

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi angin merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan karena ketersediaannya yang melimpah dan sifatnya yang berkelanjutan. Selain itu, energi angin tidak menghasilkan emisi gas CO₂, sehingga tidak berkontribusi terhadap pembentukan gas rumah kaca (*greenhouse gases*) [1]. Pemanfaatan energi angin difasilitasi oleh perangkat mekanis yang dikenal sebagai turbin angin. Turbin angin berfungsi untuk mengkonversi energi kinetik angin menjadi energi mekanik atau energi listrik [2]. Besarnya energi yang dihasilkan oleh turbin angin bergantung pada kecepatan angin dan dimensi area sapuan sudu turbin [3], [4].

Lanzafame R [5] mengklasifikasikan turbin angin ke dalam tiga kategori berdasarkan keluaran dayanya, yaitu turbin angin berskala besar dengan kapasitas lebih dari 1 MW, turbin angin berskala menengah dengan kapasitas antara 40 kW hingga 1 MW, serta turbin angin berskala kecil dengan kapasitas kurang dari 40 kW. Selain itu, turbin angin juga diklasifikasikan berdasarkan kecepatan angin operasionalnya sesuai dengan standar *International Electrotechnical Commission* (IEC), yang terdiri dari empat kelas: IEC I (*high wind*) dengan kecepatan angin rata-rata tahunan sebesar 10 m/s, IEC II (*medium wind*) sebesar 8,5 m/s, IEC III (*low wind*) sebesar 7,5 m/s, dan IEC IV (*very low wind*) sebesar 6 m/s [6]–[8]. Meskipun sebagian besar turbin angin yang dikembangkan saat ini merupakan turbin berkecepatan tinggi yang dioptimalkan untuk kondisi angin ideal dan berskala besar, terdapat peningkatan perhatian terhadap pengembangan turbin angin berskala kecil, khususnya untuk aplikasi di lingkungan permukiman. Penelitian terhadap turbin berskala kecil ini difokuskan pada upaya optimalisasi performa agar dapat beroperasi secara efisien pada kondisi kecepatan angin rendah.

Turbin angin yang dioperasikan di kawasan permukiman harus memenuhi sejumlah kriteria teknis, antara lain berukuran kompak untuk meminimalkan kendala ruang dan dampak visual, menghasilkan tingkat kebisingan yang rendah

selama beroperasi, serta memiliki kemudahan dalam aspek pengoperasian dan pemeliharaan guna meningkatkan keandalan dan kenyamanan bagi pengguna. Kondisi angin di wilayah permukiman umumnya bersifat turbulen akibat adanya hambatan dari bangunan dan vegetasi, yang menyebabkan profil kecepatan angin cenderung rendah. Bahkan ketika turbin dipasang di atap (*rooftop*) yang tidak terhalang oleh bangunan tinggi, arah angin tetap sulit diprediksi karena pola aliran angin yang tidak stabil. Oleh karena itu, diperlukan desain turbin angin yang mampu beradaptasi dengan arah angin yang berubah-ubah dan tetap mempertahankan kinerja optimal dalam kondisi tersebut.

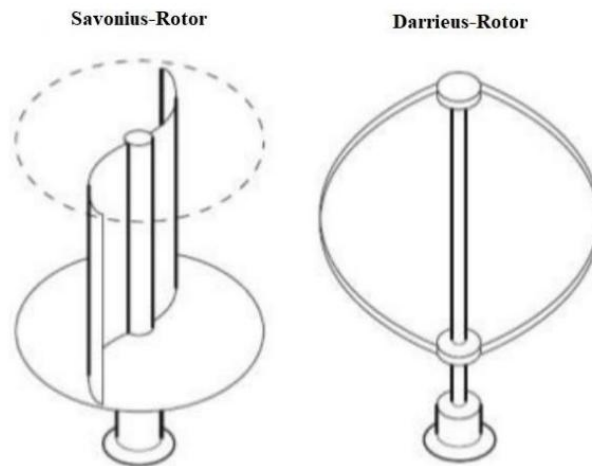
Turbin angin dapat diklasifikasikan ke dalam dua kategori utama berdasarkan orientasi sumbu putarnya, yaitu *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) dan *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT). Keduanya memiliki karakteristik teknis yang berbeda, mencakup keunggulan serta keterbatasan dalam hal efisiensi, stabilitas, kemudahan operasi, dan biaya pemeliharaan. Dalam konteks lingkungan permukiman yang memiliki pola angin tidak menentu, desain turbin angin yang mampu beradaptasi dengan perubahan arah angin menjadi krusial untuk memastikan kinerja yang optimal. Perbandingan karakteristik teknis dari kedua jenis turbin ini disajikan secara rinci pada Tabel 1 [9]–[20].

Tabel 1. 1 Kelebihan dan kekurangan Turbin angin berdasarkan arah sumbu putar

	HAWT	VAWT
Kelebihan	<ul style="list-style-type: none"> - Stabilitas yang baik - Keandalan tinggi - Efisiensi tinggi - Berbagai pitch blade yang digunakan untuk turbin horisontal yang memungkinkan energi maksimum 	<ul style="list-style-type: none"> - Mudah dioperasikan - Konstruksi sederhana dan pemeliharaan struktur berbiaya rendah - Mampu menerima angin dari segala arah - Kebisingan rendah - Mampu beroperasi pada kecepatan angin rendah - Cocok di set-up di pemukiman
Kekurangan	<ul style="list-style-type: none"> - Fabrikasi yang kompleks - Tingkat kebisingan yang tinggi - Beban dan getaran yang berat, membutuhkan perlindungan yang kuat - Harus dibangun dengan perangkat YAW yang membutuhkan biaya dan kecanggihan yang tinggi, karena baling-balingnya selalu menghadap ke arah angin 	<ul style="list-style-type: none"> - Efisiensi rendah - Torsi putaran ringan

Berdasarkan Tabel 1, teknologi turbin angin jenis vertikal lebih sesuai untuk diaplikasikan di kawasan permukiman karena memenuhi persyaratan operasional

di lingkungan tersebut. Turbin angin vertikal terbagi menjadi dua jenis utama, yaitu turbin angin Darrieus dan Savonius (Gambar 1.1).



Gambar 1. 1 Turbin Savonius Vertikal

Dalam penelitian ini, turbin Savonius dipilih untuk dikembangkan karena memiliki kemampuan *self-starting* yang lebih baik dibandingkan dengan turbin Darrieus. Menurut Wafulaet, D.W. *et al.* [21], Savonius memiliki konstruksi yang lebih sederhana sehingga biaya produksinya lebih rendah, tidak bergantung pada arah angin, serta memiliki torsi awal yang tinggi pada kecepatan angin yang sangat rendah [22], [9-14]. Kekurangan utama turbin Savonius adalah efisiensinya yang rendah, yaitu sekitar 0.18 untuk tipe klasik [10], [20], [23], [24]. Namun, efisiensi ini dapat ditingkatkan melalui optimasi geometris [25], [26].

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa efisiensi turbin Savonius dapat ditingkatkan melalui tiga pendekatan utama, yaitu:

1. Profil Aerodinamika Turbin

Mencakup analisis bentuk profil sudu dan kekasaran permukaan, yang memengaruhi pola aliran fluida di sekitar sudu. Perubahan karakteristik ini dapat mengubah transisi aliran dari laminar ke turbulen, sehingga berdampak pada koefisien hambatan dan performa *aerodinamis* turbin.

2. Parameter Geometri Turbin

Mengkaji pengaruh variabel geometri seperti *overlap ratio*, *aspect ratio*, penggunaan *endplate*, dan *gap ratio*, serta jumlah bilah terhadap kinerja turbin.

3. Teknik Augmentasi

Melibatkan penambahan komponen pendukung seperti sudu pengarah, *wind shields*, nozel, *circular wind shields*, tirai angin (*curtain*), dan peningkatan jumlah tingkat untuk meningkatkan efisiensi konversi energi.

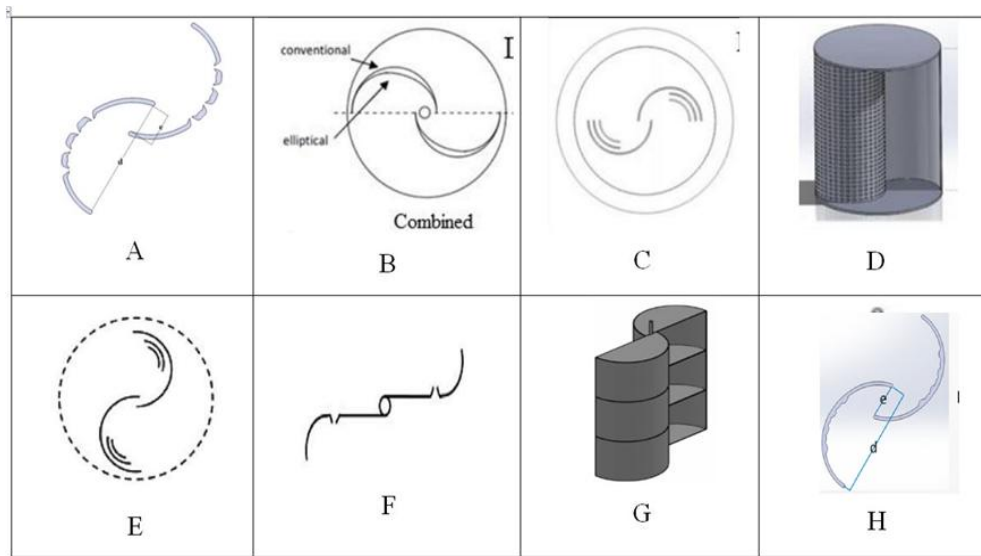
Berdasarkan tiga kategori utama yang telah dikaji oleh peneliti terdahulu dalam upaya meningkatkan efisiensi turbin Savonius, disertai ini secara lebih mendalam menganalisis pengaruh karakteristik aerodinamika profil sudu terhadap peningkatan kinerja turbin Savonius. Kajian ini difokuskan pada bagaimana perubahan profil cekung sudu dapat memengaruhi distribusi tekanan, pola aliran udara, serta gaya *aerodinamis* yang bekerja pada turbin, sehingga dapat memberikan kontribusi terhadap peningkatan efisiensi turbin Savonius.

Beberapa penelitian yang membahas modifikasi profil sudu Savonius untuk meningkatkan kinerja turbin Savonius disajikan pada Tabel 1.2

Tabel 1.2 *Literature review* tentang modifikasi profil sudu

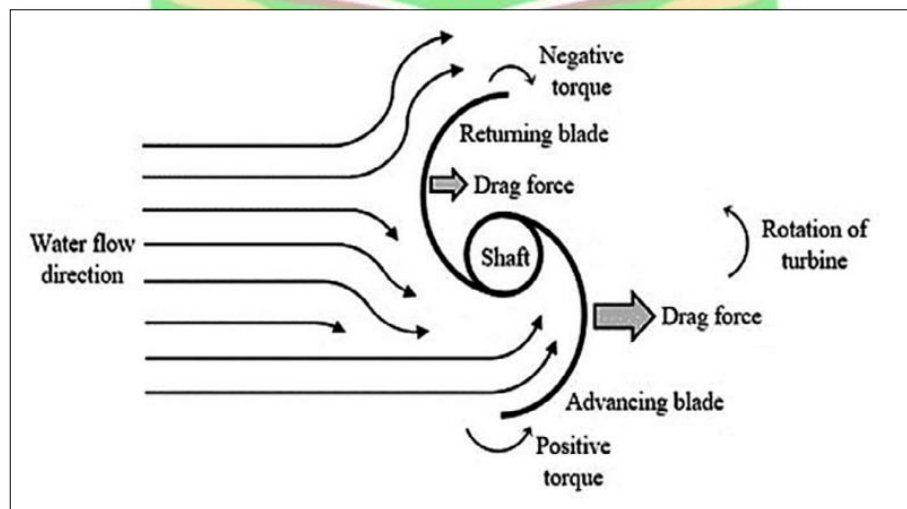
Konfigurasi	Keunggulan	Kelemahan
4 buah alur pada sisi Cembung (Gambar 1.2A) [27]	<ul style="list-style-type: none"> - Dapat menaikkan efisiensi pada Savonius eliptikal dengan nilai C_p 0,27 pada TSR 0,8, menurunkan torsi negatif pada cembung. 	<ul style="list-style-type: none"> - Diuji pada 1 kecepatan angin 6 m/s. Data masih sangat minim - Tidak ada mengkaji karakteristik <i>drag</i> yang dihasilkan model modifikasi
Perbedaan ketebalan ujung dan tengah sudu (Gambar 1.2B) [28]	<ul style="list-style-type: none"> - C_p maksimum 11% lebih tinggi dibandingkan dengan blade konvensional. - Koefisien daya maksimum 5,5% lebih tinggi jika dibandingkan dengan bilah elips 	<ul style="list-style-type: none"> - Data 1 kecepatan di 4 m/s diuji secara eksperimental saja - Tidak ada mengkaji karakteristik <i>drag</i> yang dihasilkan model modifikasi
Blade berlapis 3 di ujung (Gambar 1.2C) [29]	<ul style="list-style-type: none"> - Dapat menaikkan efisiensi sebesar 8 % dibandingkan dengan yang konvensional. - Diuji pada rentang kecepatan 6,7 – 10 m/s 	<ul style="list-style-type: none"> - Efisiensi masih rendah yaitu 0,21 pada TSR 0,67 - Baru sebatas uji numerikal - Tidak ada mengkaji karakteristik <i>drag</i> yang dihasilkan model modifikasi
Pemberian kekasaran 4 lobang pada permukaan cekung (Gambar 1.2D) [30]	<ul style="list-style-type: none"> - Pola aliran terdapat aliran jet menuju sudu mundur, 	<ul style="list-style-type: none"> - Tidak ada pembanding yang jelas - Tidak ada mengkaji karakteristik <i>drag</i> yang dihasilkan model modifikasi
Saluran vented pada tengah cembung Gambar 1.2F) [31]	<ul style="list-style-type: none"> - Ada data pola aliran yang menunjukkan jika pemberian vented tidak berpengaruh pada efisiensi Savonius 	<ul style="list-style-type: none"> - Efisiensi menurun dibandingkan konvensional - Tidak ada mengkaji karakteristik <i>drag</i> yang dihasilkan model modifikasi

Fin pada sisi cekung (Gambar 1.2G) [32]	- Efisiensi meningkat dibandingkan konvensional tetapi sebesar 1%	- Efisiensi rendah yaitu 0,11 diuji pada kecepatan 4 m/s - Tidak ada mengkaji karakteristik <i>drag</i> yang dihasilkan model modifikasi
Kekasaran gelombang pada Savonius Helikal (Gambar 1.2H) [33]	- Nilai C_p meningkat 18 % dibandingkan turbin Savonius konvensional ($C_p=0,29$ pada TSR 0,79 $U=10$ m/s) - (Rentang pengujian 6-10 m/s)	- Tidak ada analisa aliran - Rentang kecepatan tinggi - Tidak ada pembahasan gaya <i>drag</i>



Gambar 1.2 Macam-macam profil rotor Savonius

Prinsip kerja turbin Savonius adalah memanfaatkan perbedaan gaya hambat pada kedua sudu yang menyebabkan turbin berputar [9] ilustrasi pada Gambar 1.3.



Gambar 1. 3 Prinsip kerja rotor Savonius

Semakin besar perbedaan gaya hambat, semakin besar pula daya mekanis yang dihasilkan. Untuk mengoptimalkan daya keluaran, sudu yang bergerak maju harus memiliki gaya hambat yang lebih besar guna menghasilkan torsi, sementara sudu yang bergerak mundur perlu diminimalkan gaya hambatnya untuk meningkatkan efisiensi *aerodinamis* [34]. Jadi jika F_{cekung} lebih besar dari $F_{cembung}$, maka akan meningkatkan nilai torsi, yang berdampak pada peningkatan performa turbin Savonius.

Mengacu pada prinsip kerja Savonius, yaitu efisiensi dapat diperbaiki melalui peningkatan gaya *drag* pada sisi cekung sudu. Dengan metode pemberian kekasaran kemungkinan dapat menaikkan gaya *drag* pada sisi cekung. Berdasarkan teori aerodinamika, kekasaran permukaan memiliki dampak terhadap transisi lapisan batas dari laminar ke turbulen serta peningkatan gaya *drag*. Menurut teori lapisan batas yang dikembangkan oleh Ludwig Prandtl, aliran fluida yang melewati suatu permukaan akan membentuk lapisan batas, yang pada awalnya bersifat laminar sebelum akhirnya mengalami transisi menjadi turbulen [23]. Kekasaran permukaan dapat mempercepat transisi ini dengan menambah gangguan pada aliran, yang kemudian meningkatkan pertukaran momentum dalam lapisan batas dan mempercepat timbulnya turbulensi.

Dalam konteks gaya *drag*, teori *drag aerodinamika* membagi gaya hambat menjadi dua komponen utama, yaitu *skin friction drag* dan *pressure drag*. Kekasaran permukaan meningkatkan *skin friction drag* dengan memperbesar gesekan antara fluida dan permukaan padat. Selain itu, berdasarkan teori separasi aliran, kekasaran yang berlebihan dapat menyebabkan pemisahan aliran lebih dini, menghasilkan daerah tekanan rendah di belakang objek dan meningkatkan *pressure drag* [35].

Kekasaran merupakan ketidakaturan geometris pada permukaan benda [36]. Berdasarkan efek yang ditimbulkan oleh kekasaran terhadap peningkatan gaya *drag* maka pada disertasi ini akan dibahas pengaruh tingkat kekasaran pada efisiensi turbin Savonius jenis konvensional. Tingkat kekasarannya akan divariasikan yaitu kekasaran rendah (menggunakan kertas amplas), kekasaran sedang (pola zigzag dan kekasaran tinggi (menggunakan kisi) yang diuji pada kecepatan angin rendah yaitu 4-6 m/s.

Parameter kinerja yang dibahas hanya sebatas nilai C_P dan C_T , dan pembahasan tentang pengaruh gaya *drag* (*aerodinamis*). Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh peneliti terdahulu, memberikan kekasaran dengan pola zigzag bertingkat pada airfoil dapat menaikkan gaya *drag* 20% dibanding model halus [37]. Menurut Nugroho, S *et. al.* [38] rasio total area frontal kekasaran terhadap total luas permukaan besar dari 15% maka rasio *drag* tekanan terhadap hambatan total meningkat dengan meningkatnya densitas frontal kekasaran. Bentuk permukaan yang berbeda akan mempengaruhi gaya *drag* dan pola aliran fluida pada rotor Savonius untuk meningkatkan kinerjanya [39].

1.2 Rumusan Masalah

Studi sebelumnya menemukan bahwa peningkatan kekasaran permukaan secara signifikan mengganggu distribusi koefisien tekanan, yang menyebabkan pemisahan aliran lebih awal dan transisi ke kondisi aliran turbulen [12-16]. Namun, belum diketahui bagaimana pengaruh pemberian kekasaran dalam bentuk pola zigzag, amplas, dan kisi pada permukaan cekung sudu turbin Savonius terhadap karakteristik aerodinamisnya. Apakah pemberian kekasaran tersebut pada kecepatan angin rendah dapat meningkatkan drag pada sisi cekung, sehingga berkontribusi pada peningkatan torsi dan efisiensi turbin Savonius?

1.3 Pertanyaan Penelitian

Dari analisis di atas maka dapat dirumuskan beberapa permasalahan terkait dengan penelitian yang akan dilakukan:

1. Bagaimana pengaruh kekasaran (amplas, zigzag dan kisi) pada permukaan cekung sudu terhadap kinerja turbin Savonius ditinjau dari C_p dan C_T pada kecepatan angin rendah dengan menggunakan metode numerik dan eksperimental?
2. Bagaimana karakteristik gaya *aerodinamis* dan aliran fluida yang ditimbulkan oleh perbedaan variasi tersebut (khusus kekasaran zigzag)?

1.4 Tujuan Penelitian

1.4.1 Tujuan umum

Tujuan umum dari disertasi ini adalah menaikkan kinerja turbin Savonius melalui peningkatan nilai *drag* pada sudu cekung Savonius dengan cara memodifikasi permukaan cekung dengan memberikan kekasaran berupa pola zigzag, kekasaran amplas dan kisi yang diuji secara eksperimental atau numerik pada kecepatan angin rendah (4-6 m/s).

1.4.2 Tujuan Khusus

Tujuan khusus disertasi ini adalah

1. Dapat mengembangkan turbin Savonius konvensional dengan menerapkan variasi ukuran tinggi zigzag, variasi kekasaran amplas dan variasi kisi pada permukaan sudu cekung dan melihat pengaruhnya terhadap kinerja turbin ditinjau dari parameter kinerja C_p , dan C_T pada kecepatan angin 4-6 m/s dengan menggunakan metode numerik dan eksperimental
2. Mendapatkan karakteristik gaya *aerodinamis* dan aliran fluida khusus untuk aliran zigzag yang ditimbulkan oleh perbedaan variasi tersebut dengan metode numerik (khusus variasi pola zigzag).

1.5 Hipotesis

Berdasarkan hasil studi literatur, dinyatakan hipotesis penelitian sebagai berikut:

1. Perubahan bentuk permukaan pada sudu Savonius diperkirakan akan mempengaruhi pola aliran fluida dan distribusi tekanan yang melewati permukaan sudu. Ketika tinggi kekasaran mampu mempengaruhi lapisan batas, terjadi peningkatan signifikan dalam pencampuran turbulen dalam aliran, karena adanya gradien kecepatan dan tekanan yang besar. Hal ini menyebabkan peningkatan gaya hambat sudu cekung turbin.
2. Secara dinamik kekasaran pada permukaan Savonius menyebabkan perubahan momentum yang terjadi pada sudu karena efek kekasaran akan menyebabkan mempercepat aliran balik yang berpengaruh pada gradien momentum ini akan mempengaruhi gaya *drag* pada rotor, yang akan mendorong rotor sehingga terjadi perubahan kecepatan putar. Perubahan

putaran rotor akan memicu timbulnya torsi. Torsi ini diharapkan akan meningkatkan kinerja dinamis dari turbin Savonius.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan disertasi terdiri dari lima bab diuraikan setiap masing-masing bab sebagai berikut:

1. Bab I Pendahuluan

Bab ini membahas tentang latar belakang disertasi, rumusan masalah, pertanyaan penelitian, tujuan penelitian dan hipotesis.

2. Bab II Landasan Teori

Bab ini membahas tentang landasan teori yang mendukung yaitu tentang *literature review* penelitian yang telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya, ketersediaan daya angin, bilangan Reynolds, parameter ukur untuk kinerja Savonius, gaya *drag*, dan lapisan batas.

3. Bab III Metode Penelitian

Bab ini menjelaskan tentang tahapan yang dilakukan untuk mencapai tujuan penelitian. Bab ini juga menjelaskan model disain turbin Savonius, langkah penelitian numerik dan langkah penelitian eksperimental.

4. Bab IV Pembahasan

Bab ini menjelaskan hasil penelitian yang disajikan dalam bentuk tabel, grafik, atau deskripsi dan analisis data.

5. Bab V Kesimpulan

Bab ini berisikan jawaban dari rumusan permasalahan.

