

SIMULASI BILAH TURBIN ANGIN SUMBU VERTIKAL (VAWT) TIPE ROTOR *HELICAL* UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN DI TEPI PANTAI BUKIT DAN JALAN

¹M. Azizzurrahman, ²M. Luqman B, ³Ferry Setiawan, ⁴Mayesha Dwi F, ⁵ M. Kevin Adam

^{1,2,3,4,5} S1 Teknik Dirgantara, Sekolah Tinggi Teknologi Kedirgantaraan

Abstrak

Krisis Energi diakibatkan perkembangan Teknologi yang pesat di seluruh dunia mengakibatkan penggunaan energi fosil yang meningkat dan global warming, sehingga perlu adanya pengembangan Teknologi energi terbarukan untuk menjaga kesetabilan energi didunia. Salah satu potensi energi terbarukan adalah energi angin dengan turbin angin sumbu vertikal tipe rotor Helical menggunakan NACA 0021 sebagai bilah-nya, metode penelitian yang digunakan adalah metode numerik dengan hasil dimana kecepatan angin pada tepi pantai parangtritis sebesar 4,74 m/s dan density udara 1,2 Kg/m³ dengan daya yang dihasilkan menggunakan 4 bilah rotor sebesar 59,2 Watt-h. kemudian di bukit paralayang didapatkan kecepatan udara 4,55 m/s dan density udara 1,16 Kg/m³, menghasilkan daya listrik 50,8 Watt h dan pada jalan ringroad barat yogyakarta yang memiliki kecepatan udara sebesar 3,885 m/s serta density udara 1,17 Kg/m³, menghasilkan daya listrik sebesar 31,9 Watt-h. Hasil daya yang dihasilkan antara simulasi dengan perhitungan manual tidak jauh beda.

Kata kunci: VAWT, Rotor Helical, NACA 0021, 3D Printing

Abstract

The energy crisis is caused by rapid technological developments throughout the world resulting in increased use of fossil energy and global warming, so it is necessary to develop renewable energy technologies to maintain energy stability in the world. One of the renewable energy potentials is wind energy with a Helical rotor type vertical axis wind turbine using NACA 0021 as the blades, the research method used is the numerical method with the result that the wind speed on the parangtritis beach is 4.74 m/s and the air density is 1.2 Kg/m³ with the power generated using 4 rotor blades of 59.2 Watt-h. then on the paragliding hill, the air speed is 4.55 m/s and the air density is 1.16 Kg/m³, producing an electric power of 50.8 Watt h and on the west ringroad road in Yogyakarta which has an air speed of 3.885 m/s and a density 1.17 Kg/m³ of air, producing 31.9 Watt-h of electrical power. The resulting power results between the simulation and manual calculations are not much different.

Keywords: VAWT, Helical Rotor, NACA 0021, 3D Printing

Pendahuluan


Krisis energi yang di akibatkan meningkatnya peradapan serta perkembangan teknologi yang pesat didunia, tidak cukup hanya mengandalkan energi fosil yang mana hasil energi fosil juga menghasilkan gas rumah kaca sehingga semakin mengotori bumi, efek dari rumah kaca ini membuat suhu bumi semakin panas. Sehingga diperlukan pengembangan Teknologi untuk energi terbarukan guna menjaga kesetabilan energi serta menjaga dunia agar tidak semakin memburuk.

Penggunaan energi baru dan terbarukan harus menjadi perhatian utama pemerintah Indonesia tidak hanya sebagai upaya untuk mengurangi pemakaian energi fosil melainkan juga untuk mewujudkan energi bersih atau ramah lingkungan. (Azhar, Satriawan, 2018). Pemenuhan energi dalam suatu negara menjadi suatu hal yang sangat penting karena sangat mempengaruhi perkembangan industri di negara tersebut. Salah satu komoditi unggulan dalam peradaban modern adalah energi. (Ridwan, Latief, 2019).

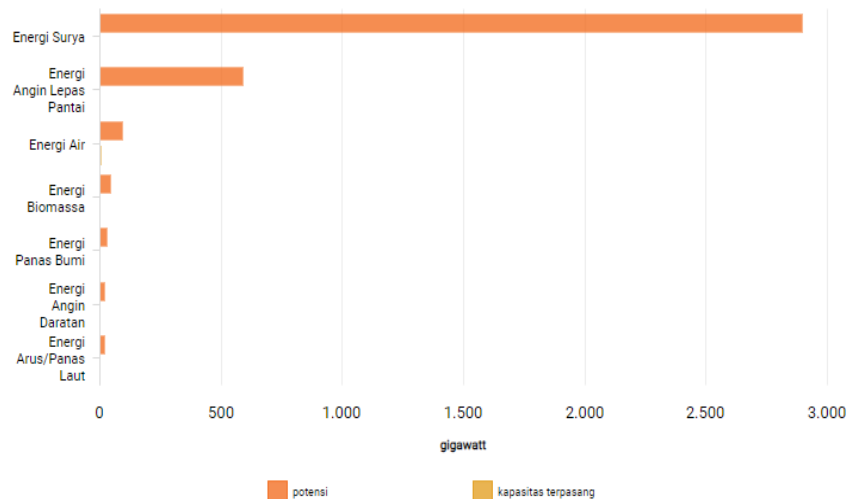
Di Indonesia sendiri memiliki banyak potensi energi terbarukan khususnya energi angin lepas pantai, mengutip dari IRENA (International Renewable Energy Agency, 2022) potensi yang dimiliki yaitu

¹Email Address: 190302081@students.sttkd.ac.id

Received 8 Agustus 2023, Available Online 30 Desember 2023

 <https://doi.org/10.56521/teknika.v9i2.869>

589 gigawatt (GW) namun belum ada yang terpasang satu pun. Pada penelitian sebelumnya mengenai pengujian turbin angin dengan menggunakan NACA 4412 didapatkan hasil daya pada kecepatan 5 m/s memiliki 0,17 koefisien daya maksimum untuk TSR 4. Yang mana hasilnya rendah, jauh dari harapan yaitu sebesar 0,592. Fauzi, I. R. W. (2019). Berdasarkan data tersebut didapatkan tujuan penelitian yaitu: 1) mengetahui berapa daya yang dihasilkan di tepi pantai laut, diatas bukit parangtritis dan jalan raya ringroad barat; 2) mengetahui perbandingan daya listrik yang dihasilkan pada menggunakan perhitungan dari data anemometer dengan data simulasi di solidworks; 3) membuat prototype bilah rotor helical dengan NACA 0021 menggunakan 3D printing guna mengetahui bentuk dan lekukan dari bilah rotor.



Gambar 1. Statistik Potensi Energi Terbarukan di Indonesia
Sumber: (*International Renewable Energy Agency, 2022*)

Tinjauan Pustaka

Angin

Angin adalah gerakan udara yang terjadi diatas permukaan bumi. Angin terjadi karena adanya perbedaan tekanan udara, ketinggian dan temperatur. Semakin besar perbedaan tekanan udara maka kecepatan angin akan meningkat. Selain itu kecepatan angin pada siang hari akan lebih besar daripada malam hari karena pada waktu siang hari udara relatif lebih tinggi dibanding dengan malam hari. Didaerah khatulistiwa, udara menjadi panas mengembang dan menjadi ringan, sehingga udara bergerak naik kedaerah yang lebih dingin Saat udaranya menjadi dingin itu akan turun kebawah. Dengan demikian terjadi suatu perputaran udara, berupa perpindahan dari kutub utara ke khatulistiwa menyusuri permukaan bumi, dan sebaliknya suatu perpindahan udara dari garis khatulistiwa kembali ke kutub utara melalui lapisan udara yang lebih tinggi

Angin adalah salah satu energi yang mudah didapatkan, tapi masih jarang dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif. Sebelumnya, angin dimanfaatkan sebagai irigasi, pencacah hasil panen, pengering dan, lain-lain. Seiring berkembangnya teknologi dan semakin berkurangnya cadangan energi fosil maka energi angin pun dijadikan sebagai sumber energi sebagai pembangkit listrik. Secara umum pemanfaatan tenaga angin di Indonesia memang kurang mendapat perhatian. Padahal kapasitas pembangkit listrik tenaga angin di dunia telah berkembang pesat dengan laju pertumbuhan kumulatif sampai dengan tahun 2004 melebihi 20 persen pertahun. Dari kapasitas terpasang 5 GW pada tahun 1995 menjadi hampir 48 GW pada akhir tahun 2004 tersebar dalam 74.400 turbin angin disekitar 60 negara

Karakteristik Angin

Adanya perbedaan kecepatan udara disebabkan variasi temperatur menimbulkan gerakan udara dari satu ketinggian ke ketinggian yang lain, sedang arahnya dipengaruhi oleh kecepatan bumi pada porosnya. Sehingga itu sebabnya kecepatan angin di Indonesia dengan kecepatan angin di beberapa negara Eropa itu berbeda. Di daerah tropis akan terjadi angin dari daerah maksimum subtropis ke daerah minimum *equator*. Angin ini disebut angin pasat timur laut di belahan bumi utara dan angin pasat tenggara di belahan bumi selatan. Ini berarti arah angin biasanya menuju *equator*. Angin pasat banyak membawa uap air karena berhembus dilaut lepas. Akan tetapi pada beberapa wilayah dipermukaan bumi angin pasat tersebut mengalami perubahan arah akibat pengaruh lingkungan setempat. Di Indonesia yang secara geografis terletak diantara dua benua dan dua samudra serta letak matahari yang berubah setiap enam bulan berada di utara dan enam bulan berikutnya berada di selatan, maka angin pasat tersebut mengalami perubahan menjadi angin musson barat dan angin *musson* timur. Kecepatan angin juga dipengaruhi oleh beberapa faktor setempat, misalnya bukit-bukit, pohon-pohon dan variasi temperatur setempat.

Beberapa karakteristik angin di Indonesia antara lain	Jika kita ingin memanfaatkan energi angin harus diperhatikan
Arah angin yang sering berubah Sering terjadi turbulensi	Didaerah mana kincir angin tersebut ditempatkan Berapa kisaran jumlah angin dalam setahun pada daerah tersebut
Kecepatan rata-rata angin relatif rendah	Bagaimana pola distribusi kecepatan angin didaerah tersebut

Pemanfaatan Energi Angin

Angin sebagai sumber energi dalam penggunaannya mempunyai beberapa manfaat: energi angin tidak akan habis dan mudah didapatkan di berbagai tempat, tidak menimbulkan emisi gas rumah kaca sehingga ramah lingkungan, biaya konversi lebih murah dibanding energi fosil, dan cocok untuk daerah/pulau yang tidak terjangkau oleh pembangkit listrik.

Energi angin keberadaanya begitu melimpah di alam dan tanpa memerlukan biaya untuk mendapatkannya. Penggunaan energi angin juga tidak mengakibatkan polusi dan gas rumah kaca yang dapat mencemari lingkungan. Sistem konversi Energi Angin (SKEA) dibagi kedalam dua jenis, yaitu berupa kincir angin dan turbin angin. Kincir angin memanfaatkan energi angin menjadi energi kinetik, sedangkan turbin angin memanfaatkan energi angin menjadi energi listrik.

Turbin Angin Sumbu Vertikal

Turbin angin dengan sumbu vertikal merupakan turbin angin yang sumbu rotasi rotornya tegak lurus terhadap permukaan tanah. Jika dilihat dari efisiensi pada turbin, turbin angin dengan sumbu horizontal lebih efektif dalam mengekstrak atau menghasilkan energi angin dibanding dengan turbin angin sumbu vertikal.

Adapun keunggulan dari turbin angin dengan sumbu vertikal diantaranya, turbin angin dengan sumbu vertikal tidak harus diubah posisinya ketika arah angin berubah, tidak seperti turbin angin horizontal yang memerlukan mekanisme tambahan dalam menyesuaikan rotor turbin dengan arah angin. Tidak membutuhkan struktur menara yang besar sehingga konstruksinya design sederhana. Dan turbin angin sumbu vertikal dapat didirikan dekat dengan permukaan tanah, sehingga memungkinkan menempatkan komponen mekanik dan komponen elektronik serta perawatan yang mendukung beroperasinya turbin.

Massa Jenis Udara

Tekanan udara sangat dipengaruhi dengan densitas udara (kerapatan massa udara) atau tingkat kepadatan. Besarnya tekanan udara bergantung dengan jumlah udara di atasnya. Ketika udara berada di titik tertinggi, semakin sedikit udara di atasnya. Hal inilah yang menyebabkan tekanan udaranya di dataran tinggi kecil. Berbanding terbalik dengan di dataran rendah. Selain itu, tekanan udara dipengaruhi oleh suhu udara. Ketika suhu udara tinggi, molekul udara akan mengembang dan volume udara akan semakin besar. Ketika volume di udara di atas suatu tempat tetap, massa udara total akan berkurang, beratnya pun juga berkurang, sehingga mempengaruhi tekanan udara yang terjadi.

Keterangan:

ρ = massa jenis udara (kg/m³)

p = tekanan udara (hPa)

R spesifik = konstanta gas tertentu (J/kg·K)

T = suhu (K)

$$\rho = \frac{p}{R \text{ spesifik } T} \dots\dots\dots(1)$$

Teori Momentum Element Betz

Teori momentum *elementer Betz* sederhana berdasarkan pemodelan aliran dua dimensi angin ketika mengenai rotor menjelaskan prinsip konversi energi angin pada turbin angin. Kecepatan aliran angin berkurang dan garis aliran akan membelok ketika melalui rotor dipandang pada satu bidang. Berkurangnya kecepatan aliran udara disebabkan beberapa bagian energi kinetik angin diserap oleh rotor turbin.

Keterangan:

P : daya yang diekstraksi (Watt)

ρ : massa jenis udara (kg/m³)

v_1 : kecepatan aliran udara sebelum melewati rotor (m/s)

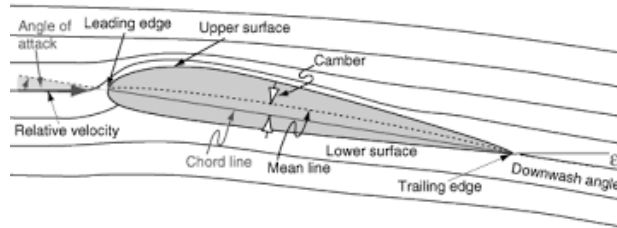
v_2 : kecepatan aliran udara setelah melewati rotor (m/s)

$$P = \frac{1}{4} \rho A (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2) \dots\dots\dots(2)$$

Airfoil

Airfoil atau Aerofoil adalah suatu bentuk geometri yang apabila ditempatkan disuatu aliran fluida akan memproduksi gaya angkat (*lift*) lebih besar dari gaya hambat (*drag*). Pada *Airfoil* terdapat bagian-bagian seperti berikut:

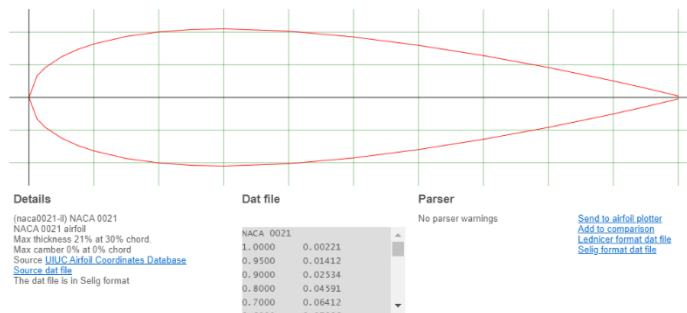
- *Leading Edge* adalah bagian yang paling depan dari sebuah *Airfoil*
- *Trailing Edge* adalah bagian yang paling belakang dari sebuah *Airfoil*
- *Chamber line* adalah bagian yang membagi sama besar antara permukaan atas dan permukaan bawah dari *Airfoil* mean *Chamber line*.
- *Chord line* adalah garis lurus yang menghubungkan *Leading Edge* dengan *Trailing Edge*.
- *Chord (c)* adalah jarak antara *Leading Edge* dengan *Trailing Edge*
- Maksimum *Chamber* adalah jarak maksimum antara *mean Chamber line* dan *chord line*. Posisi maksimum *Chamber* diukur dari *leading edge* dalam bentuk persentase *chord*.
- Maksimum *thickness* adalah jarak maksimum antara permukaan atas dan permukaan bawah *Airfoil* yang juga diukur tegak lurus terhadap *chord line*.



Gambar 2. Bagian Airfoil NACA 0021
 Sumber : (M. Fajri Hidayat,2014)

NACA Seri 4 Digit

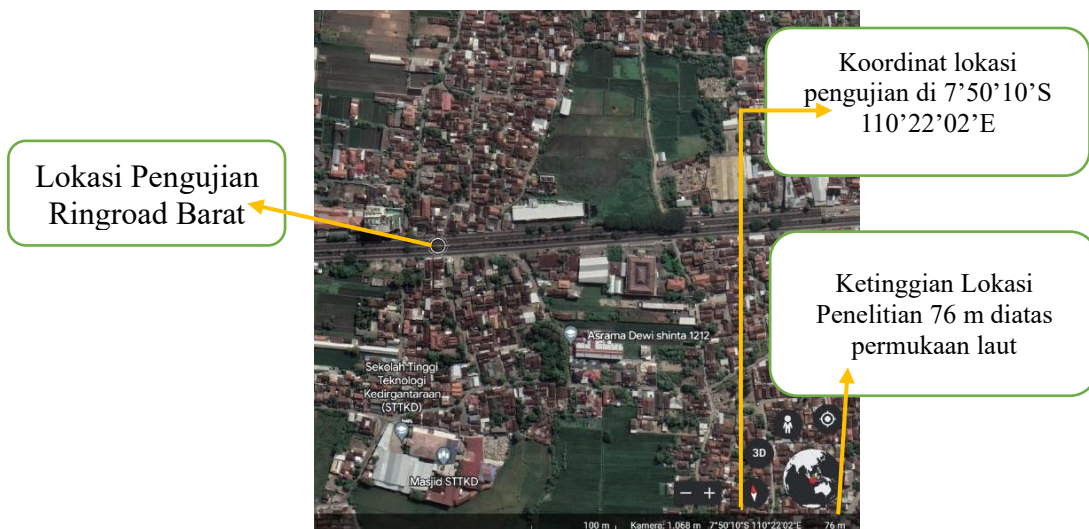
Pada *Airfoil NACA* seri 4 digit, pertama menyatakan persen maksimum *Chamber* terhadap chord. Digit kedua menyatakan persepuluh posisi maksimum *Chamber* pada chord dari leading edge. Sedangkan dua digit terakhir menyatakan persen ketebalan *Airfoil* terhadap chord. Contoh :



Gambar 3. Airfoil NACA 0021
 Sumber: (Airfoil Tools, naca0021 – il)

Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah numerik, yaitu dengan mencari referensi dari berbagai macam tipe turbin angin dengan *NACA 0021* yang akan dimodelkan. Selanjutnya adalah menggunakan data dari BMKG, Anemometer, dan penelitian terdahulu untuk mendapat kecepatan angin rata-rata di Daerah Istimewa Yogyakarta.



Gambar 4. Ketinggian Ringroad Barat Diatas Permukaan Laut
 Sumber: (Google Earth)

Berat massa udara pada tempat penelitian berbeda-beda dikarenakan ketinggian tempatnya sehingga pada penelitian di bukit paralayang perlu dilakukan penyesuaian. Berdasarkan data table 3.3 propertis *desensitas* udara didapatkan bahwa pada suhu 30°C memiliki 1,16 kg/m^3 , sedangkan pada area penelitian di jalan ringroad barat didapatkan berdasarkan penelitian dari universitas Gadjah mada yang mana hasilnya 1,17 kg/m^3 (Kifli, M. D. 2016), dan pada area penelitian di tepi pantai parangtritis memiliki 1,2 kg/m^3 berdasarkan satuan internasional (*Sea level*)

Table 1. Propertis Viskositas dan desensitas Udara

T°C	Viskositas (m^2/s)	$\rho(Kg/m^3)$
0	$13,27 \times 10^{-6}$	1,293
20	$15,05 \times 10^{-6}$	1,204
30	$15,98 \times 10^{-6}$	1,164
40	$16,92 \times 10^{-6}$	1.127
60	$18,86 \times 10^{-6}$	1.067
80	$20,88 \times 10^{-6}$	1.000
100	$22,98 \times 10^{-6}$	0.946

Table 2. List Data Berat *Massa* Udara Berdasarkan Perhitungan SI Unit

Material/jenis udara	$\rho (kg/m^3)$	Catatan
Hidrogen	0.0898	-
Helium	0.179	-
Aerographite	0.2	-
Aerogel	1.0	-
Udara	1.2	Diatas permukaan laut

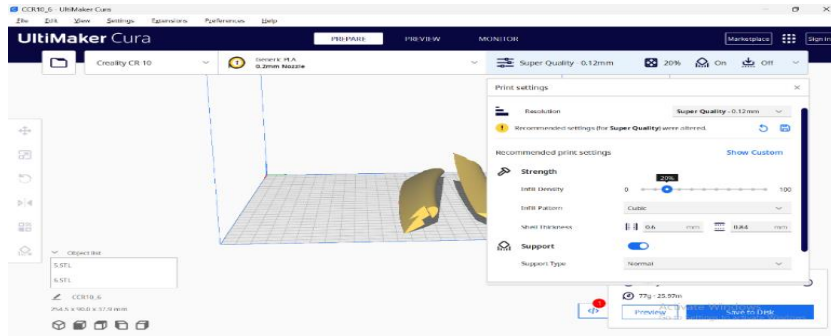
Table 3. Propertis Density vs Temperatur Satuan S1 Unit

T°C	Density udara $\rho(Kg/m^3)$
0	1.292
10	1.246
15	1.225
20	1.204
25	1.183
30	1.164
35	1.145

Kemudian melakukan pengukuran di aera penelitian menggunakan Anemometer di tepi pantai Parangtritis, bukit paralayang Parangtritis dan jalan ringroad barat.

Mencetak Prototype Bilah Rotor *Helical*

Pada tahap ini dilakukan percetakan menggunakan 3D *Printing* untuk mengetahui bentuk dari bilah rotor tipe *Helical* menggunakan airfoil tipe NACA 0021.



Gambar 5. Mencetak Prototype bilah rotor tipe Helical dengan NACA 0021 3D Printing Menggunakan software UltiMaker Cura
 Sumber: (UltiMaker Cura)

Hasil dan Pembahasan

Hasil Perhitungan Anemometer dan bilangan Reynold

Perhitungan hasil data kecepatan angin didapatkan kecepatan udara yang relatif berubah-ubah seperti pada table yang mana, kecepatan udara pagi hari di tepi pantai parangtritis sangat kecil namun di bukit paralayang parangtritis cukup tinggi begitupun sebaliknya pada kecepatan udara saat malam hari. Sedangkan pada kecepatan angin di jalan ringroad barat cukup kecil dikarenakan kecepatan udara berpengaruh terhadap kendaraan yang melintas.

Table 4. Kecepatan Angin di tepi pantai Parangtritis

Waktu	Pagi	Siang	Sore	Malam
Kecepatan Minimum	1,75 m/s	4,97 m/s	2,91 m/s	5,89 m/s
Kecepatan Maksimum	3,17 m/s	7,88 m/s	4,12 m/s	7,23 m/s
Kecepatan rata-rata	2,46 m/s	6,425 m/s	3,82 m/s	6,82 m/s
Kecepatan rata-rata total				4,74 m/s

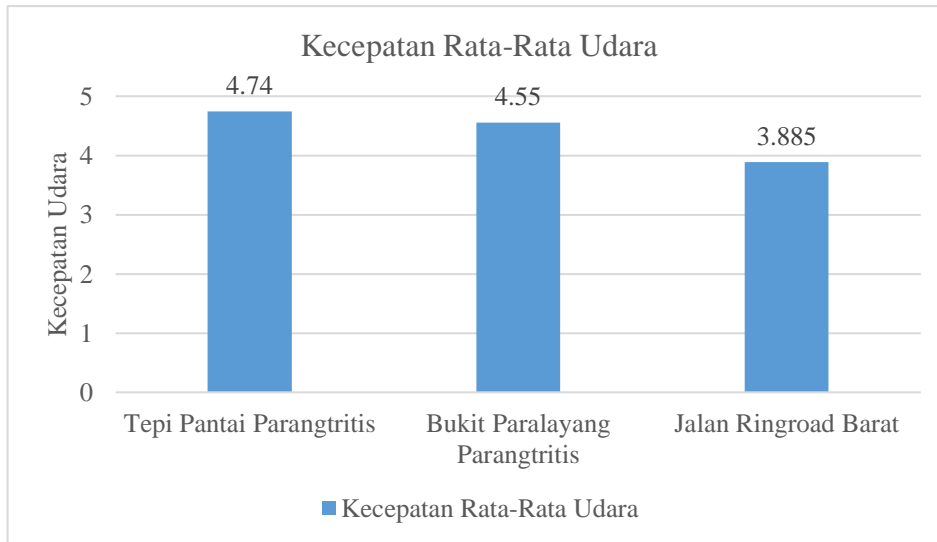
Table 5. kecepatan angin di Bukit Paralayang Parangtritis

Waktu	Pagi	Siang	Sore	Malam
Kecepatan Minimum	3,43 m/s	4,55 m/s	3,89 m/s	1,73 m/s
Kecepatan Maksimum	9,06 m/s	6,61 m/s	5,00 m/s	2,15 m/s
Kecepatan rata-rata	6,24 m/s	5,58 m/s	4,44 m/s	1,94 m/s
Kecepatan rata-rata total				4,55 m/s

Table 6. Kecepatan Angin di Jalan Ringroad Barat Yogyakarta

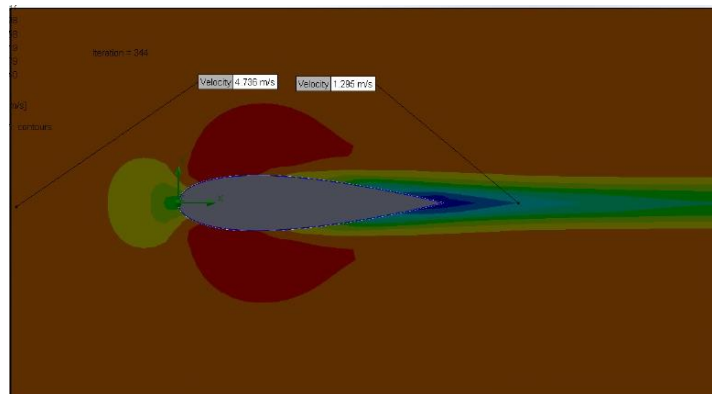
Waktu	Pagi	Siang	Sore	Malam
Kecepatan Minimum	1,30 m/s	- m/s	1,30 m/s	2,13 m/s
Kecepatan Maksimum	3,08 m/s	1,27 m/s	3,69 m/s	2,77 m/s
Kecepatan rata-rata	2,19 m/s	1,27 m/s	2,495m/s	2,45m/s
Kecepatan rata-rata total				3,885 m/s

Bedasarkan **Gambar 6** diketahui bahwa kecepatan udara yang paling tinggi didapatkan pada tepi pantai Parangtritis dikarenakan udara tidak terhalang oleh objek lain, untuk bukit paralayang udara juga tidak terhalang oleh objek lain, sedangkan di ringroad barat banyak objek lain seperti pohon, kendaraan dan lampu jalan sehingga udara tidak dapat bergerak bebas.



Gambar 6. Grafik rata-rata kecepatan udara pada ketiga tempat penelitian

Perhitungan hasil daya di Tepi Pantai Parangtritis dengan NACA 0021



Gambar 7. Hasil Analisis Kecepatan Udara Tepi Pantai Parangtritis Sebelum Dan Sesudah Melewati Airfoil NACA 0021 Menggunakan Software Solidworks 2022 Flow Somulation

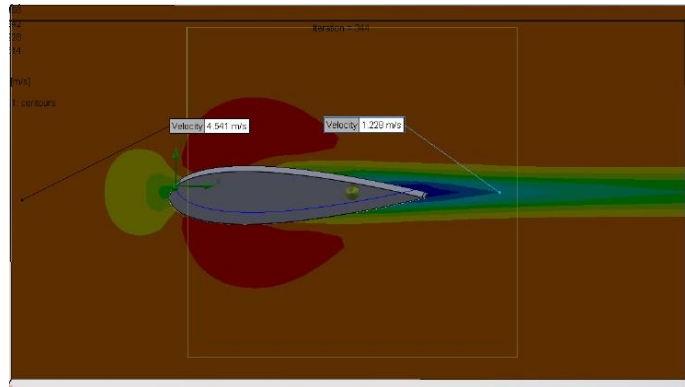
Pada **Gambar 4.5** diketahui bahwa kecepatan udara sebelum melalui bilah rotor 4,74 m/s (V_1) dan setelah melewati bilah rotor menjadi 1,295 m/s (V_2), kemudian karena lokasi penelitian di tepi pantai maka didapatkan *Density* udara sebesar 1.2 Kg/m^3 . Sehingga perhitungan listrik menggunakan teori *Element Betz* didapatkan daya output listrik sebagai berikut :

$$P = \frac{1}{4} \rho A (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2)$$

$$P = \frac{1}{4} \cdot 1,16 \cdot 0,44 \cdot (4,74^2 - 1,295^2) (4,74 + 1,295)$$

$$P = 16,457 \text{ Watt s} = 59,2 \text{ Watt h}$$

Perhitungan hasil daya di Bukit Paralayang Parangtritis dengan NACA 0021



Gambar 8. Hasil Analisis Kecepatan Udara Bukit Paralayang Parangtritis Sebelum Dan Sesudah Melewati Airfoil NACA 0021 Menggunakan Software Solidworks 2022 Flow Somulation

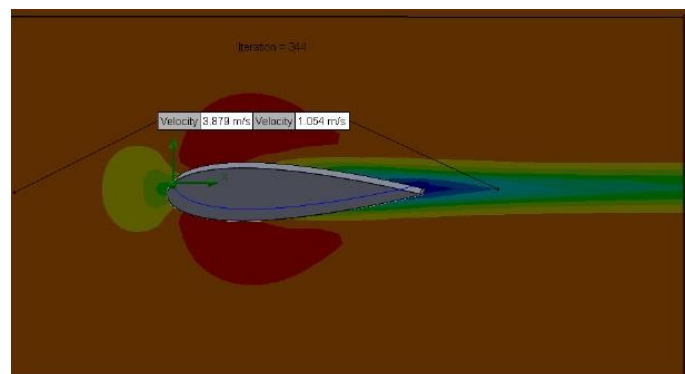
Pada area penelitian di Bukit Paralayang Parangtritis memiliki kecepatan udara sebelum melalui bilah rotor 4,55 m/s (V_1) dan 1,228 sesudah melewati bilah rotor, dikarenakan lokasi penelitian ini diatas bukit maka $Density$ udara didapatkan $1,16 \text{ Kg/m}^3$ bedasarkan suhu udara. Sehingga perhitungan listrik menggunakan teori *Element Betz* didapatkan daya output listrik sebagai berikut :

$$P = \frac{1}{4} \rho A (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2)$$

$$P = \frac{1}{4} \cdot 1,16 \cdot 0,44 \cdot (4,55^2 - 1,228^2) (4,55 + 1,228)$$

$$P = 14,115 \text{ Watt s} = 50,8 \text{ Watt h}$$

Perhitungan hasil daya di Jalan Ringroad Barat dengan NACA 0021



Gambar 9. Hasil Analisis Kecepatan Udara Jalan Ringroad Barat Sebelum Dan Sesudah Melewati Airfoil NACA 0021 Menggunakan Software Solidworks 2022 Flow Somulation

Pada **Gambar 9** diketahui bahwa kecepatan udara sebelum melewati bilah rotor (V_1) sebesar 3,885 m/s dan sesudah melewati bilah rotor (V_2) memiliki 1,054 m/s, dengan $Density$ udara 1,17 bedasarkan ketinggian lokasi penelitian terhadap permukaan laut. Sehingga perhitungan listrik menggunakan teori *Element Betz* didapatkan daya output listrik sebagai berikut :

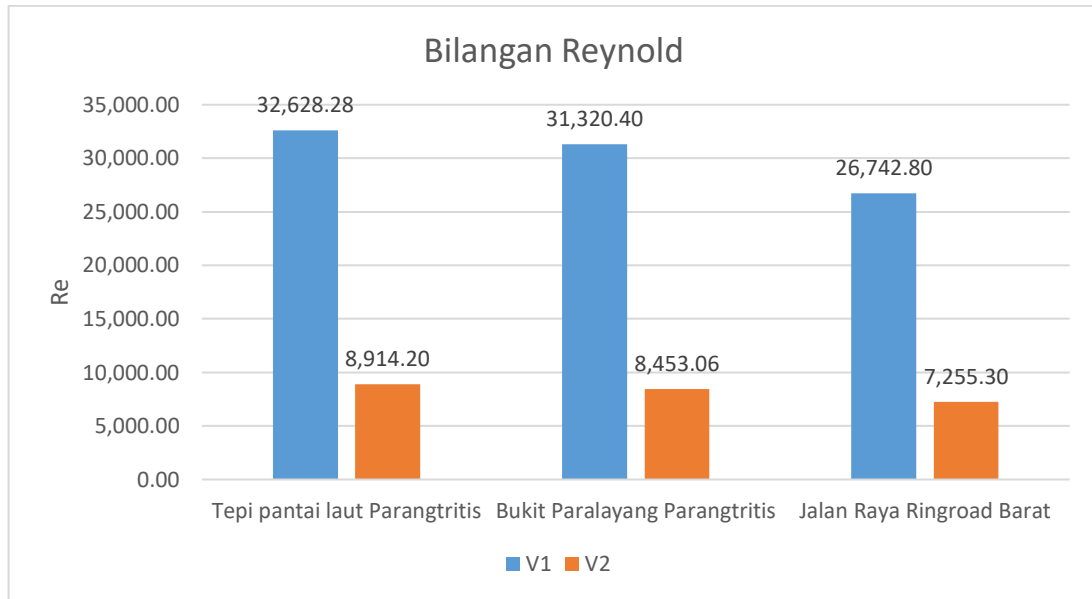
$$P = \frac{1}{4} \rho A (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2)$$

$$P = \frac{1}{4} \cdot 1,17 \cdot 0,44 \cdot (3,885^2 - 1,054^2) (3,885 + 1,054)$$

$$P = 8,88 \text{ Watt s} = 31,9 \text{ Watt h}$$

Perhitungan Nilai Bilangan Reynold

Nilai bilangan Reynold digunakan untuk mengetahui jenis aliran udara laminar, kritis, atau turbulen pada ketiga tempat penelitian.

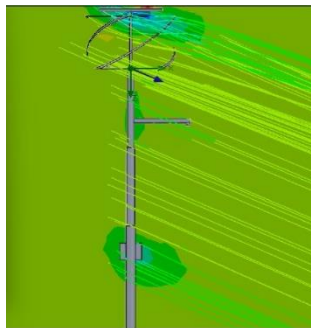


Gambar 10. Grafik Bilangan Reynold

Bedasarkan **Gambar 10** tempat penelitian di Tepi pantai laut Parangtritis memiliki hasil yang lebih tinggi V1 dan V2. Untuk pada jalan raya Ringroad Barat memiliki V1 dan V2 yang paling rendah dibandingkan 2 tempat lainnya sehingga nilai Reynold-nya juga rendah, dikarenakan kecepatan udara pada jalan raya Ringroad Barat lebih rendah. Ketiga tempat memiliki aliran udara yang sama yaitu aliran udara turbulen.

Hasil Perhitungan Simulasi

Pada hasil simulasi didapatkan torque yang mana semakin tinggi kecepatan udara maka torque yang di dapatkan semakin meningkat.



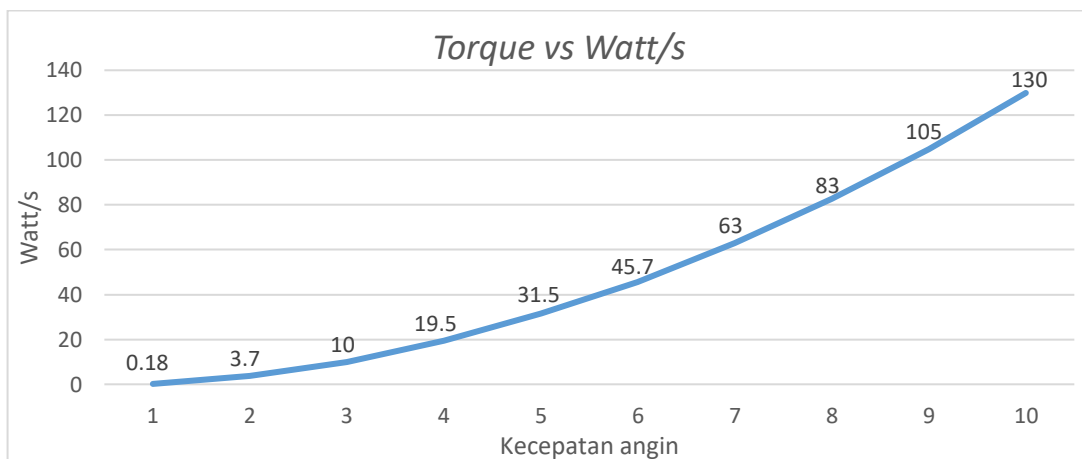
Gambar 11. Hasil torque Simulasi turbin angin Helical pada kecepatan udara 4 m/s

kecepatan udara sebelum melewati bilah rotor (V1) berkecepatan 4 m/s dan sumbu Y dan Z sebagai udara bergerak secara bebas dengan kecepatan 50% dari V1, sehingga udara bergerak seperti pada **Gambar 11**. Pada hasil simulasi didapatkan torque yang mana semakin tinggi kecepatan udara maka torque yang di dapatkan semakin meningkat, berikut data yang didapatkan :

Table 7. Kecepatan udara vs Torque

No	Kecepatan udara	Torque (N*m)	Watt/s
1	Kecepatan udara 1 m/s	0,22	0,18
2	Kecepatan udara 2 m/s	3,76	3,7
3	Kecepatan udara 3 m/s	10,23	10
4	Kecepatan udara 4 m/s	19,61	19,5
5	Kecepatan udara 5 m/s	31,57	31,5
6	Kecepatan udara 6 m/s	45,8	45,7
7	Kecepatan udara 7 m/s	63,1	63
8	Kecepatan udara 8 m/s	82,71	83
9	Kecepatan udara 9 m/s	104,98	105
10	Kecepatan udara 10 m/s	129,93	130

Didapatkan bahwa pengujian dengan simulasi dan experimental memiliki perbedaan dikarenakan aliran udara dan kondisi tempat penelitian yang berbeda seperti ketinggian dan suhu yang mempengaruhi kerapatan udara (*density*) menghasilkan daya listrik yang berbeda juga. Pada simulasi memiliki kecepatan udara dan kondisi yang optimal atau tidak terhambat, sedangkan experimental memiliki kendala seperti arah udara yang terhalang sesuatu atau lainnya sehingga mempengaruhi hasilnya.

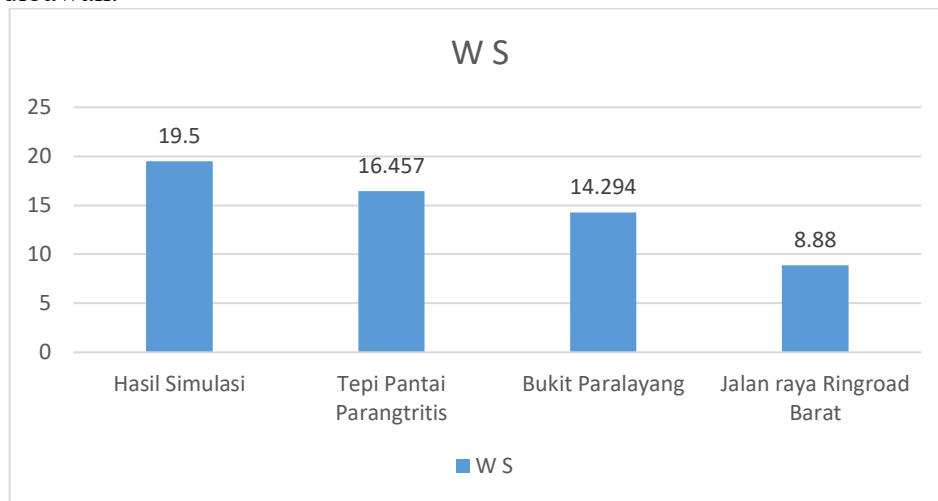
**Gambar 12. Grafik daya simulasi vs daya perhitungan manual dengan data anemometer**

Kesimpulan

Daya yang dihasilkan di tepi pantai parangtritis 16,457 *Watt/s* atau 59,2 *Watt/h* dengan density udara 1,2 Kg/m^3 . Pada bukit paralayang parangtritis mendapatkan daya 14,294 *Watt/s* atau 51,8 *Watt/h* dengan density udara 1,16 Kg/m^3 . Dan di jalan ringroad barat didapatkan daya 8,88 *Watt/s* atau 31,9 *Watt/h* dengan density udara 1,17 Kg/m^3 yang mana dari ketiga tempat penelitian menggunakan jenis yang sama yaitu turbin angin rotor tipe helical dengan *NACA0021* dengan 4 rotor. Perubahan density udara dipengaruhi pada area penelitian tergantung suhu udara dan ketinggian tempat penelitian. Perbandingan hasil daya dengan perhitungan anemometer dengan perhitungan simulasi tidak jauh beda, sehingga akurasi daya cukup baik.

Perbandingan Hasil Simulasi dengan Experimental Perhitungan dengan Anemometer

Hasil simulasi pada kecepatan udara 4 m/s, memiliki hasil daya 19,5 Watt-detik (W s) yang mana jika dibandingkan dengan hasil anemometer pada ketiga tempat penelitian didapatkan seperti pada Gambar 13 dibawah.

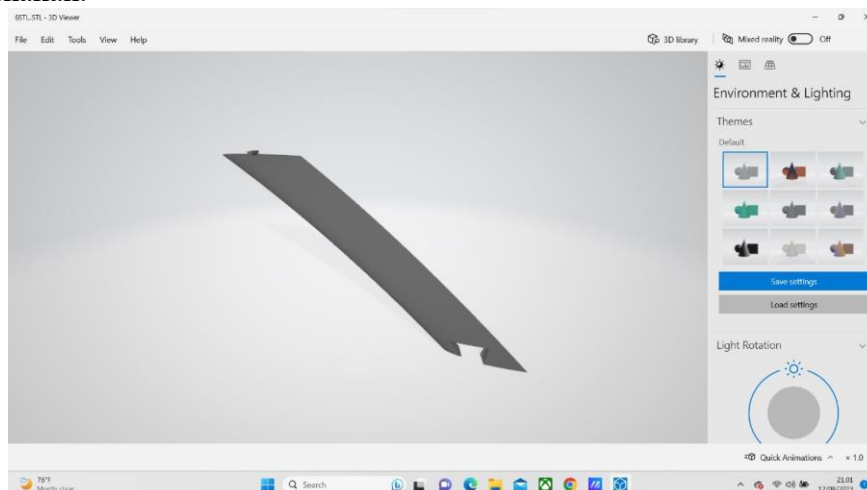


Gambar 13. Grafik perbandingan daya listrik yang dihasilkan pada kecepatan 4 m/s

Didapatkan bahwa pengujian dengan simulasi dan experimental memiliki perbedaan dikarenakan aliran udara dan kondisi tempat penelitian yang berbeda seperti ketinggian dan suhu yang mempengaruhi kerapatan udara (*density*) menghasilkan daya listrik yang berbeda juga. Pada simulasi memiliki kecepatan udara dan kondisi yang optimal atau tidak terhambat, sedangkan experimental memiliki kendala seperti arah udara yang terhalang sesuatu atau lainnya sehingga mempengaruhi hasilnya.

Pembuatan Prototype blade dengan 3D Printing

Langkah pertama yaitu mendesign bilah turbin pada SolidWorks kemudian mengubah filenya kedalam bentuk GCODE agar dapat terbaca oleh 3D Printing kemudian menentukan bahan PLA apa yang ingin digunakan.



Gambar 14. Design sebelum dicetak pada 3D Printing

Bahan yang digunakan yaitu PLA+ dimana nozzle dari 3D Printing berada pada suhu 220 Celsius dan pada plate 45 Celcius. Hasil Percetakan pada **Gambar 14** memiliki lapisan permukaan yang tidak rata sehingga dapat mempengaruhi udara yang dihasilkan.



Gambar 15. Hasil 3D Printing sebelum diperhalus



Gambar 16. Hasil 3D Printing Sesudah Diperhalus

Hasil setelah diperhalus akan meningkatkan daya karena tidak ada permukaan yang dapat menghambat atau mengganggu aliran udara.

Daftar Pustaka

- Anwar, N. R. H. (2021). Perancangan Turbin Angin Jenis *Helical* untuk Sistem Pembangkit Listrik. *Jurnal Teknik Mesin Sinergi*, 19(1), 9-17.
- Afifuddin, M. A., dan Sarwono, R. H. (2010). Studi Eksperimental Performansi Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) dengan Variasi Desain Turbin. *Jurnal Skripsi. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Noverber*.
- Azhar, M., dan Satriawan, D. A. (2018). Implementasi kebijakan energi baru dan energi terbarukan dalam rangka ketahanan energi nasional. *Administrative Law and Governance Journal*, 1(4), 398-412.
- Carrigan, T. J., Dennis, B. H., Han, Z. X., dan Wang, B. P. (2012). Aerodynamic shape optimization of a vertical-axis wind turbine using differential evolution. *International Scholarly Research Notices*, 2012.
- DeCoste, J., McKay, D., Robinson, B., Whitehead, S., Wright, S., Koksall, M., dan Hughes, L. (2005). Vertical axis wind turbine. *Department of Mechanical Engineering Dalhousie University*, 1-77.
- Hau, E. (2013). *Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics*. Springer Science dan Business Media.
- Huda, S. S., dan Arief, I. S. (2014). Analisa Bentuk Profile dan Jumlah Blade Vertical Axis Wind Turbine terhadap Putaran Rotor untuk Menghasilkan Energi Listrik. *Jurnal Teknik ITS*, 3(1), G25-G29.
- Kurniawan, H. *et al*, (2016). Pemodelan Turbin Angin Sumbu Vertikal (VAWT) tipe H-Rotor untuk Pembangkit Listrik Tenaga Angin.
- Hidayat, M. F. (2014). Analisa Aerodinamika Airfoil NACA 0012 dengan ANSYS Fluent. *Jurnal Kajian Teknologi*, 10(2).
- Ridwan, R., & Latief, A. (2020). Pengaruh Jumlah Sudu Pada Turbin Angin Sumbu Vertikal Terhadap Distribusi Kecepatan Dan Tekanan. *Jurnal Ilmiah Teknologi dan Rekayasa*, 24(2), 141-151.
- Suryadi, A. (2020). Pemanfaatan Pembangkit Turbin Angin Savonius Helix dengan Solar Cell pada Daerah Terpencil. In *Seminar Nasional Teknik Elektro* (Vol. 5, No. 1, pp. 13-17).