

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Energi Angin

2.1.1. Energi Angin

Angin adalah bentuk energi yang tak ada habisnya, sehingga dapat digunakan sebagai sumber pembangkit listrik alternatif (Syamsuarnis & Candra, 2020). Adapun pengertian angin adalah udara yang sedang bergerak yang disebabkan oleh rotasi bumi serta perbedaan tekanan udara di sekitarnya. Udara bergerak dari area dengan tekanan tinggi menuju area dengan tekanan rendah, yang memberikan angin kecepatan, kekuatan, dan arah tertentu. Menurut hukum Buys Ballot, “Udara bergerak dari daerah yang bertekanan tinggi (maksimum) ke daerah bertekanan rendah (minimum), di belahan bumi utara berbelok ke kanan sedangkan di belahan bumi selatan berbelok ke kiri”. Apabila tidak terdapat gaya lain yang mempengaruhi, maka angin akan bergerak secara langsung dari area bertekanan tinggi menuju area bertekanan rendah. Pengaruh rotasi bumi terhadap arah angin dikenal sebagai pengaruh *Coriolis (coriolis effect)*. Pengaruh *Coriolis* ini menyebabkan angin bergerak searah jarum jam mengelilingi daerah bertekanan rendah di belahan bumi selatan, sedangkan di belahan bumi utara, angin bergerak berlawanan arah dengan jarum jam mengelilingi daerah bertekanan rendah. (Wijayanti, 2015).

Gerakan angin ini memiliki energi kinetik, sehingga energi dari angin bisa diubah menjadi bentuk energi lain, seperti energi listrik, melalui penggunaan kincir angin atau turbin angin. Oleh karena itu, energi angin dapat dipahami sebagai energi kinetis atau energi yang berasal dari kecepatan angin, dan energi kinetis ini dapat dimanfaatkan untuk memutar bilah-bilah turbin angin. Sebagian besar energi angin saat ini dihasilkan dalam bentuk listrik dengan mengonversi perputaran bilah turbin menjadi arus listrik menggunakan generator listrik. (Zainal Arifin, et al., 2023). Keunggulan dari energi angin sebagai sumber energi terbarukan adalah bersih dan ramah lingkungan dengan emisi nol (zero emission) saat operasi, tersedia secara gratis dan melimpah di berbagai lokasi geografis, dan dapat diintegrasikan dengan sistem energi lainnya dalam konfigurasi hibrid.

2.1.2. Potensi Angin Laut Indonesia

Salah satu jenis angin yang sangat dikenal adalah angin laut. Angin laut Indonesia yang sejak dahulu terkenal dan sudah menjadi tantangan dikarenakan sifat anginnya yang dinamik dan dapat mempengaruhi parameter lautan (Alifdini dkk., 2021). Merujuk pada laporan Potensi Energi Angin Indonesia 2020 yang diterbitkan oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Ketenagalistrikan Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi (P3TKEBTKE), pemetaan kecepatan angin dilakukan menggunakan data meteorologi dari 111 stasiun BMKG serta 11 titik pengukuran lapangan oleh P3GL-KESDM dengan resolusi spasial sebesar 5 km. Hasil pemetaan menunjukkan bahwa wilayah dengan potensi angin terbesar berada di bagian timur Indonesia, seperti Nusa Tenggara Timur (NTT), Maluku, Sulawesi Selatan, dan pesisir selatan Pulau Jawa (Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Ketenagalistrikan, Energi Baru, Terbarukan, dan Konservasi Energi, 2021).

Rata-rata kecepatan angin di wilayah pesisir Indonesia berkisar antara 6–8 m/s, sedangkan pada daerah lepas pantai (*Offshore*) dapat mencapai lebih dari

8 m/s. Wilayah yang menunjukkan potensi tinggi di antaranya adalah perairan Banten, Kupang, Jeneponto, Pulau Wetar, dan Kepulauan Tanimbar. Merujuk pada hasil pemetaan potensi energi angin nasional, kategori rapat daya angin (Wind Power Density/WPD) di wilayah darat (onshore) mencapai 400–500 W/m² dan di wilayah laut (*Offshore*) dapat mencapai 500–600 W/m², yang dikategorikan dalam kelas *good* hingga *excellent* untuk pengembangan sistem turbin angin (Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Ketenagalistrikan, Energi Baru, Terbarukan, dan Konservasi Energi, 2021).

Sementara itu, laporan Indonesia Energy Transition Outlook 2024 oleh Institute for Essential Services Reform (IESR) mencatat bahwa hingga tahun 2023 kapasitas terpasang Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) di Indonesia baru mencapai sekitar 135 MW, yang terdiri dari proyek PLTB Sidrap (75 MW) dan PLTB Tolo Jeneponto (60 MW). Jumlah ini masih jauh dari target 255 MW pada tahun 2025 yang ditetapkan dalam Rencana Umum Energi Nasional (RUEN). IESR menekankan bahwa keterlambatan pengembangan energi angin di Indonesia bukan disebabkan oleh kurangnya potensi alam, melainkan oleh hambatan teknis, kebijakan tarif, dan kurangnya infrastruktur transmisi di daerah potensial (Institute for Essential Services Reform, 2024).

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa Indonesia memiliki potensi energi angin laut yang sangat besar, terutama di kawasan timur, dengan karakteristik kecepatan angin dan rapat daya yang kompetitif terhadap standar internasional. Tantangan utamanya terletak pada aspek teknis dan kebijakan, sementara dari sisi potensi fisik, Indonesia telah memenuhi syarat untuk pengembangan turbin angin laut skala besar maupun integrasi sistem turbin kecil pada kapal. Penerapan standar desain IEC 61400-1 dan kebijakan akseleratif sebagaimana direkomendasikan oleh IESR akan menjadi kunci untuk mengoptimalkan pemanfaatan energi angin laut sebagai bagian dari bauran energi nasional.

Tabel 2. 1 Kecepatan Angin Laut Rata Rata di beberapa Wilayah Indonesia

No.	Lokasi / Wilayah	Kecepatan Angin Rata-rata	Ketinggian Pengukuran	Kategori Potensi
1	Ciracap, Jawa Barat (Laut Selatan, termasuk Sukabumi)	6,4 – 8,7	100 m	<i>Good - Excellent</i>
2	Jeneponto, Sulawesi Selatan (Lokal PLTB)	≈ 8,0	Tinggi Menara PLTB	<i>Excellent</i>
3	Laut Natuna Utara (Puncak Musiman, area dengan potensi <i>Offshore</i> besar)	15,4 – 23,1 (30 - 45 knot)	Permukaan Laut (BMKG)	<i>High Turbulence</i>
4	Selat Makassar Selatan (Puncak Musiman, termasuk Jeneponto lepas pantai)	11,3 – 15,4 (22 - 30 knot)	Permukaan Laut (BMKG)	<i>High Turbulence</i>
5	Banten (<i>Offshore</i>)	6,0 – 8,0	100 m	<i>Good - Excellent</i>
6	Kupang & Pulau Wetar (NTT)	≥ 6,3	100 m	<i>Good - Excellent</i>
7	Kepulauan Tanimbar (Maluku)	≈ 6,0	50 m	<i>Marginal - Fair</i>

2.1.3. Kecepatan Angin dan Keterkaitannya dengan Operasi Turbin Angin

Kecepatan angin adalah kecepatan udara yang bergerak secara horizontal yang dipengaruhi oleh gradien barometrik lokasi tapak, ketinggian tapak, dan tapak topografi. Untuk mengukur kecepatan angin yang lebih baik sebenarnya dilakukan pada ketinggian 10 m dengan mempertimbangkan pengaruh lapisan batas. Untuk satuan kecepatan angin dalam meter per detik, kilometer per jam atau knot $1 \text{ m/s} = 1,9438 \text{ knot} = 3,6 \text{ km/jam}$ (International Energy Agency, 2022). Kecepatan angin merupakan salah satu parameter paling krusial dalam menentukan performa dan efisiensi turbin angin. Kecepatan angin yang tidak tetap dan bisa berbeda-beda tergantung situasinya perlu diamati dengan menggunakan skala yang sudah diakui secara internasional, yaitu skala Beaufort yang dapat dilihat pada tabel di bawah ini : Kecepatan Angin (Sujitno Ah.M.G, 1978)

Tabel 2. 2 Kecepatan Angin Berdasarkan Sujitno Ah.M.G, 1978

Skala Beaufort	Kecepatan Angin		Nama Angin (Indonesia)	Nama Angin Inggris	Keterangan
	(m/s)	(Knots)			
0	0,0–0,2	0–1	Angin reda	<i>Calm</i>	Asap naik tegak lurus
1	0,3–0,5	1–3	Angin sepoi-sepoi	<i>Light air</i>	Asap miring mengikuti arah angin
2	1,6–3,3	4–6	Angin lemah	<i>Light breeze</i>	Daun-daun mulai bergerak
3	3,4–5,4	7–10	Angin sedang	<i>Gentle breeze</i>	Ranting kecil bergerak
4	5,5–7,9	11–16	Angin tegang	<i>Moderate breeze</i>	Dahan-dahan bergerak
5	8,0–10,7	17–21	Angin keras	<i>Fresh breeze</i>	Batang pohon mulai bergoyang
6	10,8–13,8	22–27	Angin keras sekali	<i>Strong breeze</i>	Pohon besar mulai bergerak
7	13,9–17,1	28–33	Angin ribut	<i>High wind / Moderate gale</i>	Dahan patah
8	17,2–20,7	34–40	Angin ribut hebat	<i>Gale / Fresh gale</i>	Pohon kecil tumbang
9	20,8–24,4	41–47	Angin badai	<i>Strong gale</i>	Pohon besar patah
10	24,5–28,4	48–55	Angin badai hebat	<i>Storm / Whole gale</i>	Rumah-rumah rusak
11	28,5–32,6	56–63	Angin taifun	<i>Violent storm</i>	Benda berat beterbangan
12	>32,7	>64	Angin taifun hebat	<i>Hurricane</i>	Kerusakan sangat parah

Menurut laporan Teknologi Ketenagalistrikan Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi, kecepatan angin di daerah *Offshore* menunjukkan angka lebih dari 8 m/s (Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Ketenagalistrikan, Energi Baru, Terbarukan, dan Konservasi Energi, 2021) . Kecepatan ini termasuk dalam kategori optimal untuk pengoperasian turbin angin skala menengah hingga besar, khususnya tipe *Darrieus* dan *Fibonacci-Spiral* yang bekerja efisien pada kisaran 4–12 m/s .

Keunggulan utama angin laut dibandingkan angin darat terletak pada konsistensi dan kestabilan kecepatannya. Hal ini disebabkan oleh kekasaran permukaan laut yang sangat rendah (0,0002 m) serta tidak adanya penghalang fisik seperti vegetasi atau bangunan, sehingga aliran angin relatif laminar dan memiliki turbulensi yang rendah.

Profil vertikal kecepatan angin mengikuti hukum pangkat (*power law*) yang dinyatakan dengan persamaan:

$$v(z) = v(z_{ref}) \times \left(\frac{z}{z_{ref}}\right)^\alpha \dots\dots\dots(2.1)$$

di mana:

- $v(z)$ = kecepatan angin pada ketinggian z ,
- $v(z_{ref})$ = kecepatan angin pada ketinggian referensi,
- α = koefisien *wind shear*, yang nilainya berkisar antara 0,10–0,14 di laut dan 0,14–0,25 di darat.

Nilai koefisien *wind shear* yang lebih rendah di laut menandakan bahwa peningkatan kecepatan angin terhadap ketinggian lebih lambat, namun cenderung lebih stabil. Ini berimplikasi penting pada desain menara turbin, di mana tinggi menara dapat dioptimalkan agar rotor beroperasi dengan kecepatan angin rata-rata tertinggi tanpa meningkatkan beban struktural secara berlebihan.

Selain itu, distribusi kecepatan angin di laut yang lebih konsisten mendukung peningkatan kapasitas faktor turbin (*capacity factor*), yakni rasio antara energi aktual yang dihasilkan terhadap energi maksimum teoretis. Merujuk pada laporan Indonesia Energy Transition Outlook, kapasitas faktor untuk *Offshore wind turbine* di kawasan perairan Indonesia dapat mencapai 35–45%, jauh lebih tinggi dibandingkan potensi *onshore* yang berkisar 20–30% (Institute for Essential Services Reform, 2024).

Secara keseluruhan, karakteristik kecepatan angin laut baik dari sisi kestabilan, konsistensi arah, maupun nilai *wind shear* yang rendah menjadikannya sangat sesuai untuk sistem pembangkit listrik tenaga angin yang akan diimplementasikan di lingkungan kelautan, termasuk di atas kapal *Offshore support vessel* atau *floating platform*.

2.2 Turbin Angin

2.2.1. Turbin Angin Modern

Turbin angin modern adalah mesin yang mengubah energi dari angin menjadi listrik. Hal ini berbeda dengan 'kincir angin', yang merupakan mesin yang mengubah energi angin menjadi tenaga mekanik. Sebagai pembangkit listrik, turbin angin dihubungkan ke beberapa jaringan listrik. Pada turbin angin modern, proses konversi sebenarnya menggunakan gaya aerodinamis dasar dari gaya angkat untuk menghasilkan torsi positif bersih pada poros yang berputar, yang pertama-tama menghasilkan tenaga mekanis dan kemudian diubah menjadi listrik dalam generator.

Output dari turbin angin secara inheren bersifat fluktuatif dan tidak dapat didistribusikan sesuai permintaan. Setiap sistem yang terhubung dengan turbin angin harus, dalam beberapa cara, mempertimbangkan variabilitas ini. Dalam jaringan yang lebih besar, turbin angin berfungsi untuk mengurangi total beban listrik dan dengan demikian mengakibatkan penurunan baik dalam jumlah generator konvensional yang digunakan maupun dalam penggunaan bahan bakar oleh generator yang sedang berjalan. Dalam jaringan yang lebih kecil, mungkin terdapat penyimpanan energi, generator cadangan, dan beberapa sistem kontrol khusus.

2.2.2. Komponen Turbin

Pemahaman yang terstruktur mengenai cara kerja turbin angin memerlukan pengenalan terhadap elemen-elemen penyusunnya. Pada bagian berikut dijelaskan komponen-komponen utama turbin angin secara sistematis, meliputi fungsi, karakteristik operasional, serta kontribusinya terhadap proses konversi energi.:

a. Rotor

Rotor terdiri dari poros dan bilah turbin angin. Bagian-bagian ini kerap kali dianggap sebagai komponen paling penting dari turbin baik dari segi kinerja maupun biaya keseluruhan. Sebagian besar turbin saat ini memiliki rotor dengan tiga bilah., lalu ada beberapa rotor yang memiliki dua bilah namun, untuk rotor satu bilah sudah tidak lagi di produksi.

b. Drive Train

Rangkaian penggerak terdiri dari bagian berputar lain pada turbin angin yang berada di hilir rotor. Bagian ini mencakup poros berkecepatan rendah (di sisi rotor), *gearbox*, dan poros berkecepatan tinggi (di sisi generator). Komponen lainnya dari rangkaian penggerak meliputi bantalan penopang, satu atau lebih kopleng, rem, dan bagian berputar dari generator. Tujuan dari *gearbox* adalah untuk meningkatkan laju rotasi rotor dari nilai rendah (puluhan rpm) menjadi laju yang sesuai untuk menggerakkan generator standar (ratusan atau ribuan rpm). Dua tipe *gearbox* yang digunakan pada turbin angin adalah poros paralel dan planet. Untuk mesin yang lebih besar (≥ 500 kW), keuntungan berat dan ukuran dari *gearbox* planet menjadi lebih nyata. Meskipun desain komponen rangkaian penggerak turbin angin biasanya mengikuti praktik desain mesin konvensional dalam rekayasa mekanik, beban unik pada rangkaian penggerak turbin angin memerlukan perhatian khusus. Angin yang berfluktuasi dan dinamika rotor besar yang berputar menimbulkan beban variabel yang signifikan pada komponen rangkaian penggerak.

c. Generator

Hampir semua turbin angin menggunakan generator induksi atau sinkron. Desain ini melibatkan kecepatan rotasi yang konstan atau hampir konstan ketika generator terhubung langsung ke jaringan utilitas. Jika generator digunakan dengan konverter elektronik daya, turbin akan dapat beroperasi pada kecepatan variabel.

d. Nacelle dan Yaw System

Kategori ini mencakup rumah turbin angin, plat dasar mesin atau rangka utama, dan sistem orientasi *yaw*. Rangka utama menyediakan tempat untuk pemasangan dan penyesuaian yang tepat dari komponen *drive train*. Penutup *nacelle* melindungi isi dari cuaca. Sistem orientasi *yaw* diperlukan untuk menjaga poros rotor tetap sejajar dengan angin. Komponen utamanya adalah bantalan besar yang menghubungkan rangka utama ke menara. Penggerak *yaw* aktif, yang selalu digunakan pada turbin angin *upwind* dan kadang-kadang pada turbin *downwind*, mengandung satu atau lebih motor *yaw*, masing-masing menggerakkan roda pinion terhadap roda gigi *bull* yang terpasang pada bantalan

yaw.

e. Menara dan Fondasi Penopang

Kategori ini mencakup menara itu sendiri dan fondasi penopangnya. Jenis utama desain menara yang saat ini digunakan adalah jenis berdiri bebas menggunakan tabung baja, menara kisi (atau truss), dan menara beton. Untuk turbin yang lebih kecil, menara bertali juga digunakan. Tinggi menara biasanya 1 hingga 1,5 kali diameter rotor, tetapi dalam case biasanya minimal 20 m. Pemilihan menara juga sangat dipengaruhi oleh karakteristik lokasi. Kekakuan menara merupakan faktor utama dalam dinamika sistem turbin angin karena kemungkinan terjadinya getaran yang saling terkait antara rotor dan menara. Untuk turbin dengan rotor *downwind*, efek bayangan menara (*wake*) yang tercipta oleh aliran udara di sekitar menara) terhadap dinamika turbin, fluktuasi daya, dan penghasilan kebisingan harus diperhitungkan. Misalnya, karena bayangan menara, turbin *downwind* biasanya lebih bising dibandingkan dengan turbin *upwind*.

f. Kontrol

Sistem kontrol untuk turbin angin penting baik terkait operasi mesin maupun produksi daya. Sistem kontrol turbin angin mencakup komponen-komponen berikut :

- Sensor : kecepatan, posisi, aliran, temperatur, arus, tegangan, dll
- Pengendali : mekanisme mekanis, rangkaian listrik
- Penguat Daya : saklar, penguat listrik, pompa hidrolis, dan katup
- Aktuator : motor, piston, magnet, dan solenoid;
- Kecerdasan Buatan : komputer, mikroprosesor.

Kontrol turbin angin mencakup tiga aspek utama berikut dan keseimbangan bijaksana dari persyaratan mereka :

- Menetapkan batas atas dan membatasi torsi serta daya yang dialami oleh *drive train*.
- Memaksimalkan umur lelah rotor *drive train* dan komponen struktural lainnya di hadapan perubahan arah angin, kecepatan (termasuk hembusan), dan turbulensi, serta siklus *start-stop* turbin angin.
- Memaksimalkan produksi energi

g. *Ballance of Electrical System*

Sistem turbin angin juga memanfaatkan sejumlah komponen listrik lainnya. Beberapa contohnya adalah kabel, *switchgear*, trafo, konverter elektronik daya, kapasitor koreksi faktor daya, motor *yaw* dan *pitch*.

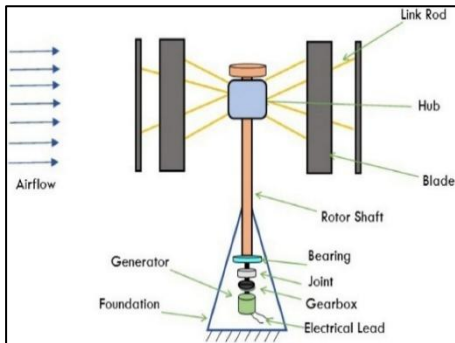
h. *Brake*

Brake pada turbin angin berfungsi untuk mengontrol dan menghentikan putaran rotor agar tetap aman, terutama saat kecepatan angin terlalu tinggi, ketika dilakukan perawatan, atau dalam keadaan darurat. Sistem rem ini mencegah kerusakan akibat *overspeed* yang bisa merusak bilah, poros, *gearbox*, maupun generator. Ada tiga jenis rem yang umum digunakan, yaitu *mechanical brake* (rem cakram untuk penghentian total), *aerodynamic brake* (mengubah sudut bilah untuk mengurangi gaya angin), dan *electrical brake* (menggunakan beban listrik sebagai pengereman elektromagnetik). Dengan demikian, *brake* berperan penting sebagai sistem pengaman utama untuk menjaga kestabilan, keandalan, dan keselamatan operasi turbin angin.

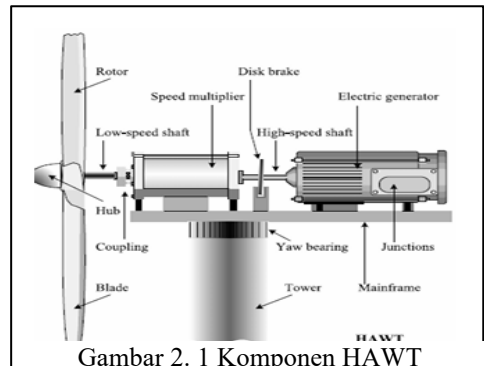
i. *Transformer*

Transformer pada turbin angin berfungsi untuk mengubah tegangan listrik yang dihasilkan generator turbin agar sesuai dengan standar jaringan listrik atau

sistem distribusi. Umumnya, generator pada turbin angin menghasilkan tegangan rendah, sehingga *transformer* digunakan untuk menaikkan tegangan (*step-up transformer*) sebelum daya dikirim ke jaringan listrik agar proses transmisi lebih efisien dan rugi daya berkurang. Selain itu, *transformer* juga berperan dalam menstabilkan tegangan, mengatur kualitas daya, dan melindungi sistem kelistrikan dari lonjakan arus atau gangguan. Dengan begitu, *transformer* menjadi komponen penting dalam memastikan energi listrik hasil konversi dari energi angin dapat ditransfer dengan aman, efisien, dan stabil ke sistem kelistrikan utama.



Gambar 2. 2 Komponen VAWT



Gambar 2. 1 Komponen HAWT

2.2.3. Jenis Turbin Berdasarkan Letak Sumbu Rotor

Turbin angin diklasifikasikan menjadi dua kategori utama berdasarkan orientasi poros rotornya, yaitu Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) dan Vertical Axis Wind Turbine (VAWT).

a. Turbin Angin Sumbu Vertikal (VAWT)

Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) adalah jenis turbin angin yang memiliki sumbu rotasi tegak lurus terhadap arah angin. Berbeda dengan HAWT, bilah VAWT berputar mengelilingi sumbu vertikal sehingga tidak memerlukan sistem yaw karena dapat menangkap angin dari segala arah (Eriksson dkk., 2008). Energi angin dikonversi melalui gaya aerodinamika (*lift* maupun *drag*) yang bekerja pada bilah. VAWT memiliki kemampuan bekerja pada arah angin yang berubah-ubah tanpa memerlukan sistem pengarah. Hal ini membuatnya ideal untuk daerah dengan turbulensi tinggi atau ruang terbatas, seperti lingkungan perkotaan atau platform lepas pantai (*Offshore structures*). Namun, efisiensi konversi energi VAWT umumnya lebih rendah (20–35%) dibandingkan HAWT karena sebagian bilah selalu bergerak melawan arah angin (Al-Rawajfeh & Gomaa, 2023).

Turbin angin sumbu vertikal atau Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) memiliki sejumlah keunggulan yang membuatnya menjadi alternatif menarik dalam pemanfaatan energi angin, terutama di wilayah dengan kondisi tertentu. Salah satu kelebihanannya terletak pada kemudahan pemeliharaan, karena desainnya yang memanjang secara vertikal membuat seluruh komponen utama turbin berada lebih dekat dengan permukaan tanah. Hal ini mempermudah proses inspeksi, perawatan, dan perbaikan tanpa memerlukan peralatan tinggi atau struktur pendukung tambahan. Selain itu, VAWT dapat menangkap angin dari berbagai arah tanpa memerlukan *yaw mechanism* untuk mengatur posisi turbin terhadap arah angin, sehingga sangat cocok digunakan

di daerah dengan kecepatan angin rendah dan arah angin yang sering berubah.

Dari sisi konstruksi, turbin sumbu vertikal memiliki desain yang lebih sederhana, mudah diproduksi, dan lebih praktis untuk ditransportasikan. Biaya pembuatannya pun relatif lebih ekonomis karena tidak memerlukan menara tinggi sebagai penopang utama. Keunggulan lain dari turbin ini adalah tingkat kebisingannya yang relatif rendah, sehingga lebih ramah terhadap lingkungan sekitar dan cocok untuk penggunaan di area pemukiman atau lokasi yang membutuhkan tingkat kebisingan minimal.

Namun, VAWT juga memiliki beberapa kelemahan. Efisiensi kerjanya cenderung lebih rendah dibandingkan dengan turbin angin sumbu horizontal (HAWT). Selain itu, daya yang dihasilkan sering kali kurang stabil karena torsi yang dihasilkan berfluktuasi seiring perubahan arah dan kecepatan angin. Turbin jenis ini juga memerlukan area yang relatif datar untuk pemasangannya agar dapat beroperasi secara optimal, sehingga tidak selalu sesuai untuk semua kondisi medan atau lokasi.

Turbin angin sumbu vertikal dapat dibedakan menjadi dua berdasarkan cara penggerakannya yaitu :

- Gaya tahanan (*drag*) sebagai penggeraknya Turbin angin jenis ini memanfaatkan efek gaya tahanan sebagai gaya dominan penggerak rotornya. Umumnya turbin angin dengan gaya *drag* memiliki efisiensi yang lebih rendah dibandingkan tipe *lift*. Turbin angin yang paling umum dikenal dari jenis ini adalah turbin angin Savonius.
- Gaya angkat (*lift*) sebagai penggeraknya Turbin angin jenis ini memanfaatkan efek gaya angkat sebagai gaya utama penggerak rotornya. Umumnya turbin angin dengan gaya *lift* memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan tipe *drag*. Turbin angin jenis ini adalah turbin angin Daerius.

b. Turbin Angin Sumbu Horizontal (HAWT)

Umumnya, bilah turbin HAWT berbentuk seperti *airfoil* pada pesawat terbang dan bekerja berdasarkan gaya angkat (*lift force*) yang dihasilkan oleh perbedaan tekanan udara antara sisi atas dan bawah bilah (Hau & Von Renouard, 2006). Energi kinetik angin dikonversi menjadi torsi pada poros utama, yang kemudian diteruskan ke *gearbox* dan *generator* untuk menghasilkan energi listrik. HAWT umumnya memiliki efisiensi konversi daya lebih tinggi dibandingkan VAWT, karena orientasinya memungkinkan bilah selalu bekerja dalam sudut serang (*angle of attack*) optimal terhadap arah angin. Berdasarkan limit *Betz*, efisiensi maksimum teoritis turbin angin adalah 59,3%, dan HAWT modern mampu mencapai 35–45% dari nilai tersebut (Burton, 2009). Namun, sistem *yaw* dan tinggi *tower* menjadikannya lebih kompleks secara struktural dan mahal dalam perawatan.

Menurut Yerikho (2016), turbin angin sumbu horizontal atau Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) memiliki beberapa keunggulan yang membuatnya banyak digunakan dalam sistem pembangkit listrik tenaga angin. Salah satu kelebihanannya adalah kemampuannya dalam mengonversi energi angin pada kecepatan tinggi secara efisien. Selain itu, HAWT juga memiliki tingkat keamanan yang baik karena posisi sudu atau bilah turbin terletak di puncak menara, sehingga lebih stabil dalam menerima hembusan angin. Dari sisi konstruksi, turbin jenis ini cenderung membutuhkan material yang lebih sedikit dibandingkan dengan jenis turbin lainnya, sehingga secara struktural lebih ringan (Stephanus Yerikho, 2016).

Namun, di balik kelebihanannya, HAWT juga memiliki beberapa

keterbatasan. Biaya pemasangan turbin angin sumbu horizontal umumnya lebih tinggi dibandingkan dengan turbin angin sumbu vertikal. Proses pembuatan serta instalasinya pun lebih kompleks karena melibatkan struktur menara yang tinggi dan memerlukan peralatan khusus untuk pemasangan. Selain itu, jenis turbin ini kurang cocok untuk ditempatkan di daerah padat penduduk, karena ukuran dan ketinggiannya dapat menimbulkan potensi bahaya serta gangguan bagi lingkungan sekitar. (Stephanus Yerikho, 2016)

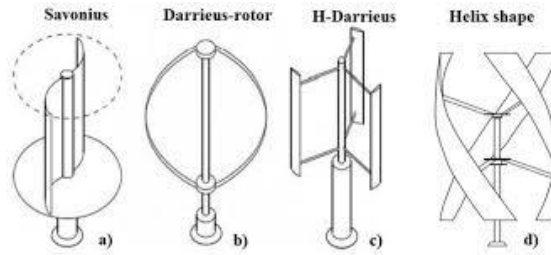
Prinsip aerodinamika pada kedua jenis turbin ini serupa, namun karakteristik performanya berbeda tergantung desain bilah, jumlah bilah, sudut pitch, serta rasio kecepatan ujung (*Tip Speed Ratio*). Dalam konteks penelitian ini, turbin *Fibonacci-Spiral* termasuk dalam kategori HAWT, yang mengandalkan geometri spiral alami untuk meningkatkan efisiensi aerodinamika pada kondisi angin laut dengan kecepatan rendah hingga sedang. Efisiensi turbin dipengaruhi oleh beberapa faktor utama seperti bentuk bilah, kecepatan angin, kepadatan udara, dan luas area sapuan rotor. Namun, untuk memahami performa turbin secara kuantitatif, diperlukan formulasi matematis yang mencakup parameter-parameter fisik seperti gaya angkat, gaya hambat, koefisien daya (*power coefficient*), serta rasio kecepatan ujung bilah (*Tip Speed Ratio*). Parameter-parameter ini dijelaskan secara rinci pada subbab 2.8 Formulasi Matematis Yang Digunakan .

2.3 Turbin Angin Darrieus

2.3.1. Sejarah dan Pengembangan Turbin Darrieus

Turbin angin tipe *Darrieus* merupakan salah satu jenis Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) yang bekerja berdasarkan prinsip gaya angkat (*lift-based*). Jenis turbin ini pertama kali diperkenalkan oleh insinyur penerbangan asal Prancis, Georges Jean Marie *Darrieus*, yang memperoleh hak patennya pada tahun 1931 (G. J. M. *DARRIEUS*, 1931) Pada masa itu, *Darrieus* merancang turbin dengan bilah vertikal melengkung menyerupai bentuk “*eggbeater*” yang berfungsi mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik rotasi. Desain tersebut muncul sebagai alternatif terhadap turbin *Savonius* yang masih berbasis gaya hambat (*drag-based*), karena *Darrieus* ingin memanfaatkan karakteristik aerodinamik gaya angkat yang memiliki efisiensi konversi energi lebih tinggi.

Dalam perkembangannya, penelitian mengenai turbin *Darrieus* semakin intensif pada dekade 1970–1990 melalui berbagai proyek eksperimen besar, salah satunya yang dilakukan oleh Sandia National Laboratories di Amerika Serikat. Melalui program riset berskala besar, Sandia mengembangkan dan menguji beberapa prototipe *Darrieus*, termasuk turbin berdiameter 34 meter yang menjadi acuan penting bagi studi aerodinamika dan struktur VAWT. Hasil-hasil eksperimen tersebut mengungkap berbagai persoalan fundamental pada desain awal, antara lain torsi awal (*starting torque*) yang rendah dan kegagalan struktur akibat beban siklik (*fatigue*) pada bilah (Ashwill, T D, 1992). Seiring waktu, berbagai perbaikan dilakukan dengan memanfaatkan material komposit yang lebih ringan dan tahan lelah, serta pengembangan desain bilah heliks (*helical blades*) yang mampu menghasilkan rotasi lebih halus dan torsi yang lebih konstan dibanding bilah lurus (*straight blades*).



Gambar 2. 3 Jenis – Jenis Turbin Angin Darrieus

2.3.2. Prinsip Kerja Dan Dominasi Gaya Angkat Dengan Profil Bilah NACA.

Prinsip kerja turbin *Darrieus* didasarkan pada dominasi gaya angkat (*lift*) yang timbul dari interaksi antara aliran angin bebas dan gerak rotasi bilah. Ketika bilah berputar di sekitar poros vertikal, setiap bagian bilah mengalami kecepatan relatif (*relative velocity*) yang merupakan kombinasi dari kecepatan angin bebas dan kecepatan tangensial bilah. Kombinasi ini menghasilkan sudut serang (*angle of attack*) yang berubah-ubah sepanjang putaran bilah. Akibat perubahan ini, gaya angkat yang bekerja pada permukaan bilah tidak konstan, melainkan berfluktuasi secara periodik dan menimbulkan torsi pada poros turbin. Komponen tangensial dari gaya angkat inilah yang berfungsi menghasilkan energi mekanik yang kemudian dikonversi menjadi energi listrik melalui generator.

Dalam operasinya, turbin *Darrieus* umumnya memiliki nilai *Tip Speed Ratio* (λ) yang tinggi, yaitu perbandingan antara kecepatan ujung bilah terhadap kecepatan angin bebas. Semakin besar nilai λ , semakin besar pula kontribusi gaya angkat terhadap torsi total. Namun, dinamika aerodinamik *Darrieus* bersifat tidak stasioner (*unsteady*), karena perubahan sudut serang yang cepat dapat menimbulkan fenomena *dynamic stall*, yaitu kondisi ketika aliran udara terlepas dari permukaan bilah dan menyebabkan fluktuasi tekanan. Oleh sebab itu, analisis numerik menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dan model *blade element momentum theory* sering digunakan untuk memprediksi distribusi gaya dan performa energi pada sistem *Darrieus*.

Kinerja aerodinamik turbin *Darrieus* juga sangat dipengaruhi oleh bentuk profil bilah (*airfoil*) yang digunakan. Secara umum, turbin ini menggunakan profil simetris NACA, seperti NACA 0012, NACA 0015, NACA 0021, dsb. Pemilihan *airfoil* simetris didasarkan pada kenyataan bahwa setiap bilah akan mengalami sudut serang positif dan negatif selama satu rotasi penuh. Profil simetris memastikan bahwa gaya angkat dan gaya hambat yang dihasilkan tetap seimbang tanpa menimbulkan momen bias terhadap poros.

Selain itu, penelitian kontemporer juga berfokus pada modifikasi profil NACA untuk meningkatkan kemampuan *start-up* dan memperbaiki koefisien daya (C_p) pada kecepatan rendah. Modifikasi tersebut meliputi penggunaan *airfoil* ber-slot (*slotted airfoil*), flap aktif, dan kombinasi dua elemen (*multi-element airfoil*). Beberapa penelitian, seperti yang dilakukan oleh El-Askary, menunjukkan bahwa modifikasi pada NACA 0021 dapat meningkatkan performa turbin hingga 15% pada kondisi *low tip speed ratio* (El-Askary dkk., 2023). Kajian numerik dan eksperimental juga menunjukkan bahwa penggabungan desain *Darrieus* dengan *Savonius* menghasilkan turbin hibrida, yang tidak hanya meningkatkan torsi awal, tetapi juga memperbaiki stabilitas rotasi pada kecepatan angin rendah.

Secara keseluruhan, turbin *Darrieus* tetap menjadi fokus penting dalam

pengembangan teknologi turbin angin vertikal modern, terutama untuk aplikasi di daerah dengan arah angin yang berubah-ubah seperti lingkungan laut dan pesisir. Dengan kemajuan material komposit, peningkatan metode simulasi CFD, dan optimasi geometri bilah berbasis profil NACA, desain *Darrieus* kini menjadi salah satu alternatif potensial dalam sistem pembangkit listrik tenaga angin berskala menengah.

2.3.3. Penelitian Terdahulu tentang Aerodinamika Turbin Darrieus

Kajian aerodinamika turbin angin tipe H-*Darrieus* pada berbagai penelitian terdahulu menunjukkan bahwa karakteristik performanya sangat dipengaruhi oleh fenomena aliran tak tunak, perubahan sudut serang sepanjang azimuth, dan interaksi *rotor-wake* yang kompleks. Studi numerik mengenai *self-starting* yang dilakukan oleh Arab dan rekan rekannya mengonfirmasi bahwa bahwa karakteristik *self-starting* sangat dipengaruhi oleh momen inersia rotor, di mana peningkatan inersia menyebabkan waktu akselerasi lebih lama dan bahkan dapat membuat turbin gagal mencapai kondisi tunak. Turbin *Darrieus* memiliki torsi awal yang sangat rendah, dengan nilai torsi bersih hanya berkisar 0,002–0,006 Nm pada *Tip Speed Ratio* (TSR) < 1 , sehingga rotor umumnya gagal berakselerasi pada kecepatan angin di bawah 4 m/s (Arab dkk., 2017). Penelitian optimasi aerodinamika terbaru menunjukkan bahwa modifikasi geometri bilah, penyesuaian sudut serang efektif, dan rekayasa pola aliran di sekitar rotor dapat meningkatkan koefisien daya (C_p) dari nilai tipikal 0,21–0,24 menjadi 0,33–0,37, menandai peningkatan efisiensi lebih dari 40% pada kondisi TSR optimum. Pendekatan desain inovatif seperti J-Blade terbukti memberikan kontribusi signifikan melalui peningkatan torsi awal hingga 142% dibandingkan bilah standar NACA 0015, serta menghasilkan peningkatan C_p pada TSR optimum 2,5–3,0, menjadikannya solusi potensial terhadap permasalahan *self-starting* yang secara inheren melekat pada konfigurasi *Darrieus* konvensional (Abdallah dkk., 2024).

Secara paralel, kajian review komprehensif oleh Du, Ingram, dan Dominy menegaskan bahwa performa aerodinamis H-*Darrieus* dipengaruhi kuat oleh parameter desain seperti *solidity*, profil bilah, *pitch angle*, serta ketergantungan yang kompleks pada sudut serang dan perubahan *Reynolds number* sepanjang rotasi, mereka juga menyoroti bahwa tantangan utama tetap berada pada peningkatan efisiensi dan kemampuan *self-starting* yang stabil pada variasi arah angin (Du dkk., 2019). Terakhir, penelitian Chen menunjukkan bahwa integrasi konfigurasi *double-deflector* pada H-*Darrieus* mampu meningkatkan rerata koefisien daya dari $C_p \approx 0.37$ (tanpa deflektor) menjadi nilai yang lebih tinggi secara signifikan melalui optimasi posisi deflektor menggunakan simulasi CFD dan jaringan syaraf tiruan, dengan selisih prediksi ANN terhadap CFD kurang dari 4.48% (Chen dkk., 2024b)

2.4 Turbin Angin Fibonacci-Spiral

2.4.1. Deret Fibonacci dan Golden Ratio

a. Deret Fibonacci

Deret Fibonacci merupakan barisan bilangan yang pertama kali diperkenalkan oleh matematikawan Italia, Leonardo Pisano Bigollo, yang dikenal dengan nama Fibonacci (Filius Bonacci) pada abad ke-13. Deret ini didefinisikan sebagai barisan bilangan di mana setiap suku merupakan penjumlahan dari dua suku sebelumnya.

Secara matematis, deret Fibonacci dapat dinyatakan dengan relasi rekursif sebagai berikut:

$$F_0=0$$

$$F_1 = 1$$

$$F_n = F_{n-1} + F_{n-2}, \text{ untuk } n > 1. \dots\dots\dots(2.2)$$

Dengan menggunakan definisi di atas, deret Fibonacci menghasilkan barisan bilangan: 0,1,1,2,3,5,8, ..

b. Golden Ratio

Golden ratio, yang dilambangkan dengan huruf Yunani phi (ϕ), merupakan konstanta matematika irasional yang memiliki nilai:

$$\phi = \frac{1+\sqrt{5}}{2} = 1.6180339887. \dots\dots\dots(2.3)$$

Golden ratio memiliki hubungan erat dengan deret Fibonacci. Rasio antara dua suku berurutan dalam deret Fibonacci akan konvergen menuju nilai ϕ seiring bertambahnya nilai n:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{F_n}{F_{n-1}} = \phi. \dots\dots\dots(2.4)$$

Tabel 2. 3 Golden Ratio dan Deret Fibonacci

n	F_n	F_{n-1}	$\frac{F_n}{F_{n-1}}$	Selisih terhadap ϕ
3	2	1	2.0000	0.3820
5	5	3	1.6667	0.0486
7	13	8	1.6250	0.0070
9	34	21	1.6190	0.0010
11	89	55	1.6182	0.0002
13	233	144	1.6181	0.0001

2.4.2. Sejarah dan Pengembangan Turbin Angin *Fibonacci-Spiral*

Definisi Turbin Angin Fibonacci dalam konteks rekayasa bukanlah merujuk pada satu mesin spesifik, melainkan penerapan geometri Deret Fibonacci (Rasio Emas/Golden Ratio) pada desain bilah turbin. Berdasarkan literatur teknis, geometri ini diterapkan pada dua konfigurasi utama yang bekerja dengan prinsip berbeda: konfigurasi *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) berbentuk spiral/heliks, dan konfigurasi *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) sebagai modifikasi profil *Savonius*.

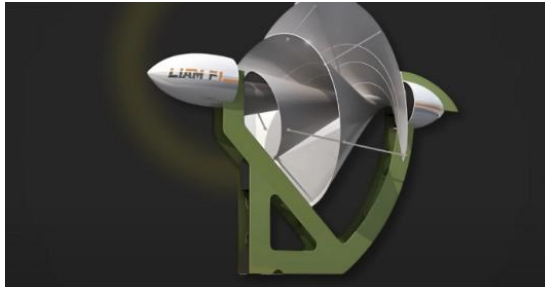
Sejarah pengembangan turbin ini berakar pada biomimikri (peniruan alam). Deret Fibonacci (0, 1, 1, 2, 3, 5, 8,...) dan Spiral Emas ditemukan di alam (cangkang siput, pola badai, galaksi) sebagai bentuk efisien untuk aliran fluida.

a. Evolusi dari Sekrup *Archimedes* ke Spiral Fibonacci (HAWT):

Pengembangan awal, seperti yang dicatat oleh Patil, terinspirasi oleh prinsip Sekrup *Archimedes*. Perusahaan rintisan Belanda, *The Archimedes*, memelopori pergeseran konsep dari turbin konvensional yang mengandalkan perbedaan tekanan (gaya angkat/*lift*) murni, menjadi turbin berbentuk spiral yang "mengumpulkan" angin. Pengembangan lebih lanjut memodifikasi bentuk ini menjadi *conical helix* menggunakan proporsi *Fibonacci* (kotak 1, 1, 2, 3, 5, 8, dst.) untuk menciptakan bilah yang mampu beroperasi pada kecepatan angin rendah di lingkungan perkotaan (Y. Patil, 2018b) .

b. Evolusi Profil *Savonius* (VAWT):

Secara historis, turbin Savonius (ditemukan tahun 1920-an) menggunakan bentuk setengah lingkaran sederhana. Damota dan rekan rekannya mencatat bahwa pengembangan modern berfokus pada modifikasi bentuk bilah untuk mengatasi efisiensi rendah *Savonius*. Integrasi bentuk *Fibonacci* pada profil VAWT adalah pengembangan kontemporer yang bertujuan untuk mengoptimalkan sisi cembung dan cekung bilah guna meningkatkan koefisien daya (C_p) tanpa mengorbankan kemampuan *self-starting* (Damota dkk., 2022b).



Gambar 2. 4 Turbin Angin Fibonacci

2.4.3. Prinsip Kerja Turbin Angin Fibonacci

Prinsip kerja turbin ini tidak tunggal, melainkan bergantung pada sumbu putarnya. Analisis ini membedakan dua mekanisme utama:

- a. Prinsip *Funneling* pada HAWT (Tipe Spiral) Pada desain sumbu horizontal, bilah tidak berbentuk *airfoil* konvensional, melainkan *conical helix* (Y. Patil, 2018).
 - Mekanisme: Turbin bekerja seperti sekrup yang "menembus" angin. Bentuk spiral mengarahkan angin masuk ke pusat turbin, mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik melalui kekekalan momentum.
 - Karakteristik Aliran: Bilah ini menggabungkan karakteristik rotor tipe *resistance* (hambatan) dan *lift* (gaya angkat). Keunggulan utamanya adalah kemampuan menyejajarkan diri dengan arah angin secara alami (seperti penunjuk arah angin) dan menghasilkan kebisingan yang sangat rendah (<42 dB), membuatnya ideal untuk area urban.
- b. Prinsip Modifikasi *Drag* pada VAWT (Tipe *Savonius*) Pada desain sumbu vertikal (Damota dkk., 2022), profil *Fibonacci* menggantikan setengah lingkaran standar.
 - Mekanisme: Turbin *Savonius* adalah mesin berbasis gaya hambat (*drag-driven*). Daya dihasilkan dari perbedaan gaya hambat antara bilah yang "menangkap" angin (sisi cekung) dan bilah yang "melawan" angin (sisi cembung).
 - Peran Geometri *Fibonacci* : Kurva *Fibonacci* mengubah distribusi tekanan di sekitar bilah. Bentuk ini meningkatkan gaya dorong bersih (*net driving force*) dengan memaksimalkan tangkapan angin pada bilah maju dan meminimalkan hambatan pada bilah yang kembali (*returning blade*).

2.4.4. Penelitian Terdahulu tentang Aerodinamika Turbin *Fibonacci*

Penelitian mengenai aerodinamika turbin berbasis *Fibonacci* telah dilakukan

pada dua konfigurasi sumbu yang berbeda dengan hasil yang signifikan. Pada konfigurasi sumbu horizontal (HAWT), Patil mengembangkan dan mensimulasikan bilah berbentuk *conical helix*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa turbin ini memiliki karakteristik respons yang baik terhadap kecepatan angin rendah, dengan kemampuan cut-in speed pada 5 m/s dan mencapai performa operasional optimal pada rentang kecepatan angin 18 hingga 25 m/s. Patil melaporkan bahwa desain ini mampu menahan turbulensi angin perkotaan dengan baik dan secara teoritis diklaim memiliki efisiensi hingga 71,38%. Namun, angka efisiensi ini perlu ditinjau secara kritis karena melampaui batas teoritis *Betz* (59,3%), yang mengindikasikan bahwa angka tersebut kemungkinan merujuk pada parameter internal spesifik dalam simulasi penulis dan bukan efisiensi aerodinamika total standar, atau terdapat deviasi dalam metodologi perhitungannya.

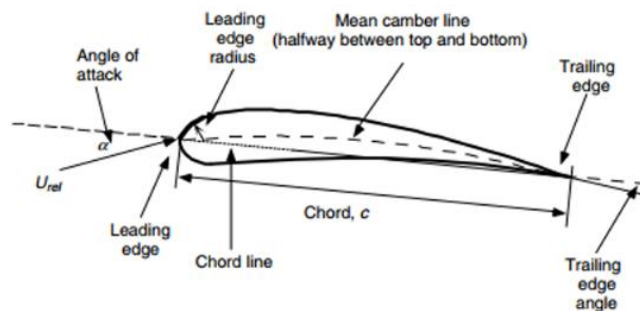
Di sisi lain, penelitian pada sumbu vertikal (VAWT) yang dilakukan oleh Damota et al. (2022) memberikan data aerodinamika yang lebih terukur menggunakan metode Computational Fluid Dynamics (CFD) model turbulensi $k-\omega$ SST yang divalidasi dengan eksperimen Sandia Labs. Studi ini secara spesifik membandingkan profil bilah bio-inspirasi *Fibonacci* dengan profil *Savonius* konvensional setengah lingkaran. Hasil penelitian menonjolkan keunggulan geometri *Fibonacci*, yang terbukti mampu meningkatkan Koefisien Daya (C_p) rata-rata sebesar 14,1% dan Koefisien Torsi (C_t) sebesar 13,5% dibandingkan *Savonius* standar. Lebih jauh, Damota mengidentifikasi parameter desain optimal untuk memaksimalkan efisiensi profil ini, yaitu penggunaan konfigurasi 2 bilah, rasio aspek (Aspect Ratio) sebesar 7, rasio overlap 0,15, dan sudut puntir (twist angle) 180 derajat. Berbeda dengan studi Patil, nilai C_p maksimum yang dicapai dalam studi ini berada pada kisaran 0,24 hingga 0,25 sebuah angka yang konsisten secara fisika untuk turbin berbasis *drag* (Damota dkk., 2022a).

2.5 AIRFOILS

Airfoil adalah sebuah bentuk aerodinamika yang bertujuan untuk menghasilkan gaya angkat sebesar mungkin dan juga gaya hambat sekecil mungkin

2.5.1. Bagian Bagian *Airfoils*

Pengertian dari bagian – bagian bada *airfoil* diatas adalah sebagai berikut:



Gambar 2. 5 Bagian bagian potongan pada *airfoil*

- *Leading edge*, merupakan bagian permukaan paling depan dari *airfoil* yang memiliki bentuk setengah lingkaran.

- *Trailing edge*, merupakan bagian permukaan paling belakang dari *airfoil* yang berbentuk lancip, biasanya jari-jari dari *leading edge* sejajar dengan garis dari *trailing edge*.
- *Chord line*, merupakan garis lurus yang menghubungkan permukaan depan (*leading edge*) dengan permukaan belakang (*trailing edge*).
- *Chamber of Upper Surface*, merupakan permukaan atas pada *airfoil*.
- *Chamber of Lower Surface*, merupakan permukaan bawah pada *airfoil*.
- *Chamber*, merupakan jarak maksimum antara *mean chamber line* dan garis *chord line* yang membentang tegak lurus terhadap garis *chord*.
- *Thickness*, merupakan ketebalan antara permukaan atas dan permukaan bawah yang terukur tegak lurus terhadap garis *chord*.
- Sudut serang atau *angle of attack* (α) pada *airfoil* tersebut menunjukkan sudut *chord line* pada *airfoil* terhadap arah angin relatif (Urel) yang mengalir melalui *airfoil*.

2.5.2. *Airfoil* NACA (National Advisory Committee for Aeronautics)

Airfoil NACA adalah bentuk geometri yang ditetapkan oleh NACA dan menjadi standar dalam perancangan *airfoil*. Penggunaan *airfoil* NACA sendiri umumnya diterapkan dalam bidang aeronautika sebagai sayap pesawat. Seiring dengan perkembangan teknologi saat ini, penerapan *airfoil* NACA juga digunakan dalam pembuatan geometri di bidang pembangkitan. Contohnya, dalam PLT Angin, pemilihan konstruksi geometri sudu-sudu turbin menggunakan bentuk *airfoil* NACA untuk mencapai daya angkat yang lebih efektif pada turbin angin..



Gambar 2. 6 *Airfoil* NACA 0015

Dalam penamaan dan penomoran model dari seri *airfoil*, NACA mengikuti standar pengkodean yang telah ditentukan, seperti seri 1 angka, 2 angka, 4 angka, dan 5 angka.

- Angka pertama menunjukkan maksimum *chamber* pada *chord line* dalam seperseratus *chord*.
- Angka kedua menunjukkan posisi maksimum *chamber* pada *chord line* dalam seperseratus *chord* dari *leading edge*.
- Dua angka terakhir merepresentasikan nilai maksimum *thickness* dalam seperseratus *chord*.

Oleh karena itu, untuk *airfoil* dengan NACA 0015 (seri empat angka), *chamber* maksimum adalah 0.0c yang terletak di 0.0c dari *leading edge*, dan maksimum *thickness* atau ketebalan maksimum adalah 0.15c. Dalam praktiknya, angka-angka ini biasanya dinyatakan dalam persen tali busur, yaitu: *camber* 0% di 0% c dengan ketebalan 15%. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6

2.5.3. Sifat-sifat *Airfoil*

Sifat-sifat *airfoil* dapat dikategorikan menjadi tiga, yaitu *attached flow regime*, *high lift/stall development regime*, dan *flat plate/fully stalled regime* (Clever dkk., 2013). Dalam *attached flow regime*, aliran mengalir di permukaan atas *airfoil* pada

sudut serang yang rendah (sudut serang di atas 7° untuk *airfoil* tipe DU-93-W 210). Pada kondisi ini, gaya *lift* akan meningkat seiring dengan bertambahnya sudut serang *airfoil*, sementara gaya *drag* tetap relatif kecil (Manwell, 2009).

Pada *high lift/stall development regime*, koefisien *lift* pada *airfoil* mengalami penurunan yang signifikan (dengan sudut serang antara 7° hingga 11° untuk *airfoil* tipe DU-93 W-210). Penurunan ini terjadi ketika sudut serang kritis *airfoil* terlampaui, yang berada di sekitar 15 derajat. Namun, hal ini sangat bergantung pada jenis fluida, *airfoil*, dan angka *Reynolds*. *High lift/stall development regime* menyebabkan efek *wake* yang mengurangi gaya *lift* dan meningkatkan gaya *drag* pada *airfoil* (Manwell, 2009).

Flat plate/fully stalled regime merupakan kondisi di mana sudut serang *airfoil* melebihi kondisi *high lift/stall development regime* hingga mencapai sudut maksimum 90° . Dalam kondisi ini, *airfoil* berfungsi seperti pelat datar, sehingga gaya *lift* dan gaya *drag* pada *airfoil* menjadi sama pada sudut serang 45° , dan gaya *lift* menjadi nol pada sudut serang 90° .

Pemahaman tentang sifat-sifat *airfoil* sangat penting untuk menganalisis karakteristik aerodinamika yang bervariasi tergantung pada sudut geometri *airfoil* yang berbeda. Oleh karena itu, karena variasi sifat aerodinamika *airfoil*, pemilihan *airfoil* untuk sudu turbin angin sangat mempengaruhi efisiensi turbin angin itu sendiri (Manwell, 2009).

2.6 Computational Fluid Dynamics (CFD)

Dinamika Fluida Komputasional adalah sistem analisis yang mencakup aliran fluida, cairan, udara, gas, dan aliran panas yang berkaitan dengan fenomena tertentu melalui perhitungan berbasis simulasi komputer. Dinamika Fluida Komputasional merupakan metode perhitungan yang melibatkan kontrol dimensi, luas, dan volume dengan memanfaatkan teknologi komputasi untuk menghitung setiap elemen pembagiannya. Prinsip dasar dari metode ini adalah membagi ruang yang berisi fluida menjadi beberapa bagian, yang sering disebut sebagai sel, dan proses ini dikenal dengan istilah *Meshing*. Bagian-bagian yang terpisah tersebut berfungsi sebagai kontrol untuk perhitungan yang akan dilakukan oleh aplikasi. Selanjutnya, pada setiap titik kontrol perhitungan, aplikasi akan melakukan penghitungan dengan batasan *domain* dan kondisi batas yang telah ditentukan. Prinsip ini banyak diterapkan dalam proses perhitungan yang menggunakan bantuan komputasi komputer. (D. Patil & Kadam, 2023).

Pada umumnya ada 3 bagian proses melakukan proses simulasi CFD yaitu :

a. *Pre-Processing*

Pre-Processing adalah fase di mana data dimasukkan, mulai dari definisi *domain* hingga penentuan kondisi batas atau *boundary condition*. Pada tahap ini, objek atau ruang yang akan dianalisis dibagi menjadi sejumlah grid tertentu, yang sering disebut sebagai *Meshing*.

b. *Processing*

Tahap berikutnya adalah pemrosesan, di mana pada tahap ini dilakukan perhitungan terhadap data input menggunakan persamaan yang terlibat secara iteratif. Ini berarti bahwa perhitungan dilakukan hingga hasilnya mendekati kesalahan terkecil atau mencapai nilai konvergen. Perhitungan dilakukan secara menyeluruh terhadap volume kontrol dengan proses integrasi persamaan diskrit .

c. *Post-Processing*

Tahap terakhir adalah pasca-pemrosesan, di mana hasil perhitungan diinterpretasikan ke dalam bentuk gambar, grafik, bahkan animasi dengan pola warna tertentu .

2.7 ANSYS FLUENT

Ansys Fluent merupakan salah satu perangkat lunak Computational Fluid Dynamics

(CFD) yang paling banyak digunakan dalam analisis aliran fluida, perpindahan panas, dan fenomena turbulensi pada berbagai aplikasi rekayasa. Secara umum, proses simulasi di *Ansys Fluent* terdiri atas beberapa tahapan utama. Pertama, pembuatan geometri dan *Meshing*, di mana *domain* dibagi menjadi elemen-elemen heksagonal, tetrahedral, atau polyhedral. Kedua, penetapan *boundary conditions* seperti kecepatan *Inlet*, tekanan *Outlet*, dinding (*no-slip*), serta parameter fluida seperti densitas dan viskositas. Ketiga, pemilihan model fisik, misalnya model turbulensi $k-\epsilon$, $k-\omega$ SST, atau LES, yang masing-masing memiliki tingkat keakuratan dan kebutuhan komputasi berbeda (Menter, 1994). Tahap berikutnya adalah proses solution initialization dan iterasi numerik, menggunakan algoritma seperti SIMPLE, PISO, atau Coupled Solver untuk menghubungkan persamaan tekanan-kecepatan.

Dalam simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD), ketepatan hasil sangat dipengaruhi oleh dua faktor utama, yaitu pemilihan *mesh* dan pendekatan pemodelan turbulensi. *Mesh* berfungsi untuk mendiskritisasi *domain* aliran menjadi elemen-elemen kecil sehingga persamaan aliran dapat diselesaikan secara numerik. Kualitas *mesh*, terutama di daerah dengan gradien kecepatan tinggi dan dekat permukaan bilah turbin, memiliki peran penting dalam menangkap fenomena aerodinamika dan interaksi aliran-struktur dengan akurat.

Ansys Fluent juga menyediakan berbagai alat visualisasi seperti kontur tekanan, kontur kecepatan, *vector field*, *streamline*, serta grafik koefisien gaya (*lift*, *drag*) untuk memudahkan interpretasi fenomena aerodinamika. Kemampuan ini menjadikan *Ansys Fluent* sangat efektif untuk menganalisis aliran kompleks, termasuk pada desain turbin angin tipe *Darrieus* yang melibatkan interaksi *dynamic stall*, rotasi, dan fenomena *wake interaction*. Keunggulan utama *Ansys Fluent* adalah fleksibilitas modelnya, stabilitas penyelesaiannya, serta tingkat akurasi yang tinggi, sehingga banyak digunakan dalam industri kelautan, energi terbarukan, dirgantara, otomotif, hingga proses manufaktur.

2.7.1. Jenis – Jenis Elemen Mesh

Pada dasarnya, *Mesh* atau *grid* adalah fondasi utama dalam simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD). Ia berfungsi sebagai representasi diskrit dari *domain* fisik yang kontinu. Proses pembuatan *Mesh*, atau *Meshing*, merupakan langkah penting di mana geometri objek dan ruang aliran di sekitarnya dibagi menjadi banyak elemen kecil dan terhingga, mirip dengan potongan-potongan *puzzle* yang membentuk gambar utuh. Transformasi ini memungkinkan persamaan matematika yang mengatur perilaku fluida yaitu sistem persamaan *Navier-Stokes* yang bersifat diferensial parsial dan *non-linier* untuk disederhanakan menjadi sekumpulan persamaan aljabar yang dapat diselesaikan secara numerik oleh komputer.

Secara filosofis, *Mesh* berfungsi sebagai penghubung antara dunia fisik yang kontinu dan dunia komputasi yang digital. Setiap elemen *Mesh* berperan sebagai 'volume kontrol' kecil, di mana prinsip-prinsip kekekalan massa, momentum, dan energi diterapkan. Solusi akhir dari simulasi, seperti distribusi tekanan, kecepatan, dan suhu, kemudian dihitung dan disimpan pada titik-titik tertentu dalam *Mesh* ini, baik di sudut-sudut (*node*), di pusat elemen (*cell center*), atau di bidang antar elemen (*face*). Kualitas dari solusi numerik sangat bergantung pada seberapa baik *Mesh* dapat menangkap geometri yang sebenarnya dan merepresentasikan gradien-gradien penting dalam aliran, seperti di lapisan batas (*boundary layer*) atau daerah geser. Oleh karena itu, proses *Meshing* bukan hanya sekadar membuat jaringan titik, melainkan juga upaya untuk menciptakan kerangka kerja komputasi yang optimal, yang harus seimbang antara akurasi, stabilitas numerik, dan biaya waktu serta sumber daya komputasi.

a. *Mesh* berdasarkan struktur

Mesh berdasarkan struktur dibagi menjadi dua kategori, yaitu terstruktur (*structured*) dan tidak terstruktur (*unstructured*). *Mesh* terstruktur (*structured*) ditandai dengan pola pengaturan titik yang sangat teratur, di mana setiap titik interior dapat dikenali dengan indeks (i, j, k) yang unik, mirip dengan kotak-kotak dalam sistem koordinat kartesian yang terdistorsi. Pola ini menghasilkan matriks data yang teratur, yang memungkinkan algoritma solusi yang lebih efisien dan konvergensi yang lebih cepat. Namun, kelemahan utama dari jenis *mesh* ini adalah rigiditasnya; jenis *mesh* ini sangat sulit diterapkan pada geometri yang sangat kompleks tanpa menghasilkan elemen yang terdistorsi secara signifikan.

Di sisi lain, *Mesh* tidak terstruktur (*unstructured*) tidak terikat oleh pola indeks yang tetap. Elemen-elemennya (biasanya segitiga untuk 2D dan tetrahedron untuk 3D) disusun dalam pola yang tidak teratur, memberikan fleksibilitas luar biasa untuk mengisi *domain* dengan bentuk apa pun, termasuk yang memiliki rongga dan lengkungan kompleks. Pengorbanan yang harus dilakukan adalah data konektivitas antar elemen harus disimpan secara eksplisit, yang memerlukan lebih banyak memori, dan proses solusi numeriknya bisa sedikit lebih lambat.

Sebagai alternatif, *mesh* hibrida (*hybrid*) menggabungkan kedua pendekatan, seperti menggunakan elemen heksahedral terstruktur di daerah aliran utama dan elemen tetrahedral tidak terstruktur untuk mengisi celah-celah yang rumit.

b. *Mesh* berdasarkan bentuk elemennya

Untuk analisis dua dimensi (planar atau axisymmetric) :

1) Segitiga (*Triangular*)

Elemen segitiga adalah poligon dengan tiga sisi yang menawarkan fleksibilitas geometris yang tinggi. Algoritma pembentukan *grid* tak terstruktur (*unstructured meshing*) seperti metode *Delaunay* memanfaatkan elemen ini untuk mendiskritisasi geometri yang tidak teratur atau sangat kompleks, di mana pola terstruktur sulit diterapkan. Namun, dari segi numerik, elemen segitiga memiliki kelemahan dalam menyelesaikan lapisan batas (*boundary layer*). Orientasi sisi-sisi segitiga yang sering kali tidak sejajar dengan arah aliran utama dapat menyebabkan difusi numerik yang berlebihan, sehingga memerlukan kerapatan *grid* yang jauh lebih tinggi dibandingkan elemen segiempat untuk mencapai tingkat akurasi yang setara.

2) Segiempat (*Quadrilateral*)

Elemen segiempat adalah poligon dengan empat sisi yang umumnya lebih diunggulkan karena memberikan akurasi yang lebih tinggi dengan jumlah elemen yang lebih sedikit. Keunggulan utama elemen ini terletak pada kemampuannya untuk meminimalkan difusi numerik, terutama ketika sisi-sisi elemen dapat dijajarkan (*aligned*) dengan arah dominan aliran fluida. Dalam aplikasi aliran viskos di dekat dinding, penggunaan elemen segiempat sangat penting untuk menangkap gradien kecepatan tegak lurus dinding secara akurat tanpa membebani biaya komputasi secara berlebihan. Dalam simulasi tiga dimensi, variasi bentuk elemen menjadi lebih kaya di mana volume kendali dibentuk oleh polihedron yang mengisi *domain* komputasi. Jenis elemen yang umum digunakan meliputi :

1) *Tetrahedral*

Elemen tetrahedral adalah analog 3D dari segitiga, berbentuk

piramida dengan alas segitiga (terdiri dari 4 sisi dan 4 *node*). Elemen ini sangat fleksibel dan menjadi pilihan default untuk *meshing* otomatis pada geometri kompleks karena algoritma generasinya sangat tangguh (*robust*). Meskipun demikian, elemen *tetrahedral* dianggap paling tidak efisien secara numerik. Untuk mengisi volume yang sama dengan tingkat resolusi spasial yang setara, diperlukan jumlah elemen *tetrahedral* yang jauh lebih banyak biasanya dengan faktor 5 hingga 6 kali lipat dibandingkan elemen *heksahedral*. Selain itu, interpolasi gradien pada muka elemen tetrahedral sering kali kurang presisi jika *grid* tidak cukup halus.

2) *Heksahedral*

Elemen *heksahedral* adalah analog tiga dimensi dari segiempat, berbentuk balok atau kubus (6 sisi, 8 *node*). Elemen ini sering dianggap sebagai standar emas dalam CFD karena sangat efisien dan akurat. Keunggulan numerik elemen ini terletak pada sifat ortogonalitasnya, di mana sudut antar sisi yang mendekati 90 derajat meminimalkan kesalahan diskritisasi saat menghitung fluks difusi. Namun, tantangan utama dalam penggunaan elemen ini adalah proses pembuatannya, penerapan *grid heksahedral* pada geometri kompleks sering kali memerlukan usaha manual yang intensif (*decomposition*) dibandingkan metode otomatis.

3) Prisma (*Wedge/Prism*)

Elemen prisma adalah hibrida yang memiliki alas segitiga dan sisi tegak segiempat. Penggunaan elemen ini biasanya dikhususkan untuk melapisi permukaan padat (*inflation layer*) guna menyelesaikan lapisan batas yang tipis namun penting. Di area ini, gradien aliran tegak lurus dinding sangat dominan. Elemen prisma memungkinkan penggunaan rasio aspek (*aspect ratio*) yang tinggi untuk menangkap gradien tajam tersebut secara efisien, yang tidak dapat dilakukan dengan baik oleh elemen *tetrahedral* isotropik.

4) Piramida (*Pyramid*)

Elemen piramida memiliki alas segiempat dan empat sisi segitiga. Dalam strategi *meshing* hibrida, elemen ini berperan vital sebagai elemen transisi yang menghubungkan permukaan *mesh heksahedral*/segiempat dengan volume *mesh tetrahedral*. Tanpa adanya elemen piramida, akan muncul ketidaksesuaian antarmuka (*non-conformal interface*) antara elemen *heksahedral* dan *tetrahedral* yang dapat mengurangi akurasi lokal dalam perhitungan fluks.

5) *Polihehedral*

Elemen polihedral adalah inovasi terbaru dalam teknologi *meshing*, di mana satu sel volume dibentuk oleh banyak muka poligon (umumnya antara 12 hingga 16 *face*). Berbeda dengan elemen *tetrahedral* yang hanya memiliki 4 tetangga, elemen polihedral menawarkan konektivitas yang lebih baik antar sel karena memiliki lebih banyak tetangga. Hal ini memungkinkan aproksimasi gradien di pusat sel dihitung berdasarkan informasi dari lebih banyak arah, yang pada gilirannya meningkatkan akurasi linear. Penelitian menunjukkan bahwa jenis *mesh* ini memiliki keunggulan dalam mengurangi jumlah elemen total untuk tingkat akurasi yang setara dan mempercepat konvergensi solusi, meskipun algoritma pembuatannya lebih kompleks.

2.7.2. Model – Model Turbulensi

Dalam Dinamika Fluida Komputasional (CFD), simulasi aliran turbulen dikelompokkan berdasarkan tingkat resolusi skala turbulensi yang diselesaikan secara numerik. Secara umum, pendekatan simulasi turbulen terbagi menjadi dua kategori utama, yaitu Direct Numerical Simulation (DNS) dan Indirect Numerical Simulation (INS) (Pope, 2000).

Direct Numerical Simulation (DNS) adalah metode simulasi yang paling dasar, di mana semua skala turbulensi, dari eddy terbesar hingga skala disipatif terkecil, diselesaikan secara langsung tanpa penerapan model turbulensi. Pendekatan ini menawarkan tingkat akurasi yang sangat tinggi karena tidak melibatkan asumsi dalam pemodelan turbulensi (Pope, 2000).

Meskipun sangat akurat, DNS memerlukan resolusi *mesh* dan langkah waktu yang sangat kecil, sehingga biaya komputasi meningkat secara eksponensial seiring dengan bertambahnya bilangan Reynolds. Oleh karena itu, DNS tidak praktis untuk digunakan dalam simulasi rekayasa dengan bilangan Reynolds tinggi, seperti aliran pada turbin angin, dan umumnya terbatas pada penelitian fundamental tentang turbulensi (Yang & Griffin, 2021).

Sebagai alternatif yang lebih efisien, pendekatan Indirect Numerical Simulation (INS) telah dikembangkan, di mana efek turbulensi tidak sepenuhnya diselesaikan secara langsung, melainkan dimodelkan dengan menggunakan pendekatan matematis tertentu. INS memungkinkan simulasi aliran turbulen yang kompleks dengan kebutuhan komputasi yang lebih rendah dan lebih sesuai untuk aplikasi teknik (Pope, 2000). Pendekatan INS mencakup beberapa metode utama, termasuk Reynolds-Averaged Navier–Stokes (RANS), Unsteady Reynolds-Averaged Navier–Stokes (URANS), Large Eddy Simulation (LES), serta metode hibrida RANS–LES. Setiap metode memiliki tingkat resolusi turbulensi dan kebutuhan komputasi yang berbeda (Spalart, 2021).

a. RANS

Pendekatan Reynolds-Averaged Navier–Stokes (RANS) diperoleh melalui perataan waktu pada persamaan *Navier–Stokes*, yang memungkinkan aliran turbulen direpresentasikan sebagai aliran rata-rata. Proses perataan ini menghasilkan suku tambahan yang dikenal sebagai *Reynolds stress*, yang mencerminkan pengaruh fluktuasi turbulen terhadap aliran rata-rata, sehingga diperlukan model turbulensi sebagai penutup (Pope, 2000). Pendekatan RANS banyak diterapkan dalam analisis aerodinamika turbin angin karena dapat memberikan prediksi parameter performa rata-rata, seperti koefisien daya (C_p), koefisien torsi (C_t), dan rasio kecepatan ujung (TSR), dengan tingkat akurasi yang memadai serta biaya komputasi yang relatif efisien (Sørensen, 2011).

Model turbulensi yang sering diterapkan dalam konteks RANS mencakup model $k-\epsilon$ dan model $k-\omega$. Model $k-\epsilon$ adalah model dua-persamaan yang menyelesaikan persamaan energi turbulen (k) serta laju disipasi energi turbulen (ϵ). Model ini dirancang untuk aliran turbulen isotropik dan menawarkan kestabilan numerik yang baik pada aliran dengan gradien tekanan rendah, sehingga banyak digunakan dalam simulasi aliran teknik (Che Sidik dkk., 2020).

Pengembangan model $k-\epsilon$ menghasilkan varian RNG $k-\epsilon$ dan Realizable $k-\epsilon$ yang bertujuan untuk meningkatkan akurasi pada aliran dengan tingkat regangan dan rotasi yang lebih tinggi. Namun, model $k-\epsilon$ memiliki keterbatasan dalam memprediksi aliran yang dekat dengan dinding serta fenomena separasi aliran yang kuat, yang sering terjadi pada aliran aerodinamika bilah turbin angin

(N. Li dkk., 2020).

Model $k-\omega$ adalah model dua-persamaan yang memanfaatkan energi turbulen (k) dan laju disipasi spesifik (ω) sebagai variabel turbulensi. Salah satu keunggulan utama dari model ini adalah kemampuannya dalam memprediksi aliran yang dekat dengan dinding tanpa memerlukan fungsi dinding, sehingga sangat sesuai untuk digunakan dalam simulasi dengan resolusi *mesh* yang baik di area dinding. Namun, model $k-\omega$ juga diketahui memiliki sensitivitas yang tinggi terhadap kondisi batas di daerah aliran bebas (Rahman dkk., 2019).

Model Shear Stress Transport (SST) $k-\omega$ dirancang untuk mengintegrasikan kelebihan model $k-\omega$ di dekat permukaan dan model $k-\epsilon$ di area aliran bebas dengan menggunakan fungsi pencampuran (*blending function*). Pendekatan ini memberikan kemampuan untuk memprediksi dengan lebih tepat mengenai pemisahan aliran dan gradien tekanan yang merugikan, yang sering muncul pada bilah turbin angin dalam kondisi sudut serang yang tinggi (Adeel-Ur-Rehman dkk., 2024).

b. URANS

Unsteady Reynolds-Averaged Navier–Stokes (URANS) adalah suatu pengembangan dari pendekatan RANS yang mempertahankan ketidakstabilan aliran dalam *domain* waktu. Berbeda dengan RANS *steady* yang hanya memprediksi kondisi aliran rata-rata, URANS dapat menangkap fenomena aliran tidak stabil berskala besar, seperti fluktuasi periodik, dinamika pusaran, dan vortex shedding, sementara efek turbulensi skala kecil tetap dimodelkan menggunakan model turbulensi RANS (Armin dkk., 2025). Pendekatan URANS biasanya diterapkan pada situasi aliran yang secara fisik tidak stabil, seperti aliran yang berosilasi atau interaksi antara fluida dan struktur. Namun, jika dibandingkan dengan RANS, URANS membutuhkan waktu komputasi yang lebih lama karena penyelesaiannya dilakukan secara transien (Israel, 2023).

2.8 Formulasi Matematis Yang Digunakan

2.8.1 Prinsip Dasar Konversi Energi Angin

Energi angin pada dasarnya adalah energi kinetik dari massa udara yang bergerak. Energi kinetik (K E) dari sebuah parsel udara dengan massa (m) yang bergerak dengan kecepatan (V) adalah :

$$K E = \frac{1}{2} mV^2 \dots\dots\dots(2.5)$$

Daya (P) adalah laju energi per satuan waktu. Oleh karena itu, daya angin adalah aliran energi kinetik per satuan waktu, yang dapat dinyatakan sebagai :

$$P = \frac{d(K E)}{dt} = \frac{1}{2} \left(\frac{dm}{dt} \right) V^2 \dots\dots\dots(2.6)$$

Di mana $\frac{dm}{dt}$ adalah laju aliran udara (m) yang melewati suatu area A (area sapuan rotor turbin). Laju aliran massa ini didefinisikan sebagai densitas udara (ρ) dikalikan dengan volume aliran per detik ($A \times V$) :

$$m = \rho AV \dots\dots\dots(2.7)$$

Dengan mensubstitusi m kembali ke persamaan daya, kita mendapatkan

persamaan fundamental untuk total daya yang tersedia di angin (bukan daya yang diekstraksi) :

$$P_{Angin} = \frac{1}{2}(\rho AV)V^2 = \frac{1}{2}\rho AV^3 \dots\dots\dots(2.8)$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa daya yang tersedia berbanding lurus dengan densitas udara (ρ) area sapuan rotor (A), dan pangkat tiga dari kecepatan angin (V^3). Jumlah kerapatan udara di permukaan laut adalah $1,225 \text{ kg/m}^3$. Hubungan pangkat tiga ini sangat penting; melipatgandakan kecepatan angin akan meningkatkan daya yang tersedia sebanyak delapan kali lipat.

2.8.2 Daya Turbin Angin

Daya Turbin Angin adalah daya yang dihasilkan oleh turbin angin sebagai akibat adanya angin yang menghantam sudu turbin sehingga sudu turbin bergerak berputar. Sehingga, daya yang dihasilkan oleh sudu turbin yang berputar adalah:

$$P_{Turbin} = T \cdot \omega \dots\dots\dots(2.9)$$

- Dimana :
- P_{Turbin} : Daya Yang Dihasilkan Turbin (Watt)
- T : Torsi (N.m)
- ω : Kecepatan Sudut (rad/s)

2.8.3 Tip Speed Ratio (TSR)

TSR adalah perbandingan antara kecepatan di ujung sudu turbin angin dengan kecepatan angin, sehingga dapat dirumuskan:

$$TSR = \lambda = \frac{\omega \cdot R}{v_0} \dots\dots\dots(2.10)$$

- Dimana :
- λ : Tip Speed Ratio
- ω : Kecepatan Sudut Rotor Turbin (rad/s)
- R : Jari-Jari Rotor (m)
- v : Kecepatan Angin (m/s)

Semakin tinggi nilai Rasio Kecepatan Tip, semakin tinggi pula efisiensi turbin angin (Hansen, 2015), namun hal ini juga menunjukkan bahwa akan terjadi tingkat kebisingan yang tinggi. Umumnya, turbin angin dengan kecepatan putar rendah memiliki nilai rasio kecepatan tip antara 1 hingga 4, sedangkan turbin angin dengan kecepatan tinggi memiliki nilai rasio kecepatan tip antara 5 hingga 9.

Untuk pertimbangan dalam perencanaan desain awal, nilai Rasio Kecepatan Tip yang optimal untuk turbin angin dengan jumlah sudu 1 hingga 3 adalah sekitar 7 (Burton, 2009) yang menunjukkan bahwa turbin angin dapat beroperasi dengan koefisien daya (*power coefficient*) yang hampir maksimal. Hubungan antara kecepatan putar dan Rasio Kecepatan Tip ditunjukkan dalam persamaan berikut (Manwell, 2009).

$$\lambda = \frac{2\pi nR}{60v_0} \dots\dots\dots(2.11)$$

Dimana :
 λ : Tip Speed Ratio
 n : Kecepatan Sudut Rotor Turbin (rad/s)
 R : Jari-Jari Rotor (m)
 V_0 : Kecepatan Awal Udara (m/s)

Berdasarkan persamaan tersebut juga dapat dijelaskan bahwa terdapat hubungan yang berbanding terbalik antara kecepatan putar rotor dengan jarak sudu. Pada nilai *Tip Speed Ratio* yang sama, sudu dengan jarak yang besar memiliki kecepatan putar yang rendah.

2.8.4 Koefisien Daya (C_p)

Koefisien daya merupakan aspek krusial dalam perancangan turbin angin karena menunjukkan seberapa banyak energi angin yang dapat diambil dari energi kinetik angin yang melewati penampang turbin. Koefisien daya memiliki dampak signifikan terhadap kinerja turbin angin dan dipengaruhi oleh konstruksi serta desain turbin angin (Wardhana & Fridayana, 2018). Perhitungan koefisien daya (C_p) pada turbin angin dapat dilakukan dengan rumus sebagai berikut :

$$C_p = \frac{T \cdot \omega}{0.5 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3} \dots \dots \dots (2.12)$$

Dimana :
 T : Torsi (N.m)
 ω : Kecepatan Sudut (rad/s)
 ρ : Massa Jenis Udara (kg/m³)
 A : Luas Penampang Sudu (m²)

Ada keterkaitan antara koefisien daya dan koefisien momen. Untuk memahami hubungan tersebut, koefisien daya dan koefisien momen dapat dinyatakan dalam persamaan berikut.:

$$C_p = \lambda \cdot C_m \dots \dots \dots (2.13)$$

Dimana :
 C_p : Koefisien Daya
 λ : Tip Speed Ratio
 C_m : Koefisien Momen

2.8.5 Koefisien Torsi (C_T)

Koefisien torsi atau *torque coefficient* (C_T) merupakan parameter penting dalam analisis aerodinamika turbin angin. Koefisien torsi (C_T) digunakan untuk menggambarkan kemampuan turbin angin menghasilkan torsi terhadap energi kinetik angin yang tersedia. Nilainya dihitung dengan rumus :

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho A R v^2} \dots \dots \dots (2.14)$$

Dimana :
 T : Torsi (N.m)
 ρ : Massa Jenis Udara (Kg/m³)

- A : Luas Sapuan Rotor (m²)
- R : Jari-jari Rotor
- V : Kecepatan Angin (m/s)

Hal ini dapat berhubungan dengan koefisien daya (C_p) yang dapat dinyatakan dengan rumus :

$$C_p = C_T \cdot \lambda \dots\dots\dots(2.15)$$

- Dimana :
- C_p : Koefisien Daya
- C_T : Koefisien Torsi
- λ : Tip Speed Ratio (TSR)

Untuk Turbin *Fibonacci-Spiral*, yang merupakan turbin sumbu horizontal yang dikembangkan dengan konfigurasi bilah mengikuti pola spiral *Fibonacci* (Golden Ratio) terdapat sedikit perbedaan. Setiap bilah menghasilkan gaya angkat (L_n) dan gaya hambat (D_n) yang bekerja pada sudut azimut θ_n terhadap arah angin. Komponen gaya tangensial pada masing- masing bilah yang berperan dalam pembentukan torsi dinyatakan sebagai berikut:

$$F_{t,n} = L_n \sin(\phi_n) - D_n \cos(\phi_n) \dots\dots\dots(2.16)$$

- Dimana :
- F_{t,n} : Gaya Tangensial bilah ke-n (N)
- L_n : Gaya Angkat Bilah ke-n (N)
- D_n : Gaya Hambat Bilah ke-n (N)
- φ_n : Sudut relatif antara arah angin dan bidang rotasi bilah (°)

Torsi pada bilah ke-n kemudian dihitung sebagai :

$$T_n = F_{t,n} \cdot r_n \dots\dots\dots(2.17)$$

- Dimana :
- r_n : Jarak Radial Posisi bilah ke-n dari pusat rotor.
- F_{t,n} : Gaya Tangensial bilah ke-n (N)
- T_n : Torsi pada bilah ke-n

Sehingga torsi total untuk turbin *Fibonacci-Spiral* dengan N bilah dihitung sebagai:

$$T_{total} = \sum_{n=1}^N (L_n \sin(\phi_n) - D_n \cos(\phi_n)) \cdot r_n \dots\dots\dots(2.18)$$

Pada desain *Fibonacci -Spiral*, posisi bilah mengikuti pola spiral berdasarkan rasio emas, sehingga setiap bilah memiliki sudut rotasi θ_n terhadap sumbu horizontal yang dihitung sebagai:

$$\theta_n = n \times 137.5^\circ$$

di mana 137,5° adalah *golden angle* yang merepresentasikan jarak sudut antar

bilah pada spiral *Fibonacci*. Nilai ini menyebabkan setiap bilah menerima aliran udara dengan sudut serang berbeda, sehingga menghasilkan variasi gaya L_n dan D_n yang unik untuk setiap posisi. Dengan mempertimbangkan distribusi tersebut, rata-rata torsi total dapat dihitung sebagai :

$$T_{Avg} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (L_n \sin(\phi_n) - D_n \cos(\phi_n)) \cdot r_n \dots \dots \dots (2.19)$$

Dan koefisien torsi total menjadi :

$$C_T = \frac{T_{Avg}}{\frac{1}{2} \rho A R V^2} \dots \dots \dots (2.20)$$

2.8.6 Teori Momentum dan Model Actuator Disc

Teori momentum merupakan dasar dari analisis aliran fluida yang digunakan untuk memahami bagaimana energi kinetik angin dikonversi menjadi energi mekanik oleh turbin. Dalam konteks turbin angin, teori ini diwujudkan melalui model cakram aktuator (*actuator disc model*), yang memandang rotor turbin sebagai sebuah cakram tipis ideal yang menyebabkan penurunan kecepatan angin karena adanya ekstraksi energi. Secara sederhana, hukum kekekalan momentum digunakan untuk menentukan gaya dorong (*thrust*) yang bekerja pada rotor akibat perbedaan kecepatan udara di depan dan di belakang cakram.

$$T = m (V_1 - V_2) \dots \dots \dots (2.21)$$

- Dimana :
- T : Gaya Dorong (N)
- $\dot{m} (\rho Av)$: Laju Massa Udara Melewati Rotor (Kg/S)
- V_1 : Kecepatan Angin Sebelum Rotor (M/S)
- V_2 : Kecepatan Angin Setelah Rotor (M/S)

Dengan v sebagai kecepatan rata-rata di bidang rotor, maka diperoleh :

$$v = \frac{V_1 + V_2}{2} \dots \dots \dots (2.22)$$

Substitusi ke persamaan momentum menghasilkan :

$$T = \rho Av (V_1 - V_2)$$

Energi mekanik per satuan waktu (daya) yang diserap oleh rotor adalah :

$$P = T \cdot v = \rho Av (V_1 - V_2) v \dots \dots \dots (2.23)$$

2.8.7 Faktor Induksi Aksial

Faktor induksi aksial (a) menggambarkan seberapa besar turbin mengurangi kecepatan aliran udara ketika melewati bidang rotor. Secara matematis, kecepatan angin di bidang rotor dinyatakan sebagai :

$$v = V_1 (1 - a) \dots \dots \dots (2.24)$$

Dimana :
 V_1 : Jarak Radial Posisi bilah ke-n dari pusat rotor.
 v : Gaya Tangensial bilah ke-n (N)
 a : Faktor Induksi aksial ($0 \leq a \leq 0.5$)

Sementara kecepatan di belakang rotor adalah :

$$V_2 = V_1(1 - 2a) \dots \dots \dots (2.25)$$

Substitusi persamaan ini ke dalam model momentum menghasilkan gaya dorong :

$$T = 2\rho AV_1^2 a(1 - a)$$

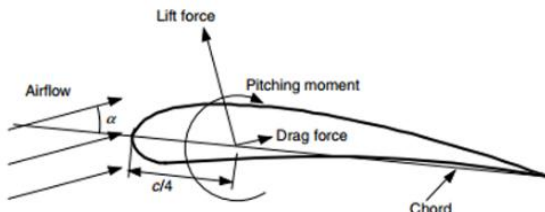
dan daya yang diserap rotor menjadi:

$$P = 2\rho AV_1^3 a(1 - a)^2 \dots \dots \dots (2.26)$$

Rumus ini menunjukkan daya yang dihasilkan turbin bergantung langsung pada nilai faktor induksi aksial (a).

2.8.8 Koefisien Lift dan Drag

Pada umumnya, terdapat dua gaya dan satu momen yang berlaku pada *airfoil*, diantaranya yaitu gaya angkat (*lift*), gaya hambatan (*drag*), dan pitching moment atau juga disebut koefisien momen.



Gambar 2. 7 Gaya lift, drag, dan pitching

Gaya angkat digunakan sebagai cara untuk mengangkat suatu benda yang disebabkan oleh aliran udara yang mengarah benda tersebut. Menurut Manwell dkk (Manwell, 2009) gaya *drag* adalah jenis gaya gesek yang melibatkan arah aliran udara. Gaya *drag* disebabkan oleh perbedaan tekanan antara bagian atas depan *airfoil* dan udara, yang disebabkan oleh aliran udara, serta oleh terjadinya gesekan antara keduanya. Hansen menyatakan bahwa kondisi terbaik yang diperlukan untuk meningkatkan efisiensi turbin angin adalah agar gaya angkat harus dimaksimalkan jika dibandingkan dengan gaya *drag*. (Hansen, 2015). Nilai koefisien *lift* (C_L) dan koefisien *drag* (C_D) dapat diketahui menggunakan persamaan berikut.

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V^2_0 A r_c} \dots \dots \dots (2.27)$$

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2_0 A r_c} \dots \dots \dots (2.28)$$

Dimana	:
C_D	: Koefisien <i>Drag</i>
C_L	: Koefisien <i>Lift</i>
ρ	: Massa Jenis Udara
A	: Luas Penampang Sudu (m^2)
r_c	: Panjang <i>airfoil</i> , biasa disebut chord (m)
V_0	: Kecepatan Awal Udara (m/s)
F_L	: Gaya <i>Lift</i> (N)
F_D	: Gaya <i>Drag</i> (N)

2.8.9 Batas *Betz*

Teori Batas *Betz* atau *Betz Limit Theory* dikemukakan oleh Albert *Betz* pada tahun 1919. Teori ini menjelaskan batas maksimum energi kinetik angin yang dapat dikonversi menjadi energi mekanik oleh turbin angin. *Betz* menunjukkan bahwa tidak mungkin turbin angin menangkap seluruh energi dari angin, karena sebagian energi harus tetap tersisa agar udara dapat terus mengalir melewati turbin. *Betz* menunjukkan bahwa nilai maksimum energi angin yang dapat diekstrak menjadi energi kinetik hanya sebesar $(\frac{16}{27} = 0,593)$ atau 59,3 %.

Halaman ini sengaja dikosongkan