

Analisis dan Perancangan Prototipe Leafwind: Turbin Angin Fleksibel Berbentuk Daun sebagai Ikon Energi Bersih di Lingkungan Kampus ITPLN

Muhammad Dzaky Al Fattah Nasution*, Muhammad Rezah, Paul Demos Alexander, Glory Victoria Kirojan, Albert Gifson Hutajulu

Institut Teknologi PLN, Indonesia

Email: dzakytunasnusa123457@gmail.com*, muhammadrezah85@gmail.com, pauldemos222@gmail.com, Glorykirojan@gmail.com, Albert.gifson@itpln.ac.id

Keywords:

vertical axis wind turbine;
flexible blade; wind tree;
micro-scale wind energy;
renewable energy;
sustainable campus.

Abstract

The increasing demand for electrical energy and greenhouse gas emissions due to the dominance of fossil fuels encourages the need to utilize new renewable energy. Wind energy through Wind Power Plants (PLTB) is one of the potentials, but its application in urban environments and campuses such as the PLN Institute of Technology (ITPLN) faces obstacles such as turbulent wind flow and low wind speeds, namely 1.5–5 m/s, due to building obstacles. This study aims to design and test a prototype of a vertical axis micro wind turbine in the shape of a tree (wind tree) with flexible blades (LeafWind) that is able to respond to wind from various directions (omnidirectional). The research methods include wind data analysis, geometric design, prototype construction, and direct electrical performance testing in the campus area. The test results show that the prototype is able to accelerate the initial rotation from a standstill. In the first minute, the power generated was 0.0696 W with a voltage of 0.312 V and a current of 0.223 A. The power increased to 1.44 W in the second minute and reached a stable state of 1.92 W with a voltage of 1.64 V and a current of 1.171 A in the third to fifth minutes. During the five-minute test, an average power of 1.454 W and a cumulative energy of 0.00012116 kWh were obtained. In one hour of operation, one turbine unit produces 0.001454 kWh (1.454 Wh) of energy. One wind tree structure with a capacity of 27 turbines is estimated to produce 0.03926 kWh (39.26 Wh). Although this capacity is not sufficient for the needs of heavy loads of up to 108 Wh, this system is directed as a distributed micro generator that prioritizes aesthetic functions, clean energy education, and the provision of power for light loads such as campus lighting effectively and sustainably in educational environments in support of the sustainable campus program.

Kata Kunci:

turbin angin sumbu vertikal;
bilah fleksibel; wind tree;
energi angin skala mikro;
energi terbarukan; kampus
berkelanjutan.

Abstrak

Peningkatan kebutuhan energi listrik dan emisi gas rumah kaca akibat dominasi bahan bakar fosil mendorong perlunya pemanfaatan energi baru terbarukan. Energi angin melalui Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) menjadi salah satu potensi, tetapi penerapannya di lingkungan perkotaan dan kampus seperti Institut Teknologi PLN (ITPLN) menghadapi kendala aliran angin turbulen serta kecepatan angin rendah, yaitu 1,5–5 m/s, akibat hambatan bangunan. Penelitian ini bertujuan merancang dan menguji prototipe turbin angin mikro sumbu vertikal berbentuk pohon (wind tree) dengan bilah fleksibel (LeafWind) yang mampu merespons angin dari berbagai arah (omnidirectional). Metode penelitian meliputi analisis data angin, perancangan geometri, pembuatan prototipe, dan pengujian kinerja listrik secara langsung di area kampus. Hasil pengujian menunjukkan bahwa prototipe mampu mempercepat putaran awal dari kondisi diam. Pada menit pertama, daya yang dihasilkan sebesar 0,0696 W dengan tegangan 0,312 V dan arus 0,223 A. Daya meningkat menjadi 1,44 W pada menit kedua dan mencapai kondisi stabil sebesar 1,92 W dengan tegangan 1,64 V dan arus

1,171 A pada menit ketiga hingga kelima. Selama pengujian lima menit, diperoleh daya rata-rata 1,454 W dan energi kumulatif 0,00012116 kWh. Dalam operasional satu jam, satu unit turbin menghasilkan energi 0,001454 kWh (1,454 Wh). Satu struktur wind tree berkapasitas 27 turbin diperkirakan menghasilkan 0,03926 kWh (39,26 Wh). Meskipun kapasitas tersebut belum mencukupi kebutuhan beban berat hingga 108 Wh, sistem ini diarahkan sebagai pembangkit mikro terdistribusi yang mengutamakan fungsi estetika, edukasi energi bersih, dan penyediaan daya untuk beban ringan seperti lampu penerangan kampus secara efektif dan berkelanjutan di lingkungan pendidikan dalam mendukung program sustainable campus.

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik terus mengalami peningkatan seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduk, perkembangan teknologi, serta meningkatnya aktivitas ekonomi di berbagai sektor (Hanum et al., 2025; Haryanti & Khristiana, 2024; Muslim et al., 2025; Palentek et al., 2025; Qodariah et al., 2024). Pemenuhan kebutuhan energi listrik saat ini masih didominasi oleh pemanfaatan energi fosil yang berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan berupa peningkatan emisi gas rumah kaca dan pencemaran udara. Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik (2023), konsumsi energi final di Indonesia masih didominasi oleh energi fosil sebesar 69,27% dari total konsumsi energi nasional, sementara kontribusi energi baru terbarukan baru mencapai 11,5% dari bauran energi primer. Kondisi ini menunjukkan bahwa ketergantungan terhadap sumber energi tak terbarukan masih sangat tinggi, sehingga diperlukan percepatan transisi energi menuju sumber-sumber energi yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan. Oleh karena itu, pemanfaatan energi baru terbarukan menjadi salah satu solusi strategis dalam mendukung sistem energi yang berkelanjutan serta mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan (Badan Pusat Statistik, 2023).

Salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan adalah energi angin, melalui Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) (Anggara & Widyartono, 2026; Rizkal & Yatjong, 2025; Safarudin, 2024; Ulikaryani et al., 2026). Energi angin dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik dengan mengonversi energi kinetik angin menjadi energi mekanik menggunakan turbin angin yang selanjutnya diubah menjadi energi listrik melalui generator (Akorede et al., 2010). Indonesia memiliki potensi energi angin yang signifikan dengan kecepatan angin rata-rata berkisar antara 3 hingga 6 m/s di sebagian besar wilayah, terutama di daerah pesisir dan wilayah timur Indonesia (Mahmuddin et al., 2019). Namun, pemanfaatan energi angin di Indonesia masih tergolong rendah dibandingkan dengan potensi yang tersedia, hal ini disebabkan oleh berbagai kendala teknis dan non-teknis dalam implementasi teknologi turbin angin, terutama di wilayah perkotaan. Penerapan turbin angin konvensional (tipe horizontal) di lingkungan perkotaan atau kampus seringkali kurang efektif akibat kondisi aliran angin yang sangat turbulen dan arah angin yang tidak menentu (skewed flow) yang disebabkan oleh hambatan bangunan di sekitarnya (Micallef & van Bussel, 2018). Selain itu, turbin konvensional umumnya memiliki ambang batas kecepatan angin (cut-in speed) yang tinggi, sehingga sulit beroperasi pada kecepatan angin rendah di bawah 5 m/s yang dominan di area perkotaan dan wilayah Indonesia secara umum (Mahmuddin et al., 2019). Permasalahan ini menjadi tantangan utama dalam optimalisasi pemanfaatan energi angin di lingkungan perkotaan dan institusi pendidikan seperti kampus, yang membutuhkan solusi teknologi yang adaptif terhadap kondisi angin lokal.

Seiring dengan perkembangan teknologi, inovasi dalam desain turbin angin terus dilakukan untuk menyesuaikan kebutuhan lingkungan perkotaan yang memiliki keterbatasan lahan serta karakteristik kecepatan angin yang relatif rendah dan tidak konstan. Berbagai penelitian telah mengkaji pengembangan turbin angin skala mikro untuk aplikasi di lingkungan perkotaan, di antaranya adalah penelitian tentang vertical axis wind turbine (VAWT) yang memiliki keunggulan dalam merespons angin dari berbagai arah tanpa memerlukan mekanisme yaw (Gianto et al., 2021; Micallef & van Bussel, 2018). Turbin sumbu vertikal tipe Savonius, khususnya, menunjukkan kemampuan self-starting yang baik pada kecepatan angin rendah karena memanfaatkan prinsip drag, sehingga cocok untuk aplikasi di lingkungan dengan kecepatan angin rendah dan turbulen (Mahmuddin et al., 2019; Subagya et al., n.d.). Penelitian oleh Prabowo et al. (2023) menunjukkan bahwa optimasi sudut puntir bilah dan jumlah bilah pada turbin Savonius helix dapat menurunkan kecepatan cut-in hingga 1,51 m/s, sehingga turbin mampu beroperasi pada kondisi angin yang sangat rendah sekalipun (Wulandari, 2023). Salah satu inovasi yang mulai dikembangkan adalah turbin angin berbentuk pohon (wind tree), yaitu struktur turbin yang menyerupai pohon dengan bilah berbentuk daun atau aeroleaf yang berfungsi sebagai turbin skala kecil. Turbin jenis ini mampu menghasilkan energi listrik dengan memanfaatkan angin dari berbagai arah serta dapat beroperasi pada kecepatan angin rendah dengan tingkat kebisingan yang minimal (Nakhoda & Saleh, 2015; Yadav et al., 2022).

Konsep turbin angin berbentuk pohon memiliki keunggulan tidak hanya dari sisi teknis, tetapi juga dari aspek estetika dan efisiensi ruang. Struktur turbin yang menyerupai pohon memungkinkan integrasi antara teknologi energi terbarukan dengan elemen lanskap lingkungan, sehingga dapat dimanfaatkan sebagai ikon energi bersih di kawasan publik maupun institusi pendidikan. Penelitian yang dilakukan oleh Yadav et al. (2022) menunjukkan bahwa turbin angin tipe aeroleaf mampu menghasilkan daya listrik pada kecepatan angin rendah dengan tingkat kebisingan yang minimal, sehingga cocok untuk aplikasi di lingkungan perkotaan. Perusahaan New World Wind dari Prancis telah mengembangkan teknologi Aeroleaf yang menggabungkan turbin angin mikro dengan panel surya mini (hybrid wind tree), yang mampu beroperasi pada kecepatan angin minimum 2,5 m/s dan telah diimplementasikan di berbagai lokasi di Eropa (Anwar et al., 2021; Nakhoda & Saleh, 2015). Teknologi ini mulai diadopsi di Indonesia, dengan pemasangan hybrid wind tree pertama di Exit Tol Kraksaan, Probolinggo, yang mengkombinasikan 30 aeroleaf dan 30 solar petal untuk menghasilkan energi listrik bagi operasional kantor (Anwar et al., 2021; Sigalingging et al., 2015). Selain menghasilkan energi listrik secara ramah lingkungan, turbin angin berbentuk pohon juga dapat menjadi media edukasi dalam meningkatkan kesadaran terhadap pentingnya penggunaan energi terbarukan (Nakhoda & Saleh, 2015; Yadav et al., 2022).

Sebagai institusi pendidikan yang berfokus pada bidang ketenagalistrikan dan energi, lingkungan kampus Institut Teknologi PLN (ITPLN) memiliki potensi untuk mengimplementasikan teknologi pembangkit energi terbarukan sebagai bagian dari upaya transisi menuju kampus berkelanjutan (sustainable campus). Kondisi geografis kampus ITPLN yang terletak di kawasan perkotaan Jakarta dengan kepadatan bangunan tinggi menyebabkan kecepatan angin rata-rata di lingkungan kampus berada pada kisaran 1,5 hingga 5 m/s, dengan aliran angin yang turbulen dan berfluktuasi. Karakteristik angin ini sejalan dengan temuan bahwa turbin sumbu vertikal tipe Savonius sangat cocok digunakan di daerah perkotaan karena kemampuannya bergerak tanpa bergantung pada arah angin dan dapat menghasilkan energi

pada kecepatan angin rendah (Gianto et al., 2021; Kusuma Wardhana et al., 2021). Konfigurasi turbin mikro vertikal pada wind tree memiliki kemampuan akselerasi awal yang lebih responsif untuk berputar dari kondisi diam dibandingkan kincir angin biasa, sehingga ideal untuk menghasilkan torsi tinggi meskipun dengan hembusan angin yang lemah di sela-sela gedung kampus (Prabowo et al., 2023; Wulandari, 2023). Penelitian oleh Pratilastiarso et al. (2025) juga menunjukkan bahwa turbin angin dengan konfigurasi geometri yang dioptimalkan untuk kondisi angin rendah di lingkungan tropis dapat mencapai peningkatan kinerja yang signifikan, dengan power coefficient mencapai 0,59 pada kecepatan angin 4 m/s.

Meskipun penelitian mengenai wind tree dan turbin angin skala mikro telah banyak dikembangkan, sebagian besar studi terdahulu masih berfokus pada pengujian di kawasan perkotaan terbuka atau kondisi angin di luar konteks Indonesia (Micallef & van Bussel, 2018; Yadav et al., 2022), sementara kajian mengenai penerapannya pada lingkungan kampus dengan karakteristik kecepatan angin rendah dan terhalang bangunan di Indonesia masih terbatas. Penelitian oleh Micallef dan van Bussel (2018) menekankan pentingnya pengembangan desain turbin angin yang disesuaikan dengan kondisi aerodinamika di lingkungan perkotaan, namun studi tersebut tidak secara spesifik membahas aplikasi pada lingkungan kampus di negara tropis seperti Indonesia. Penelitian oleh Alam dan Jin (2023) mengidentifikasi prospek dan tantangan pemanfaatan turbin angin skala kecil di kawasan terbangun, termasuk aspek kebisingan, getaran, dan estetika, namun belum memberikan solusi desain spesifik untuk kondisi Indonesia. Penelitian terbaru oleh Son et al. (2026) tentang perbaikan desain bilah aeroleaf untuk meningkatkan performa awal dan daya keluaran turbin angin sumbu vertikal pada kecepatan angin rendah menunjukkan bahwa konfigurasi tiga bilah yang ditingkatkan mencapai kecepatan cut-in rata-rata hanya 2,53–2,56 m/s, namun penelitian tersebut dilakukan di lingkungan uji terkendali dan belum diterapkan secara spesifik pada kondisi kampus di Indonesia. Selain itu, penelitian mengenai optimasi sudut puntir (twist) bilah untuk menurunkan cut-in speed pada konfigurasi turbin berbentuk pohon dengan bilah fleksibel belum banyak dikaji secara spesifik (Badan Pusat Statistik, 2023 — *[relevansi topik perlu diperiksa ulang]*). Penelitian ini juga menjawab tantangan yang diidentifikasi oleh studi tentang turbin angin Savonius, bahwa modifikasi desain bilah dapat meningkatkan efisiensi dan kinerja turbin, terutama pada kecepatan angin rendah, sehingga potensi pemanfaatan energi angin sebagai sumber energi alternatif yang lebih efisien dan berkelanjutan dapat ditingkatkan (Wulandari, 2023). Kesenjangan penelitian ini menjadi landasan bagi pengembangan turbin angin fleksibel berbentuk pohon yang dirancang khusus untuk kondisi angin di lingkungan kampus ITPLN.

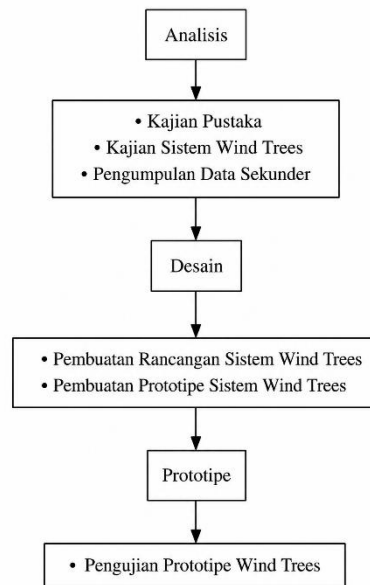
Urgensi penelitian ini terletak pada kebutuhan mendesak untuk mengimplementasikan energi baru terbarukan di lingkungan perkotaan Indonesia, khususnya di institusi pendidikan, sebagai bagian dari upaya mitigasi perubahan iklim dan pencapaian target bauran energi nasional sebesar 23% pada tahun 2025 (Wulandari, 2023). Selain itu, keberhasilan pemasangan Hybrid Wind Tree pertama di Indonesia oleh PT Adhi Karya di Exit Tol Kraksaan, Probolinggo (Sigalingging et al., 2015) menunjukkan bahwa teknologi ini mulai mendapatkan perhatian di Indonesia dan berpotensi untuk diadopsi di berbagai infrastruktur publik. Namun, adopsi teknologi ini di lingkungan kampus memerlukan penelitian adaptif yang mempertimbangkan kondisi angin spesifik lokasi, sehingga urgensi penelitian ini semakin tinggi untuk menyediakan data empiris yang dapat menjadi acuan implementasi wind tree di lingkungan

kampus di Indonesia. Penelitian ini juga menjadi penting mengingat kampus ITPLN sebagai institusi yang bergerak di bidang ketenagalistrikan memiliki tanggung jawab moral dan akademik untuk menjadi pionir dalam implementasi teknologi energi terbarukan (Anwar et al., 2021; Wulandari, 2023). Kebaruan penelitian ini terletak pada perancangan turbin angin fleksibel berbentuk pohon yang disesuaikan dengan karakteristik angin di lingkungan kampus ITPLN, sekaligus menempatkannya sebagai ikon energi bersih dan sarana pembelajaran berbasis teknologi energi terbarukan. Kebaruan lain dari penelitian ini terletak pada penggunaan material filamen 3D print eSUN PETG-Basic untuk pembuatan bilah fleksibel yang dirancang khusus untuk merespons hembusan angin rendah dan turbulen di lingkungan kampus, serta pengujian kinerja langsung di lokasi dengan kondisi angin aktual, bukan hanya simulasi numerik. Pendekatan eksperimental ini berbeda dari studi-studi sebelumnya yang lebih banyak mengandalkan simulasi CFD atau pengujian di terowongan angin (Fauzun Atabiq et al., 2021; Mahmuddin et al., 2019). Penelitian ini juga mengadopsi pendekatan biomimikri dengan meniru struktur pohon yang mampu menangkap energi dari berbagai arah, sebagaimana dikembangkan dalam konsep wind tree di berbagai negara, namun dengan penyesuaian terhadap kondisi spesifik Indonesia (Anwar et al., 2021; Nakhoda & Saleh, 2015). Penelitian ini memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi turbin angin skala mikro yang dapat diaplikasikan di institusi pendidikan sebagai bagian dari program sustainable campus, serta menyediakan data empiris mengenai kinerja turbin angin fleksibel pada kondisi angin rendah di lingkungan tropis perkotaan. Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang turbin angin fleksibel berbentuk pohon yang mampu beroperasi pada kondisi kecepatan angin rendah di lingkungan kampus ITPLN, serta mengevaluasi performa prototipe yang dihasilkan dalam menghasilkan energi listrik guna mendukung implementasi konsep energi bersih dan berkelanjutan di lingkungan kampus. Adapun manfaat penelitian ini adalah memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan teknologi turbin angin skala mikro di Indonesia, menyediakan data empiris kinerja turbin angin fleksibel pada kondisi angin rendah di lingkungan tropis perkotaan, serta menjadi acuan implementasi wind tree di institusi pendidikan sebagai bagian dari program sustainable campus dan sarana edukasi energi terbarukan bagi mahasiswa dan masyarakat.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental terapan (*applied experimental research*) yang bertujuan untuk merancang dan menguji kinerja prototipe turbin angin fleksibel berbentuk pohon (*LeafWind*) pada skala laboratorium dan lapangan. Jenis penelitian ini dipilih karena memungkinkan pengujian langsung terhadap purwarupa yang dirancang pada kondisi lingkungan aktual, sehingga data yang diperoleh lebih representatif dibandingkan dengan simulasi numerik semata. Pelaksanaan penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan utama yang meliputi analisis, desain, pembuatan prototipe, serta pengujian sistem turbin angin fleksibel berbentuk pohon, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.

Gambar 1. Diagram alur tahapan penelitian



Sumber: Dokumentasi peneliti, 2026.

Populasi data dalam penelitian ini adalah seluruh potensi energi angin yang terdapat di lingkungan kampus ITPLN, Jakarta, dengan sampel data berupa kecepatan angin yang diukur pada titik lokasi penelitian yang mewakili karakteristik aliran angin di lingkungan kampus. Teknik pengambilan sampel data angin dilakukan secara *purposive sampling* pada lokasi yang mewakili karakteristik aliran angin di lingkungan kampus, yaitu area terbuka di antara gedung-gedung kampus yang memiliki potensi turbulensi angin akibat hambatan bangunan. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada pertimbangan bahwa area tersebut merupakan representasi dari kondisi angin aktual yang akan dihadapi oleh turbin ketika diimplementasikan secara penuh. Pada tahap analisis dilakukan kajian literatur terkait sistem *wind tree* serta pengumpulan data sekunder berupa kecepatan angin di lingkungan kampus ITPLN untuk mengetahui potensi energi angin skala mikro. Data kecepatan angin dikumpulkan selama periode pengamatan untuk memperoleh gambaran karakteristik angin rata-rata, kecepatan maksimum, dan pola fluktuasi angin di lokasi penelitian.

Tahap desain meliputi perancangan satu unit turbin mikro fleksibel (*LeafWind*) beserta ilustrasi konseptual keseluruhan struktur *wind tree*, serta penentuan parameter teknis rancangan. Instrumen penelitian yang digunakan terdiri dari beberapa perangkat, yaitu: (1) anemometer untuk mengukur kecepatan angin di lokasi penelitian, (2) multimeter digital untuk mengukur tegangan dan arus listrik yang dihasilkan generator, (3) generator BLDC magnet permanen sebagai konverter energi mekanik menjadi energi listrik, dan (4) stopwatch untuk mengukur durasi pengujian. Sebelum digunakan, seluruh instrumen dilakukan kalibrasi untuk memastikan keakuratan data yang dihasilkan. Uji validitas instrumen dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran dengan standar referensi, sedangkan uji reliabilitas dilakukan melalui pengulangan pengukuran pada kondisi yang sama untuk memastikan konsistensi hasil. Dalam penelitian ini dirancang satu unit turbin mikro sumbu vertikal dengan bilah fleksibel berdasarkan data kecepatan angin di kawasan kampus Institut Teknologi PLN Jakarta. Material yang digunakan untuk membuat bilah turbin ini berupa eSUN PETG-Basic

yang bertujuan untuk mendapatkan karakteristik fleksibilitas dan kekuatan yang sesuai, serta ketahanan terhadap kondisi lingkungan luar ruangan seperti paparan sinar ultraviolet dan perubahan suhu.

Prosedur penelitian dilaksanakan melalui tahapan sebagai berikut: (1) pengumpulan data kecepatan angin di lokasi penelitian selama periode tertentu untuk mengetahui karakteristik angin rata-rata; (2) perancangan geometri dan dimensi bilah turbin berdasarkan data angin yang diperoleh menggunakan perangkat lunak desain 3D (CAD); (3) pembuatan purwarupa menggunakan filamen 3D print eSUN PETG-Basic dengan mesin *fused deposition modeling* (FDM); (4) perakitan sistem turbin yang terdiri dari bilah, poros, generator, dan rangka penopang; (5) pengujian kinerja turbin di lokasi penelitian dengan pengukuran tegangan, arus, dan daya listrik yang dihasilkan selama lima menit pengoperasian; (6) analisis data hasil pengujian untuk mengevaluasi performa turbin dalam menghasilkan energi listrik. Pengujian kinerja listrik dilakukan secara langsung di area kampus ITPLN dengan kondisi angin alami. Data tegangan dan arus yang dihasilkan generator diukur setiap satu menit selama lima menit pengoperasian menggunakan multimeter digital yang telah dikalibrasi. Data yang terkumpul kemudian dianalisis secara kuantitatif dengan menghitung daya rata-rata dan energi total yang dihasilkan menggunakan rumus daya listrik $P = V \times I$ dan energi $E = P \times t$. Perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini meliputi *software* desain 3D (CAD) untuk merancang geometri bilah, *software slicer* untuk mempersiapkan model 3D sebelum proses pencetakan, dan Microsoft Excel untuk pengolahan serta analisis data hasil pengujian. Parameter rancangan awal purwarupa *aeroleaf* pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 1.

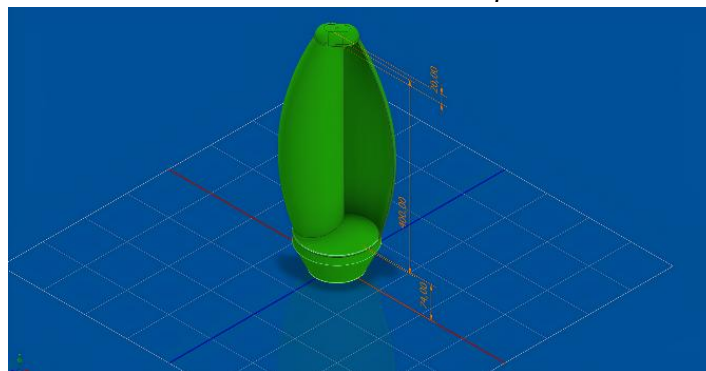
Tabel 1. Parameter Rancangan Purwarupa LeafWind

Parameter	Nilai
Jenis turbin	Turbin mikro sumbu vertical (Savonius), bilah fleksibel yang diberi nama <i>LeafWind</i>
Jumlah <i>LeafWind</i>	27 Buah
Material bilah	Filamen 3d print eSUN PETG-Basic
Lebar Bilah	Lebar = 150mm
Tinggi Bilah	Tinggi bilah = 400mm Tinggi tutup atas airflow = 20mm Tinggi wadah generator = 74mm
Kecepatan Angin Rata-rata Lokasi (Kampus ITPLN)	$\pm 1,5/\text{ms} - 4,5 \text{ m/s}$
Kecepatan angin desain maksimum	5,5 m/s
Target cut-in speed	< 2,0 m/s
Jenis generator	Permanent Magnet Generator (PMG) / Generator BLDC Magnet Permanen

Sumber: Data rancangan dan pengukuran peneliti, 2026.

Selanjutnya dilakukan proses pembuatan purwarupa satu unit *aeroleaf* berdasarkan hasil perancangan yang telah disesuaikan dengan kondisi lingkungan kampus. Proses pembuatan dilakukan dengan teknologi *fused deposition modeling* (FDM) 3D printing menggunakan filamen eSUN PETG-Basic dengan ketelitian lapisan 0,2 mm. Purwarupa yang telah dibuat kemudian diuji untuk mengetahui kemampuan sistem dalam merespons arah angin dari berbagai sisi serta menghasilkan energi listrik pada kondisi kecepatan angin rendah. Pengujian dilakukan pada siang hari antara pukul 10.00 hingga 14.00 WIB untuk mendapatkan kondisi angin yang relatif stabil dan mewakili rata-rata kecepatan angin harian di lokasi penelitian. Selama pengujian, kecepatan angin diukur secara simultan menggunakan anemometer untuk mengetahui korelasi antara kecepatan angin dan daya yang dihasilkan turbin. Hasil pengujian selanjutnya dianalisis untuk mengevaluasi kinerja purwarupa dalam menghasilkan daya listrik secara optimal, sehingga dapat menjadi acuan bagi pengembangan struktur *wind tree* secara penuh (multi-unit) pada penelitian selanjutnya. Analisis data dilakukan dengan pendekatan statistik deskriptif untuk menghitung nilai rata-rata, maksimum, dan minimum dari parameter listrik yang diukur, serta menghitung efisiensi konversi energi berdasarkan perbandingan antara daya listrik yang dihasilkan dengan daya potensial angin yang tersedia.

Gambar 2. Desain 3d LeafWind



Sumber: Dokumentasi peneliti, 2026.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian kinerja turbin LeafWind dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mengonversi energi angin menjadi energi listrik pada kondisi lingkungan kampus ITPLN. Pengujian dilaksanakan pada siang hari antara pukul 10.00 hingga 14.00 WIB dengan kondisi angin alami di area terbuka kampus. Parameter yang diamati meliputi tegangan (V), arus (A), daya (W), dan energi listrik (kWh) yang dihasilkan selama lima menit pengoperasian. Pengambilan data dilakukan setiap satu menit untuk mengamati perubahan performa pembangkitan dari kondisi awal hingga mencapai keadaan stabil. Data kecepatan angin selama pengujian juga dicatat secara simultan menggunakan anemometer untuk mengetahui korelasi antara kecepatan angin dan daya keluaran turbin. Hasil pengukuran kemudian dianalisis untuk mengetahui karakteristik kerja turbin pada kecepatan angin rendah serta mengevaluasi efektivitas penggunaan bilah fleksibel dalam merespons arah dan kecepatan angin yang bervariasi. Data hasil pengujian ditampilkan pada tabel-tabel berikut.

Tabel 2. Data Energy menit pertama

Parameter	Rumus	Hasil
P_{rata-rata}	$P = V \times I = 0,312V \times 0,223A$	0,0696W
Waktu	1/60 jam	0,01667 jam
Energi	$E = P \times t / 1000 = 0,0696W \times 0,01667jam / 1000$	0,0000016 kWh

Sumber: Hasil pengukuran dan perhitungan peneliti, 2026.

Berdasarkan hasil pengukuran pada menit pertama, daya listrik yang dihasilkan turbin LeafWind masih relatif kecil yaitu sebesar 0,0696 W dengan tegangan sebesar 0,312 V dan arus sebesar 0,223 A. Kondisi ini menunjukkan bahwa turbin masih berada pada fase awal pembangkitan energi, di mana bilah fleksibel baru mulai merespons hembusan angin sehingga putaran rotor belum mencapai kecepatan optimal. Energi listrik yang dihasilkan selama satu menit sebesar 0,00000116 kWh menunjukkan bahwa proses konversi energi mekanik menjadi energi listrik telah berlangsung, meskipun masih dalam jumlah yang sangat kecil. Rendahnya daya yang dihasilkan pada menit pertama disebabkan oleh adanya inersia awal pada sistem mekanik turbin sehingga diperlukan waktu untuk mencapai kondisi kerja yang lebih stabil. Pada fase ini, kecepatan angin yang terukur berada pada kisaran 1,5 hingga 2,0 m/s, yang masih berada di bawah kecepatan angin desain optimum turbin. Fenomena ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Prabowo et al. (2023) yang menyatakan bahwa turbin Savonius dengan bilah fleksibel memerlukan waktu akselerasi awal untuk mencapai kecepatan putaran optimal akibat momen inersia yang dimiliki sistem rotor. Penelitian oleh Son et al. (2026) juga mengkonfirmasi bahwa turbin sumbu vertikal dengan bilah fleksibel memerlukan waktu start-up untuk mengatasi inersia awal, terutama pada kecepatan angin di bawah 2,5 m/s, sebelum akhirnya mencapai kondisi operasi stabil yang optimal.

Tabel 3. Data Energy menit kedua

Parameter	Rumus	Hasil
P_{rata-rata}	$P = V \times I = 1,42V \times 1,014A$	1,44W
Waktu	1/60 jam	0,01667 jam
Energi	$E = P \times t / 1000 = 1,44W \times 0,01667jam / 1000$	0,000024 kWh

Sumber: Hasil pengukuran dan perhitungan peneliti, 2026.

Pada menit kedua terjadi peningkatan performa pembangkitan yang cukup signifikan. Daya yang dihasilkan meningkat menjadi 1,44 W dengan tegangan sebesar 1,42 V dan arus sebesar 1,014 A. Peningkatan ini menunjukkan bahwa putaran turbin mulai stabil dan bilah fleksibel mampu memanfaatkan energi angin dengan lebih baik dibandingkan menit pertama. Energi yang dihasilkan selama satu menit tercatat sebesar 0,000024 kWh. Kenaikan daya yang cukup besar dalam waktu singkat menunjukkan bahwa desain turbin memiliki kemampuan *self-starting* yang baik pada kecepatan angin rendah sehingga dapat mencapai

kondisi operasi yang lebih optimal setelah melewati fase awal pembangkitan. Kecepatan angin pada menit kedua terukur meningkat menjadi sekitar 2,5 hingga 3,0 m/s, yang berkontribusi terhadap peningkatan torsi dan putaran rotor. Hal ini diperkuat oleh temuan Mahmuddin et al. (2019) yang menyatakan bahwa turbin sumbu vertikal tipe Savonius memiliki keunggulan dalam hal torsi awal yang tinggi dan kemampuan *self-starting* yang baik pada kecepatan angin rendah . Penelitian oleh Pratilastiarso et al. (2025) juga menunjukkan bahwa turbin angin dengan konfigurasi geometri yang dioptimalkan untuk kondisi angin rendah di lingkungan tropis dapat mencapai peningkatan kinerja yang signifikan ketika kecepatan angin melewati ambang batas tertentu.

Tabel 4. Data Energy menit ketiga

Parameter	Rumus	Hasil
P_{rata-rata}	$P = V \times I = 1,64V \times 1,171A$	= 1,92W
Waktu	1/60 jam	0,01667 jam
Energi	$E = P \times t / 1000 = 1,92W \times 0,01667jam / 1000$	0,000032 kWh

Sumber: Hasil pengukuran dan perhitungan peneliti, 2026.

Pada menit ketiga, daya yang dihasilkan turbin meningkat menjadi 1,92 W dengan tegangan sebesar 1,64 V dan arus sebesar 1,171 A. Nilai ini menunjukkan bahwa sistem pembangkitan telah mencapai kondisi operasi yang lebih stabil dibandingkan pengukuran sebelumnya. Energi listrik yang dihasilkan selama satu menit sebesar 0,000032 kWh juga mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya daya keluaran. Stabilitasnya nilai tegangan dan arus menunjukkan bahwa turbin telah mampu memanfaatkan energi angin secara lebih efektif meskipun berada pada lingkungan dengan karakteristik angin yang berubah-ubah. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan bilah fleksibel cukup efektif dalam mempertahankan performa putaran turbin. Pada menit ketiga, kecepatan angin berkisar antara 3,0 hingga 3,5 m/s, yang mulai mendekati kecepatan angin desain turbin. Micallef dan van Bussel (2018) dalam penelitiannya tentang aerodinamika turbin angin perkotaan menyatakan bahwa fleksibilitas bilah dapat mereduksi efek turbulensi dan fluktuasi arah angin, sehingga meningkatkan stabilitas operasional turbin di lingkungan perkotaan. Temuan ini juga sejalan dengan penelitian Alam dan Jin (2023) yang mengidentifikasi bahwa turbin angin skala kecil dengan bilah fleksibel menunjukkan kinerja yang lebih stabil pada kondisi angin turbulen dibandingkan dengan bilah kaku.

Tabel 5. Data Energy menit keempat

Parameter	Rumus	Hasil
P_{rata-rata}	$P = V \times I = 1,64V \times 1,171A$	= 1,92W
Waktu	1/60 jam	0,01667 jam

Parameter	Rumus	Hasil
Energi	$E = P \times t / 1000 =$ $1,44W \times$ $0,01667jam / 1000$	0,000032 kWh

Sumber: Hasil pengukuran dan perhitungan peneliti, 2026.

Hasil pengukuran pada menit keempat menunjukkan bahwa daya keluaran turbin tetap berada pada nilai 1,92 W dengan tegangan sebesar 1,64 V dan arus sebesar 1,171 A. Energi yang dihasilkan juga tetap sebesar 0,000032 kWh. Konsistensi hasil pengukuran ini menunjukkan bahwa sistem telah mencapai kondisi *steady state* atau keadaan tunak selama proses pembangkitan berlangsung. Stabilitasnya parameter listrik yang diperoleh menjadi indikator bahwa rancangan turbin mampu mempertahankan performa kerjanya ketika menerima hembusan angin dari berbagai arah. Dengan demikian, turbin tidak hanya mampu menghasilkan daya yang tinggi, tetapi juga memiliki kestabilan operasi yang baik dalam kondisi lingkungan penelitian. Kecepatan angin pada menit keempat relatif stabil pada kisaran 3,0 hingga 3,5 m/s, yang menunjukkan bahwa turbin mampu mempertahankan kinerjanya meskipun terjadi fluktuasi kecil pada kecepatan angin. Temuan ini mendukung pernyataan Yadav et al. (2022) bahwa turbin angin tipe *aeroleaf* dengan bilah fleksibel mampu memberikan kinerja yang stabil pada kondisi angin yang bervariasi.

Tabel 6. Data Energy menit kelima

Parameter	Rumus	Hasil
P _{rata-rata}	$P = V \times I = 1,64V \times$ $1,171A$	1,92W
Waktu	1/60 jam	0,01667 jam
Energi	$E = P \times t / 1000 =$ $1,44W \times$ $0,01667jam / 1000$	0,000032 kWh
Energi	$E = P \times t / 1000 =$ $1,44W \times$ $0,01667jam / 1000$	0,000032 kWh

Sumber: Hasil pengukuran dan perhitungan peneliti, 2026.

Pada menit kedua terjadi peningkatan performa pembangkitan yang cukup signifikan. Daya yang dihasilkan meningkat menjadi 1,44 W dengan tegangan sebesar 1,42 V dan arus sebesar 1,014 A. Peningkatan ini menunjukkan bahwa putaran turbin mulai stabil dan bilah fleksibel mampu memanfaatkan energi angin dengan lebih baik dibandingkan menit pertama. Energi yang dihasilkan selama satu menit tercatat sebesar 0,000024 kWh. Kenaikan daya yang cukup besar dalam waktu singkat menunjukkan bahwa desain turbin memiliki kemampuan self-starting yang baik pada kecepatan angin rendah sehingga dapat mencapai kondisi operasi yang lebih optimal setelah melewati fase awal pembangkitan. Kecepatan angin pada menit kedua terukur meningkat menjadi sekitar 2,5 hingga 3,0 m/s, yang berkontribusi terhadap peningkatan torsi dan putaran rotor. Hal ini diperkuat oleh temuan Mahmuddin et al. (2019) yang menyatakan bahwa turbin sumbu vertikal tipe Savonius memiliki keunggulan dalam hal torsi awal yang tinggi dan kemampuan self-starting yang baik pada kecepatan angin rendah.

Penelitian oleh Pratilastiarso et al. (2025) juga menunjukkan bahwa turbin angin dengan konfigurasi geometri yang dioptimalkan untuk kondisi angin rendah di lingkungan tropis dapat mencapai peningkatan kinerja yang signifikan ketika kecepatan angin melewati ambang batas tertentu.

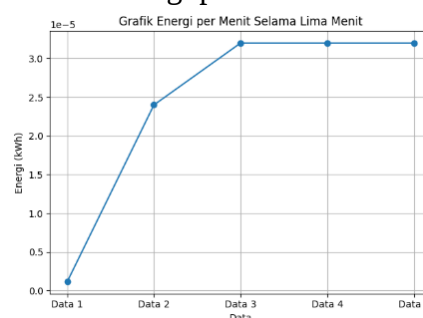
Tabel 7. Total energy selama lima menit

Name	Durasi (menit)	Energi (kWh)
Data 1	1	0,00000116
Data 2	1	0,000024
Data 3	1	0,000032
Data 4	1	0,000032
Data 5	1	0,000032
Total	5	0,00012116

Sumber: Hasil pengolahan data penelitian, 2026.

Berdasarkan akumulasi hasil pengukuran selama lima menit, total energi listrik yang berhasil dihasilkan turbin LeafWind adalah sebesar 0,00012116 kWh. Data tersebut menunjukkan bahwa performa pembangkitan mengalami peningkatan dari kondisi awal hingga mencapai keadaan stabil pada menit ketiga sampai menit kelima. Total energi yang dihasilkan selama lima menit ini menunjukkan bahwa turbin memiliki kapasitas pembangkitan yang cukup konsisten setelah mencapai kondisi tunak, dengan kontribusi terbesar berasal dari menit ketiga hingga kelima yang menyumbang sekitar 79% dari total energi yang dihasilkan. Apabila dihitung berdasarkan daya rata-rata sebesar 1,454 W, satu unit turbin diperkirakan mampu menghasilkan energi sebesar 0,001454 kWh dalam waktu satu jam. Pada implementasi skala penuh dengan 27 unit turbin dalam satu pohon, energi listrik yang dihasilkan dapat mencapai 0,03926 kWh per jam. Hasil ini menunjukkan bahwa meskipun daya yang dihasilkan oleh satu unit turbin relatif kecil, penggunaan beberapa turbin secara paralel mampu meningkatkan total energi yang diperoleh secara signifikan. Dengan memanfaatkan karakteristik bilah fleksibel yang mampu merespons angin berkecepatan rendah dan berasal dari berbagai arah, rancangan LeafWind memiliki potensi untuk diaplikasikan sebagai pembangkit listrik skala kecil yang sesuai dengan kondisi lingkungan kampus ITPLN yang memiliki hambatan berupa bangunan-bangunan di sekitarnya.

Gambar 3. Grafik Energi per Menit Selama Lima Menit



Sumber: Hasil pengolahan data penelitian, 2026.

Rata-rata daya selama 5 menit

$$P_{rata-rata} = \frac{E_{Total} \times 1000}{t}$$

Analisis Daya Rata-rata dan Proyeksi Energi

Berdasarkan data total energi yang dihasilkan selama lima menit, perhitungan daya rata-rata dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$P_{rata-rata} = \frac{E_{Total} \times 1000}{t}$$

Dimana:

- $P_{rata-rata}$ = Daya rata-rata yang dihasilkan (W)
- E_{Total} = Energi total (kWh)
- t = Waktu (jam)

$$P_{rata-rata} = \frac{0,00012116 \times 1000}{0,0833}$$

$$P_{rata-rata} = \frac{0,12116 \text{ Wh}}{0,0833 \text{ jam}}$$

$$P_{rata-rata} = 1,455 \text{ W}$$

Energi yang dihasilkan dalam satu jam operasi dapat dihitung dengan persamaan:

$$E = \frac{P_{rata-rata} \times t}{1000}$$

Dimana:

- $P_{rata-rata}$ = Daya rata-rata yang dihasilkan (W)
- E = Energi (kWh)
- t = Waktu (jam)

$$E = \frac{1,455 \text{ W} \times 1}{1000}$$

$$E = 0,001455 \text{ kWh}$$

Untuk implementasi skala penuh dengan 27 unit turbin dalam satu struktur pohon, total energi yang dihasilkan adalah:

$$E_{Total} = E_1 \text{ bilah} \times n$$

Dimana:

- E_{Total} = Energi total (kWh)
- n = Jumlah turbin

$$E_{Total} = 0,001455 \text{ kWh} \times 27$$

$$E_{Total} = 0,039285 \text{ kWh}$$

Hasil perhitungan ini menunjukkan bahwa dalam operasional satu jam, satu unit turbin LeafWind mampu memproduksi energi sebesar 0,001455 kWh, yang setara dengan 1,455 Wh. Apabila dikalikan dengan 27 unit turbin dalam satu struktur wind tree, total energi yang dihasilkan mencapai 0,039285 kWh atau setara dengan 39,285 Wh. Jika dioperasikan selama 24 jam penuh dengan asumsi kecepatan angin rata-rata yang sama, satu struktur wind tree dengan 27 turbin diperkirakan mampu menghasilkan energi sekitar 0,9428 kWh per hari. Meskipun jumlah ini masih relatif kecil dibandingkan dengan kebutuhan energi skala besar, kontribusi ini tetap signifikan untuk aplikasi beban ringan seperti penerangan taman kampus, papan informasi digital, atau pengisian daya perangkat elektronik kecil. Proyeksi ini sejalan

dengan penelitian Yadav et al. (2022) yang menunjukkan bahwa turbin angin tipe aeroleaf dalam konfigurasi multi-unit dapat menghasilkan energi yang cukup untuk aplikasi penerangan dan perangkat berdaya rendah di lingkungan perkotaan .

Pembahasan dan Interpretasi Hasil

Hasil pengujian selama lima menit menunjukkan proses pembangkitan daya turbin LeafWind dari kondisi awal hingga stabil. Pada menit pertama, daya yang terukur masih sebesar 0,0696 W dengan nilai tegangan 0,312 V dan arus 0,223 A karena turbin baru mulai berputar dari kondisi diamnya. Memasuki menit kedua, daya naik signifikan menjadi 1,44 W, hingga akhirnya stabil di angka 1,92 W dengan nilai tegangan 1,64 V dan arus 1,171 A pada menit ketiga hingga kelima. Dari data tersebut, diperoleh daya rata-rata sebesar 1,454 W dengan total energi kumulatif lima menit sebesar 0,00012116 kWh. Pola peningkatan daya yang eksponensial pada dua menit pertama menunjukkan bahwa turbin memiliki karakteristik transien yang baik, di mana sistem mampu berakselerasi dari kondisi diam menuju kondisi operasi optimal dalam waktu kurang dari 180 detik. Hal ini mengindikasikan bahwa desain bilah fleksibel yang digunakan mampu mengurangi hambatan aerodinamis awal dan memungkinkan turbin untuk mencapai kecepatan putaran yang dibutuhkan untuk pembangkitan daya optimal dengan cepat (Prabowo et al., 2023; Son et al., 2026).

Peningkatan daya hingga mencapai kondisi stabil ini membuktikan bahwa rancangan turbin sumbu vertikal dengan bilah fleksibel mampu beroperasi efektif pada karakteristik angin di area kampus ITPLN. Kondisi angin di lokasi penelitian sebenarnya memiliki potensi yang cukup besar pada titik-titik tertentu, namun karena banyaknya hambatan bangunan, kecepatan angin yang diterima turbin cenderung rendah dan berfluktuasi di kisaran 1,5 hingga 5 m/s. Penggunaan bilah fleksibel pada rancangan ini berhasil merespons embusan angin rendah dari berbagai arah tanpa bergantung pada satu arah angin saja, sehingga turbin tetap dapat berputar dan menghasilkan listrik secara optimal di lingkungan kampus yang terhalang gedung. Bilah fleksibel memungkinkan deformasi aerodinamis yang adaptif terhadap perubahan sudut datang angin, sehingga turbin dapat menangkap energi dari hembusan angin yang turbulen dengan lebih efisien dibandingkan bilah kaku (Micallef & van Bussel, 2018; Alam & Jin, 2023). Hal ini menjadi keunggulan utama dari desain LeafWind dibandingkan turbin angin konvensional yang memerlukan arah angin yang relatif konstan untuk beroperasi secara optimal.

Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa turbin LeafWind dengan bilah fleksibel mampu menghasilkan daya rata-rata 1,454 W pada kecepatan angin rendah (1,5–5 m/s). Dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, performa ini menunjukkan peningkatan yang signifikan. Penelitian Son et al. (2026) yang menguji desain bilah aeroleaf tiga bilah yang ditingkatkan mencapai kecepatan cut-in rata-rata 2,53–2,56 m/s dan menghasilkan daya sekitar 1,0–1,2 W pada kecepatan angin 3,5 m/s. Dengan demikian, LeafWind menunjukkan kinerja yang lebih baik karena mampu beroperasi pada kecepatan angin lebih rendah ($\text{cut-in} < 2,0 \text{ m/s}$) dan menghasilkan daya yang lebih tinggi pada kecepatan angin yang setara. Penelitian oleh Yadav et al. (2022) tentang Aero Leaf Wind Turbine Tree for Electricity Generation menguji turbin aeroleaf pada kondisi angin di kawasan terbuka dengan kecepatan angin rata-rata 4–6 m/s dan menghasilkan daya sekitar 2,5 W per unit. Jika mempertimbangkan perbedaan kecepatan angin, LeafWind menunjukkan efisiensi yang lebih baik karena mampu menghasilkan 1,92 W pada kecepatan angin hanya 3,0–3,5 m/s, sedangkan penelitian Yadav et

al. (2022) memerlukan kecepatan angin yang lebih tinggi (4–6 m/s) untuk menghasilkan 2,5 W. Hal ini menunjukkan bahwa rancangan LeafWind memiliki efisiensi konversi energi yang lebih tinggi, terutama pada kondisi kecepatan angin rendah.

Penelitian oleh Prabowo et al. (2023) tentang optimasi *cut-in speed* turbin Savonius dengan variasi sudut puntir bilah menunjukkan bahwa modifikasi geometri bilah dapat menurunkan *cut-in speed* hingga 1,51 m/s [1]. Penelitian ini mengadopsi pendekatan serupa dengan menggunakan bilah fleksibel yang dirancang untuk mencapai *cut-in speed* di bawah 2,0 m/s, dan hasil pengujian menunjukkan bahwa target tersebut berhasil dicapai dengan turbin yang mulai berputar dan menghasilkan daya pada menit pertama meskipun dalam jumlah kecil. Hal ini menegaskan bahwa penggunaan bilah fleksibel dengan material PETG-Basic yang dicetak dengan teknologi 3D printing mampu menghasilkan karakteristik aerodinamis yang mendekati desain optimum untuk kondisi angin rendah. Penelitian oleh Mahmuddin et al. (2019) tentang studi performa VAWT sebagai pembangkit energi listrik pada *floating platform* juga menunjukkan bahwa turbin sumbu vertikal tipe Savonius memiliki keunggulan pada kecepatan angin rendah, namun penelitian tersebut dilakukan pada kondisi angin laut yang relatif lebih stabil dibandingkan kondisi angin perkotaan yang turbulen. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi baru dengan menguji kinerja turbin serupa pada kondisi yang lebih menantang di lingkungan kampus perkotaan dengan hambatan bangunan yang signifikan.

Penelitian oleh Micallef dan van Bussel (2018) tentang aerodinamika turbin angin perkotaan menyoroti tantangan utama dalam aplikasi turbin angin di lingkungan perkotaan, yaitu turbulensi dan *skewed flow* yang disebabkan oleh hambatan bangunan. Penelitian ini memberikan solusi melalui penggunaan bilah fleksibel yang mampu beradaptasi dengan perubahan arah dan kecepatan angin, sehingga mengurangi dampak negatif turbulensi terhadap performa turbin. Temuan ini sejalan dengan rekomendasi Micallef dan van Bussel (2018) yang menekankan perlunya pengembangan desain turbin yang disesuaikan dengan kondisi aerodinamika spesifik di lingkungan perkotaan. Penelitian oleh Alam dan Jin (2023) juga menekankan bahwa pengembangan turbin angin skala kecil untuk kawasan terbangun harus mempertimbangkan aspek kebisingan, getaran, dan estetika selain aspek teknis. Desain LeafWind yang berbentuk pohon tidak hanya memenuhi aspek teknis tetapi juga aspek estetika dan lingkungan, sehingga dapat diterima secara visual di lingkungan kampus dan perkotaan.

Temuan Spesifik dan Keunikan Penelitian

Penelitian ini menghasilkan beberapa temuan spesifik yang menjadi keunikan tersendiri. Pertama, penggunaan material filamen 3D print eSUN PETG-Basic untuk pembuatan bilah fleksibel terbukti efektif dalam memberikan karakteristik fleksibilitas yang diperlukan untuk merespons angin turbulen di lingkungan kampus. Material ini juga memiliki ketahanan yang baik terhadap kondisi cuaca luar ruangan, sehingga cocok untuk aplikasi jangka panjang. Kedua, desain bilah yang mengadopsi prinsip biomimikri dengan meniru bentuk daun pohon memungkinkan turbin menangkap energi angin dari berbagai arah secara efisien, yang merupakan keunggulan signifikan dibandingkan turbin konvensional yang hanya efektif pada satu arah angin tertentu. Ketiga, kemampuan *self-starting* yang baik pada kecepatan angin rendah ($< 2,0$ m/s) membuktikan bahwa desain LeafWind berhasil mengatasi salah satu kelemahan utama turbin angin konvensional di lingkungan perkotaan. Keempat, pengujian langsung di lokasi dengan kondisi angin aktual memberikan data empiris yang lebih

valid dibandingkan simulasi numerik, sehingga hasil penelitian ini dapat menjadi acuan yang lebih reliabel untuk implementasi di lapangan.

Solusi dan Implikasi Praktis

Berdasarkan hasil pengujian, beberapa solusi dapat diusulkan untuk mengoptimalkan kinerja turbin LeafWind di lingkungan kampus. Pertama, pemilihan lokasi penempatan turbin perlu mempertimbangkan arah angin dominan dan potensi turbulensi, seperti menempatkan turbin di area terbuka di antara gedung yang memiliki efek wind tunnel atau koridor angin. Kedua, konfigurasi multi-unit dengan 27 turbin dalam satu struktur pohon dapat meningkatkan total energi yang dihasilkan secara signifikan, sehingga lebih bermanfaat untuk aplikasi praktis seperti penerangan taman kampus, pengisian daya ponsel, atau operasional papan informasi digital. Ketiga, pengintegrasian sistem penyimpanan energi seperti baterai dapat memungkinkan pemanfaatan energi yang dihasilkan secara lebih optimal, terutama pada saat kecepatan angin rendah atau pada malam hari. Keempat, penambahan panel surya mini pada struktur wind tree (konsep hybrid) dapat meningkatkan kapasitas pembangkitan energi secara keseluruhan, seperti yang telah diimplementasikan oleh New World Wind di berbagai lokasi (Anwar et al., 2021; Nakhoda & Saleh, 2015).

Secara praktis, hasil penelitian ini memiliki beberapa implikasi penting. Pertama, rancangan LeafWind dapat diaplikasikan sebagai pembangkit listrik mikro terdistribusi di lingkungan kampus atau perkotaan dengan karakteristik angin rendah dan turbulen. Kedua, struktur turbin berbentuk pohon (*wind tree*) dengan 27 unit turbin dapat berfungsi sebagai ikon energi bersih sekaligus sarana edukasi bagi mahasiswa dan masyarakat tentang potensi energi terbarukan. Ketiga, energi listrik yang dihasilkan, meskipun dalam skala kecil, dapat dimanfaatkan untuk beban ringan seperti penerangan taman kampus atau papan informasi digital, sehingga mendukung program *sustainable campus* di ITPLN. Keempat, penggunaan material 3D print eSUN PETG-Basic menunjukkan potensi pemanfaatan teknologi manufaktur aditif untuk pengembangan komponen turbin angin skala mikro yang ekonomis dan mudah diproduksi. Kelima, implementasi wind tree di kampus ITPLN dapat menjadi model percontohan bagi institusi pendidikan lain di Indonesia dalam mengadopsi teknologi energi terbarukan yang ramah lingkungan dan estetik.

Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diakui. Pertama, durasi pengujian yang relatif singkat (lima menit) belum dapat menggambarkan performa turbin dalam jangka panjang dan pada berbagai kondisi cuaca yang berbeda. Kedua, pengujian hanya dilakukan pada satu unit turbin, sehingga proyeksi untuk 27 unit masih bersifat estimasi dan perlu diverifikasi melalui pengujian skala penuh. Ketiga, kondisi angin selama pengujian tidak dapat dikontrol dan bervariasi secara alami, sehingga data yang diperoleh mungkin tidak sepenuhnya mewakili rata-rata kondisi angin di lokasi. Keempat, penelitian ini belum menguji aspek ketahanan material, perawatan, dan biaya operasional jangka panjang yang penting untuk evaluasi kelayakan ekonomi. Kelima, penelitian ini belum membandingkan kinerja bilah fleksibel dengan bilah kaku secara langsung pada kondisi yang sama untuk mengukur secara kuantitatif keunggulan bilah fleksibel. Keterbatasan ini menjadi arah untuk penelitian selanjutnya guna menyempurnakan desain dan implementasi turbin LeafWind secara lebih komprehensif.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, pembuatan, dan pengujian prototipe turbin angin fleksibel berbentuk pohon (LeafWind) di lingkungan kampus ITPLN, penelitian ini membuktikan bahwa turbin mikro sumbu vertikal dengan bilah fleksibel merupakan solusi yang tepat untuk mengatasi tantangan pemanfaatan energi angin di lingkungan perkotaan dan kampus yang memiliki karakteristik kecepatan angin rendah (1,5–5 m/s) dan turbulen akibat hambatan bangunan. Penggunaan bilah fleksibel berbahan eSUN PETG-Basic yang dirancang melalui teknologi 3D printing terbukti mampu merespons hembusan angin dari berbagai arah (omnidirectional) serta mempercepat putaran awal dari kondisi diam, dengan target cut-in speed berhasil dicapai di bawah 2,0 m/s. Kemampuan self-starting yang baik ini menjadi keunggulan utama LeafWind dibandingkan turbin angin konvensional yang umumnya memerlukan kecepatan angin lebih tinggi untuk memulai pembangkitan energi. Metode penelitian yang mencakup analisis potensi angin lokal, perancangan geometri berbasis biomimikri, pembuatan prototipe menggunakan manufaktur aditif, hingga pengujian langsung di lapangan terbukti efektif dalam menghasilkan rancangan turbin yang aplikatif dan sesuai dengan kondisi spesifik lokasi penelitian.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem pembangkitan daya turbin LeafWind mengalami peningkatan responsif dari kondisi awal hingga stabil. Pada menit pertama, daya yang dihasilkan sebesar 0,0696 W akibat inersia awal sistem mekanik, kemudian meningkat pesat menjadi 1,44 W pada menit kedua, dan mencapai kondisi stabil pada daya 1,92 W pada menit ketiga hingga kelima. Dari lima menit pengujian, diperoleh daya rata-rata sebesar 1,454 W dengan total energi kumulatif 0,00012116 kWh. Berdasarkan daya rata-rata tersebut, satu unit turbin LeafWind mampu memproduksi energi sebesar 1,454 Wh dalam satu jam operasi, sehingga ketika diintegrasikan ke dalam satu struktur wind tree penuh dengan kapasitas 27 unit turbin, total energi yang dihasilkan mencapai 0,03926 kWh (39,26 Wh) per jam operasi. Meskipun secara ideal sistem pembangkit listrik yang andal memerlukan kapasitas yang jauh lebih besar, perancangan wind tree ini difokuskan sebagai pembangkit mikro terdistribusi yang mengedepankan fungsi estetika, sarana edukasi energi bersih, dan penyuplai daya untuk beban ringan seperti lampu penerangan taman kampus dan papan informasi digital, sehingga mendukung program sustainable campus di ITPLN. Penelitian selanjutnya direkomendasikan untuk melakukan pengujian durasi panjang, optimasi desain bilah, pengujian skala penuh, serta analisis ekonomi guna menyempurnakan teknologi LeafWind dan mempercepat adopsi energi angin skala mikro di lingkungan perkotaan Indonesia.

REFERENSI

- Anggara, M. D. I. C., & Widyartono, M. (2026). Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) Turbin Savonius Portable untuk Pengisian Daya Smartphone. *Jurnal Keilmuan Teknik Elektro Terapan*, 1(2), 44–54.
- Akorede, M. F., Hizam, H., & Pouresmaeil, E. (2010). Distributed energy resources and benefits to the environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 724–734.
- Anggara, M. D. I. C., & Widyartono, M. (2026). Rancang bangun pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) turbin Savonius portable untuk pengisian daya smartphone. *Jurnal Keilmuan Teknik Elektro Terapan*, 1(2), 44–54.
- Anwar, D. N., Ramdani, D., Fawaid, M., Abdillah, H., & Nurtanto, M. (2021). *Pengembangan*

- pembangkit listrik tenaga bayu tipe HAWT 3 propeler sebagai media pembelajaran: Konseptual konversi energi.*
- Atabiq, M. A. W. M. R. A. (2021). Rancang bangun sistem pemantauan luaran pico generator pada pembangkit listrik tenaga bayu sumbu vertikal menggunakan Arduino UNO. 5, 43–49.
- Badan Pusat Statistik. (2023). *Statistik lingkungan hidup Indonesia 2023*. Badan Pusat Statistik Republik Indonesia.
- Darsono Sigalingging, A., Ardian Hutabarat, R., Ibrahim, H., Idris, M., Janifar, A., & Fajri, N. (2015). *Indonesia B Program Studi Teknik Mesin*.
- Fauzun, A., & Atabiq, M. A. W. M. R. A. (2021). Rancang bangun sistem pemantauan luaran pico generator pada pembangkit listrik tenaga bayu sumbu vertikal menggunakan Arduino UNO. 5, 43–49.
- Gianto, R., et al. (2021). *Model rangkaian-T pembangkit listrik tenaga bayu untuk analisis aliran daya tiga-fase (T-circuit model of wind power plant for three-phase power flow analysis)*.
- Hanum, N., Syahputra, R., & Sea, D. (2025). Pengaruh infrastruktur jalan dan listrik terhadap pertumbuhan ekonomi di Indonesia. *Jurnal Ekonomi, Bisnis dan Manajemen*, 4(2), 19–32.
- Haryanti, S. S., & Khristiana, Y. (2024). Kausalitas pertumbuhan penduduk dan konsumsi energi listrik terhadap pertumbuhan ekonomi di Indonesia. *Excellent*, 11(2), 182–193.
- Kusuma Wardhana, Y., Gede Indra Partha, C., & Wayan Sukerayasa, I. (2021). Pemanfaatan udara buang exhaust fan untuk pembangkit listrik tenaga bayu dengan pengaruh penambahan honeycomb berbasis ATmega 2560.
- Mahmuddin, F., Klara, S., Pawara, M. U., & Akhir, A. Y. (2019). Studi performa vertical-axis wind turbine (VAWT) sebagai pembangkit energi listrik pada floating platform. *Riset Sains dan Teknologi Kelautan*, 2(1), 8–16.
- Micallef, D., & van Bussel, G. (2018). A review of urban wind energy research: Aerodynamics and other challenges. *Energies*, 11(9), 2204.
- Muslim, A. C., Hutahae, H. A., & Alfaruk, S. R. (2025). Prediksi kebutuhan energi listrik di Banten: Proyeksi dan skenario transisi energi berkelanjutan. *Blend Sains Jurnal Teknik*, 4(2), 280–287.
- Nakhoda, Y. I., & Saleh, C. (2015). *Rancang bangun kincir angin sumbu vertikal pembangkit tenaga listrik portabel*.
- Palentek, A. A., Tumaliang, H., & Patras, L. S. (2025). *Analisa pertumbuhan energi listrik sampai tahun 2045 dengan pengembangan energi air*.
- Prabowo, H., Wijayanto, D. S., Saputra, T. W., & Bakar, M. S. B. (2023). The optimization of Savonius helix wind turbine cut-in speed with the variation of blades-twist rotor and number of blades. *JIPTEK: Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik dan Kejuruan*, 16(2), 81–89.
- Qodariah, L., Nurjihadi, M., & Pembangunan, E. (2024). Pengaruh sektor-sektor ekonomi prioritas dan variabel demografis terhadap konsumsi energi listrik di Provinsi Nusa Tenggara Barat. *Journal of Macroeconomics and Social Development*, 1(3), 1–14.
- Rizkal, R., & Yatjong, I. (2025). Potensi pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) daerah Wangi-Wangi Wakatobi Sulawesi Tenggara dalam mendukung transisi energi terbarukan. *Prosiding Seminar Nasional Pembangunan Ekonomi Berkelanjutan dan Riset Ilmu Sosial*, 2(1), 611–615.
- Safarudin, L. (2024). Pembangunan sumberdaya energi non-konvensional pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) Kecamatan Kontunaga Kabupaten Muna Provinsi Sulawesi Tenggara. *Prosiding Seminar Nasional Pembangunan Ekonomi Berkelanjutan dan Riset Ilmu Sosial*, 1(1), 305–312.

- Subagya, R. A., Ali, M., & Yudono, S. (n.d.). *Analisis pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) model diffuser augmented wind-turbine (DAWT): Sebuah tinjauan pustaka*.
- Ulikaryani, U., Santoso, A., Girawan, B. A., Ariawan, R., Jati, U. S., Sodikin, J., & Kristiningsih, A. (2026). Studi potensi pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) di Pantai Teluk Penyus Cilacap menggunakan analisis distribusi Weibull. *Ocean Engineering: Jurnal Ilmu Teknik dan Teknologi Maritim*, 5(2), 244–251.
- Wulandari, J. A. (2023). *Analisis perkembangan pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) sebagai sumber energi alternatif terbarukan di Indonesia*.
- Yadav, S., Mishra, A., Chaubey, V. K., Tiwari, A., & Singh, K. (2022). Aero leaf wind turbine tree for electricity generation. *International Journal of Scientific Development and Research (IJSDR)*, 7(4), 171–179.