

BAB II

TEORI PENUNJANG DAN KAJIAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Energi angin

Angin merupakan aliran udara yang terjadi akibat pergerakan udara dari area yang memiliki tekanan udara lebih tinggi menuju area dengan tekanan udara yang lebih rendah. Fenomena ini dipicu oleh adanya perbedaan tekanan udara yang dihasilkan dari variasi suhu udara. Perbedaan suhu tersebut pada dasarnya disebabkan oleh pemanasan atmosfer yang tidak merata, yang terjadi akibat distribusi sinar matahari yang bervariasi di permukaan bumi. Ketika angin bergerak, ia membawa energi kinetik yang dapat dimanfaatkan. Energi kinetik yang terkandung dalam angin ini memiliki potensi untuk dikonversi atau diubah ke dalam berbagai bentuk energi lain, seperti energi listrik maupun energi mekanik. Proses konversi ini dilakukan melalui perangkat seperti kincir angin atau turbin angin, yang dirancang untuk menangkap dan memanfaatkan energi dari pergerakan angin. Karena peranannya dalam mengubah energi angin menjadi bentuk energi yang lebih berguna, kincir angin maupun turbin angin sering kali disebut sebagai Sistem Konversi Energi Angin (SKEA) (Ikhsan & Hipi, 2011).

Energi memegang peran krusial dalam kehidupan manusia, sehingga tidak dapat dipisahkan dari aktivitas sehari-hari. Beragam perangkat pendukung seperti motor penggerak, peralatan rumah tangga, dan mesin-mesin industri hanya dapat beroperasi jika tersedia energi. Berdasarkan sifat pembaruannya, energi terbagi menjadi dua jenis: energi terbarukan dan energi nonterbarukan. Energi terbarukan adalah energi yang dapat diperbarui dan tersedia secara berkelanjutan, dengan sumber utamanya berasal dari alam, seperti air, angin, dan sinar matahari. Sebaliknya, energi nonterbarukan atau konvensional berasal dari fosil makhluk hidup yang telah lama mati dan terpendam di dalam tanah, seperti batu bara dan minyak bumi. Penggunaan energi konvensional masih sangat dominan hingga saat ini. Namun, karena sifatnya yang tidak dapat diperbarui, energi ini akan habis jika terus digunakan tanpa pengelolaan yang bijak (Octari et al., 2024).

Pemanfaatan energi angin melibatkan dua tahap konversi energi. Pertama, aliran angin menggerakkan *rotor* (baling-baling), menyebabkan *rotor* berputar mengikuti arah angin. Selanjutnya, putaran rotor diteruskan ke generator, yang kemudian menghasilkan arus listrik. Dengan demikian, tahapan konversi energi dimulai dari energi kinetik angin menjadi energi gerak *rotor*, lalu diubah menjadi energi listrik (Habibie et al., 2011).

2.1.2 Fibonacci

Deret *Fibonacci* adalah sebuah urutan angka di mana setiap angka dihasilkan dari penjumlahan dua angka sebelumnya. Deret ini dimulai dengan angka 0 dan 1, yang kemudian menghasilkan angka 1 sebagai jumlah dari keduanya. Proses ini berlanjut dengan menambahkan angka saat ini dengan angka sebelumnya untuk menghasilkan angka berikutnya dalam deret. Sebagai contoh, setelah 0 dan 1, angka berikutnya adalah 1 ($0 + 1$), kemudian 2 ($1 + 1$), lalu 3 ($1 + 2$), dan

seterusnya. Adapun untuk mendemonstrasikan lebih lanjut proses ini, sepuluh angka *Fibonacci* pertama diilustrasikan (pada gambar 2.1). Baris ketiga kolom 1 mengilustrasikan perhitungan sederhana yang diperlukan untuk mendapatkan angka *Fibonacci* (Herraprantanti & Saputro, 2022).

F0	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
0	1	1	2	3	5	8	13	21	34	55
		0+1=1	1+1=2	2+1=3	3+2=5	5+3=8	8+5=13	13+8=21	21+13=34	34+21=55

gambar 2. 1Angka Fibonacci Pertama dan Derivasi

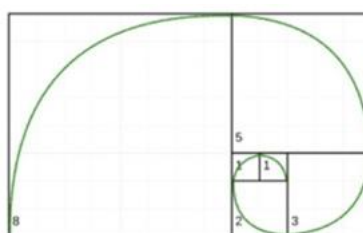
Sumber: (Herraprantanti & Saputro, 2022)

Proses ini dapat dilihat sebagai langkah sederhana, tetapi memiliki aplikasi yang luas dalam berbagai bidang, termasuk matematika, sains, seni, dan teknologi. Deret Fibonacci dikenal tidak hanya karena logika matematikanya yang intuitif tetapi juga karena hubungannya dengan konsep "Rasio Emas" atau *Golden Ratio*. Rasio ini muncul ketika angka dalam deret Fibonacci dibagi dengan angka sebelumnya, menghasilkan nilai mendekati 1,618. Rasio ini sering ditemukan dalam pola alami, seperti susunan daun pada tanaman, bentuk spiral kerang, dan distribusi biji bunga matahari, menunjukkan efisiensi dan harmoni dalam struktur alamnya. Ketika serangkaian kotak dibuat dengan panjang sesuai dengan angka *Fibonacci* pertama 1x1, 2x2, 3x3, 5x5, 8x8. Kemudian disusun sesuai dengan deret *Fibonacci* untuk membuat pola spiral khusus. Lihatlah gambar kotak di bawah ini, digambar berdasarkan deret *Fibonacci*.



gambar 2. 2fibonacci sequence

Sumber: (Herraprantanti & Saputro, 2022)



gambar 2. 3spiral curve

Sumber: (Herraprantanti & Saputro, 2022)

2.1.3 Turbin Angin

Turbin angin merupakan perangkat yang menggunakan kekuatan angin untuk menghasilkan energi, yang kemudian dikonversi menjadi listrik. Pada awalnya, turbin angin dirancang sebagai kincir angin tradisional yang berfungsi membantu kegiatan pertanian, seperti menggiling padi, menggerakkan pompa air untuk irigasi, serta berbagai aktivitas lainnya yang membutuhkan tenaga mekanis. Seiring perkembangan waktu, kincir angin mulai dikenal luas, terutama di Belanda dan berbagai negara di Eropa. Di wilayah-wilayah tersebut, kincir angin yang lebih dikenal dengan istilah *windmill* telah menjadi simbol budaya sekaligus alat yang penting dalam kehidupan masyarakatnya (Octari et al., 2024).

Pada era modern, turbin angin mengalami transformasi besar, dari sekadar alat mekanis menjadi salah satu komponen teknologi untuk menghasilkan energi listrik. Meskipun demikian, penggunaannya sebagai pembangkit listrik masih relatif terbatas jika dibandingkan dengan pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD), tenaga uap (PLTU), atau jenis pembangkit listrik lainnya yang sudah lebih umum dan mapan. Namun, para ilmuwan terus melakukan penelitian dan pengembangan teknologi turbin angin dengan tujuan meningkatkan efisiensinya serta menjadikannya lebih layak digunakan dalam skala luas. Upaya ini bertujuan untuk menjadikan turbin angin sebagai salah satu solusi energi terbarukan yang dapat diandalkan untuk memenuhi kebutuhan listrik manusia secara berkelanjutan di masa depan (Octari et al., 2024).

Turbin angin bekerja dengan mengonversi energi kinetik dari angin menjadi energi mekanik yang menggerakkan sudu. Energi putaran sudu tersebut dimanfaatkan untuk berbagai keperluan, seperti menggerakkan generator guna menghasilkan listrik. Sudu merupakan salah satu komponen utama dalam turbin angin, yang berperan mengubah gerakan linier aliran angin menjadi gerakan rotasi pada poros. Berdasarkan desain sudunya, turbin angin dibedakan menjadi dua jenis, yaitu turbin angin dengan sumbu *horizontal* dan turbin angin dengan sumbu vertikal (Sidiq et al., 2023). Ada dua jenis turbin angin yaitu *horizontal axis wind turbine* (HAWT) dan *vertical axis wind turbine* (VAWT).

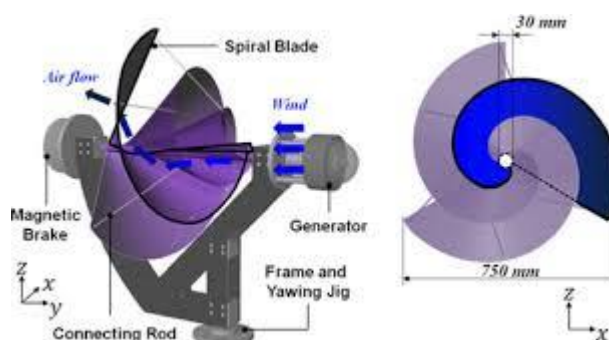
Turbin angin *horizontal* adalah jenis turbin yang paling umum dan sering dijumpai. Desainnya menyerupai kincir angin dengan bilah-bilah yang mirip baling-baling dan berputar pada sumbu *horizontal*. Pada jenis ini, *rotor* dan generator biasanya terletak di puncak menara, dan posisinya harus disesuaikan dengan arah datangnya angin. Untuk turbin berukuran kecil, penyesuaian arah angin dilakukan menggunakan wind vane yang dipasang di *rotor*, sedangkan



gambar 2. 4 *Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)*
Sumber *Re-inventing the Windmill by The Archimedes*

turbin berukuran besar dilengkapi sensor yang terhubung ke motor servo untuk mengarahkan bilah sesuai arah angin. Umumnya, turbin angin *horizontal* dilengkapi gearbox yang meningkatkan kecepatan putaran *rotor* sebelum ditransmisikan ke generator. Karena menara dapat menyebabkan turbulensi di bagian belakang, turbin ini biasanya diposisikan menghadap langsung ke arah datangnya angin. Bilah-bilah turbin dibuat kokoh untuk mencegahnya terdorong ke menara akibat tiupan angin kencang. Selain itu, bilah dipasang dengan jarak yang cukup dari menara dan kadang didesain melengkung ke depan untuk menambah stabilitas (Sidiq et al., 2024). Struktur spiral pada turbin angin Archimedes memiliki keunggulan yang memungkinkan penggunaannya dalam berbagai kondisi, termasuk saat angin berkecepatan rendah. Selain itu, turbin ini secara otomatis dapat menyesuaikan arah angin berkat bantalan pada pondasi konstruksinya, yang bergerak secara pasif akibat pengaruh gaya hambat (drag) (Sidiq et al., 2023).

Turbin angin *Archimedes* merupakan inovasi terbaru dalam desain turbin angin yang menggunakan tiga bilah melingkar yang saling terhubung dan kemudian direntangkan untuk membentuk struktur unik. Desain ini menghasilkan turbin berbentuk kerucut tiga dimensi, menyerupai bentuk cangkang siput yang sering ditemukan di pantai. Salah satu keunggulan utama dari turbin angin tipe screw ini terletak pada strukturnya yang adaptif dan fleksibel. Dengan desain yang inovatif, turbin ini mampu dioperasikan dalam berbagai kondisi lingkungan, termasuk pada area dengan kecepatan angin yang relatif rendah. Hal ini menjadikannya sangat efisien dan dapat digunakan secara luas, bahkan di lokasi yang sebelumnya kurang ideal untuk pemasangan turbin angin konvensional. Efisiensi ini tidak hanya meningkatkan kinerja energi tetapi juga memperluas potensi penerapan teknologi turbin angin di berbagai skenario (Sidiq et al., 2024).



gambar 2. 5 Turbin angin tipe screw 3 sudu
 Sumber: [M. Faiz Naufal - ccitonlinewiki](#)

Prinsip kerja dari turbin angin *Archimedes* serupa dengan prinsip yang digunakan pada turbin angin tipe *horizontal*, yaitu dengan menghadapkannya langsung ke arah datangnya angin agar dapat memanfaatkan aliran udara seoptimal mungkin. Namun, terdapat perbedaan mendasar dalam cara kedua jenis turbin ini menangkap dan mengubah energi angin menjadi gerakan rotasi. Pada turbin angin *horizontal* konvensional, bilah atau sudu berputar karena angin yang melewati permukaan berbentuk airfoil menciptakan perbedaan tekanan, sehingga menghasilkan gaya angkat yang mendorong sudu bergerak. Sementara itu, pada turbin angin Archimedes, sudu-sudu dirancang untuk membelokkan dan

mengarahkan aliran angin secara lebih efisien, sehingga angin dapat tertangkap dan dimanfaatkan semaksimal mungkin oleh sudu-sudu tersebut. Pendekatan ini memungkinkan pemanfaatan yang lebih baik dari energi angin yang tersedia, terutama dalam kondisi angin yang berubah-ubah atau berkecepatan rendah, karena desain spiralnya membantu memandu angin masuk dan menciptakan gerakan putaran yang optimal (Sidiq et al., 2024).

2.1.4 Koefisien Daya

Koefisien daya (C_p) merupakan ukuran efisiensi turbin angin, yang dinyatakan sebagai perbandingan antara daya mekanis yang dihasilkan oleh turbin dengan total daya kinetik yang terkandung dalam aliran angin. Nilai ini menunjukkan seberapa efektif turbin mampu mengonversi energi angin menjadi energi listrik atau energi mekanis (Sarasih et al., 2018).

Dalam pengoperasiannya, nilai C_p dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk desain turbin, kecepatan angin, dan kondisi lingkungan sekitar. Nilai teoritis maksimum dari koefisien daya adalah 59,3%, yang dikenal sebagai *Betz Limit*. Hal ini berarti tidak mungkin turbin menangkap seluruh energi kinetik angin, karena sebagian energi angin harus tetap ada untuk memungkinkan aliran udara melewati bilah turbin.

Desain turbin yang baik, seperti sudu berbentuk aerodinamis, sudut bilah yang optimal, serta mekanisme rotasi yang efisien, sangat penting untuk mendekati batas maksimal C_p ini. Dengan meningkatnya inovasi dalam teknologi turbin angin, para insinyur terus berupaya meningkatkan efisiensi C_p agar turbin angin mampu menghasilkan daya yang lebih besar meskipun dalam kondisi angin yang kurang ideal. Hal ini menjadikan C_p sebagai salah satu parameter kunci dalam evaluasi dan pengembangan sistem energi berbasis angin. Rumus untuk menghitung C_p ialah:

$$C_p = \frac{P_{\text{turbin}}}{P_{\text{angin}}} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana:

- P_{turbin} adalah daya mekanik yang dihasilkan oleh turbin.
- P_{angin} adalah daya yang tersedia dalam aliran angin, yang dapat dihitung dengan rumus:

$$P_{\text{angin}} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \dots\dots\dots (2.2)$$

Dengan:

- ρ = densitas udara
- A = area penampang *rotor*
- v = kecepatan angin

2.1.5 Aliran Fluida

Aliran fluida merupakan fenomena pergerakan suatu zat, baik dalam bentuk cair maupun gas, yang memiliki kemampuan untuk berubah bentuk ketika menerima pengaruh gaya eksternal. Studi tentang aliran fluida melibatkan

penerapan berbagai prinsip fundamental, seperti hukum Bernoulli yang menggambarkan hubungan antara tekanan, kecepatan, dan energi fluida, serta persamaan kontinuitas yang menjelaskan konservasi massa dalam fluida yang mengalir. Pemahaman mendalam mengenai perilaku fluida ini menjadi kunci dalam banyak aplikasi teknik, termasuk dalam desain turbin angin tipe Archimedes. Pada turbin jenis ini, analisis aliran fluida di sekitar bilah atau baling-baling menjadi aspek yang sangat krusial, karena berpengaruh langsung terhadap efisiensi konversi energi angin menjadi energi mekanik, serta kinerja keseluruhan turbin dalam berbagai kondisi operasi (Abidin et al., 2023). Dalam konteks turbin angin, aliran udara yang mengalir melalui sudu turbin dapat dikategorikan menjadi dua jenis utama:

a) Aliran laminar

Aliran fluida disebut laminar apabila fluida bergerak secara sejajar, teratur, dan konstan tanpa adanya gangguan atau persilangan antar lapisan aliran. Aliran jenis ini terjadi ketika kecepatan fluida seragam, sehingga pergerakan partikel-partikelnya dapat diamati dengan jelas dan mudah (Natayuda, 2017). Ciri khas aliran laminar adalah kestabilan dan pola gerak yang teratur, di mana difusi momentum mendominasi sementara konveksi momentum berlangsung dalam skala yang lebih kecil.

b) Aliran turbulen

Aliran turbulen adalah jenis aliran fluida yang bergerak secara tidak teratur atau fluktuatif, di mana partikel-partikel fluida menunjukkan pola gerak yang acak dan tidak beraturan, sehingga sulit untuk diamati dengan jelas (Natayuda, 2017). Aliran turbulen umumnya lebih efektif dalam mentransfer energi, namun juga cenderung menyebabkan peningkatan gesekan.

Salah satu pendekatan populer yang menggabungkan perhitungan teori analitis dengan eksperimen adalah melalui eksperimen numerik, yang dalam mekanika fluida dikenal sebagai *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dan menggunakan software ansys. Metode ini memanfaatkan pemodelan 3D turbin menggunakan komputer, kemudian mensimulasikan model tersebut terhadap aliran fluida di sekitarnya. Dengan cara ini, dapat diperoleh berbagai solusi seperti torsi, daya, dan efisiensi secara lebih mendalam, karena simulasi ini mempertimbangkan pola aliran 3D serta interaksi dengan komponen lain yang dapat mempengaruhi aliran fluida.

2.2 Kajian Penelitian Terdahulu

Penelitian selanjutnya merupakan upaya peneliti untuk mencari perbandingan yang selanjutnya digunakan untuk menemukan inspirasi baru untuk melakukan penelitian selanjutnya. Dalam penulisan tugas akhir ini peneliti menggali informasi dari beberapa referensi penelitian sebelumnya.

Menurut Abidin Muhammad Ibnul et al dalam penelitiannya yang berjudul ” Analisis Komputasi Fluida Dinamis Pada Sudu Spiral Turbin Angin Tipe Archimedes Dengan Variasi Jumlah Sudu Dan Kemiringan Sudu”. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa turbin angin Archimedes dengan 4 sudu dan

kemiringan 65° memiliki performa terbaik. Desain ini memiliki nilai koefisien drag (CD) terkecil sebesar -2.1758, nilai koefisien lift (CL) terbesar sebesar 0.37232, dan nilai koefisien momen (Cm) terbesar sebesar 0.6127938. Penelitian ini menekankan bahwa sudut kemiringan sudu sangat mempengaruhi performa turbin, dan desain ini dianggap paling optimal untuk meningkatkan efisiensi turbin angin sebagai sumber energi terbarukan. Dengan metode yang digunakan dalam jurnal tersebut melibatkan desain turbin angin archimedes menggunakan perangkat lunak solidworks, diikuti dengan simulasi perangkat lunak ANSYS untuk mengetahui koefisien drag, koefisien lift, dan koefisien momen untuk variasi jumlah sudu dan kemiringan sudu turbin. Tujuannya adalah untuk mendapatkan desain angin yang optimal (Abidin et al., 2023).

Menurut Sidiq Aburahi et al, dalam penelitiannya yang berjudul "Perancangan Turbin Angin Tipe Screw Dengan Menggunakan 3 Sudu Kapasitas 100 Watt". Hasil dari penelitian ini menunjukkan beberapa temuan utama terkait kinerja turbin angin dengan dan tanpa generator. Dari penelitian ini menunjukkan bahwa kecepatan angin dan penggunaan generator berpengaruh signifikan terhadap kinerja turbin angin. Turbin ini mampu beroperasi secara efisien pada kecepatan angin yang rendah, menjadikannya sumber energi alternatif yang layak di Indonesia. Dengan metode penelitian yang digunakan dalam jurnal ini adalah metode eksperimen dan metode literasi. Metode literasi melibatkan penggunaan teori pendukung dari penelitian sebelumnya agar relevan dengan penelitian yang sedang dilakukan. Metode eksperimen melibatkan percobaan langsung dengan mendesain dan merancang alat untuk penelitian, termasuk pemasangan dan pengujian turbin angin dengan 3 sudu (Sidiq et al., 2024).

Menurut Sidiq Abdurahim et al, dalam penelitiannya yang berjudul "Rancang Bangun Turbin Angin Tipe Ulir (Screw) Dengan Kapasitas 120 Watt". Penelitian ini menunjukkan bahwa kinerja turbin angin ulir bervariasi sesuai kecepatan angin dan waktu pengujian. Tanpa generator, turbin mulai berputar pada 1,3 m/s dan 2,4 m/s dengan generator. Rata-rata rotasi poros mencapai 279 RPM (pagi), 360 RPM (siang), dan 476 RPM (malam) tanpa generator, sedangkan dengan generator menjadi 210,4 RPM (pagi), 286 RPM (siang), dan 442 RPM (malam). Output daya rata-rata generator tercatat 29,17 watt (pagi), 46,36 watt (siang), dan 124,69 watt (malam) dengan kecepatan angin masing-masing 1,37 m/s, 4,1 m/s, dan 6,3 m/s. Dengan Metode yang digunakan dalam jurnal ini adalah percobaan pemodelan turbin angin tipe ulir. Penelitian dilakukan secara langsung di lapangan untuk mendapatkan hasil nyata dan data yang valid (Sidiq et al., 2023).

Menurut Syukur Adam dalam penelitiannya yang berjudul Analisis Pengaruh Kemiringan Sudu Terhadap Kinerja Kincir Angin Tipe Archimedes Spiral Pada Wind Tunnel. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa daya maksimal kincir angin tipe Archimedes spiral diperoleh pada kemiringan sudu 60° , kecepatan angin 7 m/s, dan beban 100 gram, yaitu sebesar 0,901 watt. Efisiensi terbaik dicapai pada kemiringan sudu 60° , kecepatan angin 3 m/s, dan beban 100 gram, dengan efisiensi mencapai 70,077%. Penelitian ini memberikan wawasan tentang pengaruh kemiringan sudu terhadap efisiensi kincir angin. Dengan metode

pengujian dilakukan didalam wind tunnel dengan memberikan variasi kecepatan angin (3,4,5,6,7, dan 8 m/s) (Syukur, 2021).