius* 4 sudu tipe U yang ditempatkan secara horizontal, penulis mengemukakan beberapa saran untuk pengembangan skripsi ini, yaitu:

1. Perlunya dilakukan pengembangan yang memungkinkan dan dapat disempurnakan untuk meningkatkan nilai efisiensi dari turbin angin tersebut, sehingga daya listrik yang diperoleh juga dapat lebih besar lagi.
2. Perlu dilakukan pembuatan desain turbin yang lebih ringan namun dengan daya tahan yang lebih kuat, sehingga udara yang dihasilkan oleh *exhaust fan* dapat lebih mudah untuk mendorong bilah-bilah turbin.

Pengembang Pembangkit Listrik Tenaga Angin di Indonesia harus lebih ditingkatkan tidak hanya di lokasi yang potensi anginnya besar, namun dapat juga dengan kecepatan angin yang kecil tetapi diorientasikan dengan teknologi lebih maju

REFERENSI

- [1] S. Syam and S. Kurniati, "Analisis Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Menggunakan Turbin Savonius," Jurnal Media Elektro, Universitas Nusa Cendana, no. Vol. IX No. 1, 2022.
- [2] Y. K. Wardhana, C. G. I. Partha, and I. W. Sukerayasa, "PEMANFAATAN UDARA BUANG EXHAUST FAN UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU DENGAN PENGARUH PENAMBAHAN HONEYCOMB BERBASIS ATMEGA 2560," Jurnal SPEKTRUM, no. Vol. 8, No. 1, 2021.
- [3] M. I. Hidayat and A. C. Hermawan, "Rancang Bangun Prototipe PLTB Sumbu Vertikal Tipe Hybrid Savonius–Darrieus untuk Pengisian Akumulator," Jurnal Teknik Elektro, Universitas Negeri Surabaya, no. Vol. 13, No. 1, 2024.
- [4] M. W. Febriyani, I. W. Sukerayasa, and C. G. I. Partha, "Rancang Bangun Sistem Pemanen Energi Angin Exhaust Fan dengan Pengaruh Jarak Turbin Angin Sumbu Horizontal Bilah Exhaust Fan," Jurnal SPEKTRUM, Universitas Udayana, no. vol.8,No.2, 2021.



- [5] S.N Fitri, F. Azis, “Rancang Bangun Turbin Vertical Axis pada PLTB,” JOULE: Journal of Electrical Engineering, Politeknik Bosawa Makassar, no. Vol. 2 No. 1, 2021.
- [6] Margono, A. Kusmantoro, and T. Ardiyanto, “Desain Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) Dengan Turbin Angin Vertikal,” Jurnal Elektro dan Teknologi Informasi, no. Vol. 3 No. 2, 2024.
- [7] A. Nurdianto and S. I. Haryudo, “Rancang Bangun Prototype Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan Turbin Angin Savonius,” JURNAL TEKNIK ELEKTRO, UNIVERSITAS NEGRI SURABAYA, no. Vol. 9 No. 1, 2020.
- [8] A. Y. Adipradana, A. R. Saleh, R. M. Sulisty, F. Hilmy, and M. K. Mubarak, “Analisis Kinerja Turbin Savonius Dua Tahap dengan Variasi Phase-Shift Angle Berbasis Computational Fluid Dynamics,” AutoMech : Jurnal Teknik Mesin, Universitas Tidar, no. Vol. 5, No. 2, 2025.
- [9] M. Pane, Andreas, and R. Samosir, “Perancangan Turbin Angin Vertikal Modifikasi Darrieus Menggunakan Geometri Airfoil Naca 2414,” Journal of Mechanical Engineering, Manufactures, Materials and Energy, Universitas Medan Area, no. Vol. 7 No. 2, 2023.
- [10] E. B. Raharjo, D. Andriyansyah, A. H. Purwono, and A. Jamaldi, “Pengaruh Jumlah Sudu Terhadap Kinerja Turbin Savonius Tipe Drag Pada Aliran Air Dalam Pipa,” Jurnal Rekayasa Mesin, Universitas Brawijaya, no. Vol. 15 No. 1, 2024.
- [11] M. Z. R. Amin and B. S. Kaloko, “Sistem Kontrol Sudut Blade Turbin Savonius dengan Metode Regresi Linier Berganda untuk Optimasi Pembangkit Listrik Tenaga Angin,” Techné: Jurnal Ilmiah Elektroteknika, Universitas Kristen Satya Wacana Salatiga, no. Vol. 23 No. 1, 2024.
- [12] S. N. Gomes, W. Mursanto, and B. Suharto, “Manufacture and Testing of the U-Type Savonius Wind Turbine with 4 Blades Vertical Axis,” Jurnal Teknik Energi, Politeknik Negeri Bandung, no. Vol. 12 No. 2, 2023.
- [13] Gunawan, A. Suprayitno, and R. J. Ariazena, “Perancangan Turbin Angin Sumbu Vertikal Savonius 3 Sudu,” Jurnal Teknologika, Sekolah Tinggi Teknologi Wastukencana, no. Vol. 11 No. 2, 2021.
- [14] M. Q. A. Husna and A. Androva, “Analisa Kecepatan Angin Terhadap Tekanan Dan Kecepatan Aliran Turbin Angin Menggunakan Computational Fluid Dynamics. Studi Kasus Pada Turbin Savonius,” Widya Teknik , vol. Vol 23 No. 3, 2024.
- [15] D. Sugiono and S. Mahardika, “Investigasi Experimental Jumlah Sudu Dan Kecepatan Angin Terhadap Performa Turbin Savonius Tipe S,” IRA Jurnal Teknik Mesin dan Aplikasinya (IRAJTMA), Vol. %1 dari %2Vol 5, No. 1, 2026.