

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia memiliki populasi sekitar 270,20 juta orang pada tahun 2020, menurut data dari Badan Pusat Statistik (BPS) tahun 2019. Akibatnya, permintaan energi juga naik sejalan dengan pertumbuhan jumlah penduduk. Berdasarkan informasi dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM), pada tahun 2018, total produksi energi primer yang meliputi minyak bumi, gas bumi, batubara, dan energi terbarukan mencapai 411,6 juta ton setara minyak (MTOE). Dari jumlah tersebut, 64% atau sekitar 261,4 MTOE diekspor, dengan fokus utama pada batubara dan LNG, seperti yang disebutkan oleh Jonan pada tahun 2018. Di samping itu, Indonesia juga mengimpor energi, terutama minyak mentah dan produk bahan bakar minyak (BBM) sebanyak 43,2 MTOE, serta sejumlah kecil batubara yang salah satu energi fosil berkalori tinggi yang dibutuhkan untuk keperluan industri, berdasarkan laporan Tim Sekretaris Jenderal Dewan Energi Nasional tahun 2019. Energi fosil sendiri menimbulkan dampak negatif, karena pembakarannya menghasilkan gas berbahaya seperti karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NO_x), sulfur dioksida (SO_2), hidrokarbon (HC), karbon dioksida (CO_2), dan timbal (Pb), sebagaimana dijelaskan oleh Sugiarti pada tahun 2015. Menurut data dari *World Health Organization (WHO)*, Indonesia berada pada kategori Interim Target 3 dengan konsentrasi rata-rata tahunan $PM_{2.5}$ sebesar $15 \mu g/m^3$, sedangkan standar yang diperbolehkan adalah $10 \mu g/m^3$, seperti yang dikemukakan oleh McDuffie, dkk, (2021). Oleh karena itu, diperlukan alternatif energi untuk memasok kebutuhan tersebut, yaitu energi baru terbarukan (EBT). Energi baru terbarukan (EBT) berasal dari sumber daya yang dapat diperbaharui dan bersifat ramah lingkungan. Jenis-jenis EBT meliputi panas bumi, angin, air, matahari, dan biomassa. Muhammad I. Riady, dkk, (2022).

Salah satu jenis energi terbarukan yang penggunaannya semakin maju saat ini adalah energi angin. Hal ini karena angin merupakan salah satu sumber energi yang

tersedia dalam jumlah besar di lingkungan alam. Angin terjadi ketika udara bergerak sebagai akibat dari perbedaan tekanan udara, dengan arah aliran dari area bertekanan tinggi ke daerah bertekanan rendah, atau dari wilayah bersuhu rendah ke tempat bersuhu tinggi, sebagaimana dijelaskan oleh Wagner pada tahun 2017. Wilayah Indonesia memiliki potensi energi angin yang diperkirakan mencapai 60 *gigawatt* dengan kecepatan angin rata-rata antara 2 meter per detik hingga 6 meter per detik, berdasarkan data dari Didik Notosudjono pada tahun 2018 dan Mustika pada tahun 2020. Sementara itu, perangkat yang memanfaatkan energi angin dan mengubahnya menjadi energi kinetik adalah turbin angin. Turbin angin dengan sumbu vertikal yang digunakan meliputi turbin *Savonius* dan *Darrieus*. Salah satu kelebihan turbin *Savonius* adalah kemampuannya untuk beroperasi di daerah dengan kecepatan angin yang cukup rendah, seperti yang disebutkan oleh Sahim, Santoso, dan Puspitasari pada tahun 2018, Zemamou, Aggour, dan Toumi pada tahun 2017, serta Wenehenubun, Saputra, dan Sutanto pada tahun 2015, yaitu ketika nilai *TSR* turbin berada antara 0,5 hingga 1,5. Namun, koefisien daya yang dihasilkan oleh turbin *Savonius* relatif kecil, dengan nilai maksimum rata-rata hanya sekitar 20% Muhammad I. Riady, dkk, (2022).

Oleh karena itu, penelitian mengenai energi terbarukan terus dilakukan untuk mengurangi kontribusi terhadap efek rumah kaca . Pemanfaatan energi angin dilakukan dengan bantuan perangkat bernama turbin angin, yang merupakan alat mekanis sederhana yang mengkonversi energi kinetik angin menjadi tenaga mekanik atau listrik. Penggunaan energi angin harus mempertimbangkan profil kecepatan angin di lokasi operasinya. Turbin yang cocok untuk beroperasi efektif pada kecepatan angin rendah adalah jenis *Savonius*, karena memiliki kemampuan *self-starting* yang baik pada kondisi angin lemah. Prinsip kerja dasar turbin *Savonius* bergantung pada perbedaan gaya hambat (*drag*) yang diberikan angin terhadap kedua *bucket (blade)*, sehingga turbin dapat berputar Ruzita Sumiati, dkk, (2022).

Turbin angin dengan sumbu vertikal adalah jenis turbin di mana poros rotasi rotornya berada dalam posisi tegak lurus terhadap permukaan bumi. Dari segi efisiensi, turbin angin dengan sumbu horizontal lebih unggul dalam mengekstrak

atau menghasilkan energi dari angin jika dibandingkan dengan turbin angin dengan sumbu vertikal. Namun, turbin angin dengan sumbu vertikal memiliki beberapa kelebihan, seperti tidak perlu diputar atau diubah posisinya saat arah angin berganti, berbeda dengan turbin angin horizontal yang memerlukan mekanisme ekstra untuk menyelaraskan rotor dengan arah angin. Selain itu, turbin ini tidak memerlukan struktur menara yang tinggi, sehingga desain konstruksinya lebih sederhana. Turbin angin dengan sumbu vertikal juga dapat ditempatkan lebih dekat dengan tanah, yang memfasilitasi pemasangan komponen mekanis dan elektronik, serta memudahkan proses perawatan untuk menjaga operasional turbin M. Azizzurrahman, dkk, (2023). Keunggulan turbin *Savonius* meliputi desain yang sederhana, kemudahan dalam pembuatan, frekuensi yang rendah, kemampuan menerima angin dari berbagai arah, torsi awal yang tinggi, rentang kecepatan angin operasional yang luas, serta kesesuaiannya untuk digunakan di area urban. Namun, turbin *Savonius* memiliki efisiensi yang rendah jika dibandingkan dengan jenis turbin lainnya, seperti yang tercantum dalam referensi. Kinerja turbin *Savonius* dievaluasi berdasarkan dua parameter utama, yaitu koefisien torsi (C_t) dan koefisien daya (C_p).

Salah satu faktor yang memengaruhi nilai koefisien tersebut adalah parameter *Overlap Ratio (OR)*. *Overlap ratio* didefinisikan sebagai jarak antara dua sudu pada turbin *Savonius* dibagi dengan diameter buket. Jarak ini berfungsi untuk menyesuaikan tekanan diferensial di bagian cekung dan cembung. Meskipun definisi *OR* dalam berbagai makalah kadang berbeda sedikit, secara umum konsepnya tetap sama. Ruzita Sumiati, dkk, (2022). Namun, pengembangan turbin *Savonius* dihadapkan pada hambatan besar, seperti efisiensi konversi energi yang masih rendah dibandingkan *HAWT* dan biaya manufaktur yang tinggi dengan metode tradisional seperti pemotongan logam atau pembentukan kayu. Proses produksi konvensional sering memakan waktu panjang dan menghasilkan limbah material yang banyak, sehingga memperlambat inovasi cepat dan pengujian prototipe Kumar, dkk, (2020).

Saat ini, teknologi mengalami kemajuan pesat yang menghasilkan banyak mesin dan peralatan yang mempermudah serta mendukung berbagai aktivitas

masyarakat. Salah satu kemajuan tersebut terjadi di bidang manufaktur, yakni teknologi *3D Printing*. Munculnya teknologi *3D Printing* telah merevolusi dunia manufaktur. Teknik *3D Printing* ini, yang juga disebut sebagai pembuatan lapisan aditif, telah ada sejak sekitar awal tahun 1980-an Mustapha dan Metwalli, (2021). Proses pencetakan *3D* merupakan inovasi baru dalam perkembangan teknologi. Inovasi ini menggemparkan dunia, khususnya di bidang sains dan industri Kothari,dkk, (2021). Teknologi *3D Printing* sangat mempengaruhi beberapa sektor industri, terutama dari segi ekonomi. Prototipe cepat, atau yang dikenal sebagai *rapid prototyping*, merupakan salah satu manfaat utama dari munculnya teknologi *3D Printing* ini (Rusianto, dkk. Di zaman digital ini, teknologi manufaktur aditif seperti pencetakan *3D* muncul sebagai solusi inovatif untuk mengatasi batasan tersebut. Teknologi pencetakan *3D* memungkinkan pembuatan prototipe dengan akurasi tinggi, pengurangan waktu produksi, dan penggunaan bahan yang lebih ringan seperti plastik atau komposit.

Dalam bidang energi terbarukan, pencetakan *3D* telah digunakan untuk mencetak komponen turbin angin, termasuk bilah dan struktur penopang, yang memungkinkan iterasi desain yang lebih cepat dan efisien . Singh, dkk, (2021). Penelitian tahun 2022 menekankan bahwa penerapan pencetakan *3D* dalam manufaktur turbin dapat menurunkan biaya hingga 30% dan meningkatkan kekuatan mekanik komponen melalui desain topologi yang dioptimalkan. Kumar, dkk, (2022). Penggabungan teknologi pencetakan *3D* dengan turbin angin *Savonius* membuka peluang baru untuk riset dan penerapan praktis. Dengan kemampuan mencetak bentuk kompleks yang sulit dicapai melalui metode konvensional, pencetakan *3D* memfasilitasi eksplorasi desain bilah yang lebih aerodinamis, seperti variasi geometri semi-silinder atau heliks, untuk meningkatkan kinerja turbin. Selain itu, teknologi ini mendukung pendekatan berkelanjutan dengan mengurangi limbah dan memungkinkan penggunaan bahan daur ulang, sesuai dengan prinsip ekonomi melingkar (Ngo, dkk, (2023).

Banyak penelitian telah dilakukan mengenai turbin angin poros vertikal. Beberapa penelitian terdahulu yang terkait dengan penelitian ini Ozkar F. Homzah, dkk, (2023) “Studi Performasi Sudu Turbin Angin Tipe *Vertical Axis* Berbahan

Komposit” penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan variasi jumlah sudu dan variasi kecepatan angin yang menghasilkan daya *output* paling tinggi adalah 5,216 *Watt* dihasilkan oleh turbin angin dengan jumlah sudu 4 serta kecepatan angin sebesar 5m/s, sedangkan daya *output* paling rendah sebesar 0,288 *Watt* dihasilkan dengan jumlah sudu 8 untuk kecepatan angin sebesar 4m/s. Didapat juga, efisiensi daya yang tertinggi terdapat pada turbin *Savonius* dengan jumlah sudu 4 dengan kecepatan angin pada 4,5m/s, dimana efisiensi daya yang dicapai sebesar 95,07%. Didapat juga, efisiensi daya terendah yaitu pada jumlah sudu 8 dengan laju kecepatan 4 m/s dengan efisiensi sebesar 4,64%. Dari penelitian ini terdapat kekurangan bahwa semakin besar beban yang diberikan maka semakin kecil kecepatan putaran turbin.

Muhammad I. Riady, dkk, (2022) “Studi eksperimental turbin angin kombinasi sumbu vertikal *Darrieus Savonius* dengan poros kembar” penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan variasi kecepatan angin yaitu 2.95 m/s, 3.71 m/s, dan 4.38 m/s dengan temperatur dan tekanan lingkungan. Secara keseluruhan, kenaikan daya yang terbesar dihasilkan oleh turbin angin dengan poros kembar pada kecepatan angin 4.38 m/s yaitu sebesar 28.54% (0.528 *W*). Kekurangan dari penelitian ini adalah terdapat beberapa bagian dari turbin angin *Darrieus* yang bersinggungan langsung dengan turbin angin *Savonius* yang dapat membuat kinerja dari kedua turbin tersebut terganggu dikarenakan adanya indikasi turbulensi yang dapat menghambat putaran turbin. Novan Habiburrahman, dkk, (2025) “Eksperimen *Wind tunnel* Sistem Hybrid *Savonius–Flettner* dengan Variasi Jumlah Sudu Terhadap Kinerja Aerodinamik” penelitian ini menggunakan metode eksperimen diuji di *wind tunnel* tipe tertutup pada variasi kecepatan udara antara 8 hingga 14 m/s. Sistem *hybrid* empat sudu menghasilkan gaya dorong yang lebih kecil dibanding sistem 8 atau 16 sudu, namun memiliki efisiensi energi dan kestabilan rotasi yang lebih tinggi. Kekurangan dari penelitian ini adalah setelah kecepatan melampaui 13 m/s, nilai *T/D* menurun akibat dominasi gaya hambat yang meningkat lebih cepat dari gaya dorong.

Berdasarkan beberapa penelitian terdahulu, penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengevaluasi kinerja turbin angin *Savonius* yang dibuat menggunakan

teknologi pencetakan *3D Printing* dengan bahan *PLA (Polylactic Acid)*. Dengan menggunakan metode eksperimen dan variasi kecepatan angin. Melalui uji coba yang akan dilakukan, akan diperoleh perubahan dalam daya dan nilai energi listrik untuk setiap variabel yang diuji. Penelitian ini juga akan membandingkan energi keluaran yang dihasilkan oleh prototipe turbin angin berdasarkan variasi kecepatan angin.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian dari latar belakang tersebut, permasalahan utama yang dapat diidentifikasi adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh nilai koefisien daya dan koefisien torsi pada turbin angin *Savonius* yang dibuat menggunakan teknologi *3D Printing* berbahan *PLA (Polylactic Acid)*?
2. Bagaimana pengaruh variasi kecepatan angin terhadap putaran poros, torsi, daya keluaran, dan efisiensi turbin angin *Savonius*?
3. Apakah penggunaan teknologi *3D printing* efektif untuk pembuatan prototipe turbin angin *Savonius* dalam konteks energi terbarukan skala kecil?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai melalui pelaksanaan penelitian ini adalah untuk memperoleh hasil yang sesuai dengan permasalahan yang telah dirumuskan sebelumnya, yaitu sebagai berikut:

1. Mengetahui nilai koefisien daya dan koefisien torsi pada turbin angin *Savonius* yang dibuat menggunakan teknologi *3D printing* berbahan *PLA*.
2. Mendapatkan nilai putaran poros, torsi, daya dan efisiensi dari turbin angin *Savonius*
3. Mengevaluasi potensi penggunaan teknologi *3D printing* sebagai metode pembuatan prototipe turbin angin *Savonius* yang efisien dan ekonomis.

1.4 Manfaat Penelitian

Melalui pelaksanaan penelitian ini, diharapkan dapat diperoleh berbagai

manfaat baik secara akademis maupun praktis, yang berkaitan dengan pengembangan dan penerapan teknologi turbin angin *Savonius*, yaitu sebagai berikut:

1. Manfaat Teoretis: Penelitian ini diharapkan dapat menambah wawasan dan referensi ilmiah dalam bidang energi baru terbarukan, khususnya mengenai kinerja turbin angin *Savonius* yang dibuat menggunakan teknologi pencetakan *3D*. Hasil penelitian ini dapat menjadi bahan kajian akademis terkait pengaruh variasi kecepatan angin terhadap daya listrik keluaran turbin angin *Savonius* berbahan *PLA*, serta menjadi dasar pengembangan penelitian selanjutnya.
2. Manfaat Praktis: penelitian ini diharapkan dapat:
 1. Memberikan gambaran mengenai potensi penggunaan teknologi *3D Printing* sebagai metode pembuatan prototipe turbin angin *Savonius* yang efisien, cepat, dan ekonomis.
 2. Menjadi referensi dalam perancangan dan pengembangan turbin angin skala kecil, khususnya untuk daerah dengan kecepatan angin rendah seperti wilayah perkotaan atau pedesaan di Indonesia.
 3. Memberikan informasi teknis mengenai karakteristik daya keluaran turbin angin *Savonius* pada berbagai variasi kecepatan angin, sehingga dapat digunakan sebagai acuan dalam penerapan nyata di lapangan.

1.5 Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terarah dan tidak menyimpang dari tujuan yang telah ditetapkan, maka batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Jenis turbin angin yang diteliti adalah turbin angin sumbu vertikal tipe *Savonius*.
2. Turbin angin *Savonius* yang digunakan merupakan prototipe hasil pencetakan *3D printing*.
3. Bahan yang digunakan dalam pencetakan *3D* adalah *PLA (Polylactic Acid)*.
4. Penelitian ini meninjau pengaruh variasi kecepatan angin yaitu pada 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s. Dan *overlap ratio* yaitu 0.1, 0.15, 0.2, terhadap daya atau energi listrik keluaran turbin angin.

5. Parameter kinerja turbin yang dianalisis yaitu pada daya listrik keluaran, koefisien daya (C_p) dan koefisien torsi (C_τ).
6. Pengujian dilakukan pada skala laboratorium dengan sumber angin buatan menggunakan kipas angin, bukan pada kondisi angin alami di lapangan.
7. Desain geometris turbin (jumlah sudu, dimensi) dianggap tetap dan tidak divariasikan selama pengujian.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan penelitian ini disusun untuk memberikan gambaran secara menyeluruh mengenai isi dan alur pembahasan dalam setiap bab, dengan susunan sebagai berikut:

1. BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi uraian mengenai latar belakang penelitian yang menjelaskan pentingnya pemanfaatan energi angin sebagai energi terbarukan serta penggunaan teknologi *3D Printing* dalam pembuatan turbin angin *Savonius*. Selain itu, bab ini juga memuat rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

2. BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas teori dan konsep dasar yang mendukung penelitian, meliputi energi angin, energi baru terbarukan, prinsip kerja turbin angin, turbin angin sumbu vertikal, khususnya turbin *Savonius*, serta parameter kinerja turbin seperti daya keluaran. Selain itu, bab ini juga mengulas teknologi *3D Printing*, material *PLA (Polylactic Acid)*, serta hasil-hasil penelitian terdahulu yang relevan dengan topik penelitian.

3. BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan tahapan penelitian yang dilakukan, mulai dari perancangan dan pembuatan prototipe turbin angin *Savonius* menggunakan teknologi *3D Printing*, spesifikasi alat dan bahan yang digunakan, prosedur pengujian, variasi kecepatan angin, metode pengambilan data, hingga teknik analisis data yang digunakan untuk menentukan daya listrik keluaran turbin.

4. BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil pengujian turbin angin *Savonius* yang telah dilakukan, meliputi data daya atau energi listrik yang dihasilkan pada setiap variasi kecepatan angin. Selanjutnya dilakukan analisis dan pembahasan terhadap hasil yang diperoleh, serta perbandingan dengan teori dan penelitian sebelumnya untuk mengetahui kinerja turbin angin *Savonius* hasil cetak *3D*.

5. BAB V PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan. Selain itu, bab ini juga memuat saran yang ditujukan untuk pengembangan penelitian selanjutnya maupun penerapan turbin angin *Savonius* berbasis *3D Printing* di masa mendatang.