

BAB II

TEORI PENUNJANG DAN KAJIAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Dasar Teori Energi Angin

Energi angin merupakan bentuk energi kinetik yang berasal dari pergerakan massa udara, yang terjadi akibat adanya perbedaan tekanan di atmosfer. Perbedaan tekanan ini biasanya timbul karena pemanasan permukaan bumi yang tidak merata akibat radiasi matahari. Udara akan mengalir dari wilayah dengan tekanan tinggi menuju wilayah dengan tekanan rendah, sehingga menghasilkan gerakan udara yang dikenal sebagai angin.

Angin adalah udara yang bergerak akibat perbedaan suhu di antara udara panas dan dingin. Perbedaan suhu ini menyebabkan tekanan udara juga menjadi tidak sama. Udara secara alami akan bergerak dari area yang memiliki tekanan tinggi menuju area dengan tekanan lebih rendah. Secara umum, angin terbentuk karena sinar matahari memanaskan permukaan bumi secara tidak merata, sehingga menciptakan perbedaan suhu udara di berbagai wilayah (Yunginger & Sune, n.d.). Proses ini terjadi secara terus-menerus dan membentuk pola pergerakan angin yang beragam, tergantung pada letak geografis, waktu, dan musim. Di wilayah tropis, misalnya, pemanasan yang intens menyebabkan terbentuknya sistem tekanan rendah yang kuat, sementara di daerah kutub yang dingin terbentuk tekanan tinggi. Akibatnya, angin mengalir dari kutub menuju khatulistiwa dengan berbagai variasi lokal. Fenomena ini menjadi dasar dari sistem sirkulasi atmosfer global dan berperan penting dalam distribusi panas, uap air, dan energi di seluruh permukaan bumi.

Indonesia merupakan negara yang kaya akan sumber daya energi, salah satunya adalah energi angin. Sebagai negara kepulauan yang terletak di sepanjang garis khatulistiwa, Indonesia memiliki kondisi geografis yang mendukung tersedianya potensi energi angin yang melimpah. Potensi ini diperkuat oleh kecepatan angin yang relatif stabil dan memadai di berbagai wilayah. Letak Indonesia di daerah ekuator yang menjadi pertemuan sirkulasi atmosfer global seperti Hadley, Walker, dan sirkulasi lokal turut berkontribusi terhadap tingginya potensi energi angin. Dengan kondisi tersebut, energi angin di Indonesia memiliki peluang besar untuk dikembangkan sebagai sumber energi terbarukan yang dapat menjadi alternatif pembangkit listrik di masa depan (Novri, 2021). Angin merupakan salah satu sumber daya alam yang dapat dimanfaatkan sebagai energi listrik. Sebagai energi terbarukan yang tidak akan habis, pemanfaatan angin melalui sistem konversi energi memberikan dampak positif bagi lingkungan. Energi angin berasal dari energi kinetik yang terkandung dalam pergerakan udara, yang kemudian dikonversi menjadi energi mekanik atau energi listrik. Penggunaan turbin angin dalam proses ini tidak

menghasilkan emisi karbon dioksida (CO_2), sehingga dapat memberikan kontribusi yang signifikan dalam upaya pengurangan emisi gas rumah kaca (Mulkan & Abd, 2022).

Pemanfaatan energi angin sebagai salah satu sumber pembangkit listrik sangat bergantung pada kecepatan angin yang tersedia di suatu wilayah. Kecepatan angin yang mencukupi diperlukan untuk menggerakkan sudu-sudu atau bilah turbin angin, yang berfungsi menangkap energi kinetik dari pergerakan udara. Ketika bilah turbin berputar, energi kinetik tersebut diubah menjadi energi mekanik dalam bentuk torsi atau momen puntir pada poros turbin. Torsi ini kemudian diteruskan ke generator yang akan mengubahnya menjadi energi listrik melalui proses induksi elektromagnetik. Efisiensi konversi ini sangat dipengaruhi oleh desain turbin, karakteristik kecepatan angin setempat, serta sistem kontrol dan transmisi daya yang digunakan. Oleh karena itu, pemilihan lokasi dan desain sistem turbin angin menjadi aspek penting dalam optimalisasi pemanfaatan energi angin sebagai energi terbarukan (Maknunah et al., 2023).

2.1.2 Turbin Angin

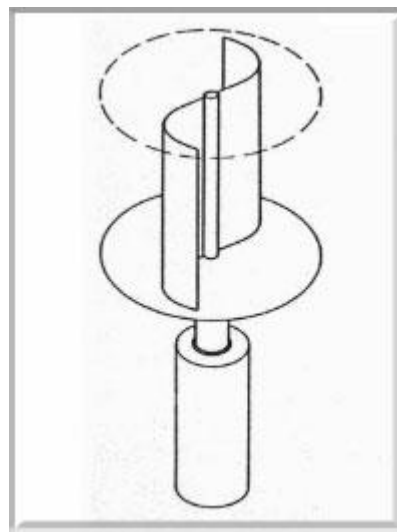
Berdasarkan arah rotasi rotornya, turbin angin diklasifikasikan menjadi dua tipe, yaitu turbin sumbu horisontal dan sumbu vertikal. Pada turbin sumbu horisontal, arah putaran *rotor* sejajar dengan arah hembusan angin. Sebaliknya, pada turbin sumbu vertikal, arah putarannya tegak lurus atau berlawanan dengan arah datangnya angin. Turbin dengan sumbu horisontal bekerja berdasarkan prinsip gaya angkat, menggunakan bilah yang ramping dan beroperasi pada kecepatan putar yang tinggi. Sementara itu, turbin sumbu vertikal memanfaatkan gaya hambat, memiliki bilah yang lebih lebar, dan berputar dengan kecepatan yang relatif rendah (Marabdi Siregar & Lubis, 2019).

Turbin angin merupakan salah satu teknologi pembangkit energi listrik yang memanfaatkan angin sebagai sumber energi utama. Energi kinetik dari angin dikonversi menjadi energi listrik melalui mekanisme kerja turbin. Sistem ini tergolong dalam kategori Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTA), yaitu jenis pembangkit yang mengubah energi angin menjadi energi listrik dengan memanfaatkan kincir atau turbin angin sebagai alat penggeraknya (Hermanses et al., 2020). Penerapan teknologi ini menjadi semakin relevan seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi bersih dan berkelanjutan, serta upaya global dalam mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Selain ramah lingkungan, pembangkit listrik tenaga angin juga memiliki potensi besar untuk dikembangkan di wilayah-wilayah yang memiliki kecepatan angin yang cukup stabil sepanjang tahun. Dengan kemajuan dalam desain aerodinamika dan pemodelan numerik seperti *Computational Fluid Dynamics* (CFD), performa turbin angin kini dapat dianalisis dan ditingkatkan secara lebih efisien. Oleh karena itu, teknologi turbin angin tidak hanya menawarkan solusi energi

terbarukan, tetapi juga membuka peluang penelitian dan inovasi yang luas di bidang rekayasa energi.

2.1.3 Savonius

Energi angin merupakan salah satu bentuk energi terbarukan yang tersedia secara gratis dan dapat dimanfaatkan untuk pembangkitan listrik. Wilayah yang memiliki potensi tinggi terhadap energi angin umumnya berada di kawasan pegunungan dan daerah pesisir, di mana kecepatan angin cenderung lebih stabil dan kuat. Untuk mengubah energi kinetik angin menjadi energi listrik, digunakan sistem konversi energi angin (SKEA) yang bekerja melalui mekanisme turbin angin. Turbin angin berperan sebagai perangkat utama dalam proses konversi tersebut dan menjadi salah satu alternatif penting dalam sistem pembangkit listrik berkelanjutan. Salah satu jenis turbin yang banyak digunakan adalah turbin angin vertikal tipe *Savonius*. Turbin ini memiliki keunggulan dapat beroperasi pada kecepatan angin rendah, sekitar 3 m/s, serta mampu menghasilkan torsi awal yang tinggi. Selain itu, desainnya yang sederhana memungkinkan proses start otomatis yang baik, tingkat kebisingan yang rendah, serta tidak bergantung pada arah datangnya angin. Oleh karena itu, turbin angin *Savonius* sangat cocok diterapkan di lingkungan dengan kecepatan angin rendah dan arah angin yang berubah-ubah (Gosen, n.d.).



Gambar 2.1 Turbin Angin *Savonius*
Sumber: [Turbin Angin Savonius | REUK.co.uk](http://Turbin%20Angin%20Savonius%20REUK.co.uk)

2.1.4 Persamaan Matematika

1. Persamaan Daya Teoritis Turbin Angin

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p \dots \dots \dots (2.1)$$

Dengan P = Daya yang dihasilkan (watt)

ρ = Massa jenis udara (kg/m^3)

A = Luas sapuan turbin (m^2), untuk VAWT: $A = D \cdot H$

V = Kecepatan angin (m/s)

C_p = *Coefficient of Power* (efisiensi turbin, maksimal secara teori ≈ 0.593 menurut batas Betz)

2. Tip Speed Ratio (TSR)

$$\lambda = \frac{\omega R}{v_w} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dengan λ = tip speed ratio

ω = kecepatan sudu turbin (rad/s)

R = jari jari turbin (m)

v_w = kecepatan angin (m/s)

3. Koefisien Daya (Power Coefficient)

$$C_p = \frac{P_{\text{turbine}}}{P_{\text{wind}}} \dots \dots \dots (2.3)$$

Dengan C_p = Koefisien daya turbin angin (tak berdimensi), menunjukkan seberapa efisien turbin mengkonversi energi angin menjadi energi mekanik

p_{actual} = Daya aktual atau daya mekanik yang berhasil diambil oleh turbin (dalam watt)

ρ = Massa jenis udara (kg/m^3), umumnya sekitar 1.225 kg/m^3 pada permukaan laut dan suhu standar

A = Luas sapuan rotor (m^2). Untuk turbin vertikal (seperti *Savonius*), biasanya $A = D \cdot H$

V = Kecepatan angin bebas (m/s)

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 Adie Syahyudinoor et al dalam penelitiannya yang berjudul "Studi Eksperimental Turbin Angin *Savonius* Tipe I Dengan Menggunakan Jumlah Sudu 2 dan Sudu 5". Hasil dari penelitian tersebut Turbin *Savonius* dengan konfigurasi lima sudu terbukti memiliki kinerja yang lebih unggul dibandingkan dengan konfigurasi dua sudu, khususnya dalam hal kecepatan rotasi, daya keluaran, dan efisiensi. Peningkatan jumlah sudu berkontribusi terhadap peningkatan kemampuan turbin dalam mengubah energi angin menjadi energi mekanik,

meskipun efisiensi totalnya masih tergolong rendah. Temuan ini menjadi dasar penting dalam upaya pengembangan desain turbin angin yang lebih efisien, terutama untuk pengoperasian pada kecepatan angin yang rendah (Syahyudinoor et al., 2024).

Menurut Mashita Titah Maryanti dalam penelitiannya yang berjudul ”Desain Struktur Baling-Baling pada Sistem Turbin Angin *Savonius*”. Kesimpulan dari penelitian tugas akhir ini menunjukkan bahwa untuk merancang bilah baling-baling turbin angin yang efektif dalam menangkap kecepatan angin rendah sebesar 3 m/s, spesifikasi ideal mencakup luas sapuan turbin sebesar 3 m², diameter rotor 1,23 meter, tinggi *rotor* 2,46 meter, dan diameter sudu 0,68 meter. Selain itu, bentuk bilah baling-baling terbukti berperan penting terhadap performa putaran turbin, di mana semakin besar diameter lengkungan bilah, maka semakin besar pula volume angin yang dapat ditangkap, sehingga meningkatkan efisiensi konversi energi angin menjadi energi mekanik (Maryanti, 2020).

Menurut Scheaua Fanel Dorel et al dalam penelitiannya yang berjudul ”*Review of specific performance parameters of vertical wind turbine rotors based on the Savonius type*”. Jurnal ini membahas berbagai studi dan inovasi terkini mengenai turbin angin tipe *Savonius*, dengan fokus pada peningkatan performa melalui modifikasi desain rotor dan optimasi geometris. Berbagai bentuk bilah seperti *semicircular*, *elliptical*, *twisted*, dan *slotted* telah diteliti, di mana penambahan jumlah bilah serta peningkatan aspek rasio terbukti mampu meningkatkan koefisien daya (CP) hingga batas optimal tertentu. Inovasi lain yang diterapkan meliputi penambahan katup pada bilah untuk mengurangi torsi negatif, penggunaan pelat ujung guna memperbaiki aliran udara dan meningkatkan CP, serta penyesuaian rasio *overlap* antar bilah untuk mengoptimalkan keluaran daya. Modifikasi profil bilah, seperti *semi-elliptical* dan *slotted*, turut meningkatkan efisiensi dan torsi, sedangkan penggunaan tirai di sekitar rotor dilaporkan mampu menaikkan CP hingga 38,5%. Desain rotor khusus, seperti model *Ice Wind*, menunjukkan kinerja lebih tinggi dibandingkan desain klasik, dengan peningkatan efisiensi mencapai 28,4%. Analisis eksperimental dan simulasi CFD memperlihatkan bahwa berbagai modifikasi ini dapat meningkatkan CP dari sekitar 16% hingga lebih dari 34%, bahkan beberapa model mencatatkan peningkatan performa hingga 90% dibanding desain tradisional. Selain memiliki keunggulan berupa struktur sederhana, biaya rendah, dan torsi awal yang tinggi pada kecepatan angin rendah, turbin *Savonius* juga sangat sesuai untuk aplikasi skala kecil seperti transportasi air, pertanian, dan sistem hidrokinetik. Penempatan *rotor* yang dekat dengan bangunan serta penggunaan bilah kembar atau *twisted* juga terbukti dapat meningkatkan efisiensi penangkapan energi, khususnya di lingkungan perkotaan (Dorel et al., 2021).

Menurut Kumail Abdulkareem Hadi Al-Gburi et al dalam penelitiannya yang berjudul ”*Experimental and Simulation Investigation of Performance of Scaled Model for a Rotor of a Savonius Wind Turbine*”. Penelitian dalam jurnal ini

menyimpulkan bahwa perubahan geometris pada bilah turbin angin tipe Savonius, seperti penerapan saluran pengarah aliran (*flow-guiding channels*) dan permukaan bilah bergelombang (*wavy blade areas*), mampu secara signifikan meningkatkan efisiensi operasional turbin. Melalui kombinasi uji eksperimental di terowongan angin dan simulasi numerik berbasis CFD, diperoleh peningkatan koefisien daya (C_p) hingga 19,5% dibandingkan model standar. Modifikasi ini efektif dalam menurunkan torsi negatif serta memperbaiki distribusi tekanan dan pola aliran di sekitar bilah, sehingga menghasilkan performa optimal pada rasio kecepatan ujung bilah (TSR) mendekati 1. Hasil simulasi dan eksperimen menunjukkan konsistensi yang baik, dengan deviasi kurang dari 5%, yang menunjukkan validitas model skala dan keakuratan metode analisis yang digunakan. Temuan ini memberikan landasan kuat untuk merancang turbin *Savonius* skala kecil yang lebih efisien dan hemat biaya, serta berpotensi luas dalam mendukung pemanfaatan energi terbarukan di kawasan perkotaan maupun sektor domestik (Al-Gburi et al., 2022).