

BAB II

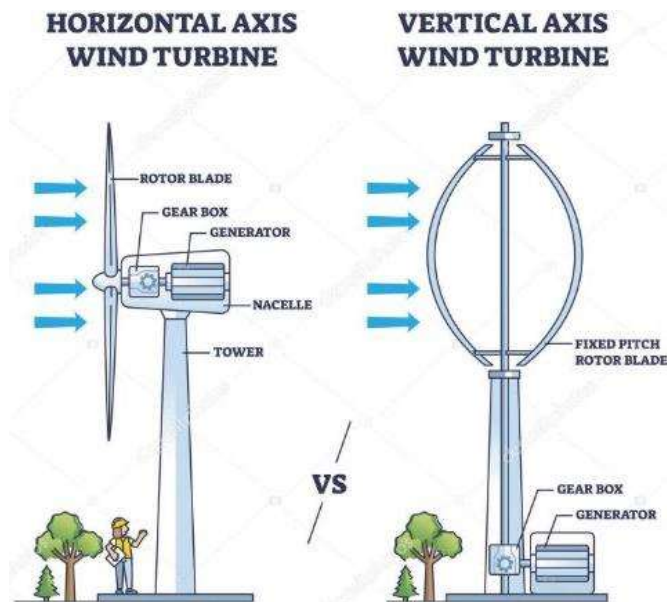
TINJAUAN PUSTAKA

Turbin angin merupakan suatu alat yang dapat mengubah energi angin menjadi energi listrik. Berdasarkan arah sumbu geraknya, turbin angin terbagi menjadi dua: turbin angin sumbu horizontal, *horizontal axis wind turbine* (HAWT) dan sumbu vertikal, *vertical axis wind turbine* (VAWT). Kinerja turbin angin dikuantifikasi dengan parameter aerodinamika yang dipengaruhi oleh geometri turbin. Riset pada turbin angin telah banyak dilakukan, baik secara simulasi numerik ataupun secara eksperimental, yang telah memberikan data-data estimasi dan empiris kinerja turbin. Riset dengan simulasi numerik merupakan riset yang berbasis pemodelan matematis dan komputasi numerik. Saat ini, perangkat lunak (software) untuk simulasi aliran udara banyak ditemukan sehingga riset dengan simulasi numerik dipilih sebagai riset awal (preliminary research) untuk mengestimasi parameter kinerja turbin angin.

2.1 Pengertian dan Prinsip Kerja Turbin Angin

Turbin angin yang juga dikenal dengan sebutan kincir-angin merupakan alat pengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik untuk memutar generator listrik. Sejarah penggunaan energi angin dimulai sejak abad ke-17 Masehi pada alat mekanik (*Windmill*) untuk memecah batu, menggiling gandum, menggergaji kayu maupun memompa air. Hingga sekarang pemanfaatan turbin angin terus berkembang sebagai turbin angin penghasil energi listrik (Mo dan Fridayana,

2018). 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 (Adlie, Rizal dan Arjuanda, 2015).



Gambar 2. 1 Prinsip kerja *horizontal axis wind turbine* dan *vertical axis wind turbine*

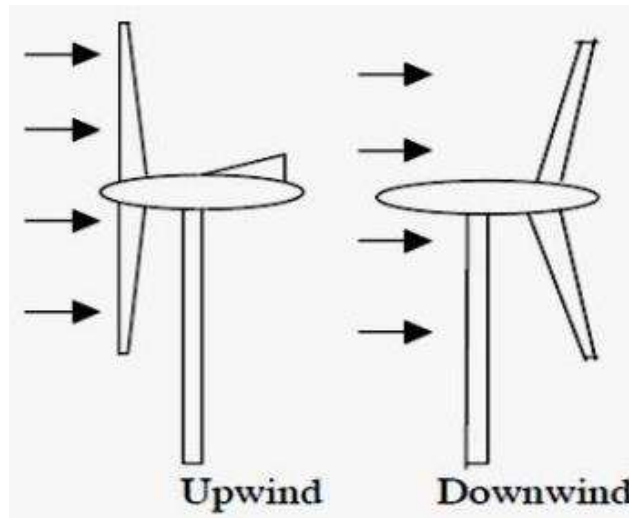
Sumber: <https://depositphotos.com/vector/horizontal-vertical-axis-wind-turbine-principle-structure-outline-diagram-labeled-648775174.html>

2.2 Klasifikasi Turbin Angin

Jenis-jenis turbin angin secara garis besar dapat dibedakan menjadi dua yaitu turbin angin sumbu mendatar yaitu *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) merupakan turbin angin dimana sumbu putarnya sejajar dengan tanah. Turbin angin sumbu Tegak yaitu *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) merupakan turbin angin dimana sumbu putarnya tegak lurus atau vertikal dengan tanah (Mo dan Fridayana, 2018).

2.2.1 Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)

Turbin angin berdasarkan sumbu horizontal adalah turbin angin yang mempunyai sumbu rotasi rotornya secara paralel terhadap permukaan tanah. Turbin angin ini memiliki poros utama serta generator listrik di puncak menara kemudian diarahkan ke arah datangnya angin sehingga energi angin dimanfaatkan. Dengan prinsip aerodinamis pada turbin angin horizontal, gaya *lift* lebih besar dibandingkan dengan gaya *drag* sehingga bilah turbin ini memanfaatkan gaya *lift* (Mayesha Dwi Fikako, Muhammad Luqman Bukhori, Ferry Setiawan, Muhammad Azizzurrahman, 2022). 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 datang angin (Adlie, Rizal dan Arjuanda, 2015).

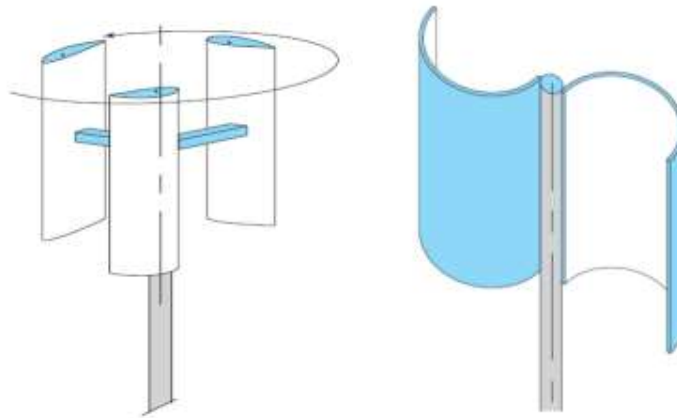


Gambar 2. 2 Jenis turbin angin sumbu horizontal berdasarkan arah angin datang

Sumber: (Adlie, Rizal dan Arjuanda, 2015)

2.2.2 *Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)*

Turbin angin dengan sumbu vertikal adalah turbin angin dengan sumbu rotasinya tegak lurus terhadap permukaan tanah, turbin ini memiliki efisiensi lebih kecil dari pada turbin dengan sumbu horizontal, dimana angin yang melewati turbin vertikal melalui rotor dari berbagai arah. Turbin ini memiliki beberapa keunggulan, yaitu turbin angin dengan sumbu vertikal tidak perlu diubah posisinya saat arah angin berubah, tidak membutuhkan struktur menara yang besar, konstruksi/desain pada turbin yang sederhana, turbin angin sumbu vertikal dapat didirikan dekat dengan permukaan tanah, sehingga memungkinkan dalam penempatan komponen mekanik dan komponen elektronik serta perawatan atau *maintenance* yang mudah dan mendukung pengoperasiannya. Berdasarkan perbedaan gaya yang dimanfaatkan, *Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)* terbagi dua jenis: yang memanfaatkan gaya angkat (jenis Darrieus) dan yang memanfaatkan gaya dorong (jenis Savonius) (Mo dan Fridayana, 2018).



Gambar 2. 3 VAWT (Darrieus/*Lift*) dan VAWT (Savonius/*Drag*)

Sumber: (Mo dan Fridayana, 2018)

2.2.3 Perbandingan memakai mekanisme *Variable Pitch* dan *Fix Pitch*

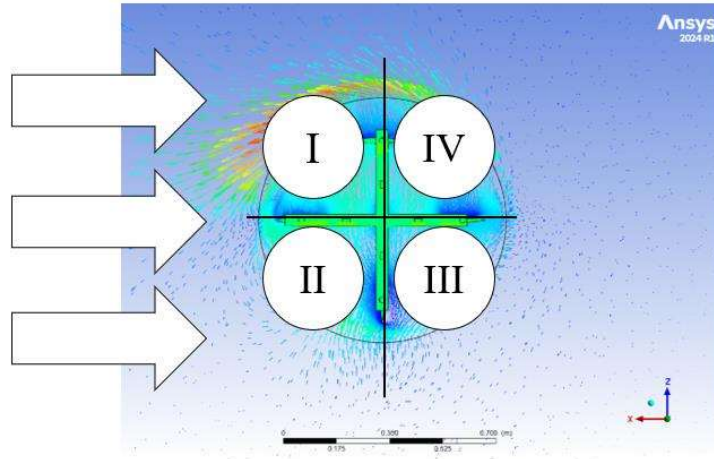
Desain VAWT dapat menggunakan mekanisme fixed pitch atau variable pitch yang memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing. Mekanisme fixed pitch menawarkan kesederhanaan desain, biaya rendah, dan keandalan tinggi, namun memiliki efisiensi yang terbatas pada rentang operasi yang sempit serta kemampuan self-starting yang buruk. Di sisi lain, mekanisme variable pitch mampu meningkatkan efisiensi secara signifikan di berbagai kondisi angin dan memperbaiki kemampuan self-starting dengan cara mengoptimalkan sudut serang bilah secara aktif. Peningkatan performa ini dicapai dengan mengorbankan kesederhanaan, yang berimplikasi pada biaya yang lebih tinggi dan sistem yang lebih kompleks.

2.2.4 Kuadran Analisis

Zona Upwind ini adalah area di mana bilah bergerak melawan atau menyambut arah datangnya aliran udara bebas (*freestream velocity*), zona ini mencakup Kuadran I dan Kuadran IV. Zona ini merupakan kontributor utama dalam pembangkitan torsi positif dan ekstraksi energi. Bilah menerima aliran udara dengan kecepatan tertinggi dan paling seragam di area ini.

Zona Downwind ini adalah area di mana bilah bergerak di dalam bayangan aerodinamis atau wake yang dihasilkan oleh interaksi angin dengan bilah di zona upwind dan poros tengah. Aliran udara di zona ini memiliki kecepatan yang lebih rendah, tingkat turbulensi yang lebih tinggi, dan arah yang lebih tidak teratur. Zona ini mencakup Kuadran II dan Kuadran III. Kinerja di zona ini seringkali lebih

rendah dan bahkan dapat menghasilkan torsi negatif jika tidak dioptimalkan.



Gambar 2. 4 Kuadran analisis VP-VAWT

2.3 Parameter Kinerja dan Desain Fundamental Turbin Angin

2.3.1 Parameter Aerodinamika

2.3.1.1 Tip Speed Ratio

Tip Speed Ratio (λ) adalah perbandingan antara kecepatan ujung bilah dengan kecepatan angin yang melewatinya (Ahmadi-baloutaki, 2015).

$$\lambda = \frac{\omega * R}{V} \quad (2.1)$$

Dimana ω adalah kecepatan rotasi dari turbin, R merupakan panjang jari-jari turbin dan V kecepatan angin.

2.3.1.2 Koefisien Daya (C_p)

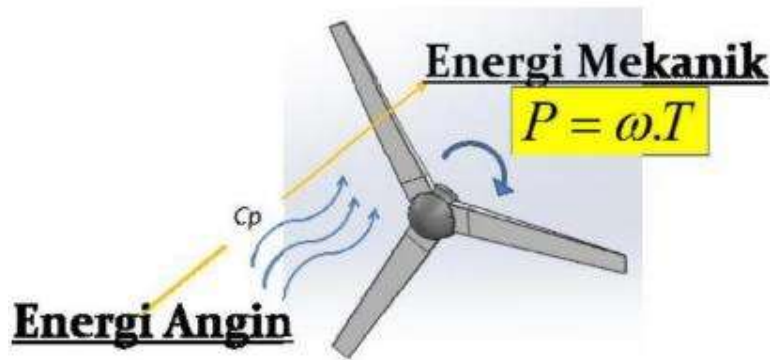
Kemampuan turbin angin dalam mengkonversi energi angin menjadi energi

listrik disebut dengan koefisien daya (C_p) yang dapat dituliskan dengan persamaan:

$$C_p = \frac{P_{mekanik}}{P_{angin}} \quad (2.2)$$

$$C_p = \frac{M\omega}{\frac{1}{2} (\rho * A * V^3)} \quad (2.3)$$

Koefisien daya (C_p) adalah ukuran efisiensi turbin angin dalam mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik. Batas Betz, yang ditemukan oleh Albert Betz, menyatakan bahwa koefisien daya maksimum yang bisa dicapai secara teoritis adalah $16/27$ atau sekitar 0,593 (59,3%). Artinya, turbin angin tidak dapat menangkap lebih dari 59,3% energi angin yang tersedia. Kinerja turbin sangat dipengaruhi oleh konstruksi dan desainnya (Adlie, Rizal and Arjuanda, 2015).



Gambar 2. 5 Konversi energi pada turbin angin
Sumber: (Mo dan Fridayana, 2018)

2.3.1.3 Soliditas

Soliditas menggambarkan tingkat kepadatan bilah pada turbin angin, mencerminkan seberapa banyak ruang yang ditempati bilah dalam area yang dilalui

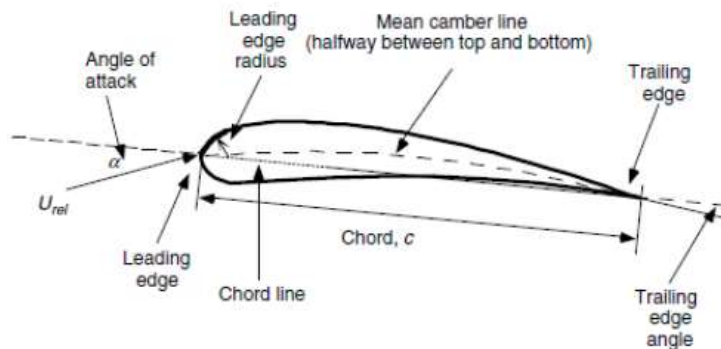
oleh turbin saat berputar.

$$\sigma = \frac{N * c}{D} \quad (2.4)$$

Dimana σ adalah soliditas, N adalah jumlah bilah, c adalah lebar bilah (chord), D adalah diameter turbin (Rezaeiha, Kalkman and Blocken, 2017).

2.3.1.4 Pengertian Airfoil

Airfoil adalah bentuk geometri khusus dari penampang tegak pada bilah turbin angin yang berguna untuk menyerap gaya mekanik dari suatu fluida yang ada disekitarnya. Profil *airfoil* banyak digunakan dalam sayap pesawat, bilah baling-baling, bilah kompresor, bilah turbin angin, turbin jet, *hydrofoil* pada kapal dan sebagainya. Parameter pada *airfoil* dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2. 6 Gambar *airfoil*

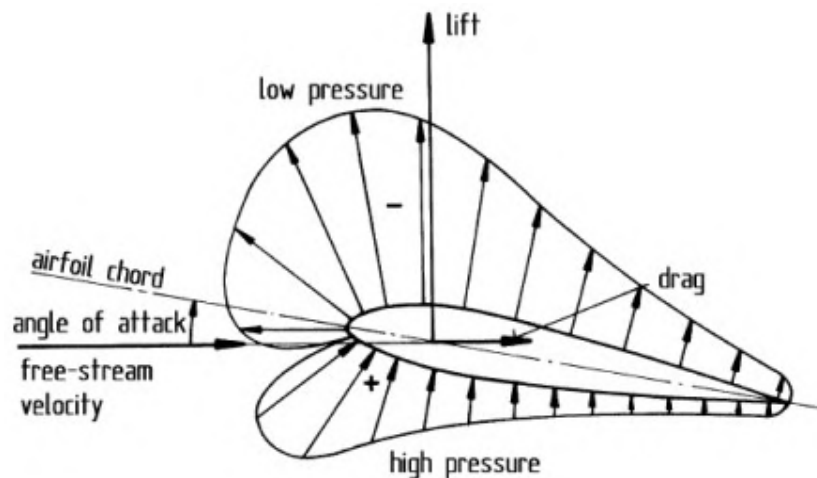
Sumber: (NRP, 2018)

Bentuk geometri serta ukuran *airfoil* sendiri memiliki berbagai macam jenis menurut standar masing-masing. Secara garis besar jenis *airfoil* dibagi menjadi dua macam yaitu *airfoil* simetris dan asimetris. Beberapa organisasi yang membuat

standar bagi *airfoil* diantaranya *National Advisory Committee for Aeronautics* (NACA) dan *National Renewable Energy Laboratory* (NREL). Selain *airfoil* yang dikeluarkan oleh organisasi tersebut, masih ada banyak bentuk dan standar *airfoil* lain. Namun standar yang sering digunakan dalam industri kapal terbang maupun turbin angin adalah NACA (Mo dan Fridayana, 2018). *Airfoil* yang digunakan pada tugas akhir ini adalah NACA 0012, Geometri simetris pada NACA 0012 sangat menguntungkan untuk sistem variable pitch. Karakteristik ini memungkinkan sudu menghasilkan gaya angkat yang optimal dan konsisten pada fase *upwind* (azimuth 270° - 90°) demi memaksimalkan torsi positif turbin.

2.3.1.5 Aerodinamika Airfoil

Angin melewati *airfoil* lebih cepat di bagian atas daripada bagian bawahnya. Hal ini akan menimbulkan tekanan yang lebih besar pada bagian bawah sehingga terjadi gaya angkat. Prinsip kerja aerodinamis ini sama halnya pada sayap pesawat terbang.



Gambar 2. 7 Kerja aerodinamis pada *airfoil*

Sumber: (Mo dan Fridayana, 2018)

Gaya aerodinamik merupakan gaya-gaya yang menggerakkan bilah pada turbin angin. Gaya aerodinamika pada *airfoil* dibagi menjadi tiga macam yaitu gaya *lift*, gaya *drag* dan gaya momen yang bekerja pada *airfoil*. Gambar 2. 7 menunjukkan gambaran gaya-gaya yang bekerja pada *airfoil* dan penjelasannya sebagai berikut (Hau, 2006):

- a. Gaya angkat (*lift*), gaya yang tegak lurus dengan terhadap aliran udara.

Gaya angkat ini timbul akibat adanya perbedaan tekanan antara bagian atas dan bawah permukaan *airfoil* akibat aliran angin yang melewati *airfoil*. Gaya angkat didefinisikan dengan bilangan tak berdimensi yaitu koefisien angkat (C_L) dengan persamaan sebagai berikut:

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} (\rho * A * V^2)} \quad (2.5)$$

- b. Gaya dorong (*drag*), gaya yang bekerja searah dengan aliran angin. Gaya ini bangkit akibat gesekan viscous pada permukaan *airfoil* dan perbedaan tekanan antara permukaan yang menghadap dan membelakangi arah aliran angin.

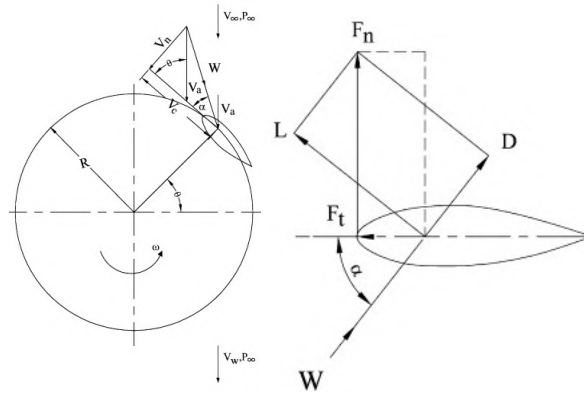
$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} (\rho * A * V^2)} \quad (2.6)$$

- c. *Pitching moment*, gaya putar yang terjadi akibat ketidak seimbangan dari perbedaan tekanan sepanjang *airfoil*. Gaya ini bekerja pada sumbu tegak lurus terhadap penampang melintang *airfoil*.

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2} (\rho * A * c * V^2)} \quad (2.7)$$

2.3.1.6 Sudut Serang (Angle of Attack)

Sudut serang (α) didefinisikan sebagai sudut yang terbentuk antara komponen kecepatan normal dan komponen kecepatan chordal dari aliran udara yang mengenai bilah turbin. Kecepatan ini merupakan kecepatan relatif yang "dirasakan" oleh bilah, yang merupakan gabungan dari kecepatan angin dan kecepatan rotasi turbin itu sendiri (Islam, Ting and Fartaj, 2008).



Gambar 2. 8 Kerja gaya pada *airfoil*
Sumber: (Islam, Ting and Fartaj, 2008)

2.3.2 Parameter Geometri

2.3.2.1 Aspect Ratio (AR)

Aspect Ratio (AR) adalah parameter geometri non-dimensional yang

mendefinisikan perbandingan antara tinggi (atau rentang) bilah (H) dengan panjang chord-nya (c) (Islam, Ting and Fartaj, 2008).

$$AR = \frac{H}{c} \quad (2.8)$$

2.3.2.2 Jumlah bilah (N)

Jumlah bilah (N) pada Turbin Angin Sumbu Vertikal (VAWT) adalah total bilah atau airfoil yang terpasang pada rotor turbin tersebut untuk menangkap energi angin (Islam, Ting and Fartaj, 2008).

2.4 Konsep dan Mekanisme *Variable Pitch* pada VAWT

2.4.1 Definisi dan prinsip kerja *variable pitch*

Pitch variabel merupakan sebuah sistem yang diciptakan untuk mengatasi kekurangan mendasar pada turbin angin sumbu vertikal (VAWT) jenis Darrieus dengan bilah lurus, khususnya terkait kurangnya torsi awal. Rancangan bilah dengan sudut pitch yang dapat disesuaikan berpotensi memecahkan masalah torsi saat memulai putaran. Cara kerjanya adalah dengan memodifikasi sudut bilah secara dinamis ketika turbin berputar, dengan tujuan mengoptimalkan sudut datang (*angle of attack*) dan meningkatkan kinerja aerodinamis. Penyesuaian sudut pitch ini memungkinkan turbin untuk dapat beroperasi secara mandiri (*self-starting*) pada kecepatan angin yang lebih rendah (Islam, Ting and Fartaj, 2008).

2.4.2 Jenis-jenis mekanisme *variable pitch*

2.4.2.1 Mekanisme Pasif (*Passive Mechanism*)

Mekanisme pasif adalah sistem yang mengubah sudut pitch bilah tanpa memerlukan input energi eksternal atau sistem kontrol yang kompleks. Perubahan sudut terjadi secara otomatis sebagai respons terhadap gaya-gaya yang bekerja pada turbin. Prinsip Kerja, Sistem ini memanfaatkan gaya aerodinamis atau gaya sentrifugal yang timbul saat turbin berotasi. Bilah dipasang pada engsel yang memungkinkannya berputar. Sebuah mekanisme penyeimbang, seperti pegas atau massa penyeimbang, digunakan untuk mengembalikan bilah ke posisi semula. Saat kecepatan angin atau kecepatan rotasi meningkat, gaya yang bekerja pada bilah akan mengatasi gaya penyeimbang, menyebabkan sudut pitch berubah. Tujuan, Umumnya dirancang untuk tujuan self-starting (memulai putaran) dan perlindungan dari kecepatan berlebih (over-speed protection) (Pawsey *et al.*, 2002).

2.4.2.2 Mekanisme Aktif (*Active Mechanism*)

Mekanisme aktif menggunakan sistem kontrol dan aktuator eksternal untuk mengatur sudut pitch bilah secara presisi berdasarkan kondisi operasi turbin. Prinsip Kerja, Sistem ini biasanya melibatkan sensor (untuk mengukur kecepatan angin, kecepatan rotasi, dan posisi bilah), sebuah unit kontrol (seperti mikrokontroler), dan aktuator (seperti motor servo atau motor stepper) yang terhubung ke bilah. Kontroler akan menghitung sudut pitch optimal secara real-time dan memerintahkan aktuator untuk menyesuaikan posisi bilah. Tujuan, Bertujuan untuk optimasi performa secara menyeluruh, termasuk memaksimalkan koefisien daya (C_p) di berbagai kecepatan angin, memastikan kemampuan self-starting, dan

menyediakan perlindungan dari kecepatan berlebih (Elkhoury, Kiwata and Aoun, 2015).

2.5 Karakteristik Fluida

2.5.1 Massa Jenis

Massa jenis didefinisikan sebagai perbandingan antara massa suatu benda dan volumenya. Pada gas, massa jenis dapat berubah seiring dengan perubahan tekanan, namun hal ini tidak berlaku pada zat berwujud cair. Secara umum, massa jenis suatu zat dipengaruhi oleh tekanan dan temperatur (Cengel and Cimbala, 2016).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.9)$$

ρ = Massa Jenis (Kg/m³)

m = Massa (Kg)

V = Volume (m³)

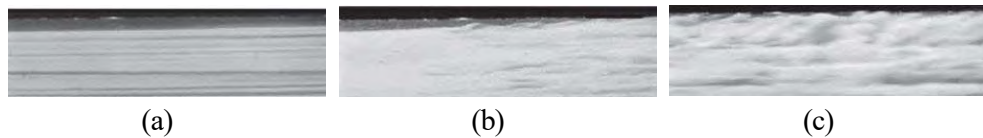
2.5.2 Kondisi *No Slip*

Aliran fluida lazimnya terhambat oleh permukaan padat yang kemudian memengaruhi perilakunya. Saat bersentuhan dengan dinding, fluida yang mengalir pada bilah turbin berhenti, dan kecepatan fluida yang tegak lurus terhadap permukaan dinding bernilai nol. Berbagai riset eksperimental telah menunjukkan bahwa fluida yang bergerak akan berhenti pada permukaan padat, sehingga kecepatan relatif antara fluida dan permukaan adalah nol. Kontak langsung antara fluida dan permukaan padat menyebabkan fluida melekat akibat efek viskositas, sebuah kondisi yang dikenal sebagai kondisi no slip (Cengel and Cimbala, 2016).

2.6 Aliran Fluida

2.6.1 Aliran Laminar dan Turbulen

Fluida dapat mengalir dalam dua pola utama: laminar dan turbulen. Perbedaan keduanya terletak pada tingkat keteraturan alirannya. Aliran laminar ditandai dengan gerakan fluida yang teratur dalam lapisan-lapisan, menghasilkan aliran yang tenang. Sebaliknya, aliran turbulen menunjukkan ketidakteraturan dalam gerakan fluida, menyebabkan fluktuasi atau perubahan pola kecepatan seiring waktu. Kondisi aliran antara laminar dan turbulen dikenal sebagai aliran transisi.



Gambar 2. 9 Visualisasi aliran (a) Laminar (b) Transisi (c) Turbulen
Sumber: (Cengel and Cimbala, 2016)

2.6.2 Aliran *Steady* dan *Unsteady*

Aliran *Steady* adalah jenis aliran yang karakteristiknya konstan pada suatu titik tertentu seiring waktu. Sementara itu, aliran *Unsteady* adalah aliran yang sifat-sifatnya berubah pada suatu titik tertentu seiring waktu (Cengel and Cimbala, 2016).

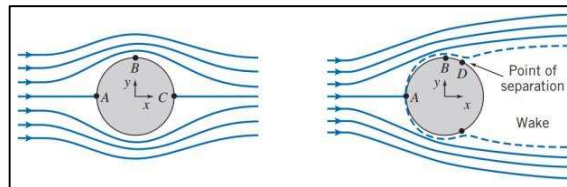
2.6.3 Aliran *Compressible* dan *Incompressible*

Fluida dapat dikategorikan menjadi fluida yang mudah dimampatkan (*compressible*) atau sulit dimampatkan (*incompressible*) bergantung pada seberapa

besar perubahan kerapatan saat fluida bergerak. Aliran dianggap sulit dimampatkan apabila kerapatan fluida cenderung konstan selama pergerakannya, sementara aliran disebut mudah dimampatkan jika terdapat perubahan atau variasi kerapatan yang signifikan (Pritchard, 2019). Aliran gas merupakan contoh paling umum dari aliran yang mudah dimampatkan, sedangkan aliran cairan umumnya dianggap sebagai aliran yang sulit dimampatkan (Munson *et al.*, 2013).

2.6.4 Aliran *Viscous* dan *Inviscid*

Pergerakan relatif antara dua lapisan fluida menghasilkan gaya gesek di antara keduanya. Kemampuan fluida dalam melawan aliran ini ditentukan oleh sifatnya yang disebut viskositas, yang dimiliki oleh semua fluida dan selalu memengaruhi aliran. Aliran dengan gesekan yang dominan akibat viskositas dikenal sebagai aliran viscous, sementara aliran inviscid adalah aliran yang tidak mengalami efek gesekan (Cengel and Cimbala, 2016).



Gambar 2. 10 Aliran (a) *inviscid* dan (b) *viscous*
Sumber: (Cengel and Cimbala, 2016)

2.6.5 Aliran *Vortex*

Aliran vortex, atau aliran pusaran, adalah kumpulan fluida yang bergerak searah dalam lintasan melingkar di sekitar suatu titik pusat dalam sebuah aliran

fluida (Cengel and Cimbala, 2016).

Terdapat dua jenis utama aliran memutar, diklasifikasikan berdasarkan pola distribusi kecepatan tangensialnya:

1. Forced vortex flow, yang memperlihatkan distribusi kecepatan tangensial serupa dengan rotasi benda padat.
2. Free vortex flow, yang merupakan putaran aliran tanpa gesekan, dengan kecepatan tangensial yang mempertahankan momen momentum fluida konstan pada setiap jari-jari putaran.

2.7 Computational Fluid Dynamic (CFD)

CFD singkatan dari *Computational Fluid Dynamics* merupakan suatu metode numerik yang biasa digunakan dalam bidang mekanika fluida. Metode ini muncul sekitar tahun 1970 dengan mengkombinasikan permasalahan fisik, perhitungan numerik dan ilmu komputer. Prinsip kerja dari CFD adalah melakukan diskritisasi untuk melakukan penyelesaian numerik dalam volume atur yang lebih kecil. Setiap volume atur tersebut diselesaikan secara iteratif dengan menyelesaikan persamaan pengaturnya yang meliputi hukum konservasi massa, momentum dan energi. Perhitungan secara diskrit tersebut dilakukan dengan bantuan perangkat keras maupun lunak komputer dengan harapan dapat menyelesaikan permasalahan sesuai dengan kondisi fisiknya (Blazek, 2005).

Sistem analisis CFD terbagi oleh 3 tahap sebagai berikut :

1. Pre-processor

Merupakan bagian pemodelan matematis dari suatu fenomena fisik fluida ke

sebuah program CFD melalui pembuatan geometri, *domain*, diskritasi volume atur hingga menentukan lapisan batasnya.

- a. Pembuatan Geometri, riset ini mengkaji pengaruh jarak celah terhadap kinerja turbin angin sumbu vertikal dengan rasio aspek konstan. Selanjutnya, dilakukan optimasi jumlah bilah turbin dengan mempertahankan jarak celah optimal yang telah diperoleh sebelumnya pada konfigurasi tiga bilah. Studi ini menentukan desain turbin dengan jumlah bilah optimal berdasarkan koefisien torsi, yang dihitung dari kinerja turbin dan dibandingkan antar konfigurasi. Hasilnya digunakan untuk menganalisis kinerja turbin dengan jarak celah dan jumlah bilah optimal (Altan, 2024).
- b. Ukuran Domain, Ukuran Domain, Jarak dari Pusat Turbin ke Inlet/Keluaran: Jarak minimum 4 hingga 8 kali diameter turbin (D) dari pusat turbin ke inlet dan outlet domain disarankan untuk meminimalkan efek penyumbatan dan ketidakpastian kondisi batas. Lebar Domain: Lebar domain sebesar 8 kali diameter turbin (D) disarankan untuk memastikan karakteristik aliran yang akurat. Diameter Inti Berputar: Diameter inti berputar harus sekitar 1,5 kali diameter turbin (D) (Rezaeiha, Kalkman dan Blocken, 2017).

2. Solver

Merupakan bagian utama dari sebuah kegiatan CFD yaitu melakukan perhitungan secara numerik dengan menggunakan algoritma tertentu. Perhitungan

yang dilakukan secara iteratif untuk mencapai suatu keadaan yang konvergen sesuai kriteria residual yang diberikan.

- a. Model Turbulensi, Analisis CFD VAWT ini menggunakan *pressure-based solver*, mengingat kecepatan angin operasional turbin yang rendah. Simulasi transien dipilih untuk merepresentasikan fluktuasi aliran secara akurat. Domain dalam berputar dengan kecepatan sudut yang sesuai dengan rasio kecepatan ujung (TSR) tertentu. Dinding turbin dimodelkan sebagai dinding bergerak tanpa slip relatif terhadap domain berputar. Model turbulensi $k - \omega$ SST dipilih karena keakuratan dan validasinya yang telah terbukti luas dalam berbagai riset, menunjukkan korelasi yang baik antara data eksperimen dan hasil simulasi CFD (Ahmad dan Zafar, 2023). Model $k - \omega$ SST sangat direkomendasikan untuk simulasi turbin angin vertikal (VAWT) karena kinerjanya yang baik dalam kondisi gradien tekanan yang tidak menguntungkan dan aliran yang terpisah. Model ini mampu menggabungkan formulasi yang kokoh dan akurat dari model $k - \omega$ di daerah dekat dinding dengan kemandirian aliran bebas dari model $k - \epsilon$ di daerah jauh, sehingga membuatnya lebih akurat dan andal untuk aplikasi semacam itu (M. H. Mohamed, 2012).

3. Post-processor

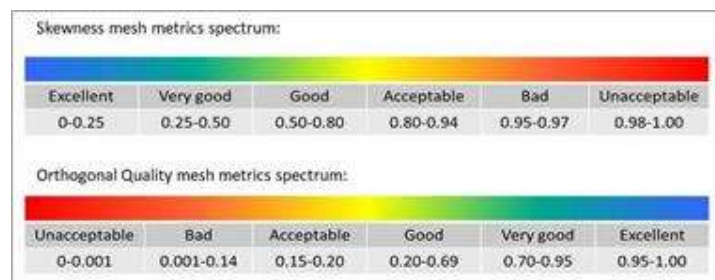
Hasil simulasi CFD adalah berupa variabel-variabel yang memiliki nilai pada titik tertentu. Agar dapat dipahami dengan mudah maka perlu dilakukan olah data dalam bentuk kontur, grafik ataupun tabel-tabel yang diinginkan.

2.7.1 Kualitas Mesh

Dalam analisis numerik seperti Computational Fluid Dynamics (CFD) dan Finite Element Analysis (FEA), kualitas jaring (mesh) merupakan faktor fundamental yang secara signifikan memengaruhi akurasi, konvergensi, dan stabilitas solusi. Dua metrik utama yang umum digunakan untuk mengevaluasi kualitas jaring adalah Orthogonal Quality dan Skewness.

Orthogonal Quality mengukur tingkat ortogonalitas sel, dengan rentang nilai dari 0 (kualitas terburuk) hingga 1 (kualitas terbaik). Nilai yang mendekati 1 mengindikasikan kondisi ortogonal ideal yang meminimalkan kesalahan numerik dalam perhitungan gradien.

Sebaliknya, Skewness mengukur tingkat distorsi sebuah sel dari bentuk idealnya, dengan skala dari 0 (ideal) hingga 1 (terdistorsi total). Tingkat skewness yang tinggi dapat menyebabkan ketidakakuratan hasil yang signifikan dan kegagalan konvergensi. Oleh karena itu, untuk menjaga validitas komputasi, nilai orthogonal quality minimum umumnya dijaga di atas 0.1, sementara nilai skewness maksimum harus dipertahankan di bawah 0.95.



Gambar 2. 11 Kualitas mesh berdasarkan skewness dan orthogonal quality

Sumber: (Pangestu *et al.*, 2024)