

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Energi Angin

Angin merupakan udara yang bergerak terjadi karena ada perbedaan suhu udara dingin dengan suhu panas Arnawan Hasibuan, dkk, 2020. Angin menjadi sumber energi mekanik yang dapat diperbaharui sehingga bisa dimanfaatkan sebagai sumber energi karena energi dari angin dapat digunakan untuk menggerakkan turbin angin Mustika, n.d., p. 2020) Energi angin merupakan salah satu bentuk energi terbarukan yang bersumber dari pergerakan udara di atmosfer akibat perbedaan tekanan dan suhu antara wilayah bumi yang satu dengan yang lainnya . Perbedaan tekanan ini menyebabkan udara mengalir dari daerah bertekanan tinggi ke rendah membentuk arus angin yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi.

Angin mengandung energi karena udara yang bergerak memiliki massa dan kecepatan sehingga sebagian energi geraknya menjadi gerakan mekanis bila mengenai bilah turbin yang disebut rotasi turbin. Rotasi dapat dikonversi menjadi energi listrik melalui generator dan proses ini mengubah angin menjadi sumber energi alternatif bersih, ramah lingkungan bahkan tidak mengandung emisi karbon. Keunggulan utama energi angin karena sifatnya baru dan tersedia di berbagai tempat seperti dataran tinggi atau rendah. Selain itu, energi angin tidak menghasilkan limbah atau pencemaran udara sehingga relevan menjadi solusi yang digunakan untuk mengatasi krisis energi dan pemanasan global. Energi angin dapat menghasilkan listrik dengan pemanfaatan turbin angin. Secara umum,

tempat yang terbaik untuk pemasangan turbin angin adalah celah di antara gunung atau bukit, dataran terbuka dan kawasan pantai Latif et al., (2022).

Turbin angin sebagai alat konversi energi yang dibedakan menjadi dua tipe yaitu horizontal dan vertikal. Turbin sumbu horizontal banyak digunakan di ladang angin besar, namun membutuhkan arah angin yang stabil. Sementara itu, turbin angin vertikal seperti turbin Savonius mampu menangkap angin dari segala arah dan bekerja pada kecepatan rendah sehingga cocok untuk penggunaan skala kecil. Pengembangan teknologi turbin angin kini difokuskan pada peningkatan efisiensi konversi energi seperti modifikasi desain sudu. Inovasi seperti penggunaan permukaan *dimple* bertujuan memperbaiki karakteristik aliran udara di sekitar sudu, sehingga lebih banyak energi angin yang dimanfaatkan. Oleh karena itu, pemahaman dasar tentang energi angin penting dalam pengembangan turbin efisiensi tinggi.

2.2 Kincir angin

Kincir atau turbin angin merupakan sebuah alat yang digunakan dalam Sistem Konversi Energi Angin (SKEA) yang digerakkan oleh tenaga angin sehingga menghasilkan energi mekanik atau gerak (Saputra et al., 2020). Kincir angin banyak ditemukan di negara-negara Eropa khususnya Belanda dan Denmark yang pada waktu itu banyak digunakan untuk irigasi, menumbuk hasil pertanian dan penggilingan gandum. Pada saat ini kincir angin telah dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik. Kincir angin yang digunakan untuk menghasilkan sebuah energi listrik disebut dengan turbin angin (*wind turbine*)(Arif, 2019). Turbin angin mampu mengubah energi angin menjadi energi mekanik dengan

memanfaatkan putaran kincir untuk memutar generator sehingga akan dihasilkan energi listrik.

Kelebihan dan kekurangan kincir angin

1. Kelebihan

1. Ramah lingkungan (tidak polusi, bersih)
2. Merupakan *renewable energy* (energi yang tidak dapat habis)
3. Sering dipadukan dengan sumber energi lain terutama sumber energi yang terbarukan.
4. Merendahkan efek rumah kaca.

2. Kekurangan

1. Hanya bisa di tempat-tempat tertentu yang memiliki banyak angin (tidak bisa di sembarang tempat).
2. Butuh lahan yang cukup besar materi berhubungan dengan kincir angin.

2.3 Turbin Savonius

Turbin Savonius adalah salah satu jenis turbin angin sumbu vertikal yang bekerja berdasarkan prinsip gaya hambat. Artinya, turbin ini memanfaatkan dorongan angin secara langsung untuk memutar sudu-sudunya. Berbeda dengan turbin sumbu horizontal yang memerlukan arah angin tertentu, turbin Savonius dapat menangkap angin dari segala arah tanpa memerlukan sistem pengarah sehingga bisa digunakan pada wilayah dengan angin tidak menentu. Desain turbin Savonius umumnya sederhana dan mudah dibuat. Sudu-sudunya memiliki bentuk lengkung atau melipat seperti huruf S, U, dan L.



Gambar 2.1 Turbin Savonius Tipe L
Sumber: (Wijianti et al., 2019)

Dalam penelitian ini, digunakan bentuk sudu tipe L yang dikenal mampu menghasilkan gaya torsi awal lebih besar dibanding tipe lain. Penggunaan empat sudu juga dapat memberikan distribusi gaya rotasi yang lebih stabil, meskipun dapat meningkatkan hambatan antar sudu jika tidak dirancang dengan baik. Keunggulan utama turbin Savonius terletak pada kemampuannya bekerja di kecepatan angin rendah, serta mudah dirawat dan dipasang bahkan di lingkungan dengan ruang terbatas seperti atap rumah atau daerah terpencil. Oleh karena itu, turbin ini sering digunakan untuk keperluan energi skala kecil seperti pompa air.

Keunggulan lain dari turbin ini yaitu mampu beroperasi pada kecepatan angin yang relatif rendah, sekitar 1 – 2 m/s. Cara konversi energi angin menjadi energi mekanik dapat dilakukan dengan menggunakan turbin angin savonius (Jamal, 2019). Turbin angin Savonius adalah jenis turbin angin tipe *drag*, dimana turbin ini menghasilkan daya dengan memanfaatkan gaya putar yang dihasilkan dari tiap-tiap sudunya. Drag merupakan gaya yang bekerja berlawanan dengan

arah angin yang menumbuk sudu. Upaya lain meningkatkan performanya, penelitian ini akan difokuskan pada modifikasi bentuk dan permukaan sudu. Salah satu pendekatan yang digunakan adalah penggunaan *dimple* atau cekungan kecil pada permukaan sudu, yang bertujuan untuk memperbaiki aliran udara di sekitarnya.

2.4 Pengertian *Dimple*

Dimple merupakan proses fabrikasi mengurangi berat lembaran logam dengan cara membuat lesung pipit pada lembaran logam yang telah dilubangi lalu dipress agar berbentuk *dimple* (Nur Kholis et al., 2024). Konsep *dimple* pertama kali dikenal luas melalui penerapannya pada bola golf, yang memiliki ratusan *dimple* di permukaannya hambatan udara dan meningkatkan jarak tempuh. Secara aerodinamika, *dimple* mampu menciptakan lapisan aliran turbulen tipis di sekitar permukaan benda yang mencegah aliran utama terpisah terlalu cepat, sehingga mengurangi *drag* (gaya hambat) dan meningkatkan kestabilan aliran udara.



Gambar 2.2 Pola *dimple* pada bola golf
 Sumber: [Racmadi Wahyu Adie, \(2017\)](#)

Dalam konteks turbin angin, khususnya turbin savonius yang bekerja berdasarkan gaya hambat, *dimple* memiliki potensi besar untuk efisiensi sudu.

Akibatnya, sudu dapat menangkap energi angin dengan lebih efektif dan menghasilkan torsi yang lebih besar. Ukuran, bentuk, dan distribusi *dimple* merupakan faktor penting yang menentukan efektivitasnya. Diameter *dimple* memiliki pengaruh langsung terhadap seberapa besar turbulensi yang dihasilkan dan bagaimana aliran udara berinteraksi dengan permukaan sudu. *Dimple* yang terlalu kecil tidak cukup mengganggu aliran untuk menghasilkan efek yang signifikan, sementara *dimple* yang terlalu besar dapat menimbulkan turbulensi berlebihan yang merugikan. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian untuk menemukan dimensi *dimple* yang paling optimal untuk aplikasi pada sudu turbin angin.

Penerapan *dimple* pada sudu turbin merupakan inovasi yang relatif baru dan masih terbatas kajiannya, terutama pada turbin vertikal pada tipe Savonius. Meningkatnya kebutuhan sistem energi terbarukan yang efisien dan murah, pendekatan ini menjadi solusi potensial yang layak untuk dikembangkan. Selain dapat meningkatkan performa tanpa mengubah desain makro turbin secara signifikan, penerapan *dimple* juga memanfaatkan prinsip-prinsip dasar aerodinamika yang terbukti efektif di bidang lain. Inilah yang mendorong pentingnya penelitian lebih lanjut tentang pengaruh diameter *dimple* terhadap karakteristik turbin Savonius tipe L empat sudu seperti yang menjadi fokus dalam penelitian ini.

2.5 Tip Speed Ratio

Tip Speed Ratio (TSR) merupakan salah satu parameter penting dalam performa turbin angin termasuk turbin Savonius. Istilah ini mengacu pada perbandingan antara kecepatan ujung sudu turbin dengan kecepatan angin yang mengenainya (Latif et al., 2022). Artinya, TSR menggambarkan seberapa cepat ujung bilah atau sudu berputar dibandingkan dengan kecepatan angin yang masuk. Nilai TSR memberikan gambaran mengenai efisiensi interaksi antara sudu dan aliran angin dalam menghasilkan energi mekanik.

TSR berperan penting dalam menentukan desain sudu, sistem kontrol turbin dan setiap jenis turbin memiliki nilai TSR optimal yang berbeda. Turbin angin sumbu horisontal bekerja dengan prinsip gaya angkat, biasanya memiliki TSR yang lebih tinggi karena bilahnya berputar lebih cepat dari angin untuk memaksimalkan efisiensi. Sebaliknya, turbin Savonius yang bekerja berdasarkan gaya hambat umumnya memiliki nilai TSR rendah karena tidak memerlukan rotasi tinggi untuk mulai berkerja, dan efisiensinya tetap optimal pada kecepatan rotasi rendah.

Nilai TSR yang terlalu tinggi atau rendah dapat menyebabkan turbin bekerja diluar zona efisiensinya. Ketika nilai TSR rendah, sudu bergerak terlalu lambat hingga tidak mampu menangkap cukup energi dari angin sedangkan jika nilainya tinggi sudu akan bergerak lebih cepat dari angin sehingga menciptakan turbulensi dan energi. Karena itu, pemilihan desain sudu dan pengaturan sistem harus mempertimbangkan nilai TSR agar turbin dapat beroperasi dengan maskimal dalam berbagai kondisi angin.

Dalam konteks penelitian ini, pemahaman mengenai TSR penting karena perubahan geometri sudu, seperti penambahan *dimple*. Hal ini dapat mempengaruhi distribusi tekanan dan aliran udara di sekitar sudu bahkan secara tidak langsung akan berpengaruh pada kecepatan rotasi sudu yang akhirnya mengubah nilai TSR. Maka analisis terhadap perubahan TSR dapat menjadi salah satu indikator penting dalam menilai dampak modifikasi desain terhadap performa turbin Savonius tipe L empat sudu.

2.6 Konsep Dasar Perhitungan

Berikut ini adalah rumus-rumus yang digunakan untuk melakukan perhitungan dan analisis kerja turbin angin yang diteliti.

2.6.1 Luas Penampang Rotor

Luas penampang rotor adalah area yang diswept oleh bilah-bilah turbin saat berputar. Luas penampang rotor merupakan faktor penting dalam menentukan daya yang dapat dihasilkan oleh turbin angin. Berikut adalah rumus yang digunakan untuk menghitung luas penampang, yakni:

$$A = D \cdot h \dots\dots\dots (2.1)$$

Sumber : (Arif, 2019)

Keterangan

A = luas penampang rotor (m²)

D = diameter rotor (m)

h = tinggi rotor (m)

2.6.2 Daya Angin (Pin)

Daya angin (Pin) adalah daya yang dihasilkan oleh sudu kincir angin yang diakibatkan oleh hembusan angin. Daya angin dapat dirumuskan

sebagai berikut:

$$P_{in} = \frac{1}{2} \rho A \cdot v^2 \dots\dots\dots (2.2)$$

Sumber:(Arif, 2019)

Keterangan:

P_{in} = daya angin (watt)

ρ = massa jenis (kg/m^3)

A = luas penampang(m^2)

v = kecepatan angin (m/s^2)

2.6.3 Gaya Pembebanan

Gaya pembebanan adalah gaya yang bekerja pada turbin akibat pengaruh angin, berat komponen, dan juga gaya-gaya lain yang mungkin terjadi saat turbin beroperasi.

$$F=m \cdot g \dots\dots\dots (2.3)$$

Sumber:(Arif, 2019)

Keterangan:

F = Gaya pembebanan

m = massa / beban (kg)

g = percepatan gravitasi bumi (m/s^2)

2.6.4 Torsi (τ)

Torsi adalah gaya yang menyebabkan suatu benda berputar disekitar sumbu. Torsi merupakan hasil kali gaya pembebanan (F) dengan panjang lengan torsi (I). Torsi dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\tau = F \cdot r \dots\dots\dots (2.4)$$

Sumber:(Arif, 2019)

Keterangan

τ = torsi (Nm)

F = gaya pembebanan (N)

r = Jari-jari poros (m)

2.6.5 Kecepatan Sudut (ω)

Kecepatan sudut atau dalam kasus ini kecepatan ujung sudu merupakan kecepatan ujung sudu terhadap satu kali putaran proses setiap detik. Maka dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \dots\dots\dots (2.5)$$

sumber : (Saputra et al., 2020)

Keterangan

ω = kecepatan sudut(rad/s)

n = putaran turbin(rpm)

π = kecepatan lingkaran (3,14)

2.6.6 Daya turbin(Pt)

Daya turbin adalah jumlah energi yang dihasilkan oleh turbin angin dalam satuan waktu tertentu. Perhitungan daya turbin yang dapat dihasilkan oleh sebuah tubin angin dengan persamaan sebagai berikut :

$$Pt = \tau \cdot \omega \dots\dots\dots (2.6)$$

Sumber:(Arif, 2019)

Keterangan

Pt = daya turbin (Watt)

τ = torsi $\left(\frac{N}{m}\right)$

ω = kecepatan sudut (rad/s)

2.6.7 Tip speed ratio (λ)

Tip speed ratio adalah perbandingan antara kecepatan linear lingkaran terluar dengan kecepatan angin. Perhitungan nilai *tip speed ratio* dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\lambda = \frac{\omega \cdot r}{v} \dots\dots\dots (2.7)$$

Sumber: (Arif, 2019)

Keterangan

λ = *tip speed ratio*

ω = kecepatan sudu(rad/s)

r = jari – jari poros(m)

v = kecepatan angin (m/s)

2.6.8 Efisiensi Turbin (η)

Efisiensi turbin adalah kemampuan turbin untuk mengubah energi kinetik angin menjadi energi listrik. Untuk mencari nilai efisiensi turbin angin Savonius tipe L menggunakan persamaan di bawah ini :

$$\eta = \frac{P_t}{P_{in}} \times 100 \% \dots\dots\dots (2.8)$$

Sumber : (Saputra et al., 2020)

Keterangan

η = efisiensi turbin (100%)

P_t = daya turbin (Watt)

p_{in} = daya angin (Watt)

2.7 Penelitian Terdahulu

(Arif, 2019) melakukan penelitian tentang Analisis dan pengujian kinerja turbin angin savonius 4 sudu. Tujuan dari penelitian ini yakni untuk mengetahui kinerja dan efisiensi turbin angina savonius 4 sudu dalam menghasilkan daya listrik dan juga untuk menguji pengaruh jumlah sudu terhadap kinerja turbin angina terutama dalam kondisi kecepatan angin. Metode yang digunakan Simulasi CFD (*Cimulating Fluid Dynamics*) dengan variasi putaran poros (206,7 dan 466) rpm dengan variable kecepatan angin sebesar 3,9 m/s dan 5,2 m/s. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa Putaran pada poros motor berbanding lurus dengan kecepatan angin, begitu pula sebaliknya. Pada putaran poros tertinggi yaitu 466 rpm terjadi pada kecepatan angin 5,2 m/s. Untuk putaran terendah yaitu 206,7 rpm pada kecepatan angin 3,9 m/s. Daya generator yang dihasilkan semakin besar seiring dengan bertambahnya kecepatan angin. Angin pada kecepatan tertinggi yaitu 5,2 m/s menghasilkan daya generator sebesar 10,5 watt. Pada kecepatan angin terendah yaitu 3,9 m/s menghasilkan daya generator sebesar 4,18 m/s. Dan Koefisien power tertinggi sebesar 0,027 dengan besar *tip speed ratio* sebesar 0,84. Untuk koefisien power terendah terjadi pada saat *tip speed ratio* sebesar 0,019 sebesar 0,71.

Saputra et al., 2020) melakukan penelitian tentang Pengaruh diameter dan jumlah sudu turbin angin savonius tipe L terhadap unjuk kerja yang dihasilkan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membandingkan hasil efisiensi dan daya yang lebih baik pada kinerja turbin dengan jumlah sudu

yakni 2 dan 4. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah kuantitatif yang memvariasikan diameter turbin angin (20 dan 40) cm dengan jumlah sudu turbin angin yaitu 2 dan 4. Hasil dari penelitian ini adalah variasi diameter 40 cm dan 4 sudu memiliki kinerja terbaik dengan menghasilkan daya 1,676 watt, BHP 3,352 watt, dan efisiensi 2,17 %. Torsi tertinggi diraih turbin angin dengan variasi diameter 40 cm dan 2 sudu dengan torsi 0,116 Nm.

(Nur Kholis et al., 2024) melakukan penelitian yang berjudul Analisa Kekakuan Pelat terhadap Pembentukan Dimple Dies dengan Variasi Diameter Lubang dan Jumlah Lubang *Dimple*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui frekuensi natural panel atau pelat setelah berubah bentuk menjadi *dimple*. Selanjutnya penelitian ini untuk mengetahui pengaruh dari diameter lubang dan jumlah lubang *dimple* terhadap frekuensi natural dan kekakuan panel atau pelat dengan menggunakan metode eksperimen, yang memvariasikan jumlah lubang *dimple* 16 dan 20 dengan diameter lubang *dimple* yaitu 20 dan 25. Hasil dari penelitian ini adalah Variasi diameter lubang *dimple* 25 dan jumlah lubang *dimple* 16 memiliki kinerja terbaik dengan rata-rata kekakuan plat senilai 399,01.

I Kadek Alit Dwika Mahajaya (2023) melakukan penelitian yang berjudul Pengaruh penambahan *dimple* pada *blade* turbin angin savonius dengan metode *computational fluid dynamic* (cfd) untuk meningkatkan performa turbin angin savonius. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengurangi gaya *drag* yang dihasilkan oleh turbin dan membandingkan hasil dari torsi, RPM, dan daya dari turbin standar dengan turbin menggunakan

dimple. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah Metode numerik dengan teknologi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Dengan membuat *dimple* ukuran 5 mm dan jarak antara *dimple* 14 dan kedalaman 1 mm. Hasil dari penelitian ini adalah RPM pada turbin konvensional 420,5 dan pada turbin dengan *dimple* 436,5 jadi RPM naik sebesar 3,66%. Torsi pada turbin konvensional 0.01 Nm dan pada turbin dengan *dimple* 0.02 Nm jadi torsi naik sebesar 12,33 %. Daya yang dihasilkan pada turbin konvensional 0.26 dan pada turbin dengan *dimple* 0.33 jadi daya naik sebesar 20,3%.