

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Pada tinjauan pustaka bertujuan untuk memberikan gambaran tentang literatur yang digunakan sebagai acuan dalam penulisan dasar teori tentang topik yang dibahas. Yaitu “Pengembangan dan Uji Kinerja Turbin Angin Spiral Archimedes Dengan Sudut Bilah 40°, 50°, 60° pada Kecepatan Angin 2,5, 3, 3,5 m/s”.

2.1 Energi Angin

Energi angin merupakan bentuk energi kinetik yang dihasilkan oleh pergerakan massa udara akibat perbedaan tekanan dan suhu di atmosfer. Energi ini termasuk sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan dan tersedia secara alami di seluruh permukaan bumi. Energi angin dapat dikonversikan menjadi energi mekanik menggunakan turbin angin, dan kemudian menjadi energi listrik melalui generator.

Secara matematis, energi angin yang tersedia dalam suatu luasan area tertentu dapat dihitung menggunakan rumus:

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

dengan:

P = daya (Watt),

ρ = massa jenis udara (1,225 kg/m³ pada kondisi standar),

A = luas sapuan rotor (m²),

V^3 = kecepatan angin bebas (m/s). (Himran, 2019)

Namun, tidak seluruh daya angin dapat dikonversi menjadi energi mekanik. Menurut Hukum Betz, maksimum daya yang bisa diambil dari aliran angin oleh turbin adalah 59,3%.

2.2 Pengertian Additive Manufacturing (AM)

Additive Manufacturing (AM) atau pencetakan 3D berbasis teknologi *Fused Deposition Modeling* (FDM) diterapkan untuk memproduksi proses pembuatan objek tiga dimensi dari model CAD menggunakan material termoplastik PLA (*Polylactic Acid*) atau ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*), di mana parameter pencetakan seperti ketebalan lapisan (*layer height*: 0,1–0,2 mm), suhu ekstrusi (200–220°C), dan densitas infill (10–50%) dioptimalkan untuk memastikan akurasi geometri, kekakuan struktural, serta ketahanan terhadap beban aerodinamis selama pengujian eksperimental pada kecepatan angin 4, 6, dan 8 m/s, sekaligus memvalidasi kesesuaian prototipe dengan desain CAD sebelum tahap analisis kinerja lebih lanjut. (Nawangwulan, 2023)

Proses ini cocok digunakan untuk pembuatan prototipe turbin karena:

- Biaya rendah,
- Akurasi tinggi,
- Fleksibilitas bentuk,
- Cepat untuk iterasi desain.

Dalam penelitian ini digunakan material PLA+, yang menurut (Nawangwulan, 2023) memiliki kekuatan mekanik lebih tinggi dari PLA biasa

dan ideal untuk struktur turbin kecil. Metode pencetakan yang digunakan adalah *Fused Deposition Modeling* (FDM).

2.3 Pengertian Mesin 3D printing

3D printing adalah jenis proses yang melibatkan objek tiga dimensi dengan membangun lapisan material yang berurutan. Proses ini juga dikenal sebagai *additive manufacturing* (AM) karena berbeda dengan metode manufaktur tradisional yang pembentukan bahan untuk membuat produk akhir *3D printing* memproses pembuatan objek fisik 3D, termasuk prototipe produk, pengemasan produk, karya seni, alat musik, perkakas, organ manusia, dan banyak lagi. *3D printing* dimulai dengan menggunakan software untuk merancang model 3D dan menerjemahkan file digital objek menjadi data. (Nawangwulan, 2023)

2.4 Pengertian Wind Tunnel

Terowongan angin adalah struktur yang memiliki aliran udara melaluinya biasanya dalam bentuk saluran yang melaluinya udara digerakkan oleh kipas bertenaga listrik (atau mekanisme lain yang memiliki fungsi yang sama). Jenis dan ukuran terowongan angin yang digunakan bergantung pada ukuran objek yang menjalani pengujian, serta kondisi aliran yang diinginkan. (boomsupersonic, 2021)

2.5 Cara kerja Wind Tunnel

Terowongan angin menghasilkan aliran udara yang konsisten, biasanya dengan kipas bertenaga listrik. Objek yang menjalani pengujian tidak bergerak. Udara yang bergerak di sekitar objek yang diam, menciptakan pergerakan udara relatif yang sama seperti yang diharapkan dalam kehidupan nyata, sedekat

mungkin. Sementara itu, gaya aerodinamis yang bekerja pada objek, seperti gaya hambat dan gaya angkat, dapat diukur dengan perangkat pengukur beban yang akurat. Karakteristik aliran di sekitar objek juga dapat divisualisasikan menggunakan sejumlah teknik injeksi asap dan aliran oli pada artikel pengujian untuk menyebutkan beberapa yang dimaksudkan untuk "membuat udara yang tidak terlihat menjadi terlihat." (boomsupersonic, 2021)

2.6 Pengertian Turbin Angin Archimedes

Turbin angin Archimedes merupakan salah satu jenis turbin angin sumbu horizontal yang memiliki bilah berbentuk spiral menyerupai geometri spiral Archimedes. Geometri ini didasarkan pada persamaan matematika dalam koordinat polar:

$$r = \alpha\theta \tag{2.1}$$

di mana r merupakan jarak dari pusat, α adalah konstanta, dan θ adalah sudut dalam radian. Bentuk spiral tersebut membuat turbin ini memiliki karakteristik aerodinamis yang berbeda dibandingkan dengan turbin angin konvensional. (Hyeonmu Jang 1, 2019)

ASWT merupakan pengembangan dari HAWT yang menggunakan bilah berbentuk spiral mengikuti geometri Archimedes. Desain spiral memungkinkan peningkatan interaksi antara aliran udara dan bilah, serta menghasilkan torsi awal yang tinggi bahkan pada kecepatan angin rendah.

2.6.1 Asal-usul dan Pengembangan

Konsep dasar turbin ini terinspirasi oleh prinsip sekrup Archimedes, yaitu sebuah alat kuno yang digunakan untuk mengangkat air dengan memanfaatkan putaran sekrup berbentuk spiral. Prinsip spiral tersebut kemudian diadaptasi dalam desain bilah turbin angin modern, sehingga aliran udara diarahkan mengikuti kontur spiral dan energi kinetik angin dapat ditransfer secara lebih efisien ke rotor. Turbin angin Archimedes pertama kali diperkenalkan secara luas pada tahun 2014 di Belanda, dan sejak itu menarik perhatian karena bentuknya yang unik, ramah lingkungan, serta kemampuannya bekerja optimal pada kecepatan angin rendah.

2.6.2 Prinsip Kerja Turbin Angin Spiral Archimedes

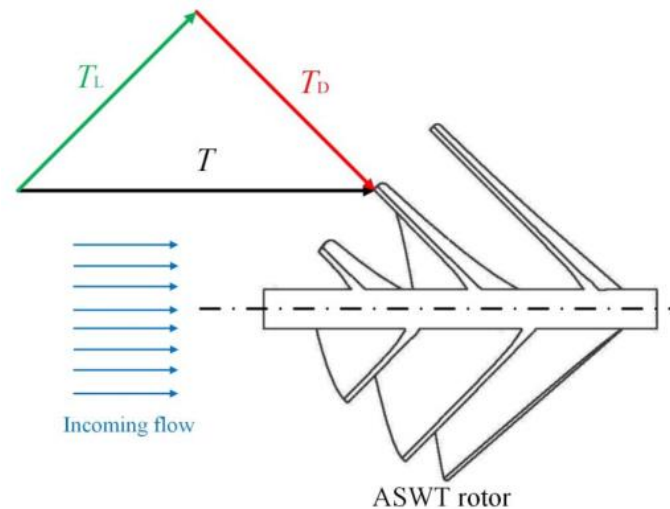
Turbin Angin Archimedes bekerja dengan teknologi turbin angin sumbu Horizontal. Tidak seperti turbin sumbu horizontal yang bertumpu pada baling-baling besar yang berputar, turbin angin archimedes menggunakan desain spiral yang meniru pergerakan alami angin. Berikut ini adalah penjelasan sederhananya:

Pengumpulan Angin: Turbin ini menangkap angin dari segala arah, berkat sumbu vertikalnya. Turbin ini sangat membantu di kota-kota di mana pola angin terus berubah.

- **Pergerakan Spiral:** Desain spiral yang unik merubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik saat berputar.
- **Konversi Energi:** Gerakan berputar ditransfer ke generator, mengubah energi mekanik menjadi listrik yang dapat digunakan untuk menyalakan rumah atau disimpan dalam baterai.

- Desain ini memudahkan untuk memanfaatkan energi angin di daerah perkotaan di mana turbin lain tidak dapat melakukannya. (Tarantino, 2024)

2.7 Aerodinamis Archimedes wind turbine



Gambar 2. 1 Analisis gaya aerodinamis pada rotor ASWT.

(Sumber: (Ke Song H. H., 2023))

Pada Gambar 2.1 menyajikan representasi grafis dari distribusi gaya aerodinamis yang bekerja pada bilah rotor turbin angin spiral sumbu horizontal (ASWT). Dalam ilustrasi tersebut, gaya total (T) yang dihasilkan akibat interaksi antara bilah dan aliran udara merupakan resultan dari dua komponen utama, yaitu gaya angkat (T_L) dan gaya hambat (T_D). Gaya total (T) merupakan resultan dari interaksi antara gaya angkat dan gaya hambat yang muncul akibat aliran udara yang mengenai permukaan bilah dengan sudut tertentu terhadap arah angin. Vektor gaya angkat (T_L) bekerja tegak lurus terhadap arah aliran relatif, dan merupakan komponen gaya yang paling berkontribusi terhadap

pembangkitan torsi pada rotor. Sementara itu, gaya hambat (T_D) bekerja sejajar dengan arah aliran dan bersifat resistif terhadap pergerakan rotor.

Penjabaran vektor gaya dalam bentuk segitiga seperti yang diperlihatkan pada gambar ini sangat penting dalam memahami performa aerodinamis rotor secara menyeluruh. Arah dan besar gaya total (T) sangat dipengaruhi oleh proporsi antara gaya angkat (T_L) dan gaya hambat (T_D) yang pada gilirannya ditentukan oleh bentuk geometris bilah, sudut serang, serta kecepatan relatif aliran udara terhadap bilah. Dengan desain spiral pada rotor ASWT, distribusi tekanan di sepanjang permukaan bilah cenderung menghasilkan gaya angkat yang lebih dominan dibandingkan gaya hambat, sehingga arah gaya total menjadi lebih efektif dalam menghasilkan torsi untuk memutar poros rotor.

Selain itu, arah panah vektor pada gambar juga memperlihatkan interaksi antara bilah rotor dan aliran fluida secara visual, di mana orientasi gaya total menunjukkan arah resultan kerja aerodinamis terhadap sistem rotor. Pemahaman terhadap distribusi gaya-gaya ini menjadi aspek fundamental dalam optimalisasi desain turbin angin, karena pengaruhnya terhadap efisiensi konversi energi kinetik angin menjadi energi mekanik sangat signifikan. Dengan meminimalkan gaya hambat dan memaksimalkan gaya angkat melalui rekayasa bentuk bilah dan konfigurasi sudut serang, performa rotor dapat ditingkatkan secara substansial. Oleh karena itu, gambar ini tidak hanya bersifat ilustratif, tetapi juga merepresentasikan prinsip kerja dasar aerodinamika rotor turbin angin spiral secara kuantitatif dan kualitatif.

2.8 Rumus Dasar Perhitungan Daya pada Turbin Angin

Dalam proses konversi energi pada turbin angin, ada beberapa tahapan perhitungan yang dilakukan untuk mengetahui seberapa besarnya daya yang akan dihasilkan serta efisiensi pada turbin. Analisa perhitungan daya pada turbin angin terdapat tiga komponen utama, yaitu, daya mekanik (output poros), daya listrik (output generator), dan efisiensi turbin. Rumus-rumus berikut digunakan sebagai dasar analisis dalam penelitian ini.

2.8.1 Daya angin

Angin adalah udara yang mengalir. Udara memiliki massa namun memiliki kerapatan yang rendah. Ketika massa bergerak dengan kecepatan tertentu, maka akan menyebabkan energi kinetik. Energi kinetik adalah energi yang dimiliki suatu benda karena pergerakannya.

$$E = \frac{1}{2} \pi V^2 \quad (2.2)$$

Keterangan :

E = Energi kinetik (J)

v = Kecepatan angin (m/s)

m = Massa (kg)

(Himran, 2019)

2.8.2 Energi angin

Energi angin adalah energi yang dihasilkan oleh angin pada setiap area, sehingga energi angin dapat digolongkan sebagai energi kinetik. Pada dasarnya, tenaga angin adalah angin yang bergerak per satuan waktu sehingga dapat

dirumuskan dalam rumus sebagai berikut.

$$p_{\alpha} = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (2.3)$$

Keterangan :

v = Kecepatan angin (m/s)

p_{α} = Daya angin (watt)

A = Luas penampang (m²)

ρ = Densitas udara (m/s)

(Himran, 2019)

2.8.3 Torsi

Torsi yang dihasilkan oleh suatu gaya dapat dihitung dengan menggunakan persamaan dasar torsi, yaitu:

$$\tau = F \times r \quad (2.4)$$

Diketahui:

τ = torsi (Nm)

r = lengan gaya (m)

F = gaya yang diberikan tegak lurus dengan lengan gaya (N)

2.8.4 Tip Speed Ratio (TSR)

Tip Speed Ratio (TSR) merupakan rasio antara kecepatan linear ujung bilah turbin dengan kecepatan angin yang mengenainya. Nilai TSR sangat berpengaruh terhadap efisiensi aerodinamis dari turbin angin. Secara matematis,

TSR dapat dinyatakan dengan rumus:

$$TSR = \frac{\omega R}{V} \quad (2.5)$$

Jika kecepatan sudut (ω) dinyatakan dalam RPM, rumusnya menjadi:

$$TSR = \frac{2\pi n R}{60V} \quad (2.6)$$

Diketahui

TSR: *Tip Speed Ratio* (rasio kecepatan ujung bilah terhadap kecepatan angin)

ω : Kecepatan sudut rotor (rad/s)

R = jari – jari rotor

V = kecepatan angin (m/s)

n = kecepatan rotasi rotor ASWT (rpm)

(James Manwell, 2009)

Secara umum, nilai TSR yang ideal berbeda untuk setiap jenis turbin. Pada turbin angin horizontal seperti tipe Archimedes, nilai TSR optimal biasanya berkisar antara 1 hingga 3, tergantung pada desain bilah dan jumlah bilah yang digunakan. Nilai TSR yang terlalu rendah menunjukkan bahwa bilah berputar terlalu lambat sehingga sebagian besar energi angin tidak dimanfaatkan, sedangkan nilai TSR yang terlalu tinggi menandakan bilah berputar terlalu cepat sehingga menyebabkan kehilangan energi akibat gaya hambat udara yang meningkat. (Jang, 2021)

2.8.5 Kecepatan Sudut Putaran

Kecepatan sudut (ω) dari poros atau elemen yang berputar dapat dihitung dari kecepatan putarannya dalam satuan rotasi per menit (RPM), yang dinyatakan dalam rumus berikut:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (2.7)$$

Diketahui:

ω = Kecepatan sudut rotor (rad/s)

n = kecepatan rotasi rotor ASWT (rpm)

(Mohamed A.A. Nawar a H. A., 2021)

2.8.6 Daya mekanikal

Daya mekanikal pada turbin angin Archimedes diperoleh dari hasil perkalian antara torsi yang dihasilkan poros turbin dengan kecepatan sudut rotasinya.

Secara matematis, hubungan ini dapat dituliskan sebagai:

$$P_m = \tau \cdot n \quad (2.8)$$

Diketahui:

P_m : adalah daya mekanikal (Watt)

τ : torsi (Nm)

n : Kecepatan putaran turbin

Perhitungan ini penting untuk mengetahui besarnya energi yang dapat dikonversi dari energi kinetik angin menjadi energi mekanik pada poros turbin sebelum dikonversi lebih lanjut menjadi energi (I. McGowan, 2009)

2.8.7 Daya electrical

Pada sistem turbin angin, daya listrik dapat dihitung berdasarkan hasil pengukuran langsung pada keluaran generator berupa tegangan dan arus. Hubungan antara kedua besaran tersebut mengikuti persamaan dasar listrik, yaitu:

$$P_{Electrical} = V \times I \times 0,8 \quad (2.9)$$

Diketahui:

$P_{Electrical}$ = daya listrik yang dihasilkan oleh generator turbin angin (Watt)

V = voltase (Volt)

I = tegangan arus (Ampere)

(LARSSON, 2000)

2.8.8 koefisien daya (C_p)

Koefisien daya (C_p) yang menunjukkan efisiensi turbin angin dalam mengonversi energi kinetik angin menjadi energi mekanik. Nilai C_p dihitung dengan membandingkan daya yang dihasilkan oleh turbin (P) terhadap daya total angin yang tersedia pada area sapuan bilah. Secara matematis, koefisien daya dinyatakan dengan rumus berikut:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A V^3} \quad (2.10)$$

P = output daya (W)

ρ = Densitas udara (kg/m^3)

A = area sapuan rotor

V = kecepatan angin (m/s)

(Ke Song H. H., 2024)

2.8.9 koefisien daya dorong (C_r)

Koefisien daya (C_r) yang menunjukkan efisiensi turbin angin dalam mengonversi energi kinetik angin menjadi energi mekanik. Nilai C_r dihitung dengan membandingkan daya yang dihasilkan oleh turbin (P) terhadap daya total angin yang tersedia pada area sapuan bilah. Secara matematis, koefisien daya dinyatakan dengan rumus berikut:

$$C_r = \frac{4T}{\rho A V^2 D} \quad (2.11)$$

Diketahui:

T = torsi rotor (Nm),

ρ = densitas udara (kg/m^3),

A = luas sapuan rotor (m^2),

V = kecepatan angin (m/s),

D = diameter rotor (m).

(Ahmed M. Kamal a M. A., 2023)

2.8.10 Efisiensi Turbin

Efisiensi pada turbin angin Archimedes dihitung dengan membandingkan daya listrik yang dihasilkan generator terhadap daya mekanikal yang ditransfer dari poros turbin. Secara matematis, efisiensi dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_{Electrical}}{P_{Mechanical}} \times 100\% \quad (2.12)$$

Diketahui:

η : Efisiensi turbin angin (%)

$P_{Electrical}$: Daya listrik yang dihasilkan oleh generator (Watt)

$P_{Mechanical}$: Daya mekanikal yang di transfer dari poros turbin ke generator (Watt)

Rumus di atas menunjukkan bahwa efisiensi turbin angin Archimedes dihitung berdasarkan perbandingan antara daya listrik yang berhasil dikonversi oleh generator terhadap daya mekanikal yang disuplai dari poros turbin.

Nilai efisiensi tersebut dapat memberikan sebuah gambaran mengenai seberapa efektif sistem konversi energi dalam mengubah energi mekanikal menjadi energi listrik yang dapat dimanfaatkan.