

PENGARUH VARIASI KECEPATAN ANGIN TERHADAP KINERJA TURBIN ANGIN SUMBU HORIZONTAL

Aryananta Lufti¹, Edy Budi Santoso², Nurtjahyono³

Teknik Mesin Pertahanan. Akademi Militer^{1,2,3}

aryanantalufti@nikmesinhan.akmil.ac.id,

edybudisantoso@nikmesinhan.akmil.ac.id, nurcahyono644@gmail.com,

Abstract

This study aims to analyze the effect of wind speed variation on the performance of horizontal axis wind turbines with different numbers of blades. The research method used is an experimental approach with wind speed variations of 3.8 m/s, 4.7 m/s, and 6.3 m/s applied to turbines with 8 blades and 4 blades. The observed parameters include voltage, current, power, and power coefficient (Cp). The results show that increasing wind speed is directly proportional to the increase in voltage, current, and power generated by the turbine. The 8-blade wind turbine produces better performance compared to the 4-blade turbine, especially at a wind speed of 6.3 m/s with a power output of 4894.26 mW and a power coefficient of 35.51×10^{-6} . This indicates that both the number of blades and wind speed significantly affect the performance of wind turbines.

Keywords: wind turbine, wind speed, power, performance, horizontal axis

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi kecepatan angin terhadap kinerja turbin angin sumbu horizontal dengan jumlah sudu yang berbeda. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimen dengan variasi kecepatan angin sebesar 3,8 m/s, 4,7 m/s, dan 6,3 m/s pada turbin dengan 8 sudu dan 4 sudu. Parameter yang diamati meliputi tegangan, arus, daya, dan koefisien daya (Cp). Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan angin berbanding lurus dengan peningkatan tegangan, arus, dan daya yang dihasilkan turbin. Turbin angin dengan 8 sudu menghasilkan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan turbin 4 sudu, terutama pada kecepatan angin 6,3 m/s dengan daya sebesar 4894,26 mW dan koefisien daya sebesar $35,51 \times 10^{-6}$. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah sudu dan kecepatan angin sangat berpengaruh terhadap performa turbin angin.

Kata Kunci: turbin angin, kecepatan angin, daya, kinerja, sumbu horizontal

PENDAHULUAN

Energi adalah kemampuan untuk melakukan kerja atau usaha. Energi merupakan sesuatu yang sangat penting dalam kehidupan di alam ini, terutama bagi kehidupan manusia, karena segala sesuatu yang kita lakukan memerlukan energi. Energi di alam ini tersedia dalam berbagai bentuk, misalnya energi kimia, energi listrik, energi kalor, dan energi cahaya. Energi akan bermanfaat jika terjadi perubahan bentuk dari suatu bentuk energi ke bentuk lain. Energi fosil adalah sumber energi yang selama ini menjadi sumber energi utama di Indonesia bahkan dunia, yang saat ini ketersediaannya telah sangat terbatas dan terus mengalami kehabisan dan menipis akan tetapi pemakaian bahan bakar fosil semakin lama semakin meningkat. Dengan semakin berkurangnya persediaan bahan bakar fosil di Indonesia dan terbatasnya kekayaan alam yang lain maka tenaga angin saat ini menjadi pilihan sebagai sumber energi alternatif dan dalam rangka membantu penyediaan energi. Angin merupakan salah satu sumber energi potensial yang kuantitasnya cukup banyak untuk daerah-daerah di Indonesia, tetapi belum banyak dimanfaatkan (Bere, Koehuan, & Jason, 2017).

Di Indonesia pemanfaatan energi angin masih lebih kecil dibandingkan dengan sumber daya alam yang lain seperti minyak, gas, air dan sebagainya. Di Indonesia wilayahnya adalah perairan, di mana pada wilayah perairan terdapat potensi angin yang bertiup lebih stabil. Energi angin merupakan salah satu energi alternatif yang disediakan oleh alam yang dapat dimanfaatkan sebagai PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Angin), yaitu menggerakkan suatu alat untuk mengubah energi kinetik angin yang nantinya dapat dimanfaatkan sebagai penggerak generator, pompa air dan sebagainya. Rotor atau sudu pada turbin angin digunakan sebagai alat pengkonversi energi angin tersebut. Energi menjadi sangat penting demi kelancaran suatu kegiatan bagi setiap instansi termasuk TNI (Manwell et al., 2010). Manakala energi tersebut tidak tersedia maka kegiatan akan terhambat atau bahkan tidak terlaksana, jika itu terjadi maka energi harus dibuat demi kelancaran tugas, dan bagi setiap prajurit TNI harus dapat bertahan walaupun di daerah perbatasan sekalipun dengan tantangan akan minimnya sumber daya alam, hal ini juga di sebabkan karena tidak terjangkaunya posisi tersebut oleh PT. PLN dan sebagian besar energi yang digunakan di Indonesia berasal dari energi fosil yang berbentuk minyak bumi dan gas bumi. Berkaitan dengan kebutuhan energi pada pelaksanaan tugas

TNI di pulau terluar Negara Kesatuan Republik Indonesia (NKRI) mengenai kebutuhan listrik guna mendukung tugas pokok TNI dalam menjaga kedaulatan Negara Kesatuan Republik Indonesia saya mempunyai gagasan bahwa dengan menggunakan pembangkit listrik tenaga kincir angin merupakan solusi dalam memenuhi kebutuhan energi listrik prajurit TNI di pulau terluar yang selama ini sangat susah di dapatkan di daerah terpencil seperti di pulau terluar Republik Indonesia (Khusnawati, Wibowo, & Kabib, 2022).

Dengan memanfaatkan angin yang berhembus kencang di wilayah Indonesia, maka pembangkit listrik tenaga kincir angin sangat cocok di gunakan di wilayah pulau terluar atau wilayah pesisir pantai Indonesia dan inilah merupakan suatu terobosan untuk memberikan solusi dalam memenuhi kebutuhan energi prajurit TNI di wilayah pulau terluar serta kelebihan dari turbin angin yang lain karena akan lebih ringan, tidak memerlukan ekspansi yang sangat luas, serta ekonomis. mengingat pentingnya alat ini bagi kebutuhan TNI dalam pelaksanaan tugas operasi di daerah pedalaman serta kelebihan yang dimiliki oleh alat tersebut (Burton et al., 2011).

LANDASAN TEORI

Turbin Angin (Blade).

Turbin angin adalah suatu perangkat yang membuat penggunaan energi angin untuk menghasilkan energi mekanik, kemudian energi mekanik ini dikonversi menjadi energi listrik. Prinsip kerja kincir angin adalah mengubah energi mekanis dari angin menjadi energi putar pada kincir, selanjutnya putaran kincir digunakan untuk memutar generator yang akhirnya akan menghasilkan listrik (Micallef, Sant, & van Bussel, 2013). Menurut desain ada dua jenis turbin angin yaitu desain sumbu vertikal dan desain sumbu horisontal :

a. Turbin angin sumbu vertikal

Pada turbin angin ini, turbin disusun tegak lurus dengan poros berada pada atas dan bawah tiang penyangga (Suhariyanto, Batutah, & Muttaqin, 2023).



Gambar 2.1 Kincir Angin Vertikal

Pada turbin angin sumbu vertikal, turbin menggerakkan motor listrik dan menghasilkan tegangan menggunakan daya dari angin, walaupun arah datangnya angin tidak menentu tetap dapat memutar turbin.

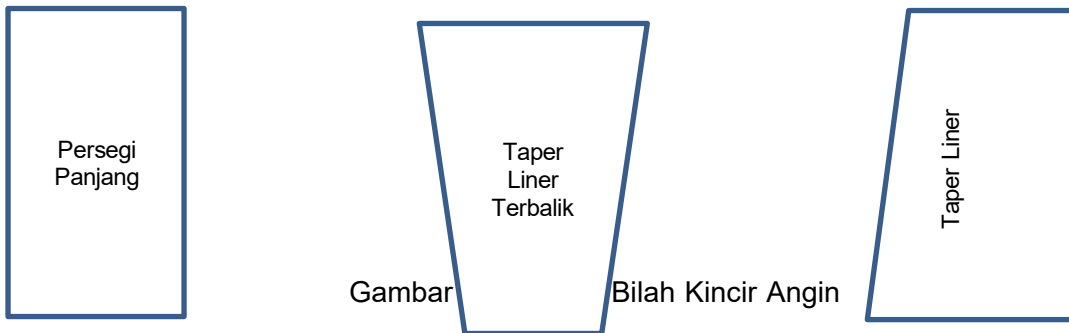
b. Turbin angin sumbu horizontal

Pada turbin ini, turbin di buat berada di atas tiang penyangga dengan generator dan gear box berada secara linier dengan turbin tersebut (Wood, 2011). Pada turbin angin sumbu horizontal, turbin menggerakkan motor listrik menggunakan daya dari angin yang terfokus pada satu arah dan memerlukan pengatur arah angin agar berfungsi dengan maksimal.



Gambar 2.2 Kincir Angin Horisontal

Bentuk Bilah.



Gambar Bilah Kincir Angin

Model sudu yang paling terbaik adalah yang mendekati bentuk stramline, dalam rancang bangun digunakan bentuk taper liner sebagai bentuk yang mendekati streamline, dengan menimbang adanya gaya sentrifugal yang bekerja pada setiap sudu dan menggunakan bahan almunium untuk pembuatannya (Fahrudin, Bugis, & Saputro, 2020).

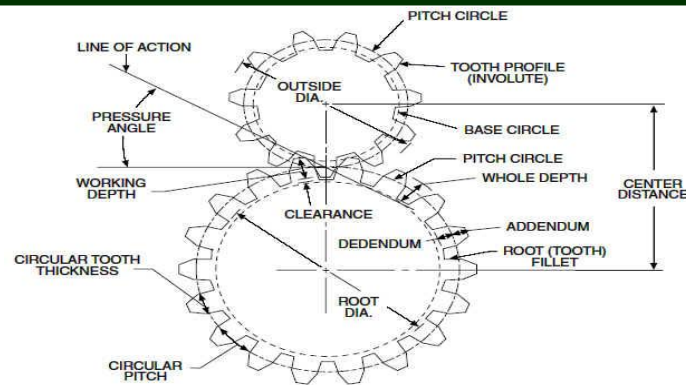
Roda Gigi.

Roda gigi adalah roda silindris bergigi, yang digunakan untuk menstransmisikan gerak dan daya dari sebuah poros berputar ke poros berputar yang lain (Dai & Hu, 2010). Roda gigi digunakan untuk menstransmisikan daya besar dan daya putaran yang tepat. Roda gigi memiliki gigi di sekelilingnya, sehingga penerusan daya dilakukan oleh gigi-gigi kedua roda yang saling berkaitan. Roda gigi sering digunakan karena dapat meneruskan putaran dan daya yang lebih bervariasi dan lebih kompak daripada menggunakan alat transmisi lainnya, selain itu roda gigi juga memiliki beberapa kelebihan jika dibandingkan dengan alat transmisi lainnya seperti sistem transmisi lebih ringkas, putaran lebih tinggi dan daya lebih besar, serta konstruksi yang sederhana (Hau, 2013).

Adapun perbandingan antara kedua roda gigi, yaitu :



- a. Roda Besar = 74 Buah gigi
- b. Roda Kecil = 19 Buah gigi



Gambar 2.4 Roda Gigi

Jika dari dua buah roda berbentuk silinder atau kerucut yang saling bersinggungan pada kelilingnya salah satu diputar maka yang lain akan ikut berputar. Alat yang menggunakan cara kerja semacam ini untuk menstransmisikan daya disebut roda gesek. Cara ini cukup baik untuk meneruskan daya kecil dengan putaran yang tidak perlu tepat (Vermeer, Sørensen, & Crespo, 2003). Guna menstransmisikan daya besar dan putaran yang tepat tidak akan dilakukan dengan roda gesek. Untuk itu, kedua roda tersebut harus dibuat bergerigi pada kelilingnya sehingga penerusan daya dilakukan oleh gigi-gigi kedua roda yang saling berakaitan. Roda gigi semacam ini, yang dapat berbentuk silinder atau kerucut, disebut roda gigi (Rahman et al., 2022).

Diluar cara transmisi di atas, ada pula cara lain untuk meneruskan daya, yaitu dengan sabuk atau rantai. Namun demikian transmisi roda gigi mempunyai keunggulan dibandingkan dengan sabuk atau rantai karena lebih ringkas, putaran lebih tinggi dan tepat, dan daya lebih besar. Kelebihan ini tidak selalu dipilihnya roda gigi disamping cara lain, karena memerlukan ketelitian yang lebih besar dalam pembuatan, pemasangan, maupun perencanaannya (Sulaiman & Gunawan, 2023).

Klasifikasi Roda Gigi.

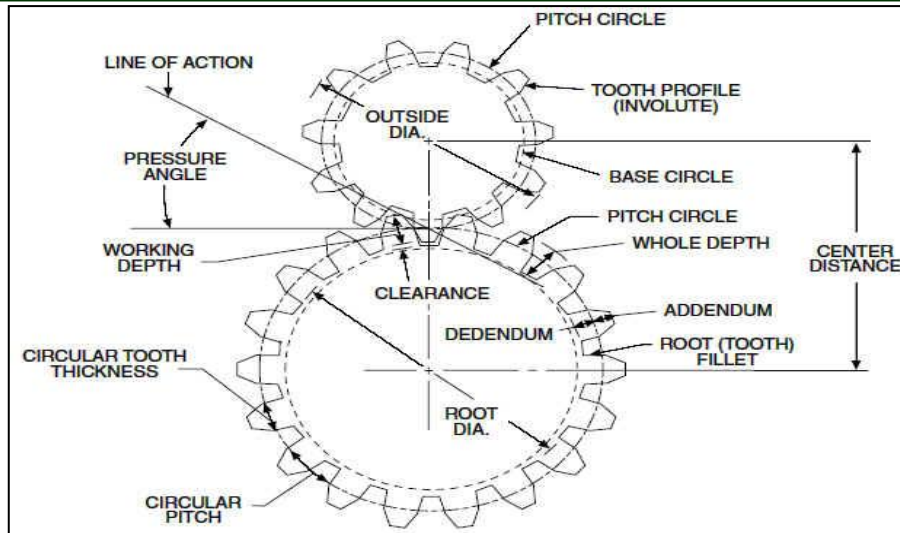
Roda gigi diklasifikasikan sebagai berikut :

- a. Menurut letak poros
 - 1) Roda Gigi dengan sejajar
 - 2) Roda gigi dengan poros berpotongan
 - 3) Roda gigi dengan poros silang
- b. Menurut arah putaran
 - 1) Roda gigi luar; arah putarannya berlawanan
 - 2) Roda gigi dalam dan pinion; arah putarannya sama
- c. Menurut bentuk jalur gigi
 - 1) Roda gigi lurus
 - 2) Roda gigi miring
 - 3) Roda gigi permukaan
 - 4) Roda gigi kerucut
 - 5) Roda gigi cacing

Berdasarkan data tersebut diatas, maka saya menentukan untuk memilih roda gigi lurus pada sistem mekanis turbin angin

1). Roda gigi lurus

Roda gigi digunakan untuk poros yang sejajar atau paralel. Dibandingkan dengan jenis roda gigi yang lain roda gigi lurus ini paling mudah dalam proses pengerjaannya (machining) sehingga harganya lebih murah. Roda gigi lurus ini cocok digunakan pada sistem transmisi yang gaya kelilingnya besar, karena tidak menimbulkan gaya aksial. Untuk roda gigi lurus arah putaran sesuai dengan hukum tangan kanan dan adalah positif atau negatif apabila berlawanan dengan jarum jam atau searah dengan putaran jarum jam .



Gambar 2.5 Roda gigi lurus

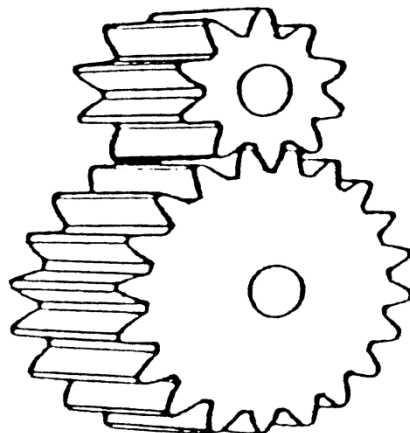
Ciri-ciri roda gigi lurus adalah:

- a. Daya yang di transmisikan <25.000 Hp
- b. Putaran yang ditransmisikan <100.000 rpm
- c. Kecepatan keliling < 200 m/s
- d. Rasio kecepatan yang digunakan
 1. Untuk 1 tingkat (i) < 8
 2. Untuk 2 tingkat (i) < 45
 3. Untuk 3 tingkat (i) < 200

efisiensi keseluruhan untuk masing masing tingkat 96% - 99% tergantung disain dan ukuran.

2) Roda gigi lurus luar

Roda gigi lurus luar ditunjukkan seperti gambar 2.6 pasangan roda gigi lurus ini digunakan untuk menaikkan atau menurunkan putaran dalam arah yang berlawanan.



Gambar 2.6 Roda gigi Lurus Luar

Dengan mempertimbangkan data tersebut diatas, maka saya menggunakan besi (fe) sebagai bahan pembuatan roda gigi.

Hubungan Daya (power) dan Energi.

Energi adalah ukuran kesanggupan suatu benda untuk melakukan suatu usaha.

Force = massa x percepatan

$F = m \times a$, (pounds , newton)

Energi = kerja (W) = gaya(F) x jarak (d), (kilowatt hours,joules)

Daya adalah usaha yang dilakukan per satuan waktu

Power = $P = W / \text{time}(t)$, (kilowatts,Watts, Hoersepower)

Power = $\text{Torqe}(Q) \times \text{Rotational speed } (\Omega)$

Energi Kinetik Angin.

Energi kinetik adalah energi yang dimiliki suatu benda akibat gerakannya.

Energi kinetik = Kerja (W) = $\frac{1}{2} m V^2$

Dimana :

M = Massa dari benda yang bergerak

V = Kecepatan dari benda yang bergerak

Angin yang menggerakkan sudu merupakan udara yang bergerak dan mempunyai massa, sehingga dapat dituliskan sebagai berikut:

m = berat jenis(ρ) x volume (Area x distance)

$m = \rho \times A \times d$

$m = (\text{kg/m}^3) \cdot (\text{m}^2) \cdot (\text{m}) = \text{kg}$

Daya Angin (Power).

Daya angin adalah daya (watt) yang dibangkitkan oleh angin tiap luasan, sehingga daya angin dapat digolongkan sebagai energi potensial. Pada dasarnya daya angin merupakan angin yang bergerak per satuan waktu sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut :

Daya = kerja/ waktu

= energi kinetik/ waktu

= $\frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 / t$

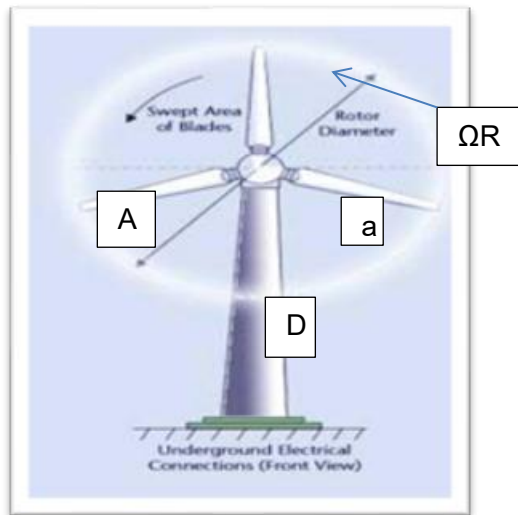
= $\frac{1}{2} \cdot (\rho \cdot A \cdot d) \cdot V^2 / t$

= $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 \cdot (d/t)$

= $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$



$d/t = V$



Gambar 2.7 Analogi daya angin

Beberapa hal yang harus diingat :

a. Daerah sapuan (A) = $\pi \cdot R^2$ (m^2) daerah dari sapuan berbentuk lingkaran oleh rotor.

b. ρ = kerapatan udara = $1,16 \text{ kg/m}^3$

Contoh perhitungan daya yang terdapat di angin :

Daya angin = $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$

Kecepatan angin = $V = 6,3 \text{ m/s}$

Kerapatan udara = $\rho = 1,16 \text{ kg/m}^3$

Jari - jari sudu = $R = 0,2 \text{ m}$ = daerah sapuan = $A = 3,5 \text{ m}^2$

Daya angin = $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$

= $(0,5) \cdot (1,16) \cdot (3,5) \cdot (5)^3$

= $253,75 \text{ watt}$

Satuan energi = $(\text{kg/m}^3) \times (\text{m}^2) \times (\text{m}^3/\text{s}^3)$





$$= (\text{kg} \cdot \text{m})/\text{s}^2 \times \text{m/s}$$

$$= \text{N} \cdot \text{m/s} = \text{watt}$$

Syarat – syarat Perhitungan Produksi Energi.

Dalam perhitungan energi yang dihasilkan oleh turbin angin ada juga faktor-faktor yang dipertimbangkan yaitu :

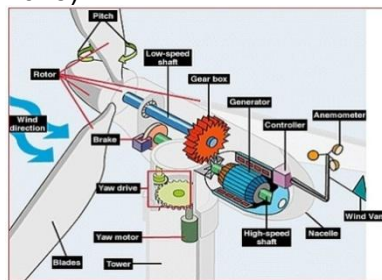
- Daya angin = $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$
- Betz Limit = secara teori mempunyai efisiensi 59% maksimal
- Koefisien tarik = Cd
- Daya rata – rata = daya maksimal yang dapat dihasilkan generator.
- Faktor kapasitas = energi sesungguhnya / energi maksimal.
- Kecepatan angin masuk dimana energi mulai dihasilkan.
- Kecepatan angin terakhir dimana produksi energi berakhir

Kecepatan Angin.

Kecepatan Angin merupakan suatu hal yang biasanya menjadi patokan untuk mengetahui potensi angin. Yang menjadi masalah biasanya tentang kecepatannya, sebagaimana diketahui kecepatan angin akan selalu berubah-ubah, contohnya di Indonesia kecepatan angin pada siang hari akan berbeda dengan kecepatan pada malam hari. Biasanya pada siang hari kecepatan anginnya akan lebih kencang, sedangkan pada malam hari kecepatan anginnya tidak terlalu kencang bahkan terkadang tidak terjadi gerakan udara yang signifikan (Wahyudi & Al-Janani, 2020).

Dasar Turbin Angin

Dasar dari alat untuk mengubah energi angin adalah turbin angin Meskipun masih terdapat susunan dan perencanaan yang beragam biasanya turbin digolongkan ke dalam dua macam tipe (horisontal dan vertikal) dan yang paling banyak digunakan adalah Turbin dengan sumbu horisontal. Turbin jenis ini mempunyai rotasi horisontal terhadap tanah (secara sederhana sejajar dengan arah tiupan angin (Zhu, Shen, & Sørensen, 2015).



Gambar 2.8 Dasar Kincir Angin

METODE PENELITIAN

Metode Penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

- Studi Kepustakaan.
Metode ini digunakan untuk memperoleh informasi yang berkaitan dengan topik Tugas Akhir yang dapat diambil dari literatur dan digunakan sebagai referensi.
- Metode Pelaksanaan Program. Dalam perancangan alat “Rancang Bangun Turbin Angin vertikal Untuk Penerangan Rumah Tangga”, penulis menerapkan beberapa metode pelaksanaan penelitian, yaitu:
 - Rancangan Detail.
Tahap pembuatan rancangan detail yang sebelumnya dilakukan optimalisasi konsep dasar, tata letak dan bentuk, penyiapan daftar komponen dan dokumen produksi dan terakhir yaitu penyiapan gambar kerja disertai dengan bahan komponen yang sudah diperhitungkan keamanannya berdasarkan kekuatan bahan.
 - Persiapan Alat dan Bahan.
Proses ini dimulai setelah selesainya rancangan detail. Alat-alat dan bahan yang diperlukan disiapkan secara keseluruhan, sehingga proses pembuatan prototipe terlaksana secara sempurna.





3) Pembuatan Alat.

Persiapan yang telah direncanakan dilaksanakan sesuai rancangan yang dibuat, kemudian membuat rangka komponen, merakit semua komponen lalu diuji kinerja. Bila dalam proses ini ada suatu kesalahan atau kekurangan pada alat, maka akan dilakukan perbaikan sampai alat ini dapat berfungsi dengan baik. Kemudian langkah terakhir adalah penyempurnaan alat.

4) Pengujian Alat.

Rancang Bangun Turbin angin horizontal Untuk keperluan tugas akhir taruna akademi militer tingkat empat ini akan di lakukan di laboratorium depmipatek akademi militer.

Alat dan Bahan.

Dalam perancangan ini penulis menggunakan alat dan bahan bekas yang masih layak pakai agar hemat biaya, adapun alat dan bahan yang penulis gunakan sebagai berikut.

a. Alat.

Alat yang digunakan oleh penulis yaitu :

- 1) Mesin las listrik dan perlengkapannya.
- 2) Mesin bor.
- 3) Mesin bubut dan perlengkapannya.
- 4) Mesin gerinda.
- 5) Gunting plat.
- 6) Palu.
- 7) Rol meter.
- 8) Mistar baja.
- 9) Gergaji besi.
- 10) Kunci ring.
- 11) Kunci pas.
- 12) Kunci inggris.
- 13) Kunci shock.
- 14) Tang.
- 15) Amplas.
- 16) Perlengkapan cat.
- 17) Lem alteco.

b. Bahan

Bahan yang digunakan oleh penulis yaitu :

- 1) Kayu Albasia.
- 2) Alumunium.
- 3) Pipa besi.
- 4) Besi berbentuk lingkaran.
- 5) Besi siku.
- 6) Besi plat.
- 7) Kawat besi.
- 8) Bearing.
- 9) Rivet.
- 10) Generator.
- 11) Baut dan mur.
- 12) Aki.
- 13) Lampu LED.
- 14) Ampere meter.
- 15) Volt meter.

Langkah Percobaan

Pengujian kincir angin sumbu horisontal bersudu 8 dan bersudu 4 dengan sudut 15° menggunakan beberapa variabel pengujian kecepatan angin. Berikut ini adalah beberapa variabel pengujian . Kecepatan angin diatur pada:





- a. Pada turbin angin 8 Sudu dengan Sudut 15^0 menggunakan variabel kecepatan angin:
- 1) 3,8 m/s
 - 2) 4,7 m/s
 - 3) 6,3 m/s
- b. Pada turbin angin 4 Sudu dengan Sudut 15^0 menggunakan variabel kecepatan angin :
- 1) 4,7 m/s
 - 2) 6,3 m/s

Dari pengujian kincir angin tersebut didapatkan beberapa data yang diperlukan untuk membandingkan pada kecepatan angin berbeda yang akan memberikan hasil yang paling maksimal pada beberapa posisi kincir ditandai dengan semakin cepatnya putaran poros dan lampu menyala terang hingga maksimal.

- a. Menghitung daya angin.

Daya angin adalah besarnya daya yang dihasilkan dari angin terhadap kincir angin tergantung dari berbagai variasi kecepatan angin. Bila kecepatan angin yang digunakan dalam perhitungan adalah $v = 3,8$ m/s, $v = 4,7$ m/s, dan $v = 6,3$ m/s, maka didapatkan daya angin :

Daya angin (power)

$$\begin{aligned} \text{Daya} &= \frac{1}{2} \times \rho \times A \times V^3 \\ &= \frac{1}{2} \times 1,16 \text{ kg/m}^3 \times (\pi (0,55 \text{ m})^2) \times (6,3)^3 \text{ m/s} \\ &= \frac{1}{2} \times 1,16 \text{ kg/m}^3 \times (3,14 \times 0,3025 \text{ m}^2) \times (6,3)^3 \text{ m/s} \\ &= 137,75 \text{ watt} \end{aligned}$$

Hasil perhitungan daya angin pada kecepatan 6,3 m/s adalah daya pada angin yang dihasilkan oleh sumber angin buatan yaitu dari kipas angin dan merupakan daya potensial. Daya pada angin ini bukanlah daya yang dibangkitkan oleh kincir angin Horizontal bersudu banyak. Untuk mendapatkan daya pada kincir angin yang sesungguhnya maka harus dikalikan terlebih dahulu dengan efisiensi daya (C_p) atau dengan bilangan betz limits. Daya kincir adalah daya yang dapat dibangkitkan oleh kincir, ditandai dengan menyalnya lampu pengujian dan terukur multimeter akibat adanya daya listrik untuk mendapatkan harga tegangan dan arus listrik.

- b. Menghitung koefisien daya (C_p).

Koefisien daya (C_p) adalah perbandingan antara daya yang dibangkitkan oleh kincir (dilihat dari harga tegangan dikalikan arus) dengan daya dari angin yang tersedia untuk tiap luasan area.

$$C_p = \frac{\text{Daya kincir}}{\text{Daya angin}} \quad \text{Daya kincir (P)} = V \times I$$

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengambilan Data.

Adapun hasil yang diperoleh dari pengujian Kincir Angin 8 Sudu yang dilakukan oleh penulis adalah sebagai berikut :

Tabel 4.1 Hasil Pengujian kincir 8 dan 4 sudu

Untuk kevalidan data, pengujian melakukan pengujian sebanyak 3 kali dan di ambil rata-rata dari data yang dihasilkan tersebut dengan cara:

No	Jumlah Sudu	Kecepatan Angin	Tegangan (mV)			Arus (mA)			P (mW)
			I	II	III	I	II	III	
1.	8	3,8 m/s	2,3	2,2	2,5	2,17	1,3	1,3	3,70
		4,7 m/s	16,2	14,2	12,1	12,58	11,5	17,2	194,84
		6,3 m/s	80,1	81,6	81,4	60,1	60,2	60,3	4894,26
2.	4	3,8 m/s	0	0	0	0	0	0	0
		4,7 m/s	0,4	0,3	0,3	0,5	0,5	0,25	0,13
		6,3 m/s	17,7	23,6	12,6	24,4	19,7	18,2	370,5

Untuk menghitung Tegangan rata-rata digunakan rumus :

$$V_{\text{rata-rata}} = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3}$$

untuk menghitung arus rata-rata adalah :





$$I_{rata-rata} = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3}$$

Dan untuk menghitung Daya kincir digunakan rumus :

$$\text{Daya kincir (P)} = V \times I$$

dimana : P = daya kincir

V = Tegangan

I = Arus

Dari Tabel diatas bisa dilihat bahwa tegangan yang dihasilkan oleh kincir angin 8 sudu dengan variasi angin menghasilkan tegangan dan arus yang berbeda, semakin tinggi kecepatan angin semakin tinggi pula arus dan tegangan yang dihasilkan, dimana tegangan didapat dari pengukuran menggunakan Voltmeter dan arus didapat dari pengukuran dengan menggunakan Amperemeter.

Analisis Data.

a. Perhitungan Data Tegangan Pada Turbin Angin Sudu 8.

Tegangan yang dihasilkan dari 3 kali percobaan pada Turbin Angin sudu 8 dengan Kecepatan Angin 3,8 m/s, 4,7 m/s, 6,3 m/s pada sudut 15^0 dapat dihitung tegangan rata-ratanya dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

- 1) Pada kecepatan angin 3,8 m/s
 - a) Percobaan 1 = 2,3 mV
 - b) Percobaan 2 = 2,2 mV
 - c) Percobaan 3 = 2,5 mV

$$\begin{aligned} \bar{V} &= \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3} \\ &= \frac{2,3 + 2,2 + 2,5}{3} \\ &= 2,33 \text{ mV} \end{aligned}$$

- 2) Pada kecepatan angin 4,7 m/s
 - a) Percobaan 1 = 16,2 mV
 - b) Percobaan 2 = 14,2 mV
 - c) Percobaan 3 = 12,1 mV

$$\begin{aligned} \bar{V} &= \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3} \\ &= \frac{16,2 + 14,2 + 12,1}{3} \\ &= 14,16 \text{ mV} \end{aligned}$$

- 3) Pada kecepatan angin 6,3 m/s
 - a) Percobaan 1 = 80,1 mV
 - b) Percobaan 2 = 81,6 mV
 - c) Percobaan 3 = 81,4 mV

$$\begin{aligned} \bar{V} &= \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3} \\ &= \frac{80,1 + 81,6 + 81,4}{3} \\ &= 81,3 \text{ mV} \end{aligned}$$

b. Perhitungan Data Arus Pada Turbin Angin Sudu 8.

Arus yang dihasilkan dari 3 kali percobaan pada Turbin Angin sudu 8 dengan Kecepatan Angin 3,8 m/s, 4,7 m/s, 6,3 m/s pada sudut 15^0 dapat dihitung Arus rata-ratanya dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

- 1) Pada kecepatan angin 3,8 m/s
 - a) Percobaan 1 = 2,17 mA
 - b) Percobaan 2 = 1,3 mA
 - c) Percobaan 3 = 1,3 mA

$$\begin{aligned} I &= \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3} \\ &= \frac{2,17 + 1,3 + 1,3}{3} \end{aligned}$$





$$= 1,59 \text{ mA}$$

- 2) Pada kecepatan angin 4,7 m/s
 a) Percobaan 1 = 12,58 mA
 b) Percobaan 2 = 11,5 mA
 c) Percobaan 3 = 17,2 mA

$$\begin{aligned} I &= \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3} \\ &= \frac{12,58 + 11,5 + 17,2}{3} \\ &= 13,76 \text{ mA} \end{aligned}$$

- 3) Pada kecepatan angin 6,3 m/s
 a) Percobaan 1 = 60,1 mA
 b) Percobaan 2 = 60,2 mA
 c) Percobaan 3 = 60,3 mA

$$\begin{aligned} I &= \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3} \\ &= \frac{60,1 + 60,2 + 60,3}{3} \\ &= 60,2 \text{ mA} \end{aligned}$$

- c. Perhitungan Data Tegangan Pada Turbin Angin Sudu 4.

Tegangan yang dihasilkan dari 2 kali percobaan pada sudu 4 dengan Kecepatan Angin 4,7 m/s dan 6,3 m/s pada sudut 15° dapat dihitung tegangan rata-ratanya dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

- 1) Pada kecepatan angin 4,7 m/s
 a) Percobaan 1 = 0,4 mV
 b) Percobaan 2 = 0,3 mV
 c) Percobaan 3 = 0,3 mV

$$\begin{aligned} \bar{V} &= \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3} \\ &= \frac{0,4 + 0,3 + 0,3}{3} \\ &= 0,33 \text{ mV} \end{aligned}$$

- 2) Pada kecepatan angin 6,3 m/s
 a) Percobaan 1 = 17,7 mV
 b) Percobaan 2 = 23,6 mV
 c) Percobaan 3 = 12,6 mV

$$\begin{aligned} \bar{V} &= \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3} \\ &= \frac{17,7 + 23,6 + 12,6}{3} \\ &= 17,9 \text{ mV} \end{aligned}$$

- d. Perhitungan Data Arus Pada Turbin Angin Sudu 4.

Arus yang dihasilkan dari 3 kali percobaan pada Turbin Angin sudu 4 dengan Kecepatan Angin 4,7 m/s dan 6,3 m/s pada sudut 15° dapat dihitung Arus rata-ratanya dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

- 1) Pada kecepatan angin 4,7 m/s
 a) Percobaan 1 = 0,5 mA
 b) Percobaan 2 = 0,5 mA
 c) Percobaan 3 = 0,25 mA

$$\begin{aligned} I &= \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3} \\ &= \frac{0,5 + 0,5 + 0,25}{3} \\ &= 0,41 \text{ mA} \end{aligned}$$

- 2) Pada kecepatan angin 6,3 m/s
 a) Percobaan 1 = 24,4 mA
 b) Percobaan 2 = 19,7 mA



$$\begin{aligned}
 \text{c) Percobaan 3} &= 18,2 \text{ mA} \\
 I &= \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3} \\
 &= \frac{24,4 + 19,7 + 18,2}{3} \\
 &= 20,7 \text{ mA}
 \end{aligned}$$

e. Perhitungan Data Daya Pada Turbin Angin Sudu 8.

Daya yang dihasilkan oleh Turbin Angin 8 Sudu dengan kecepatan angin 3,8 m/s, 4,7 m/s, 6,3 m/s dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

1) Pada kecepatan angin 3,8 m/s

$$\begin{aligned}
 P &= V \times I \\
 &= 2,33 \times 1,59 \\
 &= 3,70 \text{ mW} \\
 &= 3,70 \times 10^{-6} \text{ watt}
 \end{aligned}$$

2) Pada kecepatan angin 4,7 m/s

$$\begin{aligned}
 P &= V \times I \\
 &= 14,16 \times 13,76 \\
 &= 194,84 \text{ mW} \\
 &= 194,84 \times 10^{-6} \text{ watt}
 \end{aligned}$$

3) Pada kecepatan angin 6,3 m/s

$$\begin{aligned}
 P &= V \times I \\
 &= 81,3 \times 60,2 \\
 &= 4894,26 \text{ mW} \\
 &= 4894,26 \times 10^{-6} \text{ watt}
 \end{aligned}$$

f. Perhitungan Data Daya Pada Turbin Angin Sudu 4.

Daya yang dihasilkan oleh Turbin Angin 4 Sudu dengan kecepatan angin 4,7 m/s dan 6,3 m/s dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

1) Pada kecepatan angin 4,7 m/s

$$\begin{aligned}
 P &= V \times I \\
 &= 0,33 \times 0,41 \\
 &= 0,13 \text{ mW} \\
 &= 0,13 \times 10^{-6} \text{ watt}
 \end{aligned}$$

2) Pada kecepatan angin 6,3 m/s

$$\begin{aligned}
 P &= V \times I \\
 &= 17,9 \times 20,7 \\
 &= 370,53 \text{ mW} \\
 &= 370,53 \times 10^{-6} \text{ watt}
 \end{aligned}$$

Dari tabel sebelumnya dapat dilihat besarnya daya yang dihasilkan dari angin tergantung dari kecepatan angin dan diameter sapuan blade. Kecepatan angin yang digunakan dalam perhitungan adalah $v = 3,8 \text{ m/s}$, $4,7 \text{ m/s}$, $v = 6,3 \text{ m/s}$.

Pada kecepatan angin 3,8 m/s bila luas sapuan blade (A) yg di pakai adalah $r = 0,55 \text{ m}$ maka didapatkan daya angin :

$$\begin{aligned}
 \text{Daya angin (power)} \\
 \text{daya} &= \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \\
 &= \frac{1}{2} \times 1,16 \text{ kg/m}^3 \times (\pi \cdot (0,55)^2) \times (3,8 \text{ m/s})^3 \\
 &= \frac{1}{2} \times 1,16 \text{ kg/m}^3 \times (3,14 \times 0,302 \text{ m}^2) \times (3,8 \text{ m/s})^3 \\
 &= 30,201 \text{ watt} \\
 &= 30,201 \cdot 10^{-3} \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Pada kecepatan angin 4,7 m/s bila luas sapuan blade (A) yg di pakai adalah $r = 0,55 \text{ m}$





maka didapatkan daya angin :

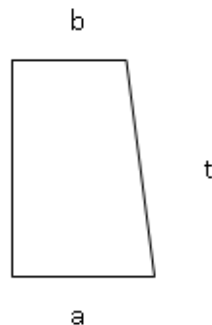
$$\begin{aligned} \text{daya} &= \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \\ &= \frac{1}{2} \times 1,16 \text{ kg/m}^3 \times (\pi (0,55 \text{ m})^2) \times (4,7 \text{ m/s})^3 \\ &= \frac{1}{2} \times 1,16 \text{ kg/m}^3 \times (3,14 \times 3,025 \text{ m}^2) \times (4,7 \text{ m/s})^3 \\ &= 571,92 \text{ watt} \\ &= 571,92 \cdot 10^{-3} \text{ kW} \end{aligned}$$

Pada kecepatan angin 6,3 m/s bila luas sapuan blade (A) yg di pakai adalah $r = 0,55 \text{ m}$

maka didapatkan daya angin :

$$\begin{aligned} \text{Daya angin (power)} \\ \text{daya} &= \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \\ &= \frac{1}{2} \times 1,16 \text{ kg/m}^3 \times (\pi (0,55 \text{ m})^2) \times (6,3 \text{ m/s})^3 \\ &= \frac{1}{2} \times 1,16 \text{ kg/m}^3 \times (3,14 \times 0,3025 \text{ m}^2) \times (6,3 \text{ m/s})^3 \\ &= 137,824 \text{ watt} \\ &= 137,824 \cdot 10^{-3} \text{ kW} \end{aligned}$$

Pada kincir angin yang menggunakan sudu 4 bila Kecepatan angin yang digunakan dalam perhitungan adalah $v = 4,7 \text{ m/s}$, $v = 6,3 \text{ m/s}$ dan luas sapuan blade (A) yg digunakan adalah 4 kali luas masing-masing blade, maka didapatkan daya angin :



Rumus yang di pakai karena memakai 4 buah blade :

$$\begin{aligned} A &= 4 \cdot A \\ &= 4 \cdot (a+b) \cdot \frac{1}{2} t \\ &= 4 \cdot (9+5) \cdot \frac{1}{2} \cdot 50 \\ &= 56 \times 25 \\ &= 1400 \text{ cm}^2 \\ &= 0,14 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

a. Pada kecepatan angin 4,7 m/s maka di dapatkan daya angin (power) :

$$\begin{aligned} \text{Daya} &= \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \\ &= \frac{1}{2} \times 1,16 \text{ kg/m}^3 \times 0,14 \text{ m}^2 \times (4,7 \text{ m/s})^3 \\ &= 8,43 \text{ watt} \\ &= 8,43 \cdot 10^{-3} \text{ kW} \end{aligned}$$

b. Pada kecepatan angin 6,3 m/s maka di dapatkan daya angin (power) :

$$\begin{aligned} \text{Daya} &= \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \\ &= \frac{1}{2} \times 1,16 \text{ kg/m}^3 \times 0,14 \text{ m}^2 \times (6,3 \text{ m/s})^3 \\ &= 20,3038 \text{ watt} \\ &= 20,3038 \cdot 10^{-3} \text{ kW} \end{aligned}$$

Tabel 4.2 Hasil Perhitungan rata-rata

No.	Sudu	Kecepatan Angin (m/s)	Tegangan (mV)	Arus (mA)	P (Watt) ($\times 10^{-6}$)
1.	8	3,8	2,33	1,59	3,70
		4,7	14,16	13,76	194,84
		6,3	81,3	60,2	4894,26
2.	4	3,8	0	0	0
		4,7	0,33	0,41	0,13
		6,3	17,9	20,7	370,53

Dari tabel diatas dapat dilihat besarnya daya yang dihasilkan turbin angin tergantung dari kecepatan angin dan diameter sapuan blade. Adapun kecepatan angin yang digunakan dalam perhitungan yaitu pada sudu 8 digunakan kecepatan angin : 3,8 m/s, 4,7 m/s dan 6,3 m/s. Sedangkan pada sudu 4 digunakan kecepatan 4,7 m/s dan 6,3 m/s.

Pada turbin angin 4 sudu tidak digunakan kecepatan 3,8 m/s karena jumlah blade pada 4 sudu lebih sedikit dari pada 8 sudu, sehingga angin hanya dapat memutar kincir dengan kecepatan angin diatas 3,8 m/s.

c. Koefisien Daya (C_p).

Koefisien daya (C_p) adalah perbandingan antara daya yang dihasilkan oleh kincir dengan daya angin yang tersedia untuk tiap luasan area. Adapun persamaan untuk menghitung C_p adalah sebagai berikut :

a) Cara menghitung Koefisien Daya dengan kecepatan yang bervariasi pada Kincir Angin sudu 8 dengan sudut sudu 15^0 adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 &1) \quad \text{Kecepatan 3,8 m/s} \\
 C_p &= \frac{\text{Daya Kincir}}{\text{Daya Angin}} \\
 &= \frac{3,70 \times 10^{-6}}{30,201} \\
 &= 1,22 \times 10^{-7} \\
 &= 0,12 \times 10^{-6}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &2) \quad \text{Kecepatan 4,7 m/s} \\
 C_p &= \frac{\text{Daya Kincir}}{\text{Daya Angin}} \\
 &= \frac{194,84 \times 10^{-6}}{57,144} \\
 &= 3,41 \times 10^{-6}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &3) \quad \text{Kecepatan 6,3 m/s} \\
 C_p &= \frac{\text{Daya Kincir}}{\text{Daya Angin}} \\
 &= \frac{4894,26 \times 10^{-6}}{137,824} \\
 &= 3,551 \times 10^{-5} \\
 &= 35,51 \times 10^{-6}
 \end{aligned}$$

b) Cara menghitung Koefisien Daya dengan kecepatan yang bervariasi pada Kincir Angin sudu 4 dengan sudut sudu 15^0 yang menggunakan $r = 0,55$ adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 &1) \quad \text{Kecepatan 4,7 m/s} \\
 C_p &= \frac{\text{Daya Kincir}}{\text{Daya Angin}} \\
 &= \frac{0,13 \times 10^{-6}}{57,144} \\
 &= 2,274 \times 10^{-9} \\
 &= 0,002 \times 10^{-6}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &2) \quad \text{Kecepatan 6,3 m/s} \\
 C_p &= \frac{\text{Daya Kincir}}{\text{Daya Angin}} \\
 &= \frac{370,53 \times 10^{-6}}{137,824} \\
 &= 2,68 \times 10^{-6}
 \end{aligned}$$

c) Cara menghitung Koefisien Daya dengan kecepatan yang bervariasi pada Kincir Angin sudu 4 dengan sudut sudu 15^0 yang menggunakan $A = 0,14 \text{ m}^2$ adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 &1) \quad \text{Kecepatan angin 4,7 m/s} \\
 C_p &= \frac{\text{Daya Kincir}}{\text{Daya Angin}} \\
 &= \frac{0,13 \times 10^{-6}}{8,43} \\
 &= 1,54 \times 10^{-8}
 \end{aligned}$$

$$= 0,15 \times 10^{-7}$$

2) Kecepatan angin 6,3 m/s

$$C_p = \frac{\text{Daya Kincir}}{\text{Daya Angin}} = \frac{370,53 \times 10^{-6}}{20,30}$$

$$= 1,8252 \times 10^{-5}$$

$$= 182,52 \times 10^{-7}$$

Dari hasil perhitungan Koefisien daya diatas dapat di analisa dalam tabel berikut :

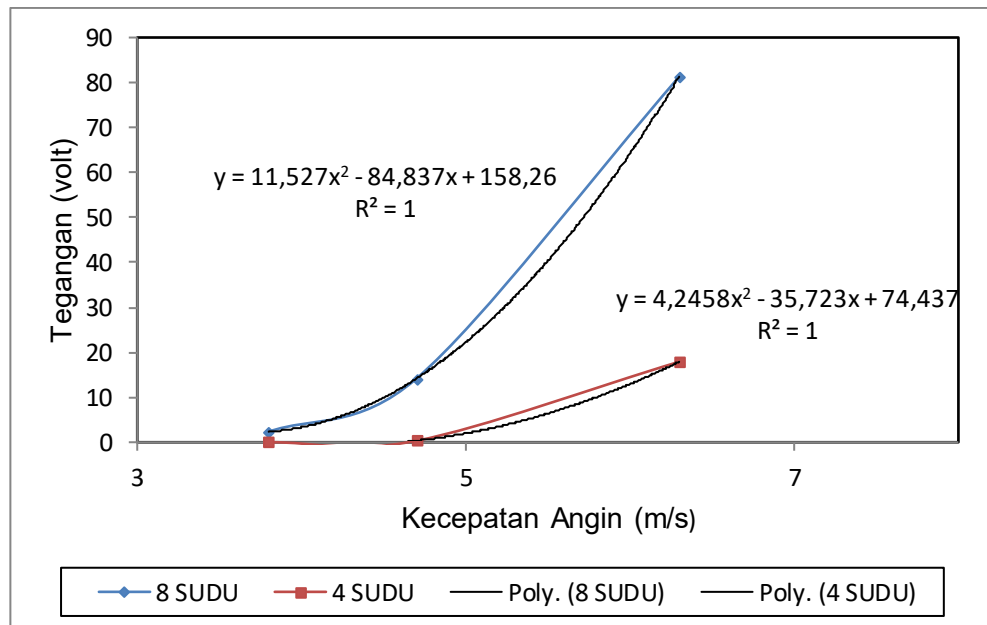
Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Koefisien Daya

No.	Jumlah Sudu	Kecepatan Angin (m/s)	Cp (x 10 ⁻⁶)
1.	8	3,8	0,12
		4,7	3,41
		6,3	35,51
2.	4	4,7	0,002
		6,3	2,68

Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa variasi kecepatan angin dapat mempengaruhi besarnya Cp. Pada kincir angin dengan 8 sudu nilai Cp akan maksimal pada kecepatan 6,3 m/s, pada kecepatan dibawah 6,3 m/s harga Cp akan turun. Sedangkan pada kincir dengan 4 sudu sama dengan kincir 8 sudu, pada kecepatan 6,3 m/s harga Cp akan maksimal. Semakin besar harga Cp menunjukkan sudu berfungsi maksimal sebagai penangkap angin.

d. Analisis Grafik.

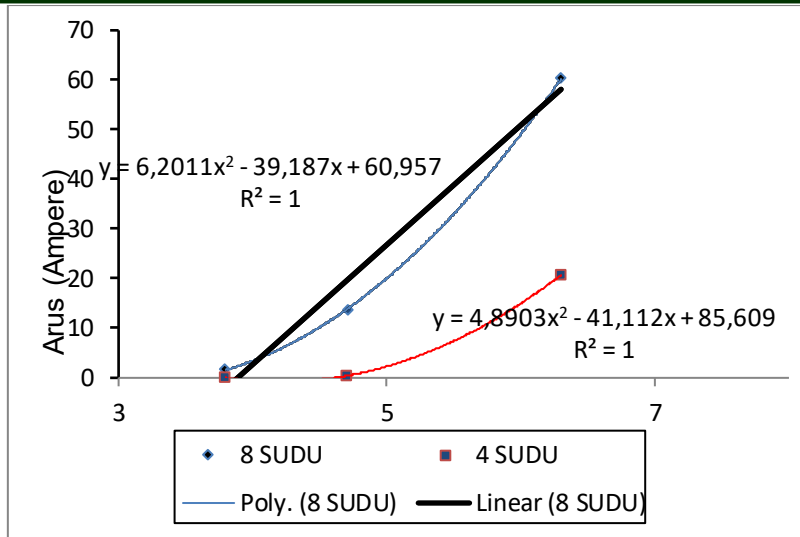
a)



b)

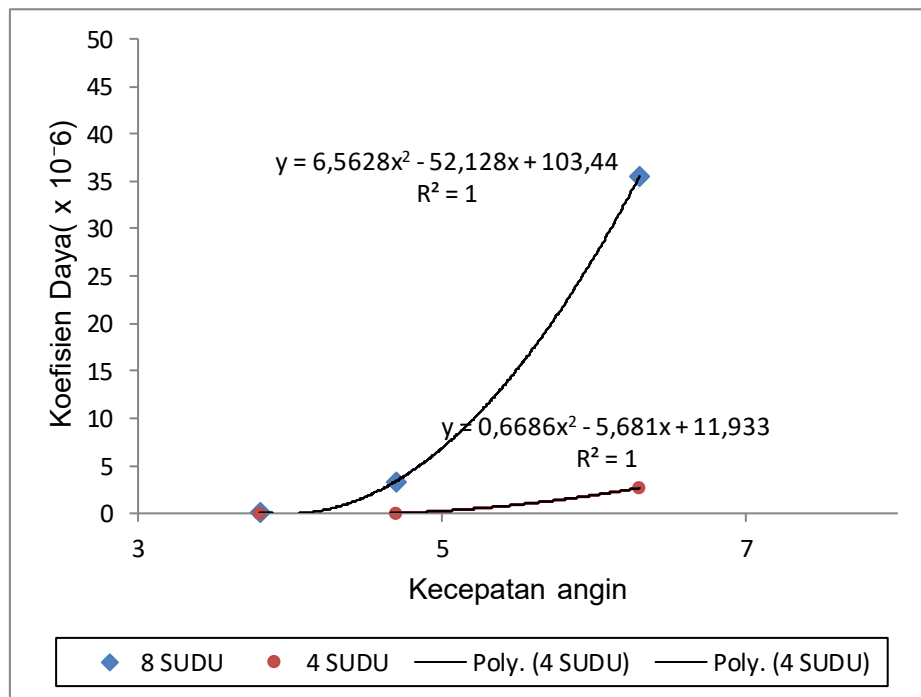
Grafik 4.1 Pengaruh kecepatan angin terhadap tegangan

Grafik diatas menunjukkan bahwa variabel kecepatan angin berpengaruh terhadap tegangan yang dihasilkan, dan tegangan yang dihasilkan oleh turbin angin 8 sudu dan 4 sudu dengan kecepatan angin yang bervariasi juga dapat menghasilkan tegangan yang berbeda juga. Dilihat dari tabel diatas bahwa pada kecepatan angin 6,3 m/s dengan sudu 8 dapat menghasilkan tegangan yang lebih baik.



Grafik 4.2 Pengaruh Kecepatan Angin terhadap Arus

Grafik diatas menunjukkan bahwa variabel kecepatan angin berpengaruh terhadap Arus yang dihasilkan, dan Arus yang dihasilkan oleh turbin angin 8 sudu dan 4 sudu dengan kecepatan angin yang bervariasi juga dapat menghasilkan Arus yang berbeda juga. Dilihat dari grafik diatas bahwa pada kecepatan angin 6,3 m/s dengan sudu 8 dapat menghasilkan Arus yang lebih baik.



Grafik 4.3 Pengaruh Kecepatan Angin terhadap Cp

Dari Grafik diatas menunjukkan bahwa variabel kecepatan angin berpengaruh terhadap koefisien yang dihasilkan, Koefisien daya yang dihasilkan oleh turbin angin 8 sudu dan 4 sudu dengan menggunakan kecepatan angin yang bervariasi dapat menghasilkan koefisien daya yang berbeda juga. Dilihat dari grafik diatas bahwa kecepatan angin 6,3 m/s dengan sudu 8 dapat menghasilkan koefisien daya yang lebih baik



SIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Setelah melakukan penelitian pada turbin angin dengan 8 sudu dan 4 sudu berdasarkan teori yang telah dijelaskan pada bab 2 dan bab 3, dapat diketahui bahwa turbin angin dengan variabel kecepatan angin dapat menghasilkan tegangan, arus, dan koefisien daya yang berbeda. Dapat dilihat pula perbandingan antara Turbin Angin yang menggunakan 8 sudu dan 4 sudu, yang dapat menghasilkan daya yang baik yaitu pada turbin angin 8 sudu yang mendapatkan sumber angin paling kencang yaitu 6,3 m/s. Berdasarkan hasil penelitian dan uraian dari analisa data, maka penulis dapat mengambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

- a. Kecepatan angin sangat berpengaruh terhadap daya yang dihasilkan oleh kincir angin, hal ini dapat dilihat dari hasil yang didapat dalam penelitian yang telah dilakukan oleh penulis, hasil penelitian tersebut dapat dilihat pada :
 - 1) Pada kincir angin yang menggunakan 8 sudu dimana kecepatan angin 6,3 m/s dapat menghasilkan koefisien daya sebesar $35,51 \times 10^{-6}$
 - 2) Pada kincir angin yang menggunakan 4 sudu dimana kecepatan angin 6,3 m/s dapat menghasilkan koefisien daya sebesar $2,68 \times 10^{-6}$
- b. Kecepatan angin pada kincir angin yang menggunakan 8 sudu lebih efisien dibandingkan dengan kincir angin yang menggunakan 4 sudu, hal ini dapat dilihat dari perhitungan dimana kincir angin 8 sudu pada kecepatan 6,3 m/s mempunyai efisiensi yaitu $35,51 \times 10^{-6}$ sedangkan kincir angin 4 sudu yang menggunakan $r = 0,55$ pada kecepatan 6,3 m/s mempunyai efisiensi yaitu $2,68 \times 10^{-6}$. Pada kincir angin 4 sudu yang menggunakan $A = 0,14 \text{ m}^2$ adalah $182,52 \times 10^{-7}$.

Saran

Dengan segala kekurangan yang masih terdapat pada perancangan turbin angin ini, agar kedepannya turbin angin ini dapat dibuat lagi dalam bentuk yang lebih sempurna dari yang sebelumnya, maka penulis menyarankan untuk :

- a. Agar kabel yang terdapat pada *stand* turbin angin tidak berbelit pada saat memutar, maka sebaiknya dalam perancangannya turbin angin ini dilengkapi dengan Slip Ring supaya pada proses kerjanya turbin angin tersebut lebih sempurna.
- b. Agar dalam penelitian selanjutnya tidak perlu menggunakan kincir angin 4 sudu karena daya yang dihasilkan tidak sebesar kincir angin yang menggunakan 8 sudu.
- c. Dalam penelitian kincir angin selanjutnya menggunakan sudu yang memiliki diameter sudu lebih besar lagi dari yang sebelumnya agar sapuan blade dapat menghasilkan Tegangan, arus, dan koefisien daya yang lebih besar lagi.

Daftar Pustaka

- Bere, F. M., Koehuan, V. A., & Jasron, J. U. (2017). Analisis performansi turbin angin poros horizontal model double rotor contra rotating. LONTAR Jurnal Teknik Mesin Undana, 2(1). <https://doi.org/10.35508/ljtmu.v2i1.481>
- Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., & Bossanyi, E. (2011). Wind energy handbook (2nd ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119992714>
- Dai, Y., & Hu, Y. (2010). A review of wind turbine aerodynamics. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(9), 3079–3088. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.06.006>
- Fahrudin, M., Bugis, H., & Saputro, H. (2020). Pengaruh material bilah dan kecepatan angin terhadap performansi turbin angin horizontal skala mikro. Nozel: Jurnal Pendidikan Teknik Mesin, 2(1). <https://doi.org/10.20961/nozel.v2i1.43234>
- Hafid, A. (2025). ANALISIS PERBANDINGAN UJI KEAUSAN ANTARA KAMPAS KOPLING KUALITAS 1 DENGAN KUALITAS 2 PADA KENDARAAN SUZUKI KATANA. JURNAL MEKANIKASISTA, 13(1), 38–52.
- Harjanto, B., & Wijanarko, H. (2025). Analisis pengaruh kegunaan ring diesel pada saluran bahan bakar solar terhadap daya mesin diesel. Jurnal Mekanikasista, 13(1), 1–10.
- Hau, E. (2013). Wind turbines: Fundamentals, technologies, application, economics (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-27151-9>





- Khusnawati, N., Wibowo, R., & Kabib, M. (2022). Analisa turbin angin sumbu horizontal tiga sudu. *Jurnal Crankshaft*, 5(2). <https://doi.org/10.24176/crankshaft.v5i2.7683>
- Lufti, A., Harjanto, B., & Sukahar, S. (2023). Pengabdian kepada masyarakat Prodi Teknik Mesin Pertahanan Akmil kepada masyarakat Kelurahan Karangasem Kabupaten Gunung Kidul Yogyakarta. *Jurnal Nagara Bhakti*, 2(1), 58–67.
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2010). *Wind energy explained: Theory, design and application* (2nd ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119994367>
- Micallef, D., Sant, T., & van Bussel, G. (2013). The aerodynamics of wind turbines: A review. *Renewable Energy*, 60, 34–44. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.04.002>
- Rahman, F., Nurjannah, I., Sari, H. N., Christian, A., & Hidayat, M. K. (2022). Optimalisasi metode blade turbin angin sumbu horizontal. *Otopro*, 18(2). <https://doi.org/10.26740/otopro.v18n2.p59-64>
- Suhariyanto, Batutah, M. A., & Muttaqin, M. Z. (2023). Perancangan dan analisis kinerja turbin angin tipe horizontal tiga blade dengan bahan PVC. *Journal of Manufacturing in Industrial Engineering & Technology*, 3(2). <https://doi.org/10.30651/mine-tech.v3i2.23775>
- Sukahar, S., Lufti, A., & Harijanto, B. (2026). Model pengelolaan sampah berkelanjutan berbasis komunitas di Kecamatan Taktakan Kota Serang. *Jurnal Nagara Bhakti*, 4(2), 64–76.
- Sulaiman, S., & Gunawan, A. (2023). Pengujian turbin angin dengan variasi kecepatan angin pada turbin horizontal tiga blade. *Jurnal Teknologi dan Vokasi*, 1(1), 38–44. <https://doi.org/10.21063/jtv.2023.1.1.38-44>
- Vermeer, L. J., Sørensen, J. N., & Crespo, A. (2003). Wind turbine wake aerodynamics. *Progress in Aerospace Sciences*, 39(6–7), 467–510. [https://doi.org/10.1016/S0376-0421\(03\)00078-2](https://doi.org/10.1016/S0376-0421(03)00078-2)
- Wahyudi, S. N., & Al-Janan, D. H. (2020). Konfigurasi bilah NACA 3612 terhadap performa turbin angin sumbu horizontal. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 11(3). <https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2020.011.03.14>
- Wood, D. (2011). *Small wind turbines: Analysis, design, and application*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-84996-175-2>
- Zhu, W., Shen, W. Z., & Sørensen, J. N. (2015). Modeling of wind turbine performance and wake effects. *Renewable Energy*, 75, 620–628. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.047>