

**PENGEMBANGAN MODEL MATEMATIS UNTUK
MEMPREDIKSI POTENSI ENERGI ANGIN DAN EFISIENSI
TURBIN ANGIN SUMBU VERTIKAL**

SKRIPSI

OLEH:

**KANDER ARI GOK TUA SITINJAK
208130095**



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2024**

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 16/1/25

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

HALAMAN JUDUL

PENGEMBANGAN MODEL MATEMATIS UNTUK MEMPREDIKSI POTENSI ENERGI ANGIN DAN EFISIENSI TURBIN ANGIN SUMBU VERTIKAL

SKRIPSI

Diajukan sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh
Gelar Sarjana di Fakultas Teknik
Universitas Medan Area

OLEH:

KANDER ARI GOK TUA SITINJAK
208130095

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2024

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 16/1/25

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI

Judul Skripsi : Pengembangan Model Matematis untuk
Memprediksi Potensi Energi Angin dan
Efisiensi Turbin Angin Sumbu Vertikal

Nama Mahasiswa : Kander Ari Gok Tua Sitinjak

NIM : 208130095

Fakultas : Teknik

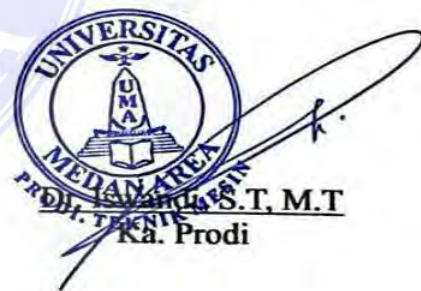
Disetujui Oleh
Komisi Pembimbing



Dr. Jufrizal, S.T, M.T
Pembimbing



Dr. Eng. ... S.T, M.T
Dekan



... S.T, M.T
Ka. Prodi

Tanggal Lulus: 19 September 2024

HALAMAN PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi yang saya susun, sebagai syarat memperoleh gelar sarjana merupakan hasil karya tulis saya sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan skripsi ini yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan sumbernya secara jelas sesuai norma, kaidah, dan etika penulisan ilmiah.

Saya bersedia menerima sanksi pencabutan gelar akademik yang saya peroleh dan sanksi-sanksi lainnya dengan peraturan yang berlaku, apabila di kemudian hari ditemukan adanya plagiat dalam skripsi ini.

Medan, 19 September 2024



Kander Ari Gok Tua Sitinjak
208130095

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR/SKRIPSI/TESIS UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Medan Area, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Kander Ari Gok Tua Sitinjak
NPM : 208130095
Program Studi : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi/Tugas Akhir

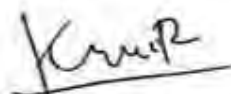
demi membangun ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Medan Area **Hak Bebas Royalti (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas Tugas Akhir saya yang berjudul : **Pengembangan Model Matematis untuk Memprediksi Potensi Energi Angin dan Efisiensi Turbin Angin Sumbu Vertikal.**

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Medan Area berhak menyimpan, mengalih media/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Medan

Pada tanggal : 19 September 2024

Yang menyatakan



(Kander Ari Gok Tua Sitinjak)

ABSTRAK

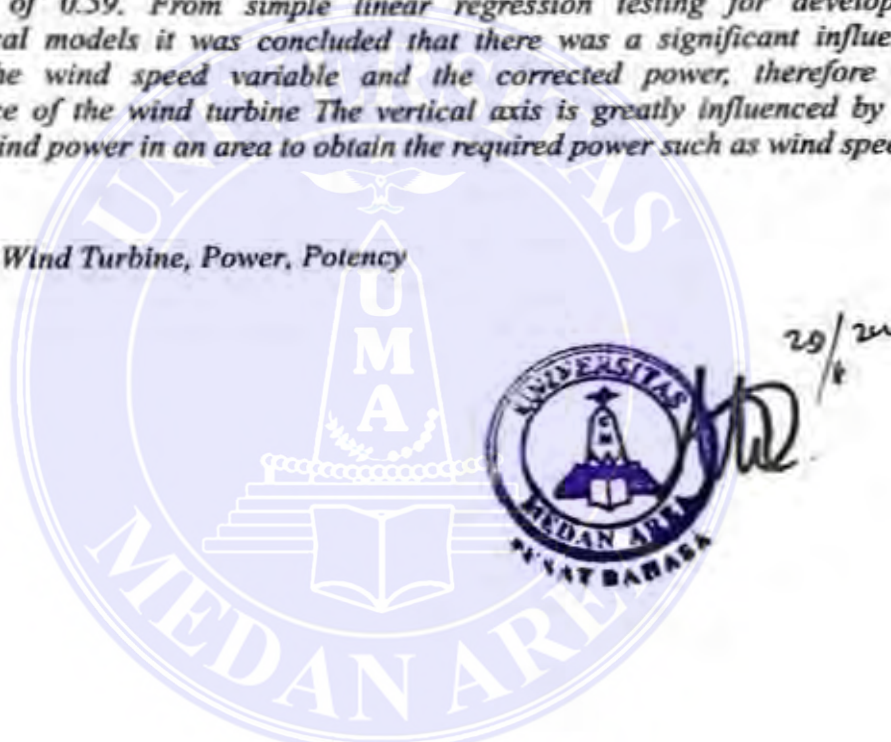
Sumber tenaga angin merupakan solusi pemanfaatan energi baru terbarukan yang relatif bersih dan ramah lingkungan karena tidak menghasilkan karbondioksida. Desain turbin angin mempunyai karakteristik spesifik, sehingga perancangannya harus disesuaikan dengan profil angin, dimana turbin akan dipasang, untuk memperoleh koefisien daya atau efisiensi yang optimal. Model matematika telah dipelajari untuk berbagai prediksi keluaran yang digunakan dalam desain turbin angin sumbu horizontal, namun model tersebut tidak memperhitungkan sudut *pitch* sudu vertikal. Penelitian ini menggunakan metode penelitian kuantitatif dengan teknik analisis data menggunakan regresi linier sederhana bertujuan untuk menguji hipotesis atau untuk mengenali adanya hubungan sebab dan akibat dengan tujuan tertentu. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini yaitu kecepatan terukur (*rated speed*) maks yaitu 6,9 m/s. Pada kecepatan ini, turbin menghasilkan daya maksimum sebesar 40,51 watt dengan Efisiensi sistem 0.75 serta koefisien daya 0.59 dari pengujian regresi linear sederhana untuk pengembangan model matematis disimpulkan bahwa adanya pengaruh signifikan antara variabel kecepatan angin dengan daya yang terkoreksi, maka dari itu Kinerja Turbin angin sumbu vertikal sangat di pengaruhi oleh Potensi daya angin di suatu daerah untuk mendapatkan daya yang dibutuhkan seperti kecepatan angin.

Kata Kunci: Turbin Angin, Daya, Potensi

ABSTRACT

Wind power sources are a solution for utilizing new, renewable energy that is relatively clean and environmentally friendly because it does not produce carbon dioxide. Wind turbine designs have specific characteristics, so the design must be adjusted to the wind profile, where the turbine will be installed, to obtain optimal power coefficient or efficiency. Mathematical models have been studied for various output predictions used in the design of horizontal axis wind turbines, but they do not take into account the vertical blade pitch angle. This research uses quantitative research methods with data analysis techniques using simple linear regression with the aim of testing hypotheses or recognizing the existence of cause and effect relationships with certain objectives. The results obtained from this research are the maximum rated speed, namely 6.9 m/s. At this speed, the turbine produces a maximum power of 40.51 watts with a system efficiency of 0.75 and a power coefficient of 0.59. From simple linear regression testing for developing mathematical models it was concluded that there was a significant influence between the wind speed variable and the corrected power, therefore the performance of the wind turbine The vertical axis is greatly influenced by the potential wind power in an area to obtain the required power such as wind speed.

Keywords: *Wind Turbine, Power, Potency*



RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Perawang Pada tanggal 28 Mei 1998 dari ayah A.Sitinjak dan ibu M. Manullang. Penulis merupakan putra ke-3 (tiga) dari 5 (lima) bersaudara.

Penulis pertama kali mengenyam pendidikan dibangku TK Marsudirini pada tahun 2003-2004, meneruskan pendidikan Sekolah Dasar Swasta Marsudirini diselesaikan pada tahun 2010, meneruskan pendidikan di Sekolah Menengah Pertama Negeri 1 Tualang diselesaikan pada tahun 2013, meneruskan pendidikan Sekolah Menengah Kejuruan Swasta YPPI Tualang.

Pada Tahun 2016 Penulis lulus dari SMK Swasta YPPI Tualang dan pada tahun 2020 terdaftar sebagai mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Medan Area. dan pada tahun 2022 Bulan Desember Penulis melaksanakan praktek kerja lapangan (PKL) di PKS PTPN II Pagar Merbau berlokasi di Lubuk Pakam.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Kuasa atas segala karuniaNya sehingga skripsi ini berhasil diselesaikan. Adapun judul yang dipilih penulis ialah "Pengembangan Model Matematis untuk Memprediksi Potensi Energi Angin dan Efisiensi Turbin Angin Sumbu Vertikal"

Terima kasih penulis sampaikan kepada Bapak Dr. Jufrizal, ST, MT selaku Dosen Pembimbing saya. Disamping itu penghargaan penulis sampaikan kepada teman teman Teknik Mesin stambuk 20 yang telah membantu penulis selama melaksanakan penelitian. Ungkapan terima kasih juga disampaikan kepada kedua Orang Tua, serta saudara kandung dan seluruh keluarga atas segala doa juga perhatiannya, lalu penulis juga banyak mengucapkan terimakasih kepada CV. IRA Publishing yang telah berkenan menjadi tempat riset bagi penulis.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki kekurangan, oleh karena itu kritik dan saran yang bersifat membangun sangat penulis harapkan demi kesempurnaan skripsi ini. Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat baik untuk kalangan pendidikan maupun masyarakat. Akhir kata penulis ucapkan terima kasih.

Penulis



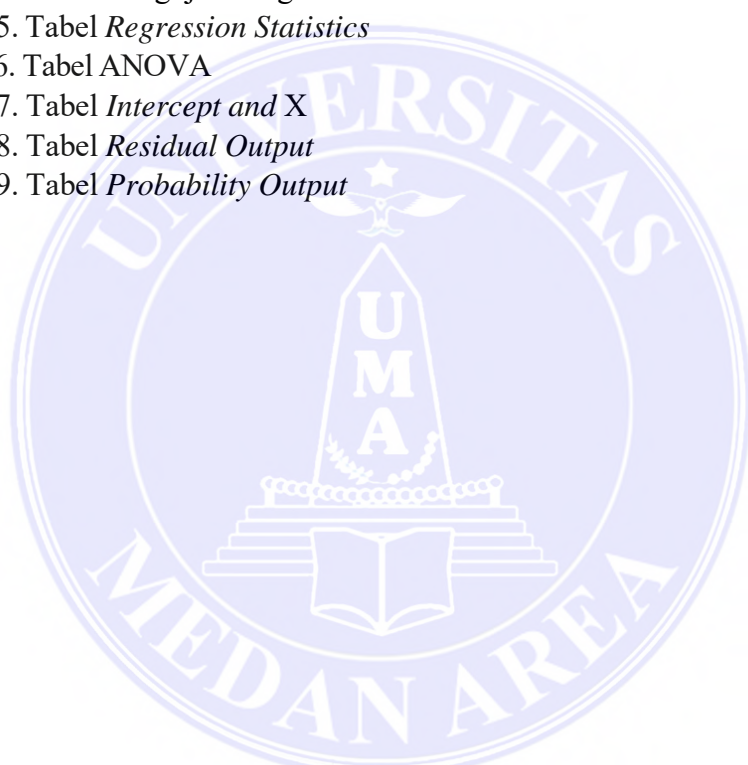
(Kander Ari Gok Tua Sitinjak)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI.....	ii
HALAMAN PERNYATAAN.....	iii
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	iv
ABSTRAK	v
RIWAYAT HIDUP	vii
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR NOTASI	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Hipotesis Penelitian	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Energi Alternatif.....	6
2.2 Dasar Teori Angin.....	9
2.3 Definisi Turbin Angin.....	14
2.4 Jenis-Jenis Turbin Angin	16
2.5 Pemodelan Matematika	26
2.6 Regresi Linear	27
2.7 Rumus Perhitungan	29
2.8 Teori Momentum <i>Element Betz</i>	36
2.9 Bilangan <i>Reynolds</i>	39
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	40
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	40
3.2 Bahan dan Alat	41
3.3 Metode Penelitian.....	44
3.4 Populasi dan Sampel	44
3.5 Prosedur Kerja.....	45
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	48
4.1 Hasil.....	48
4.2 Pembahasan	57
BAB V SIMPULAN DAN SARAN	62
5.1 Simpulan.....	62
5.2 Saran.....	63
DAFTAR PUSTAKA.....	64

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Potensi dan Kapasitas Terpasang EBT Indonesia (2021)	6
Tabel 2.2. Potensi Energi Primer Nasional	8
Tabel 2.3. Tingkatan kecepatan angin 10 meter diatas permukaan tanah (<i>knots</i>)	12
Tabel 2.4. Perbandingan antara kedua jenis turbin	15
Tabel 3.1. Jadwal Rencana Penelitian	40
Tabel 3.2. Tabel Populasi dan Sampel	45
Tabel 4.1. Tabel Data Sekunder Rata-rata kecepatan angin	48
Tabel 4.2. Tabel Data Sekunder Kecepatan angin Maksimal	49
Tabel 4.3. Tabel Hasil Perhitungan Daya	51
Tabel 4.4. Tabel Pengujian Regresi Linier Sederhana	52
Tabel 4.5. Tabel <i>Regression Statistics</i>	53
Tabel 4.6. Tabel ANOVA	53
Tabel 4.7. Tabel <i>Intercept and X</i>	54
Tabel 4.8. Tabel <i>Residual Output</i>	54
Tabel 4.9. Tabel <i>Probability Output</i>	54



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Diagram jenis-jenis Turbin Angin	16
Gambar 2.2.	Turbin Angin Poros Horizontal	17
Gambar 2.3.	Jenis Turbin Angin berdasarkan Jumlah Sudu	18
Gambar 2.4.	Turbin Angin jenis <i>Upwind</i> dan <i>Downwind</i>	19
Gambar 2.5.	Turbin Angin Sumbu Vertikal	20
Gambar 2.6.	Turbin angin <i>Darrieus</i> tipe-H	22
Gambar 2.7.	Arah Angin pada Sudu Turbin	23
Gambar 2.8.	Model sudu turbin <i>Savonius</i>	24
Gambar 2.9.	<i>Savonius</i> tipe U	25
Gambar 2.10.	<i>Savonius</i> tipe S	25
Gambar 2.11.	Garis Regresi	28
Gambar 2.12.	Nilai koefisien daya dan <i>tip speed ratio</i>	36
Gambar 2.13.	Model Aliran dari Teori Momentum <i>Betz</i>	37
Gambar 2.14.	Koefisien Daya Berbanding Dengan Rasio Kecepatan Aliran	38
Gambar 3.1.	Turbin Angin Sumbu Vertikal	41
Gambar 3.2.	Laptop / PC	42
Gambar 3.3.	<i>Handphone</i>	42
Gambar 3.4.	Anemometer	43
Gambar 3.5.	<i>Tachometer</i>	43
Gambar 3.6.	Diagram Alir Penelitian	47
Gambar 4.1.	Grafik kecepatan angin maks pada 1 Tahun	50
Gambar 4.2.	Grafik Normal <i>Probality Plot</i>	55
Gambar 4.3.	Grafik X <i>Residual Plot</i>	56
Gambar 4.4.	Grafik X <i>Line Fit Plot</i>	56

DAFTAR NOTASI

λ	=	<i>Tip speed ratio</i>
μ	=	Kekentalan mutlak (Pa.s)
ρ_{mf}	=	Kerapatan massa fluida (kg/m^3)
AB	=	Luas area untuk satu sudu
A_{lpt}	=	Luas Penampang Turbin (m^2)
As	=	Luas Area Paparan Angin
BHP	=	<i>Brake Horse Power (watt)</i>
c	=	Panjang <i>Chord</i> (m)
C_D	=	Koefisien Gaya Hambat
C_L	=	Koefisien Gaya Angkat
CP	=	Daya koefisien pisau
C_{power}	=	Koefisien <i>power</i>
D_p	=	Diameter pipa (m)
D_{rtr}	=	Diameter rotor (m)
D_t	=	Luas bidang turbin
E	=	Energi kinetik (<i>joule</i>)
H	=	Efisiensi (%)
I	=	Kuat Arus Listrik (<i>Ampere</i>)
M_a	=	Massa angin (kg)
m_{lja}	=	Laju aliran massa
N	=	Jumlah sudu
n	=	Putaran rotor (rpm)
P0	=	Daya mekanik total yang terkandung dalam angin (<i>watt</i>)
$P_{generator}$	=	Daya Motor Listrik (<i>watt</i>)
P_{input}	=	Daya Masukan (<i>watt</i>)
P_r	=	Daya rotor (<i>watt</i>)
P_{rt}	=	Daya mekanik yang dihasilkan rotor (<i>watt</i>)
P_w	=	Daya angin (<i>watt</i>)
Re	=	Bilangan <i>Reynolds</i>
V	=	Laju volume (m^3/s)
$\nu\mu$	=	Kekentalan kinematik fluida (m^2/s)
v_a	=	Kecepatan aliran (m/s)
$V_{listrik}$	=	Tegangan Generator Listrik (<i>volt</i>)
v	=	Kecepatan angin (m/s)
v_k	=	Kecepatan Fluida Relatif Terhadap Obyek (m/s)
$\eta_{generator}$	=	Efisiensi Generator Listrik (%)
ρ_{fluida}	=	Densitas Fluida (kg/m^3)
ρ_{udara}	=	Densitas Udara (kg/ m^3)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Kebutuhan energi di Indonesia khususnya dan di dunia pada umumnya terus meningkat karena penambahan penduduk, pertumbuhan ekonomi dan pola konsumsi energi itu sendiri yang senantiasa meningkat. Sedangkan energi fosil yang selama ini merupakan sumber energi utama ketersediaannya sangat terbatas dan terus mengalami kehabisan atau penipisan. Proses alam memerlukan waktu yang sangat lama untuk dapat kembali menyediakan energi fosil ini. Jika tidak segera diciptakan alternatif penghasil energi untuk pengganti energi fosil maka dapat dipastikan bahwa kita akan kehabisan energi. Upaya-upaya pencarian sumber energi alternatif selain fosil mendorong penulis untuk mencari alternatif (Abdullah, I., Nurdin, J., & Hasanuddin, H, 2016).

Energi terbarukan seperti energi matahari dan energi angin adalah sumber energi yang tidak terbatas dibandingkan dengan bahan bakar fosil. Tingginya kebutuhan listrik di masyarakat modern dan selisih yang tinggi antara jumlah energi pembangkitan dan kebutuhan konsumen, maka jika kebutuhan listrik hanya dengan sumber konvensional akan sangat sulit terpenuhi. Oleh karena itu, pemanfaatan sumber energi terbarukan seperti matahari, angin, biomassa, dan lainnya sangat dibutuhkan dalam memenuhi kebutuhan konsumsi listrik. Terdapat permasalahan pada pemanfaatan energi angin dan matahari karena bersifat intermiten yang tidak hanya mengubah pembangkitan tetapi juga mempengaruhi tegangan dan frekuensi

sistem. Oleh karena itu, pembangkit listrik tenaga surya dan tenaga angin diintegrasikan dengan sistem diesel untuk memasok daya dengan handal, aman dan daya ekonomis untuk beban terisolasi (Zainal Abidin, 2020).

Sumber tenaga angin merupakan solusi pemanfaatan energi baru terbarukan yang relatif bersih dan ramah lingkungan karena tidak menghasilkan karbondioksida. Desain turbin angin mempunyai karakteristik spesifik, sehingga perancangannya harus disesuaikan dengan profil angin, dimana turbin akan dipasang, untuk memperoleh koefisien daya atau efisiensi yang optimal. Hal ini menjadi tantangan tersendiri dalam pengembangan energi angin, terutama daerah – daerah di Indonesia yang memiliki kecepatan angin yang relatif rendah, namun sesungguhnya memiliki potensi energi angin yang layak untuk dikembangkan (Rizki Rahman, 2022).

Energi angin atau tenaga angin menggambarkan proses dimana angin digunakan untuk menghasilkan tenaga mekanik atau listrik. Penggunaan energi angin untuk keperluan pembangkit listrik menjadi sumber energi yang semakin menarik karena meningkatnya permintaan energi di seluruh dunia dan masalah lingkungan. Pembakaran bahan bakar fosil mengeluarkan gas seperti karbon dioksida ke atmosfer yang menyebabkan pemanasan global. Energi angin tidak bergantung pada bahan bakar fosil untuk menghasilkan energi (Manyonge, 2012).

Energi angin merupakan energi yang sangat fleksibel. Berbeda dengan energi air, energi angin dapat dimanfaatkan di dataran tinggi, lereng, bahkan di laut. Seperti yang diketahui, angin pada dasarnya disebabkan oleh adanya perbedaan energi antara udara panas dan dingin. Di dekat khatulistiwa panas, dan pada busur 0

derajat, udara memanas, mengembang, menjadi lebih ringan, naik, dan berpindah ke daerah yang lebih dingin seperti kutub. Namun di daerah kutub yang dingin, udara menjadi dingin dan tenggelam ke dasar. Dengan cara ini, terjadi rotasi atmosfer di mana udara bergerak sepanjang permukaan bumi dari Kutub Utara ke ekuator dan sebaliknya, dan udara bergerak dari ekuator melalui lapisan udara atas kembali ke Kutub Utara. Menurut sumber yang ada, tenaga angin telah digunakan sejak tahun 2000 SM. Digunakan sebagai sumber energi alternatif. Potensi pemanfaatan energi angin di Indonesia juga besar. Sebagian besar wilayah Indonesia terdiri dari wilayah pesisir yang anginya bertiup sangat kencang (Harirotul Lathifah, 2023).

Sistem konversi energi angin pada umumnya terdiri dari tiga perangkat utama yang membentuk turbin angin yang mengubah energi angin menjadi energi listrik. Perangkat pertama adalah rotor yang terdiri dari dua atau tiga bilah *fiber glass* yang disambungkan ke hub yang berisi motor hidrolis yang mengubah setiap bilah sesuai dengan kondisi angin yang ada sehingga turbin dapat beroperasi secara efisien pada kecepatan angin yang bervariasi. *Nacelle* adalah rumah besar di belakang rotor yang menampung poros penggerak, *gearbox*, trafo, dan generator (Yusuf Ismail Nakhoda, 2017).

Pada kasus turbin angin sumbu horizontal, sudut serang akibat putaran turbin angin adalah konstan. Banyak penelitian telah dilakukan mengenai prediksi karakteristik aerodinamis bilah, dan banyak teknologi eksklusif telah dikembangkan. Namun pada kasus turbin angin sumbu vertikal, sudut serang akibat putaran turbin angin berubah secara terus menerus. Oleh karena itu, penting untuk mengembangkan proses verifikasi keluaran turbin angin sumbu vertikal. Metode

verifikasi yang paling jelas adalah eksperimen. Namun karena keterbatasan ruang, metode ini terbatas pada turbin angin yang sangat kecil. Model matematika telah dipelajari untuk berbagai prediksi keluaran yang digunakan dalam desain turbin angin sumbu horizontal, namun model tersebut tidak memperhitungkan sudut *pitch* sudu vertikal atau lokasi penyangga atau hanya studi parsial yang telah dilakukan (Dowon Han, 2018).

Maka dari latar belakang permasalahan diatas penulis tertarik melakukan penelitian dengan judul “Pengembangan Model Matematis untuk Memprediksi Potensi Energi Angin dan Efisiensi Turbin Angin Sumbu Vertikal”

1.2 Perumusan Masalah

Banyak faktor yang mempengaruhi efisiensi turbin angin, diantaranya energi angin yang masuk, energi listrik yang dihasilkan, kecepatan putaran baling-baling. Oleh sebab itu pertanyaan yang ingin dijawab adalah:

- a. Bagaimana kecepatan maksimum yang efisien untuk potensi energi angin pada turbin angin sumbu vertikal ?
- b. Bagaimana hubungan antara kecepatan angin dan efisiensi turbin angin sumbu vertikal ?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun Tujuan penelitian ini adalah untuk:

- a. Mengidentifikasi Kecepatan maksimum pada turbin angin sumbu vertikal

- b. Menganalisis bagaimana variasi kecepatan angin mempengaruhi efisiensi turbin, Serta membangun model matematis yang mampu memprediksi efisiensi turbin angin sumbu vertikal.

1.4 Hipotesis Penelitian

- a. H_0 : Tidak ada pengaruh signifikan antara kecepatan angin terhadap Daya efisiensi pada turbin angin sumbu vertikal
- b. H_a : Tidak ada pengaruh signifikan antara kecepatan angin terhadap Daya efisiensi pada turbin angin sumbu vertikal.

1.5 Manfaat Penelitian

- a. Memberi pengetahuan tentang teknologi turbin angin khususnya turbin angin sumbu vertikal.
- b. Dalam pembuatan skala besar mampu menghasilkan energi listrik yang besar.
- c. Dengan adanya penelitian dalam perencanaan penggunaan pembangkit listrik tenaga angin bisa menjadi salah satu aplikasi pemanfaatan energi terbarukan.
- d. Penggunaan energi terbarukan dapat membantu meningkatkan akses energi bagi masyarakat yang belum terjangkau oleh jaringan listrik nasional.
- e. Pengembangan EBT juga dapat membantu meningkatkan kualitas hidup masyarakat dengan mengurangi polusi dan kerusakan lingkungan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Energi Alternatif

Energi alternatif adalah energi yang memiliki peran sebagai pengganti energi utama. Pada dasarnya, energi diklasifikasikan menjadi dua kelompok utama, yaitu energi terbarukan dan energi tidak terbarukan. Penggunaan bahan bakar fosil untuk memenuhi permintaan energi global meningkat seiring berjalannya waktu, Hal-hal ini dapat menyebabkan menipisnya cadangan energi fosil itu Untuk itu diperlukan upaya penelitian sumber energi baru dan terbarukan atau biasa kita sebut dengan energi pengganti namun seperti yang kita ketahui, khususnya di Indonesia memanfaatkan potensi energi terbarukan hingga Saat ini, hal tersebut masih belum optimal. Seperti terlihat pada tabel 2.1 Potensi dan Kapasitas Terpasang Energi Terbarukan Indonesia (2021).

Tabel 2.1. Potensi dan Kapasitas Terpasang EBT Indonesia (2021)

No.	Nama	Potensi / Gigawatt	Kapasitas Terpasang / Gigawatt
1.	Energi Surya	2.898	0,2
2.	Energi Angin	589	0
3.	Energi Air	94,6	6,1
4.	Biomassa	43,3	1,9
5.	Energi Panas Bumi	29,5	2,1
6.	Energi Angin Daratan	19,6	0,2
7.	Energi Arus/Panas Laut	17,9	0

Dilihat dari tabel diatas Indonesia memiliki banyak potensi sumber daya energi terbarukan. Namun, potensi yang sudah tergarap masih sangat minim.

Hal ini diungkapkan *International Renewable Energy Agency* (IRENA) dalam laporan *Indonesia Energy Transition Outlook* yang dirilis Oktober 2022. IRENA memperkirakan total potensi energi terbarukan Indonesia mencapai 3.692 gigawatt (GW). Namun, sampai 2021 kapasitas terpasangnya baru 10,5 GW atau sekitar 0,3% dari total potensi yang ada. Berikut rincian untuk memperjelas tabel potensi dan kapasitas terpasang energi terbarukan Indonesia pada 2021 menurut IRENA:

- a. Energi Surya: potensi 2.898 GW, terpasang 0,2 GW
- b. Energi Angin Lepas Pantai (*offshore wind*): potensi 589 GW, terpasang 0 GW
- c. Energi Air: potensi 94,6 GW, terpasang 6,1 GW
- d. Energi Biomassa: potensi 43,3 GW, terpasang 1,9 GW
- e. Energi Panas Bumi: potensi 29,5 GW, terpasang 2,1 GW
- f. Energi Angin Daratan (*onshore wind*): potensi 19,6 GW, terpasang 0,2 GW
- g. Energi Arus/Panas Laut: potensi 17,9 GW, terpasang 0 GW

Maka dari itu (IRENA) *International Renewable Energy Agency* mendorong Indonesia untuk mengembangkan pemanfaatan energi terbarukan demi mendukung tujuan Perjanjian Paris, salah satunya menjaga peningkatan suhu bumi agar tidak melampaui 1,5 derajat Celcius. Dari tabel 2.1 diatas, terlihat bahwa dari semua potensi energi alternatif yang ada, baru sebagian kecil yang sudah dimanfaatkan. Untuk itu diperlukan suatu penelitian penelitian dan kajian studi mengenai energi-energi alternatif tersebut, sehingga bisa lebih optimal dalam memanfaatkannya agar dalam meningkatkan energi yang ada didunia untuk menjadikan energi terbarukan yang sangat menguntungkan bagi manusia (Adi Ahdiat, 2022).

2.8.1 Potensi Energi di Indonesia

Wilayah Indonesia yang luas terkandung beragam potensi energi yang berpeluang untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik. Potensi energi tersebut berupa energi primer atau energi fosil seperti minyak bumi, gas dan batubara dan potensi energi terbarukan atau alternatif antara lain air, panas bumi atau *geothermal*, *mini/micro hydro*, tenaga surya, tenaga angin bahkan nuklir atau uranium.

2.8.2 Potensi Energi Primer

Potensi minyak bumi sebesar 86,9 miliar barel dengan cadangan sebanyak 9,0 miliar barel dan produksi tahunannya sebesar 500 juta barel. terdapat di hampir seluruh kawasan di Indonesia yakni di pulau Sumatera, Pulau Jawa dan Pulau Kalimantan . Potensi batubara diperkirakan sekitar 57 miliar ton, dengan cadangan 19,3 miliar ton dengan wilayah penyebaran mencakup Sumatera sebanyak 72%, Kalimantan sebesar 27,3%, Jawa dengan presentasi 0,2%, Irian Jaya berkisar 0,2% dan Sulawesi sebanyak 0,1% sedangkan Potensi cadangan gambut diperkirakan sekitar 200 miliar ton atau ± 17 juta hektar, tersebar di wilayah Sumatera dan Kalimantan (Achmad Imam Agung, 2013).

Tabel 2.2. Potensi Energi Primer Nasional

No	Energi Primer	Sumber Daya	Cadangan	Produksi (per tahun)	Rasio cad/prod (Tanpa eksplorasi)
1.	Minyak	86,9 miliar barel	9,0 miliar barel	500 juta barel	18 tahun
2.	Gas	384,7 TSCF	3,0 TSCF	187 TCF	61 tahun
3.	Batubara	57 miliar ton	19,3 miliar ton	130 juta ton	147 tahun

2.2 Dasar Teori Angin

Angin merupakan udara yang bergerak yang terjadi karena adanya perbedaan suhu antara udara panas dan udara dingin. Adanya perbedaan suhu udara ini karena adanya perbedaan tekanan udara di permukaan bumi. Udara bergerak dari daerah yang memiliki tekanan udara yang tinggi ke daerah yang memiliki tekanan udara yang rendah. Pada dasarnya angin yang bertiup di permukaan bumi terjadi karena adanya penerimaan radiasi surya yang tidak merata di permukaan bumi, sehingga mengakibatkan perbedaan suhu udara. Perbedaan tekanan udara ini akan mengakibatkan terjadinya gerakan udara dari daerah yang tekanannya lebih tinggi ke daerah yang tekanannya lebih rendah yang menimbulkan gerakan udara. Perubahan panas antara siang dan malam merupakan gerak utama sistem angin harian, karena beda panas yang kuat antara udara di atas darat dan laut atau antara udara di atas tanah pegunungan dan tanah di daerah lembah.

Daerah sekitar khatulistiwa, yaitu pada busur 0° , adalah daerah yang mengalami pemanasan lebih banyak dari matahari dibanding daerah lainnya di Bumi, artinya udara di daerah khatulistiwa akan lebih tinggi dibandingkan dengan udara di daerah kutub. Pertukaran panas pada atmosfer akan terjadi secara konveksi. Berat jenis dan tekanan udara yang disinari cahaya matahari akan lebih kecil dibandingkan jika tidak disinari. Perbedaan berat jenis dan tekanan inilah yang akan menimbulkan adanya pergerakan udara.

Angin diberi nama sesuai dengan arah mana angin datang, misalnya angin timur adalah angin yang datang dari arah timur, angin laut adalah angin dari laut ke darat, dan angin lembah adalah angin yang datang dari lembah menaiki gunung. Angin lokal disebabkan perbedaan tekanan lokal dan juga dipengaruhi

topografi, gesekan permukaan disebabkan gunung, lembah dan lain – lain. Variasi harian disebabkan perbedaan temperatur antara siang dan malam. Perbedaan temperatur daratan dan lautan juga mengakibatkan angin sepoi–sepoi, bagaimanapun angin tidak mengalir sangat jauh di daratan.

Arah angin adalah arah dari mana angin berhembus atau dari mana arus angin datang dan dinyatakan dalam derajat yang ditentukan dengan arah perputaran jarum jam dan dimulai dari titik utara bumi dengan kata lain sesuai dengan titik kompas. Umumnya arus angin diberi nama dengan arah dari mana angin tersebut bertiup, misalnya angin yang berhembus dari utara maka angin utara. Kecepatan angin adalah kecepatan dari menjalarnya arus angin dan dinyatakan dalam *knot* atau kilometer per jam maupun dalam meter per detik. Karena kecepatan angin umumnya berubah-ubah, maka dalam menentukan kecepatan angin diambil kecepatan rata-ratanya dalam periode waktu selama sepuluh menit dengan dibulatkan dalam harga satuan *knot* yang terdekat (Raghel Yunginger, 2015).

2.2.1 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. Hal ini yang mengakibatkan perbedaan kecepatan angin di sekitar garis khatulistiwa dengan daerah di kutub bumi. Hal itulah yang menyebabkan perbedaan kecepatan angin di Indonesia dengan kecepatan angin di beberapa negara Eropa. Di daerah tropis akan terjadi angin dari daerah maksimum subtropis ke daerah minimum ekuator. Angin ini disebut angin pasat timur laut di belahan bumi utara dan angin pasat tenggara

dibelahan 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 muson barat dan angin muson 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:

- a. Kecepatan rata-rata angin relatif rendah
- b. Arah angin yang sering berubah
- c. Sering terjadi turbulensi

Jika kita ingin memanfaatkan energi angin harus diperhatikan yakni:

- a. Besaran kisaran jumlah angin dalam setahun pada daerah tersebut
- b. Bagaimana pola distribusi kecepatan angin di daerah tersebut
- c. Di daerah mana kincir angin tersebut ditempatkan

Untuk mengetahui laju rata-rata angin suatu daerah diperlukan data kecepatan angin dari BMKG.

2.2.2 Tingkatan Kecepatan Angin

Syarat-syarat kecepatan dan kondisi angin yang dapat digunakan untuk menghasilkan energi listrik diperlihatkan pada Tabel 2.3 Tabel tersebut menjelaskan bahwa kecepatan angin kelas 3 adalah batas minimum dan kelas 8 adalah batas

maksimum yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik. Tingkatan kecepatan angin diberikan pada 10 meter dari permukaan tanah (Ilmi Abdullah, 2016).

Tabel 2.3. Tingkatan kecepatan angin 10 meter diatas permukaan tanah (*knots*)

Tingkat Kecepatan Angin 10 Meter di atas permukaan Tanah		
Kelas	Kecepatan	Kondisi Alam di Daratan
1	0,00 - 0,02
2	0,3 - 1,5	Angin tenang, asap lurus ke atas
3	1,6 - 3,3	Asap bergerak mengikuti arah angin
4	3,4 - 5,4	Wajah terasa ada angin, daun-daun bergoyang pelan, penunjuk arah angin bergerak
5	5,5 - 7,9	Debu jalan, kertas berterbangan, ranting pohon bergoyang
6	8,0 - 10,7	Ranting pohon bergoyang, bendera berkibar
7	10,8 - 13,8	Ranting pohon besar bergoyang, air plampung berombak kecil
8	13,9 - 17,1	Ujung pohon melengkup, hembusan angin terasa di telinga
9	17,2 - 20,7	Dapat mematahkan ranting pohon, jalan berat melawan arah angin
10	20,8 - 24,4	Dapat mematahkan ranting pohon, rumah rubuh
11	24,5 - 28,4	Dapat merubuhkan pohon, menimbulkan kerusakan
12	28,5 - 32,6	Menimbulkan kerusakan parah
13	32,7 - 36,9	Tornado

2.2.3 Sistem Konversi Energi Angin Menjadi Energi Listrik

Udara yang bergerak mempunyai massa, kerapatan dan kecepatan. Sehingga dengan adanya faktor-faktor tersebut, angin mempunyai energi kinetik dan energi potensial. Akan tetapi faktor kecepatan lebih mendominasi posisi massa terhadap permukaan bumi. Dengan demikian energi kinetik lebih dominan dari pada energi potensial. Perpindahan molekul udara memiliki energi kinetik, sehingga secara lokal jumlah molekul udara berpindah melalui luasan selama selang waktu tertentu menentukan besarnya daya. Luasan ini adalah tidak luas permukaan bumi, tetapi luasan yang tegak. Topografi atau ketinggian berbeda menyebabkan potensi angin

berbeda, dan karena daya angin sebanding dengan kecepatan angin pangkat tiga, perbedaan kecepatan angin yang kecil pun akan menghasilkan perbedaan daya yang besar. Kondisi dan kecepatan angin menentukan tipe dan ukuran rotor. Kecepatan angin rata-rata mulai dari 3 m/s memadai untuk turbin angin propeler ukuran kecil, di atas 5 m/s untuk turbin angin menengah dan di atas 6 m/s untuk turbin angin besar. Dengan demikian sistem tenaga angin memanfaatkan angin melalui kincir angin untuk menghasilkan listrik. Energi angin merupakan energi alternatif yang mempunyai prospek baik karena selalu tersedia di alam, dan merupakan sumber energy yang bersih dan terbarukan kembali. Proses pemanfaatan energi angin melalui dua tahapan konversi yaitu :

1. Aliran angin akan menggerakkan rotor (baling-baling) yang menyebabkan rotor berputar selaras dengan angin bertiup.
2. Putaran rotor dihubungkan dengan generator sehingga dapat dihasilkan listrik.

Dengan demikian energi angin merupakan energi kinetik atau energi yang disebabkan oleh kecepatan angin untuk dimanfaatkan memutar sudu-sudu kincir angin. Untuk memanfaatkan energi angin menjadi energi listrik maka langkah pertama yang harus dilakukan adalah menghitung energi angin dengan formula.

2.2.4 Pemanfaatan energi Angin

Angin sebagai sumber energi dalam penggunaannya mempunyai manfaat antara lain:

- a. Energi angin tidak akan habis dan dapat didapatkan di berbagai tempat
- b. Biaya konversi lebih murah dibanding energi fosil
- c. Cocok untuk daerah/pulau yang tidak terjangkau oleh pembangkit listrik

d. Tidak menimbulkan emisi dan ramah lingkungan

Energi angin keberadaanya begitu melimpah di alam dan tanpa memerlukan biaya untuk mendapatkannya. Penggunaan energi angin juga tidak mengakibatkan pencemaran 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 (Hanif Kurniawan, 2016).

2.3 Definisi Turbin Angin

Turbin angin adalah alat untuk mengubah energi angin menjadi energi listrik. Secara garis besar turbin angin digolongkan ke dalam dua macam tipe, yaitu *horizontal axis wind turbine(hawt)* dan *vertical axis wind turbine(vawt)*. Kincir angin poros vertikal mempunyai sumbu vertikal dengan sudu paralel dengan sumbunya. Prinsip dasar kerja dari turbin angin adalah mengubah energi mekanis dari angin menjadi energi putar pada kincir, selanjutnya putaran kincir digunakan untuk memutar generator, yang akhirnya akan menghasilkan listrik. Berdasarkan arah sumbu gerakanya, turbin angin terbagi menjadi dua, yaitu: turbin angin sumbu horisontal dan vertikal. Sedangkan berdasarkan prinsip gaya aerodinamik yang terjadi, turbin angin dibagi menjadi dua, yaitu jenis: *lift* dan *drag*. Pengelompokan berdasarkan prinsip aerodinamik pada rotor yang dimaksud adalah apakah turbin angin menangkap energi angin dengan hanya memanfaatkan gaya *drag* dari aliran udara yang melalui rotor atau memanfaatkan gaya *lift* yang dihasilkan dari aliran udara yang melalui bentuk aerodinamis sudu. Dapat dikatakan terdapat turbin angin yang menggunakan rotor jenis drag dan turbin angin yang memanfaatkan rotor jenis

lift. Dua kelompok ini memiliki perbedaan yang jelas pada kecepatan putar rotornya. Rotor turbin angin jenis *drag* berputar dengan kecepatan putar rendah sehingga disebut juga turbin angin putaran rendah. Rotor turbin angin jenis *lift* pada umumnya berputar pada kecepatan putar tinggi bila dibandingkan dengan jenis *drag* sehingga disebut juga sebagai turbin angin putaran tinggi.

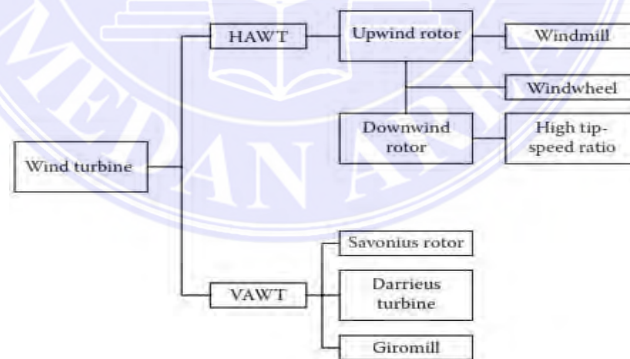
Tabel 2.4. Perbandingan antara kedua jenis turbin

Dasar Perbedaan	Turbin Angin Sumbu Horizontal	Turbin Angin Sumbu Vertikal
Definisi	Turbin angin sumbu horizontal adalah turbin yang sumbu putarannya horizontal.	Turbin angin disebut turbin angin sumbu vertikal jika sumbu putarannya vertikal.
Sumbu rotasi terhadap aliran angin	Untuk turbin angin sumbu horizontal, sumbu putaran turbin sejajar dengan aliran angin.	Untuk turbin angin sumbu vertikal, sumbu putaran turbin tegak lurus terhadap aliran angin.
Kebutuhan mekanisme yaw	Pada turbin angin sumbu horizontal, mekanisme yaw diperlukan untuk mengarahkan turbin ke arah angin.	Turbin angin sumbu vertikal tidak memerlukan mekanisme yaw karena menerima angin dari segala arah.
Desain dan instalasi	Desain dan pemasangan turbin angin sumbu horizontal sangatlah rumit.	Desain dan pemasangan turbin angin sumbu vertikal relatif sederhana.
Ketergantungan pada arah angin	Ketergantungan pada arah angin	Pengoperasian turbin angin sumbu vertikal tidak bergantung pada arah angin karena menerima angin dari segala arah.
Koefisien daya	Turbin angin sumbu horizontal memiliki koefisien daya yang tinggi.	Turbin angin sumbu vertikal memiliki koefisien daya yang rendah.
Efisiensi	Efisiensi ideal turbin angin sumbu horizontal adalah sekitar 50% hingga 60%.	Efisiensi ideal turbin angin sumbu vertikal biasanya lebih dari 70%.

2.4 Jenis-Jenis Turbin Angin

Apapun yang bergerak memiliki energi kinetik, dan ilmuwan serta insinyur menggunakan energi kinetik angin untuk menghasilkan listrik. Energi angin, atau tenaga angin, dibuat menggunakan turbin angin, alat yang menyalurkan tenaga angin untuk menghasilkan listrik.

Angin meniup bilah turbin, yang melekat pada rotor. Rotor kemudian memutar generator untuk menghasilkan listrik. Ada dua jenis turbin angin: *Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)* dan *Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)*. *HAWT* adalah jenis turbin angin yang paling umum. *HAWT* biasanya memiliki dua atau tiga bilah tipis panjang yang terlihat seperti baling-baling pesawat. Bilah diposisikan sehingga mereka menghadap langsung ke angin. *VAWT* memiliki bilah melengkung yang lebih pendek dan lebih lebar yang menyerupai pengocok yang digunakan dalam *mixer* listrik Berdasarkan letak porosnya, turbin angin dibagi menjadi dua jenis yaitu:

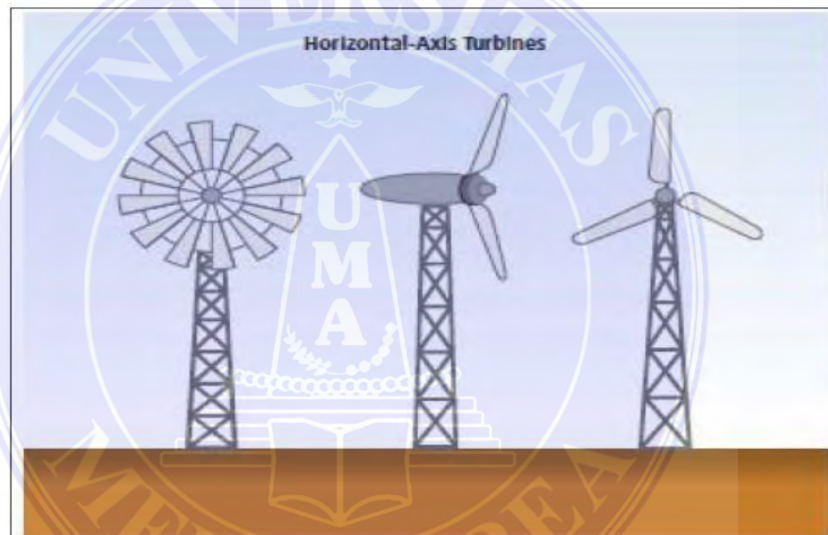


Gambar 2.1. Diagram jenis-jenis Turbin Angin

2.4.1 Turbin angin sumbu horizontal

Turbin angin poros horizontal merupakan turbin angin yang putaran rotasi rotornya paralel terhadap permukaan tanah. Turbin angin sumbu horizontal

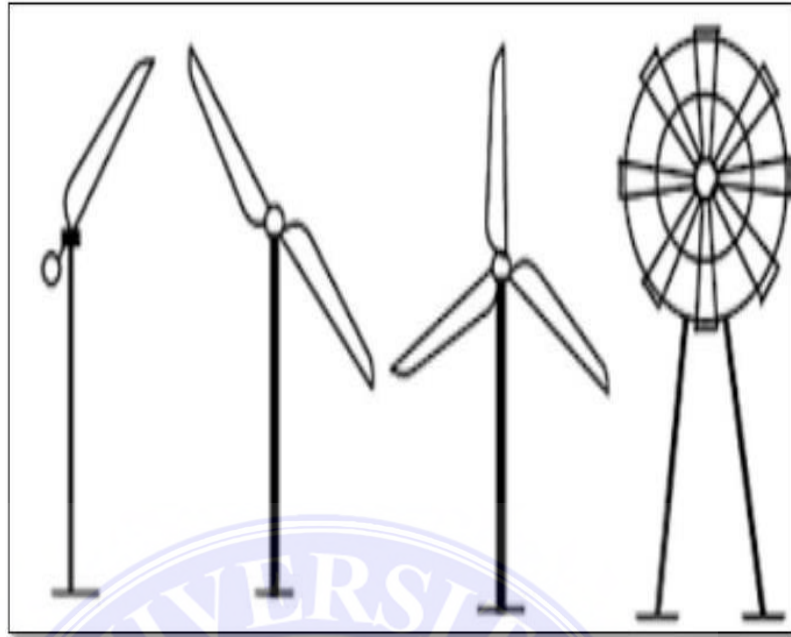
memiliki poros rotor utama dan generator listrik di puncak menara dan diarahkan menuju dari arah datangnya angin untuk dapat memanfaatkan energi angin. Rotor turbin angin kecil diarahkan menuju dari arah datangnya angin dengan pengaturan baling-baling angin sederhana sedangkan turbin angin besar umumnya menggunakan sensor angin dan motor yang mengubah rotor turbin mengarah pada angin. Berdasarkan prinsip aerodinamis, rotor turbin angin sumbu horizontal mengalami gaya *lift* dan gaya *drag*, namun gaya *lift* jauh lebih besar dari gaya *drag* sehingga rotor turbin ini lebih dikenal dengan rotor turbin tipe *lift*.



Gambar 2.2. Turbin Angin Poros Horizontal

Dilihat dari jumlah sudu, turbin angin sumbu horizontal terbagi menjadi:

1. Turbin angin satu sudu (*single blade*)
2. Turbin angin dua sudu (*double blade*)
3. Turbin angin tiga sudu (*three blade*)
4. Turbin angin banyak sudu (*multi blade*)



Gambar 2.3. Jenis Turbin Angin berdasarkan Jumlah Sudu

Turbin angin poros horizontal memiliki keunggulan dan keterbatasan, yaitu :

A. Keunggulan

1. Memiliki efisiensi yang tinggi, karena *blade* selalu bergerak tegak lurus terhadap angin.
2. Tower-nya yang tinggi memungkinkan untuk mendapatkan angin dengan kekuatan yang lebih besar.

B. Keterbatasan

1. Dibutuhkan konstruksi tower yang besar untuk mensupport beban *blade*, *gearbox* dan generator.
2. Komponen-komponen dari turbin angin horizontal (*blade*, *gearbox* dan generator) harus diangkat ke posisinya pada saat pemasangan.

Berdasarkan letak rotor terhadap arah angin, turbin angin sumbu horizontal dibedakan menjadi dua macam yaitu:

1) *Upwind*

2) *Downwind*

Turbin angin jenis *upwind* memiliki rotor yang menghadap arah datangnya angin sedangkan turbin angin jenis *downwind* memiliki rotor yang membelakangi arah angin. Rotor pada turbin *upwind* terletak di depan turbin, posisinya mirip dengan pesawat terbang yang didorong baling-baling. Untuk menjaga turbin tetap menghadap arah angin, diperlukan mekanisme *yaw* seperti ekor turbin. Keuntungannya adalah udara akan mulai menekuk di sekitar menara sebelum berlalu, sehingga jika kehilangan daya dari gangguan yang terjadi, tidak sama dengan daya yang dihasilkan turbin jenis *downwind*.



Gambar 2.4. Turbin Angin jenis *Upwind* dan *Downwind*

Turbin angin *downwind* memiliki rotor di sisi bagian belakang turbin. Bentuk *nacelle* didesain untuk menyesuaikan dengan arah angin. Keunggulannya yaitu sudu rotor dapat lebih fleksibel karena tidak ada bahaya tabrakan dengan menara. Sudu fleksibel memiliki keuntungan, biaya pembuatan sudu lebih murah dan mengurangi tegangan pada tower selama keadaan angin dengan kecepatan tinggi karena melentur memberikan beban angin didistribusikan secara langsung ke

sudu daripada ke menara. Sudu yang fleksibel dapat juga sebagai kekurangan dimana kelenturannya menyebabkan keletihan sudu. Di Belakang menara merupakan masalah dengan mesin *downwind* karena menyebabkan turbulensi aliran dan meningkatkan kelelahan pada turbin.

2.4.2 Turbin Angin Sumbu Vertikal

Turbin angin sumbu vertikal adalah jenis turbin angin yang pertama dibuat manusia. Pada awalnya, putaran rotornya hanya memanfaatkan efek magnus yaitu karena adanya selisih gaya *drag* pada kedua sisi rotor atau sudu sehingga menghasilkan momen gaya terhadap sumbu putar rotor. Turbin angin poros vertikal atau yang lebih dikenal memiliki ciri utama yaitu keberadaan poros tegak lurus terhadap arah aliran angin atau tegak lurus terhadap permukaan tanah. (Taufan Arif Adlie, 2015).



Gambar 2.5. Turbin Angin Sumbu Vertikal

Turbin angin poros vertikal merupakan turbin angin yang poros rotasi rotornya tegak lurus terhadap permukaan tanah. Jika dilihat dari efisiensi turbin, turbin angin sumbu horizontal lebih efektif dalam mengekstrak energi angin dibanding dengan turbin angin poros vertikal. Meskipun demikian, turbin angin ini memiliki keunggulan dan keterbatasan, yaitu :

A. Keunggulan

1. Turbin angin vertikal tidak harus diubah posisinya jika arah angin berubah, tidak seperti turbin angin horizontal yang memerlukan mekanisme tambahan untuk menyesuaikan rotor turbin dengan arah angin.
2. Tidak membutuhkan struktur menara yang besar dan konstruksi turbin sederhana.

B. Keterbatasan

1. Kebanyakan turbin angin memiliki penurunan efisiensi pada turbin horizontal, terutama karena hambatan yang mengurangi *drag* menghasilkan lebih banyak angin, terutama yang menyalurkan angin ke daerah kolektor.
2. Memiliki rotor terletak dekat dengan tanah dimana kecepatan angin lebih rendah dan tidak mengambil keuntungan dari kecepatan angin tinggi di atas.

Jika dilihat dari prinsip aerodinamis rotor yang digunakan, turbin angin sumbu angin dibagi menjadi dua bagian, yaitu:

1) . Turbin Angin *Darrieus*

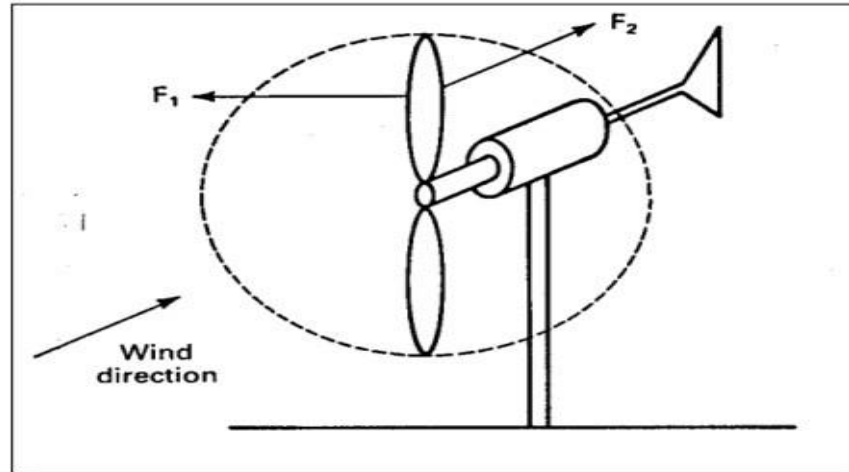
Turbin angin *Darrieus* pada umumnya dikenal sebagai turbin *eggbeater*. Turbin angin *Darrieus* pertama kali ditemukan oleh *Georges Darrieus* pada tahun 1931. Turbin angin *Darrieus* merupakan turbin angin yang menggunakan prinsip

aerodinamis dengan memanfaatkan gaya *lift* pada *airfoil* dalam mengekstrak energi angin.



Gambar 2.6. Turbin angin *Darrieus* tipe-H

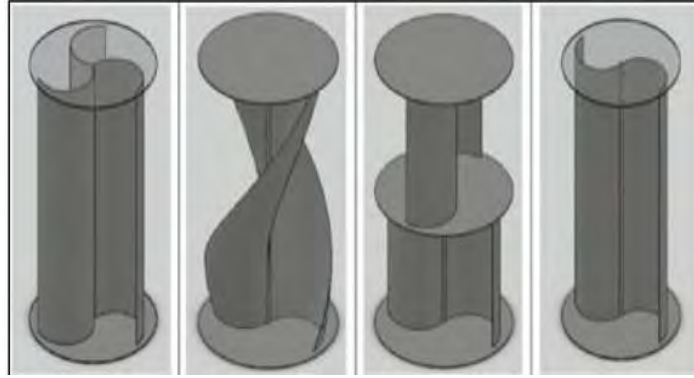
Turbin *Darrieus* memiliki torsi rotor yang rendah tetapi putarannya lebih tinggi dibanding dengan turbin angin *Savonius* sehingga lebih diutamakan untuk menghasilkan energi listrik. Namun turbin ini membutuhkan energi awal untuk mulai berputar. Rotor turbin angin *Darrieus* pada umumnya memiliki variasi sudu yaitu dua atau tiga sudu. Modifikasi rotor turbin angin *Darrieus* disebut dengan turbin angin H.



Gambar 2.7. Arah Angin pada Sudu Turbin

2) Turbin Angin *Savonius*

Turbin angin *Savonius* pertama kali diperkenalkan oleh insinyur Finlandia Sigurd J. *Savonius* pada tahun 1922. Turbin angin sumbu vertikal yang terdiri dari dua sudu berbentuk setengah silinder yang dirangkai sehingga membentuk 'S', satu sisi setengah silinder berbentuk cembung dan sisi lain berbentuk cekung yang dilalui angin. Berdasarkan prinsip aerodinamis, rotor turbin ini memanfaatkan gaya hambat (*drag*) saat mengekstrak angin yang berhembus dari aliran angin yang melalui sudu turbin. Koefisien hambat permukaan cekung lebih besar dari pada permukaan cembung. Oleh sebab itu, sisi permukaan cekung setengah silinder yang dilalui angin akan memberikan gaya hambat yang lebih besar daripada sisi lain sehingga rotor berputar. Setiap turbin angin yang memanfaatkan potensi angin dengan gaya hambat memiliki efisiensi yang terbatas karena kecepatan sudu tidak dapat melebihi kecepatan angin yang melaluinya.

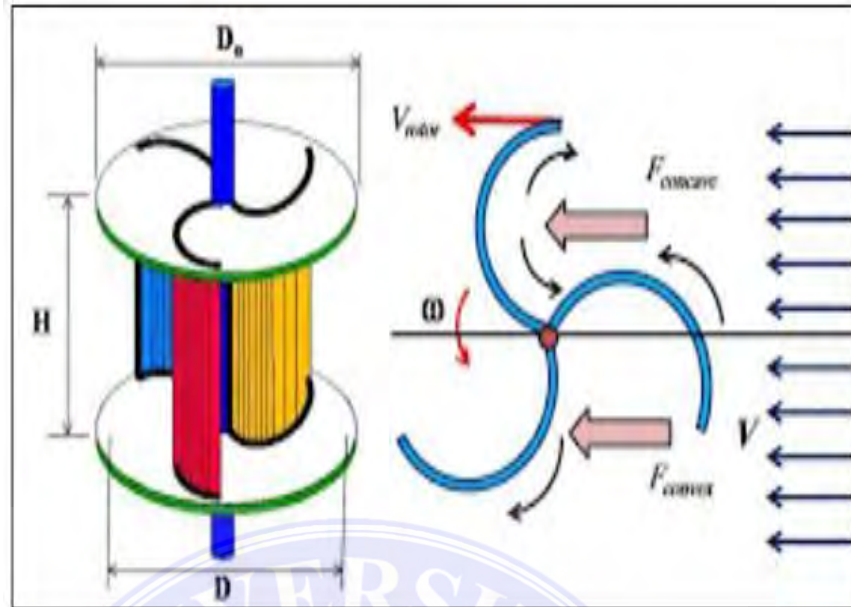


Gambar 2.8. Model sudu turbin *Savonius*

Dengan memanfaatkan gaya hambat, turbin angin *Savonius* memiliki putaran dan daya yang rendah dibandingkan dengan turbin angin *Darrieus*. Meskipun demikian turbin *Savonius* tidak memerlukan energi awal untuk memulai rotor berputar yang merupakan keunggulan turbin ini dibanding turbin *Darrieus*. Daya dan putaran yang dihasilkan turbin *Savonius* relatif rendah, sehingga pada penerapannya digunakan untuk keperluan yang membutuhkan daya kecil dan sederhana seperti memompa air. Turbin ini kurang sesuai digunakan untuk pembangkit listrik dikarenakan *tip speed ratio* dan daya yang relatif rendah. Dibawah ini beberapa tipe sudu *Savonius* yaitu:

a) *Savonius* tipe U

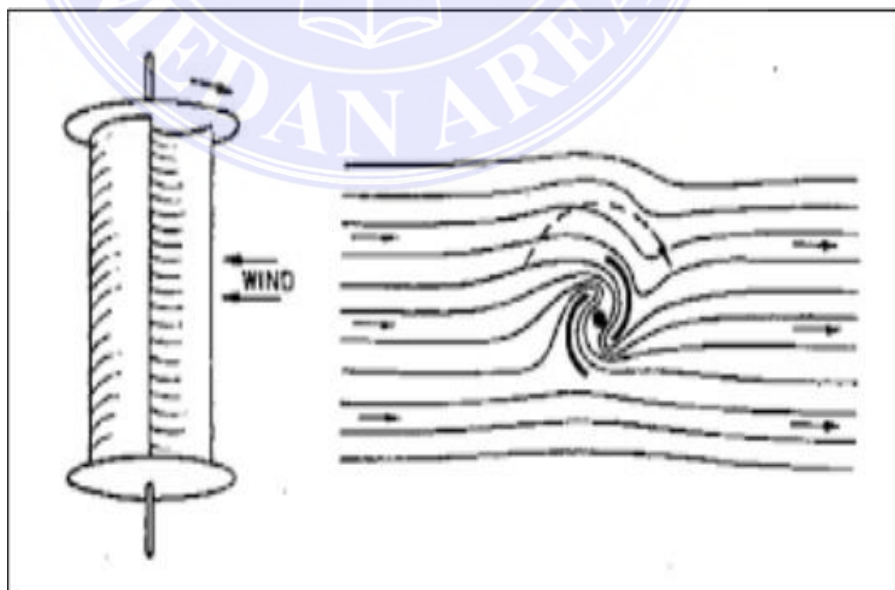
Savonius tipe U sangat kuat, karena berpusat di tengah atau pusat batang, tetapi sedikit kurang efisien dibandingkan dengan dua tipe *Savonius* lainnya.



Gambar 2.9. *Savonius* tipe U

b) *Savonius* tipe S

Rancangan *Savonius* tipe S ini juga sangat sederhana dan juga dapat dilakukan dengan mudah dari logam pipa atau drum. Desain yang sedikit lebih efisien dari pada tipe *Savonius* di atas karena beberapa udara dibelokkan oleh kedua baling lalu keluar pada salah satu sisinya (Taufik Setiaji, 2017).



Gambar 2.10. *Savonius* tipe S

2.5 Pemodelan Matematika

Pemodelan matematika merupakan salah satu teknik untuk merepresentasikan suatu sistem yang kompleks ke dalam model matematika. Dengan kata lain, pemodelan matematika merupakan suatu sistem persamaan yang dapat merepresentasikan suatu permasalahan kompleks yang sedang diamati. Dengan demikian, model matematika yang diformulasi diharapkan mampu menjelaskan situasi kompleks yang sedang diamati. Model matematika terdiri dari variabel, parameter dan fungsi yang menyatakan relasi antara variabel dan parameter.

Dalam pemodelan, kita perlu dengan tepat memilih hal-hal yang perlu diabaikan dan hal-hal yang perlu diikuti dalam model. Ini sangat bergantung pada permasalahan yang sedang pelajari atau teliti. Secara umum, model matematika diklasifikasikan kedalam beberapa kategori yakni model fenomena (*phenomenological model*) dan model mekanistik (*mechanistic model*). Model fenomena (*phenomological model*) merupakan sebuah jenis model yang mendeskripsikan sebuah fenomena yang terjadi yang konsisten dengan teori tetapi tidak diformulasi secara langsung dari teori tersebut. Model fenomena tidak dibangun berdasarkan mekanisme permasalahan yang sedang dipelajari. Dengan kata lain, mekanisme internal dari permasalahan yang dipelajari tidak terepresentasikan dalam model tersebut. Model ini dibangun berdasarkan data yang diperoleh dan secara umum tujuannya adalah menentukan relasi atau pola antara data (Meksianis Z, 2022).

2.6 Regresi Linear

Regresi linear (*linear regression*) adalah teknik yang digunakan untuk memperoleh model hubungan antara 1 variabel dependen dengan 1 atau lebih variabel independen. Jika hanya digunakan 1 variabel independen dalam model, maka teknik ini disebut sebagai regresi linear sederhana (*simple linear regression*), sedangkan jika yang digunakan adalah beberapa variabel independen, teknik ini disebut regresi linear ganda (*multiple linear regression*).

Variabel dependen pada regresi linear disebut juga sebagai respons atau kriteria, sedangkan variabel independen dikenal pula sebagai prediktor atau regresor. Kovariat adalah variabel independen yang berkorelasi dengan prediktor lainnya, juga mempengaruhi respons. Kovariat umumnya tidak diminati hubungannya dengan respons dan hanya digunakan untuk pengendalian hubungan prediktor-respons dalam model.

Respons pada regresi linear selalu berupa variabel kontinu, sedangkan prediktor dapat berupa variabel kontinu, indikator, ataupun kategorik yang disubstitusikan menjadi variabel indikator.

Model yang digunakan untuk regresi linear sederhana adalah:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i \dots \dots \dots (2.1)$$

Y_i : Respons untuk subjek ke-i

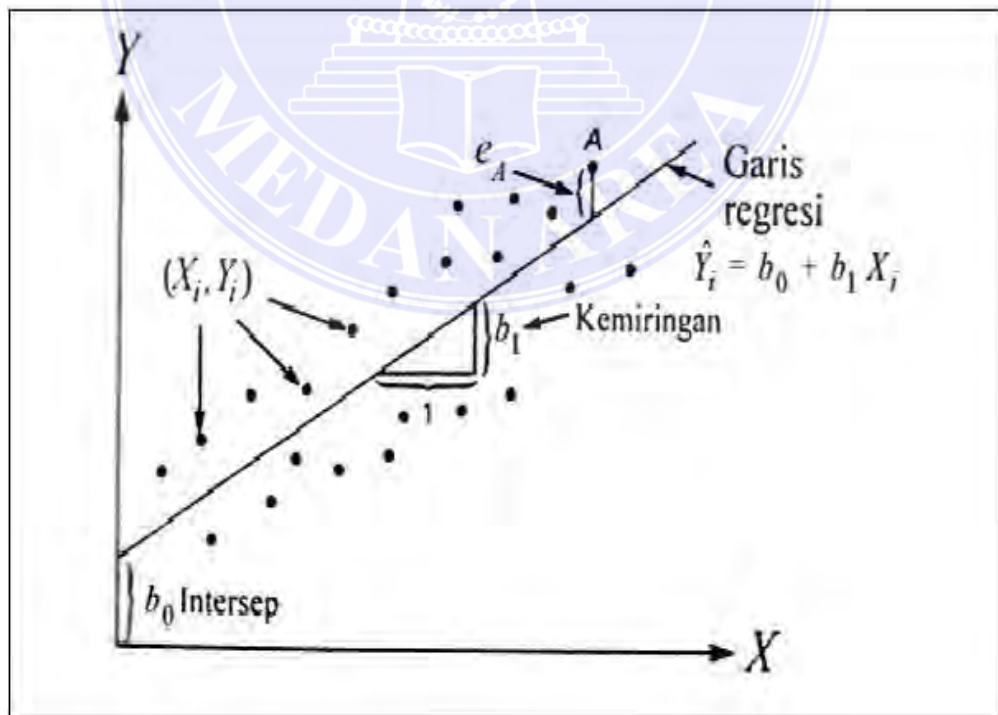
x_i : Prediktor untuk subjek ke-i

ε_i : Galat untuk subjek ke-i

β_0 dan β_1 merupakan parameter dalam populasi yang hendak diestimasi dalam fitting model. Pada fitting model dengan data sampel akan diperoleh persamaan garis regresi (gambar 2.11):

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_i \dots\dots\dots(2.2)$$

b_0 dinamakan intersep (*intercept*) atau konstanta, menyatakan jarak dari titik pangkal ke titik potong garis regresi dengan sumbu Y (sumbu vertikal), merupakan penaksir untuk β_0 . b_1 disebut juga sebagai kemiringan (*slope*) atau koefisien regresi, menyatakan kemiringan garis regresi yang diukur sebagai tangen sudut yang dibentuk oleh garis horizontal dengan garis regresi dalam arah positif (diukur berlawanan dengan perputaran jarum jam) merupakan penaksir untuk β_1 . e_i menyatakan galat untuk anggota sampel ke-i, sekaligus merupakan penaksir untuk ε_i (Johan Harlan, 2018).



Gambar 2.11. Garis Regresi

2.7 Rumus Perhitungan

Pada percepatan konstan a , energi kinetik E suatu benda bermassa m dan kecepatan v sama dengan usaha yang dilakukan W saat memindahkan benda tersebut dari keadaan diam ke jarak s di bawah pengaruh gaya F , yaitu $E = W = F s$. Menurut hukum kedua Newton tentang gerak

$$F = ma \dots \dots \dots (2.3)$$

dengan demikian, energi kinetik menjadi

$$E = mas \dots \dots \dots (2.4)$$

Dari kinematika gerak benda padat, $v^2 = u^2 + 2as$ dimana u adalah kecepatan awal benda. Ini menyiratkan bahwa $a = \frac{v^2 + 2as}{2s}$. Dengan asumsi kecepatan awal benda adalah nol, diperoleh $a = \frac{v^2}{2s}$. Oleh karena itu dari persamaan (2) kita mendapatkan itu

$$E = \frac{1}{2} m v^2 \dots \dots \dots (2.5)$$

Rumusan energi kinetik ini didasarkan pada kenyataan bahwa massa benda padat adalah konstan. Namun, jika kita menganggap angin (udara yang bergerak) sebagai fluida, massa jenis dan kecepatannya dapat berubah sehingga massanya tidak konstan. Untuk alasan ini merumuskan hukum energi kinetik dengan faktor $\frac{2}{3}$ alih-alih $\frac{1}{2}$. Dalam makalah ini kita akan berasumsi bahwa kepadatan udara tidak berubah secara signifikan bahkan dengan variasi ketinggian atau suhu dan menggunakan hukum energi kinetik dalam bentuk persamaan (3). Oleh karena itu energi kinetik (dalam joule) di udara bermassa M bergerak dengan kecepatan v (angin) dapat

dihitung dari persamaan (3) di atas. Daya P dalam angin ditentukan oleh laju perubahan energi kinetik, yaitu

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} v^2 \dots \dots \dots (2.5)$$

Tetapi laju aliran massa $\frac{dm}{dt}$ diberikan oleh $\frac{dm}{dt} = \rho A v_w$ dimana A adalah luas daerah yang dilalui angin dalam hal ini dan ρ adalah massa jenis udara. Dengan ini ekspresi, persamaan (4) menjadi

$$P = \frac{1}{2} \rho A v_w^3 \dots \dots \dots (2.6)$$

Daya mekanis sebenarnya P_w , yang diekstraksi oleh sudu-sudu rotor dalam watt adalah selisih antara daya angin hulu dan hilir[1], yakni

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v_w (v_u^2 - v_d^2) \dots \dots \dots (2.7)$$

dimana v_u adalah kecepatan angin hulu pada pintu masuk sudu rotor dalam m/s dan v_d adalah kecepatan angin hilir pada pintu keluar sudu rotor dalam m/s. Kita akan melihat nanti bahwa kedua kecepatan ini menimbulkan rasio kecepatan ujung sudu. Sekarang dari laju aliran massa, kita dapat menulisnya

$$\rho A v_w = \frac{\rho A (v_u + v_d)}{2} \dots \dots \dots (2.8)$$

v_w adalah rata-rata kecepatan masuk dan keluar sudu-sudu rotor turbin. Dengan persamaan ini, persamaan (6) menjadi

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v_w (v_u - v_d) \frac{(v_u + v_d)}{2} \text{ yang dapat}$$

disederhanakan sebagai berikut (Manyonge, 2012):

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v_u^3 C_p \dots \dots \dots (2.9)$$

2.7.1 Energi Kinetik

Energi angin sering disebut sebagai energi kinetik dapat diubah menjadi energi listrik atau mekanik dengan menggunakan turbin angin. Energi kinetik yang terdapat pada angin pada umumnya dapat dituliskan dalam persamaan berikut:

$$E = \frac{1}{2} M_a \cdot v^2 \dots\dots\dots (2.10)$$

Dimana :

E = Energi Kinetik (*joule*)

M_a = massa angin (kg)

v = kecepatan angin (m/s)

volume udara per satuan waktu yang bergerak dengan kecepatan v dan melewati daerah seluas A adalah :

$$V = v \cdot A_{lpt} \dots\dots\dots (2.11)$$

Dimana :

V = Laju volume (m^3/s)

v = Kecepatan angin (m/s)

A_{lpt} = Luas Penampang Turbin (m^2)

Massa udara yang bergerak dalam satuan waktu dengan kerapatan ρ , adalah :

$$m_{ja} = \rho_{udara} \cdot V = \rho_{udara} \cdot v \cdot A_{lpt} \dots\dots\dots (2.12)$$

Dimana :

m_{ja} = Laju aliran massa

ρ_{udara} = Densitas Udara (kg/ m^3)

A_{lpt} = Luas Penampang Turbin (m^2)

v = Kecepatan Angin (m/s)

Untuk daya angin yang dihasilkan dari energi kinetik pada angin yang bergerak dalam satuan waktu dapat dituliskan dalam persamaan berikut:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho_{\text{udara}} \cdot A_{\text{lpt}} \cdot v^3 \dots \dots \dots (2.13)$$

Dimana :

- P_w = Daya Angin (*watt*)
- ρ_{udara} = Densitas Udara (kg/ m^3)
- A_{lpt} = Luas Penampang Turbin (m^2)
- v = Kecepatan Angin (m/s)

2.7.2 Gaya Lift dan Gaya Drag

Dimana pada titik tertentu mengalami perbedaan tekanan tetapi tergantung dimana titik-titik tersebut. Terjadinya perbedaan ini menyebabkan terjadinya distribusi tekanan yang berbeda sehingga menimbulkan gaya aerodinamis. Yang kedua adalah terjadinya tegangan geser yang terjadi pada benda yang berasal dari fluida yang melawan bidang permukaan benda. Resultan dan τ_w pada titik permukaan menghasilkan gaya R , dan kemudian diuraikan menjadi dua komponen gaya. Komponen gaya yang paralel biasa disebut *drag force* atau yang biasa disebut gaya hambat dan gaya angkat biasanya dinamakan gaya *lift force*.

Koefisien Gaya lift

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho_{\text{fluida}} \cdot v^2 \cdot A_{\text{cn}}} \dots \dots \dots (2.14)$$

Koefisien Gaya drag

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho_{\text{fluida}} \cdot v^2 \cdot A_{\text{cn}}} \dots \dots \dots (2.15)$$

Dimana:

C_D = Koefisien Gaya Hambat

C_L = Koefisien Gaya Angkat

ρ_{fluida} = Densitas Fluida (kg/m^3)

A_{cn} = Luasan Acuan (m^2)

c = Panjang *Chord* (m)

v_k = Kecepatan Fluida Relatif Terhadap Obyek (m/s)

2.7.3 Brake Horse Power

Brake Horse Power adalah daya dari kincir yang diukur setelah mengalami pembebanan. *Brake horse power* adalah nilai dari unjuk kerja turbin yang diukur setelah terjadi massa pembebanan yang tersambung pada generator, *gearbox*, pompa ataupun perangkat tambahan lainnya (Dodi Nobertus, 2020).

$$P_{generator} = V_{listrik} \cdot I \dots\dots\dots (2.16)$$

Dimana:

$P_{generator}$ = Daya Motor Listrik (*watt*)

$V_{listrik}$ = Tegangan Generator Listrik (*volt*)

I = Kuat Arus Listrik (*Ampere*)

Brake Horse Power dapat dihitung setelah didapatkan nilai $P_{generator}$ dengan rumus sebagai berikut:

$$BHP = \frac{P_{generator}}{y_{generator}} \dots\dots\dots (2.17)$$

Dimana:

BHP = *Brake Horse Power* (*watt*)

$P_{generator}$ = Daya Motor Listrik (*watt*)

$$\eta_{\text{generator}} = \text{Efisiensi Generator Listrik (\%)}$$

Efisiensi

$$\eta = \frac{BHP}{P_{\text{input}}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.18)$$

Dimana:

H = Efisiensi (%)

BHP = *Brake Horse Power (watt)*

P_{input} = Daya Masukan (*watt*)

2.7.4 Daya rotor

Daya turbin angin adalah daya yang dibangkitkan oleh rotor turbin angin akibat mendapatkan daya dari hembusan angin. Daya turbin angin tidak sama dengan daya angin dikarenakan daya turbin angin terpengaruh oleh koefisien daya. Koefisien daya adalah presentase daya yang terdapat pada angin yang dirubah kedalam bentuk energi mekanik Jadi hasil dari kekuatan turbin angin dapat disimpulkan sebagai :

$$P_r = C_p \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \dots\dots\dots(2.19)$$

Dimana :

P_r = Daya rotor (*watt*)

C_p = Daya koefisien pisau

2.7.5 Luas area paparan angin (*swept area*)

Luas area paparan angin merupakan dimana area pergerakan turbin angin yang disebabkan oleh kecepatan udara yang menghasilkan putaran pada rotor.

$$A_s = \frac{1}{4} \pi \cdot D^2 \dots\dots\dots(2.20)$$

Dimana :

A_s = Luas area paparan angin

D_t = Luas bidang turbin

Rotor *solidity* merupakan perbandingan jumlah jarak antara *blade* dengan keliling rotor, ditentukan dengan persamaan :

$$\sigma = \frac{N \cdot AB}{A_s} \dots\dots\dots(2.21)$$

Dimana :

N = Jumlah sudu

A_s = Luas area paparan angin

AB = Luas area untuk satu sudu

Kebanyakan dari turbin angin sumbu horizontal dengan tingkat *solidity* yang tinggi atau area paparan angin dengan *blade* yang banyak, akan terjadi lebih lambat dan memberi torsi yang lebih besar. Jika *solidity* rendah maka nilai C_p akan naik dan untuk putaran awal soliditas tinggi hingga sampai 20 kali lebih berat dari turbin dengan 3 sudu (Taufan Arif Adlie, 2015).

2.7.6 Tip Speed Ratio

Tip speed ratio (rasio kecepatan ujung) adalah rasio kecepatan ujung rotor terhadap kecepatan angin bebas. Untuk kecepatan angin nominal yang tertentu, *tip speed ratio* akan berpengaruh pada kecepatan putar rotor. *Tip speed ratio* dengan persamaan:

$$\lambda = \frac{\pi \cdot D \cdot r \cdot n}{60 \cdot v} \dots\dots\dots(2.22)$$

Dimana:

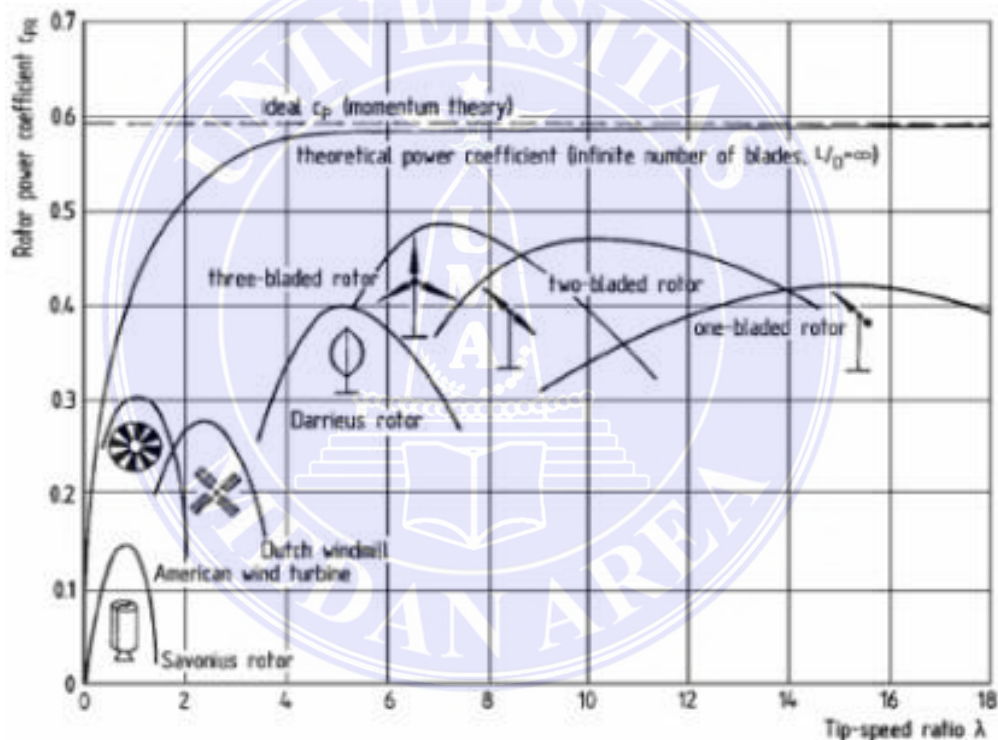
λ = tip speed ratio

D_{tr} = diameter rotor (m)

n = putaran rotor (rpm)

v = kecepatan angin (m/s)

Gambar berikut menunjukkan variasi nilai *tip speed ratio* dan koefisien daya c_p untuk berbagai macam turbin angin.

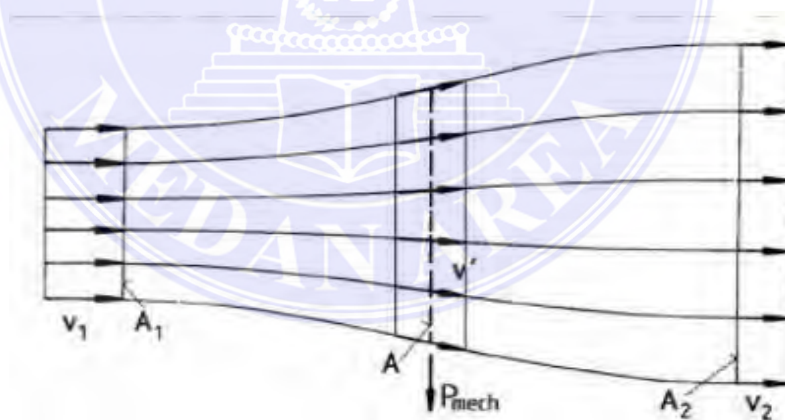


Gambar 2.12. Nilai koefisien daya dan *tip speed ratio*

2.8 Teori Momentum *Element Betz*

Menurut *Betz*, seorang insinyur Jerman, besarnya energi yang maksimum dapat diserap dari angin adalah hanya 0.59259 dari energi yang tersedia. Sedangkan hal tersebut juga dapat dicapai dengan daun turbin yang dirancang dengan sangat

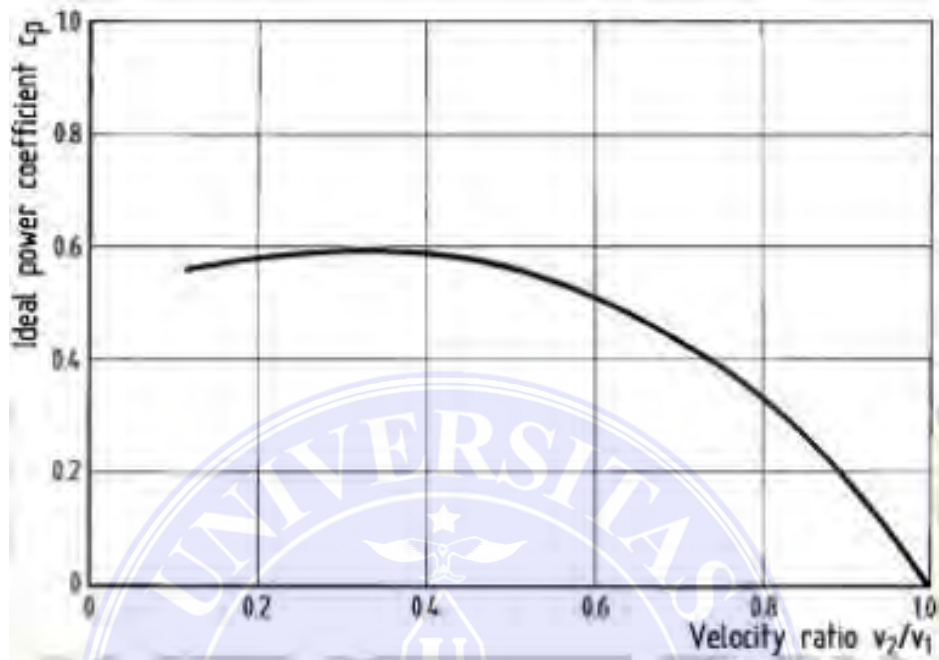
baik serta dengan kecepatan keliling daun pada puncak daun sebesar 6 kali kecepatan angin. Pada dasarnya turbin angin untuk generator listrik hanya akan bekerja antara suatu kecepatan angin minimum, yaitu kecepatan star C_s , dan kecepatan nominalnya C_r . Teori momentum *elementer Betz* sederhana berdasarkan pemodelan aliran dua dimensi angin yang mengenai rotor menjelaskan prinsip konversi energi angin pada turbin angin. Kecepatan aliran udara berkurang dan garis aliran membelok ketika melalui rotor dipandang pada satu bidang. Berkurangnya kecepatan aliran udara disebabkan sebagian energi kinetik angin diserap oleh rotor turbin angin. Pada kenyataannya, putaran rotor menghasilkan perubahan kecepatan angin pada arah tangensial yang akibatnya mengurangi jumlah total energi yang dapat diambil dari angin. Walaupun teori *elementer Betz* telah mengalami penyederhanaan, namun teori ini cukup baik untuk menjelaskan bagaimana energi angin dapat dikonversikan menjadi bentuk energi lainnya.



Gambar 2.13. Model Aliran dari Teori Momentum *Betz*

Koefisien daya hasil dari konversi daya angin ke daya mekanis turbin tergantung pada perbandingan dari kecepatan angin sebelum dan sesudah dikonversikan. Jika keterkaitan ini di plot ke dalam grafik, secara langsung solusi analitis juga dapat ditemukan dengan mudah. Dapat dilihat bahwa koefisien daya

mencapai maksimum pada rasio kecepatan angin tertentu seperti pada terlihat pada gambar 2.14



Gambar 2.14. Koefisien Daya Berbanding Dengan Rasio Kecepatan Aliran

Perbandingan antara daya keluaran rotor terhadap daya total yang melalui penampang rotor disebut koefisien daya C_p . Dirumuskan dengan

$$C_p = \frac{P_{rt}}{P_0} = \frac{\frac{1}{4} \rho A (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2)}{\frac{1}{2} \rho v_1^3 A} \dots\dots\dots (2.23)$$

Dimana:

C_{power} = Koefisien *power*

P_{rt} = Daya mekanik yang dihasilkan rotor (*watt*)

P_0 = Daya mekanik total yang terkandung dalam angin (*watt*)

Dengan memasukkan nilai v_2/v_1 , maka C_p dapat disajikan dalam bentuk sebagai berikut.

Besarnya efisiensi teoritis atau maksimum dari turbin angin C_{power} adalah :

$$C_{Power} = \frac{16}{27} = 0,539$$

Dengan kata lain, turbin angin dapat mengkonversikan tidak lebih dari 60% tenaga total angin menjadi tenaga berguna. *Betz* adalah orang pertama yang menemukan nilai ini, untuk itu nilai ini disebut juga dengan *Betz factor* (Firman Aryanto, 2013).

2.9 Bilangan Reynolds

Bilangan *Reynolds* menyatakan perbandingan gaya-gaya inersia terhadap gaya-gaya kekentalan (viskositas). Bilangan *Reynolds* merupakan bilangan tak berdimensi. Dilihat dari kecepatan aliran, dikategorikan laminar bila aliran tersebut mempunyai bilangan Re kurang dari 2300. Untuk aliran transisi berada pada bilangan Re 2300 dan 4000 biasa juga disebut sebagai bilangan *Reynolds* kritis, sedangkan aliran turbulen mempunyai bilangan Re lebih dari 4000. Bilangan *Reynolds* untuk pipa-pipa bundar yang mengalir penuh adalah:

$$Re = \frac{v_a D \rho_{mf}}{\mu} = (v D \rho) / \nu \mu \dots \dots \dots (2.24)$$

Dimana:

Re = bilangan *Reynolds*

v_a = kecepatan aliran (m/s)

D_p = diameter pipa (m)

ρ_{mf} = kerapatan massa fluida (kg/m³)

μ = kekentalan mutlak (Pa.s)

$\nu \mu$ = kekentalan kinematik fluida (m² /s)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

3.1.1 Waktu Penelitian

Adapun Waktu penelitian dimulai dari pengajuan sampai persetujuan judul skripsi, pengambilan data, pengolahan data, hingga penyusunan skripsi dinyatakan selesai.

3.1.2 Tempat Penelitian

Tempat penelitian dilaksanakan di CV. IRA Publishing Perum Graha Garuda Mas Blok II No. 39 Dusun V Desa Sigara-Gara Kecamatan Patumbak Kabupaten Deli Serdang Provinsi Sumatera Utara, Indonesia, Kode Pos: 20361. Lokasi ini memiliki data angin historis yang cukup atau fasilitas untuk mengumpulkan data kecepatan angin secara langsung.

Adapun Jadwal Penelitian dapat dilihat pada tabel 3.1 sebagai berikut.

Tabel 3.1. Jadwal Rencana Penelitian

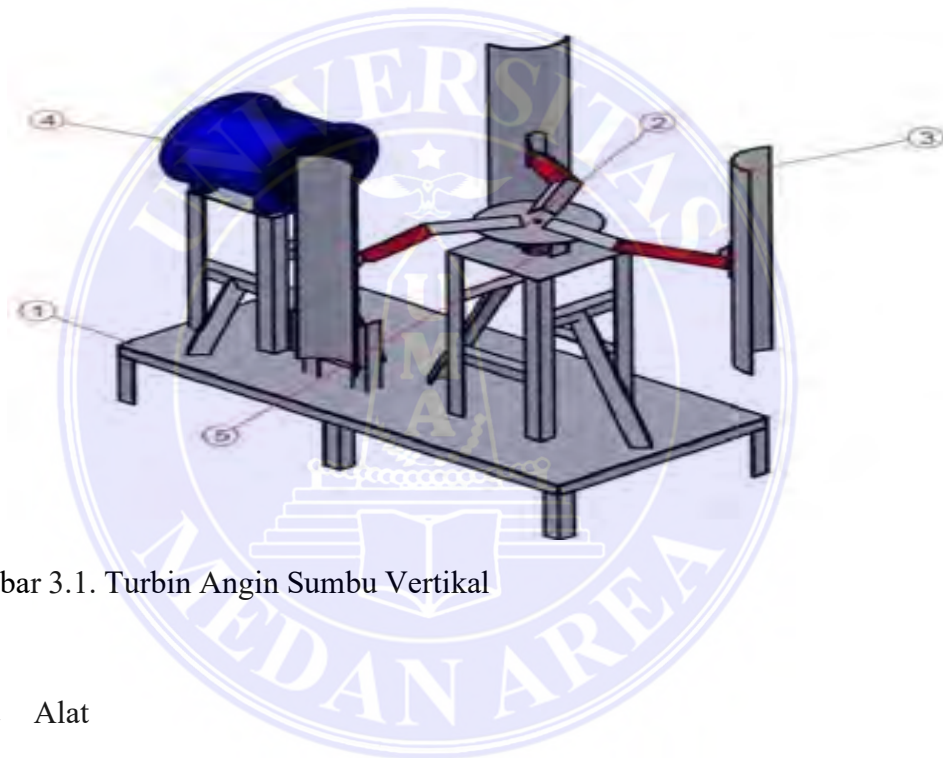
Aktifitas	2024							
	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Juni	Juli	Agst
	1234	1234	1234	1234	1234	1234	1234	1234
Pengajuan Judul								
Penulisan Proposal								
Seminar Proposal								
Proses Penelitian								
Pengolahan Data								
Penyelesaian Laporan								
Seminar Hasil								
Evaluasi dan Persiapan Sidang								
Sidang Sarjana								

3.2 Bahan dan Alat

3.2.1 Bahan

1. Turbin Angin Sumbu Vertikal / VAWT

Turbin Angin Sumbu Vertikal / VAWT merupakan turbin angin sumbu tegak yang gerakan poros dan rotor sejajar dengan arah angin, sehingga rotor dapat berputar pada semua arah angin. Pada penelitian ini alat yang akan diteliti yaitu Turbin Angin Sumbu Vertikal.



Gambar 3.1. Turbin Angin Sumbu Vertikal

3.2.2 Alat

1. Laptop / PC

Laptop adalah komputer pribadi yang dapat dipindahkan dan dibawa dengan mudah sehingga dapat digunakan di banyak tempat. Mayoritas laptop mempunyai fitur yang sama dengan komputer, seperti mampu menjalankan perangkat lunak dan mengelola berkas, Pada penelitian ini laptop digunakan untuk menjalankan *Software Excel* untuk membuat pengolahan data analisis.



Gambar 3.2. Laptop / PC

2. Handphone

Handphone dengan prosesor lebih cepat dan RAM yang lebih besar akan dapat menjalankan aplikasi pengukuran dengan lebih lancar dan memproses data secara lebih akurat. Sementara itu, *handphone* dengan kinerja rendah mungkin mengalami lag atau kesalahan dalam pemrosesan data. Pada penelitian ini *handphone* digunakan untuk mengambil gambar yang terkait sebagai objek penelitian.



Gambar 3.3. Handphone

3. Anemometer

Anemometer digunakan untuk mengukur kecepatan angin. Dalam konteks turbin angin, anemometer sangat penting karena membantu menentukan kecepatan angin di lokasi turbin. Informasi ini digunakan untuk mengatur kinerja turbin, mengoptimalkan produksi listrik, dan melindungi turbin dari kerusakan jika kecepatan angin terlalu tinggi.



Gambar 3.4. Anemometer

4. Tachometer

Tachometer adalah sebuah komponen alat ukur yang digunakan untuk mengukur perputaran mesin dalam satuan rpm (*rotation per minute*). Dalam konteks Turbin Angin alat ini digunakan untuk mengukur kecepatan rotasi poros utama atau bilah turbin.



Gambar 3.5. Tachometer

3.3 Metode Penelitian

Dalam hal pengumpulan data ini penulis terjun langsung pada objek yang akan diteliti untuk mendapatkan data yang valid maka peneliti menggunakan metode sebagai berikut :

1. Metode Observasi (Pengamatan)

Melakukan pengamatan secara langsung penggunaan turbin angin sumbu vertikal.

2. Uji Regresi Linier

Regresi linier adalah teknik analisis data yang memprediksi nilai data yang tidak diketahui dengan menggunakan nilai data lain yang terkait dan diketahui. Secara matematis memodelkan variabel yang tidak diketahui atau tergantung dan variabel yang dikenal atau independen sebagai persamaan linier.

Metode regresi linear dipilih karena kesederhanaannya, kemudahan interpretasi hasil, dan kemampuannya untuk memberikan estimasi hubungan yang cukup baik antara kecepatan angin dan daya turbin dalam banyak situasi praktis. Meskipun hubungan fisik yang lebih tepat antara kecepatan angin dan daya lebih kompleks, regresi linear menawarkan cara yang cepat dan efektif untuk memahami tren umum, melakukan prediksi, dan menganalisis pengaruh kecepatan angin terhadap daya turbin secara statistik.

3.4 Populasi dan Sampel

Dalam penelitian "Pengembangan Model Matematis Untuk Memprediksi Potensi Energi Angin Dan Efisiensi Turbin Angin Sumbu Vertikal," populasi yang diselidiki adalah turbin angin sumbu vertikal.

Sampelnya terdiri dari variasi konfigurasi atau desain turbin angin sumbu vertikal yang berbeda. Penelitian ini kemungkinan menggunakan data dari beberapa turbin angin sumbu vertikal dengan berbagai sudut, jumlah sudu, dimensi, atau karakteristik lainnya untuk mengembangkan model matematis yang dapat memprediksi potensi energi angin dan efisiensi turbin sumbu vertikal secara lebih luas.

Tabel 3.2. Tabel Populasi dan Sampel

Kecepatan Angin (m/s)	Luas penampang (m ²)	Densitas udara (kg/m ³)	Efisien sistem	Daya (Watt)
7	0,455	1,225	0.75	?
5	0,455	1,225	0,75	?
3	0,455	1,225	0,75	?

3.5 Prosedur Kerja

Langkah-langkah proses penelitian adalah sebagai berikut:

1. Pengumpulan Data Kecepatan Angin

Data sekunder pada tahun 2021 selama 1 tahun kecepatan angin didapatkan dari stasiun pemantau cuaca lokal yang ada di desa sigaragara yaitu CV. Ira Publishing

2. Deskripsi data

Memastikan data mencakup kecepatan angin harian (atau interval waktu lain yang sesuai) selama periode tertentu.

3. Statistik Deskriptif

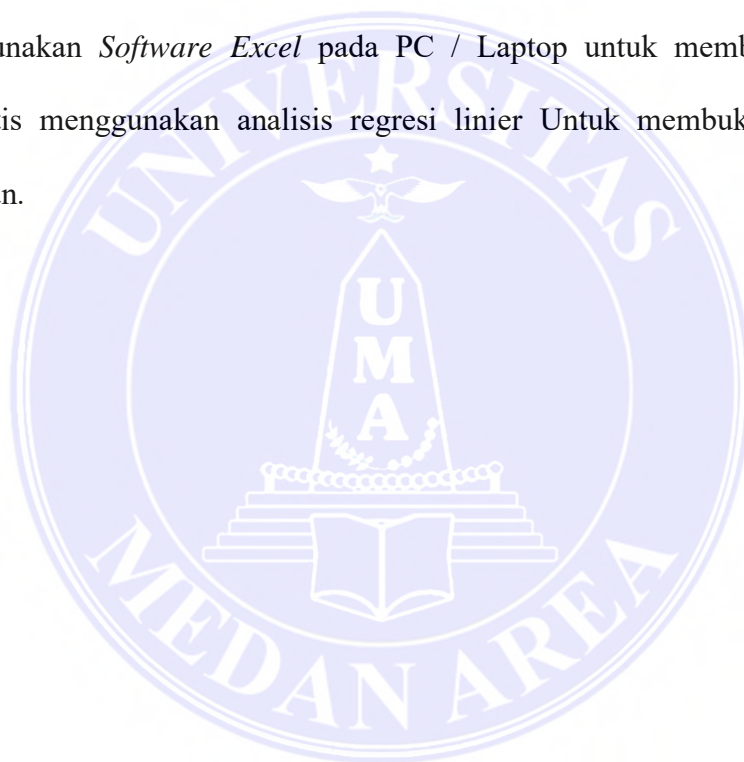
Menghitung rata-rata, maksimum, dan minimum kecepatan angin harian dan memvisualisasikan data menggunakan grafik.

4. Estimasi Potensi Energi

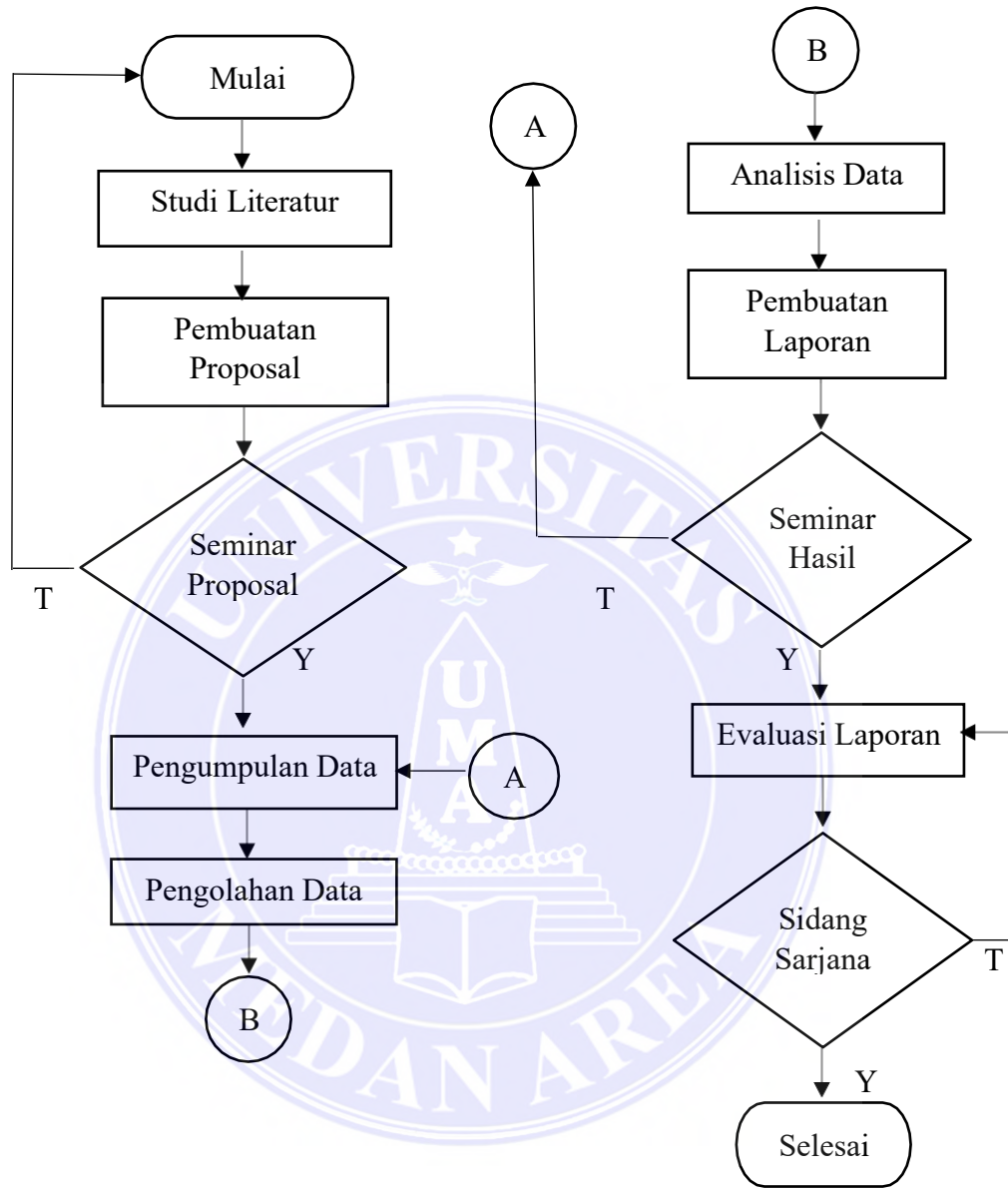
Gunakan formula energi angin $E = \frac{1}{2} A \cdot V^3 \cdot \rho$ untuk menghitung potensi energi. ρ adalah densitas udara (biasanya sekitar 1.225 kg/m^3 pada permukaan laut), A adalah area sapuan turbin, dan v adalah kecepatan angin. Lakukan perhitungan untuk setiap data kecepatan angin harian untuk mendapatkan estimasi produksi energi harian.

5. Pengolahan data

Gunakan *Software Excel* pada PC / Laptop untuk membuat pemodelan matematis menggunakan analisis regresi linier Untuk membuktikan Hipotesis penelitian.



3.5.1. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.6. Diagram Alir Penelitian

BAB V

SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Dari hasil pengujian alat, pengumpulan data, dan pembahasan dalam penelitian ini, maka dapat diambil kesimpulan bahwa :

1. Kecepatan angin optimal untuk menghasilkan daya maksimal pada VAWT ini adalah kecepatan terukur (*rated speed*) yaitu 6,9 m/s. Pada kecepatan ini, turbin menghasilkan daya maksimum sebesar 40,51 watt dengan efisiensi sistem 0,75 serta koefisien daya / Cp 0,59 di Teori momentum Element Betz. Kecepatan angin ini adalah target ideal untuk lokasi pemasangan turbin jika memungkinkan.
2. Didapat hasil dari pengujian regresi linear sederhana untuk pengembangan model matematis disimpulkan bahwa adanya pengaruh signifikan antara variabel kecepatan angin dengan daya yang terkoreksi. maka dari itu Kinerja Turbin angin sumbu vertikal sangat dipengaruhi oleh Potensi daya angin di suatu daerah untuk mendapatkan daya yang dibutuhkan seperti kecepatan angin. Nilai korelasi antara kecepatan angin m/s (X) dengan Daya yang terkoreksi (Y) adalah 0,99 Termasuk dalam kategori korelasi yang Sangat Kuat. Nilai koefisien determinasi 0,97 atau 97 %. Yang berarti bahwa kecepatan angin (X) dapat menjelaskan Daya terkoreksi (Y) sebesar 97% sisanya dipengaruhi oleh faktor lain. Nilai signifikansi $0,05 > \alpha = 0,00000000167$ sehingga dapat disimpulkan bahwa adanya pengaruh yang signifikan antara variabel X dengan variabel Y .

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dari penelitian ini adalah:

1. Melalui pemodelan matematis, peneliti dapat mengoptimalkan desain sudu turbin dengan mempertimbangkan faktor seperti panjang, lebar, sudut pitch, dan material sudu. Ini akan memungkinkan desain turbin yang lebih efisien di berbagai kecepatan angin.
2. Lakukan pengujian di berbagai rentang kecepatan angin, mulai dari kecepatan angin rendah hingga angin dengan kecepatan tinggi. Setiap konfigurasi sudu mungkin berperilaku berbeda pada kecepatan angin yang berbeda.
3. Uji berbagai desain sudu, baik dari segi panjang, bentuk, material, dan sudut pemasangan. Setiap variabel ini dapat mempengaruhi daya yang dihasilkan oleh turbin, terutama di berbagai kecepatan angin.
4. Pemilihan lokasi untuk penempatan turbin angin harus di daerah yang memiliki kecepatan angin yang cukup tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, I., Nurdin, J., & Hasanuddin, H. (2016). Kajian Potensi Energi Angin Di Daerah Kawasan Pesisir Pantai Serdang Bedagai Untuk Menghasilkan Energi Listrik. *Mekanik*, 2(1), 31-38.
- Achmad Imam Agung. (2013). Potensi Sumber Energi Alternatif Dalam Mendukung Kelistrikan Nasional. *Potensi Sumber Energy Alternatif*, 3(2), 892-897.
- Adi Ahdiat. (2022, 10 25). *Potensi dan Kapasitas Terpasang Energi Terbarukan Indonesia (2021)*. Diambil kembali dari Katadata Media Network: <https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2022/10/25/potensi-energi-terbarukan-indonesia-baru-tergarap-03-sampai-2021>
- Dodi Nobertus. (2020). Pengaruh Jumlah Sudu Terhadap Kinerja Turbin Angin Sumbu Vertikal Tipe Darrieus-H. *I8(1)*, 44-60.
- Dowon Han. (2018, June 11). Design, Fabrication, and Performance Test of a 100-W Helical-Blade Vertical-Axis Wind Turbine at Low Tip-Speed Ratio. *Energies*, 1-17.
- Firman Aryanto. (2013). Pengaruh Kecepatan Angin dan Variasi Jumlah Sudu Terhadap Unjuk Kerja Turbin Angin Poros Horizontal. *Dinamika Teknik Mesin*, 3(1), 50-59.
- Hanif Kurniawan. (2016). Pemodelan Turbin Angin Sumbu Vertikal (VAWT) Tipe H-Rotor Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Angin di Pulau Tabuhan.
- Harirotul Lathifah. (2023). Analisis Potensi Pemanfaatan Energi Angin Sebagai Sumber Energi Listrik Di Indonesia. *Jurnal Pendidikan, Sains Dan Teknologi*, 2(4), 1005-1009.
- Ilmi Abdullah, J. N. (2016). Kajian Potensi Energi Angin Di Daerah Kawasan Pesisir Pantai Serdang Bedagai Untuk Menghasilkan Energi Listrik. *Jurnal Ilmiah Mekanik*, 31-38.
- Johan Harlan. (2018). *Analisis Regresi Linear* (Vol. 53).
- Manyonge, A. (2012). Pemodelan Matematika Turbin Angin dalam Sistem Konversi Energi Angin Analisis Koefisien Daya. *Ilmu Matematika Terapan*, 6(91), 4527 - 4536.
- Meksianis Z. (2022). *Pemodelan Matematika*. Pekalongan: PT. Nasha Expanding Management.
- Raghel Yunginger. (2015). Analisis Energi Angin Sebagai Energi Alternatif Pembangkit Listrik di Kota Gorontalo. 1-14.
- Rizki Rahman. (2022, Oktober 2). Analisa Model Turbin Angin Vertikal Jenis Savonius Tipe Sudu Helical 3 Berbanding Tipe Sudu U3. 2(1).
- Taufan Arif Adlie. (2015). Perancangan Turbin Angin Sumbu Horizontal 3 Sudu Dengan Daya Output 1 KW. *jurutera*, 2(2), 72-75.
- Taufik Setiaji. (2017). Perancangan Turbin Angin Tipe Poros Silang. 3-19.
- Yusuf Ismail Nakhoda. (2017, Maret). Pembangkit Listrik Tenaga Angin Sumbu Vertikal Untuk Penerangan Rumah Tangga Di Daerah Pesisir Pantai. *Industri Inovatif*, 7(1), 20-28.
- Zainal Abidin. (2020, september 2). Pemodelan Matematis Pengaturan Frekuensi Beban Sistem Tenaga Hibrid Turbin Angin-Diesel- PV. *JE-Unisla*, 5(2), 392-399.



UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 16/1/25

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area