

Analisis Desain Turbin Angin Horizontal 100 W di Pantai Koneng

Eri Prabowo¹, Trassanda Scudetto Widestomo Putra², Michael Putra Humisar Tampubolon³

Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi PLN, Jakarta, Indonesia

Email: eriprabowo@itpln.ac.id, Trassanda2410505@ITPLN.AC.ID, mch.putra@gmail.com

Abstract

Wind energy utilization in coastal areas can support small-scale renewable electricity supply, especially where the measured wind speed is suitable for micro wind turbine applications. This paper analyzes the design of a 100 W horizontal axis wind turbine at Pantai Koneng, Dumai, using NACA airfoils and QBlade simulation. The design compares three-blade and five-blade rotor configurations based on measured wind data, blade geometry, coefficient of power, tip speed ratio, rotational speed, and simulated power output. Primary wind data were obtained using a digital anemometer on 15-16 July 2023, while secondary data were taken from BMKG Pekanbaru and windPROSPECTING. The measured average wind speed at Pantai Koneng was 4.00 m/s, with a maximum hourly average of 6.00 m/s and a minimum of 3.00 m/s. The blade radius was set at 2 m with a taperless chord of 0.145 m and twelve blade segments using NACA 4424, NACA 4418, and NACA 4412 airfoils. QBlade results show that the three-blade configuration produces 230.793 W, coefficient of power 0.468, TSR 7, and rotational speed 200 rpm. The five-blade configuration produces 188.354 W, coefficient of power 0.382, TSR 5, and rotational speed 150 rpm. The three-blade rotor is therefore recommended because it provides higher simulated output and better suitability for the intended 100 W design target

Keywords: HAWT; NACA airfoil; Pantai Koneng; QBlade; wind turbine

Abstrak

Pemanfaatan energi angin di wilayah pesisir dapat mendukung penyediaan listrik terbarukan skala kecil, terutama pada lokasi dengan kecepatan angin yang sesuai untuk turbin angin mikro. Artikel ini menganalisis desain turbin angin sumbu horizontal 100 W di Pantai Koneng, Dumai, menggunakan airfoil NACA dan simulasi Qblade. Perancangan membandingkan konfigurasi rotor tiga bilah dan lima bilah berdasarkan data angin terukur, geometri bilah, koefisien daya, tip speed ratio, putaran rotor, dan daya hasil simulasi. Data primer diperoleh menggunakan anemometer digital pada 15-16 Juli 2023, sedangkan data sekunder berasal dari BMKG Pekanbaru dan windPROSPECTING. Kecepatan angin rata-rata terukur di Pantai Koneng sebesar 4,00 m/s, dengan nilai maksimum rata-rata per jam 6,00 m/s dan minimum 3,00 m/s. Jari-jari bilah ditetapkan 2 m dengan chord taperless 0,145 m dan dua belas segmen bilah menggunakan airfoil NACA 4424, NACA 4418, dan NACA 4412. Hasil Qblade menunjukkan konfigurasi tiga bilah menghasilkan daya 230,793 W, koefisien daya 0,468, TSR 7, dan putaran 200 rpm. Konfigurasi lima bilah menghasilkan daya 188,354 W, koefisien daya 0,382, TSR 5, dan putaran 150 rpm. Rotor tiga bilah direkomendasikan karena memberikan daya simulasi lebih tinggi dan lebih sesuai terhadap target desain 100 W.

Kata kunci: airfoil NACA; HAWT; Pantai Koneng; QBlade; turbin angin

1. Pendahuluan

Kebutuhan energi listrik yang terus meningkat mendorong pemanfaatan sumber energi terbarukan pada berbagai skala. Salah satu sumber yang dapat dimanfaatkan adalah energi angin karena ketersediaannya bergantung pada kondisi lokal, dapat dikonversi menjadi energi mekanik melalui rotor, dan dapat digunakan untuk pembangkitan listrik skala kecil hingga besar [1,2]. Pembangkit listrik tenaga bayu belum memberikan kontribusi dominan dalam bauran pembangkit nasional, namun aplikasinya tetap relevan untuk wilayah yang memiliki potensi angin lokal, khususnya daerah pesisir. Pantai Koneng di Kota Dumai menjadi lokasi yang menarik karena karakter pesisirnya memungkinkan aliran angin relatif terbuka dan dapat dimanfaatkan untuk turbin angin skala kecil.

Turbin angin sumbu horizontal atau horizontal axis wind turbine (HAWT) banyak digunakan karena efisiensinya relatif tinggi, konfigurasi rotornya stabil, dan prinsip aerodinamikanya telah banyak diterapkan pada perancangan turbin modern [3,4]. Pada skala mikro, desain rotor menjadi faktor utama yang menentukan kemampuan turbin menangkap energi angin. Jumlah bilah, bentuk airfoil, jari-jari rotor, chord, sudut puntir, dan tip speed ratio harus dipilih agar turbin dapat bekerja pada kecepatan angin rendah sampai sedang [5-9].

Penelitian ini berangkat dari kebutuhan merancang turbin angin horizontal kapasitas 100 W untuk kondisi angin Pantai Koneng. Kecepatan angin rata-rata terukur sebesar 4,00 m/s sehingga sesuai untuk aplikasi skala kecil, sedangkan data sekunder dari BMKG digunakan sebagai pembanding kondisi angin wilayah [10,13]. Desain awal dilakukan dengan perhitungan geometri bilah, kemudian disimulasikan menggunakan QBlade sebagai perangkat lunak perancangan dan analisis turbin angin [14]. Perbandingan dilakukan antara konfigurasi tiga bilah dan lima bilah dengan airfoil NACA 4424, NACA 4418, dan NACA 4412 yang mengacu pada basis data koordinat airfoil [15].

2. Metode Penelitian

2.1. Lokasi, Data, dan Kriteria Desain

Penelitian dilakukan di Pantai Koneng, Kelurahan Teluk Makmur, Kecamatan Medang Kampai, Kota Dumai, Provinsi Riau. Data primer diperoleh melalui pengukuran langsung menggunakan anemometer digital Holdpeak HP-866B APP pada 15-16 Juli 2023 pukul 08.00-20.00 WIB. Data sekunder digunakan sebagai pembanding, yaitu data BMKG Pekanbaru tahun 2021-2022 dan data potensi angin dari windPROSPECTING. Kriteria desain yang digunakan adalah turbin angin horizontal dengan target daya 100 W pada kecepatan angin rata-rata lokasi.

Tabel 1. Ringkasan data angin Pantai Koneng

Parameter	Nilai	Keterangan
Kecepatan rata-rata primer	4,00 m/s	Pengukuran 15-16 Juli 2023
Kecepatan maksimum rata-rata per jam	6,00 m/s	15 Juli 2023 pukul 11.00-12.00
Kecepatan minimum rata-rata per jam	3,00 m/s	15 Juli 2023 pukul 17.00-18.00
Temperatur rata-rata	32,97 degC	Data pengukuran lapangan
Rata-rata BMKG 2021-2022	2,31 m/s	Data sekunder pembanding
Kelas potensi angin	Class 1	Skala kecil, 2,5-4 m/s

Berdasarkan klasifikasi kecepatan angin, lokasi penelitian berada pada kelas angin rendah sampai menengah untuk aplikasi skala kecil. Oleh karena itu, rancangan rotor difokuskan pada kemampuan mulai berputar pada kecepatan relatif rendah, menghasilkan daya lebih besar dari 100 W pada simulasi, serta tetap sederhana untuk kemungkinan pembuatan prototipe.

2.2. Parameter Geometri dan Material Bilah

Desain bilah menggunakan tipe taperless karena bentuk ini lebih sederhana untuk fabrikasi dan cukup umum pada turbin angin skala kecil. Jari-jari rotor ditetapkan 2 m dan chord 0,145 m. Bilah dibagi menjadi dua belas segmen. Bagian pangkal menggunakan NACA 4424, bagian tengah menggunakan NACA 4418, dan bagian ujung menggunakan NACA 4412. Kombinasi ini dipilih untuk memperoleh ketebalan lebih besar di pangkal sebagai dukungan struktur dan profil lebih tipis di ujung untuk meningkatkan performa aerodinamis.

Tabel 2. Parameter desain bilah

Komponen/parameter	Nilai desain	Keterangan
Jenis turbin	HAWT	Turbin angin sumbu horizontal
Target daya	100 W	Daya rancangan teoritis
Jari-jari rotor	2 m	Hasil penentuan geometri
Chord	0,145 m	Bilah taperless
Jumlah segmen	12	Segmen perhitungan bilah
Airfoil segmen 1-4	NACA 4424	Bagian pangkal
Airfoil segmen 5-8	NACA 4418	Bagian tengah
Airfoil segmen 9-12	NACA 4412	Bagian ujung
Material shell	Polyurethane 20GF 65D	rho 1360 kg/m ³
Material internal	Aluminium seri 7000	rho 2900 kg/m ³

2.3. Rumus Perancangan

Kecepatan rata-rata dihitung dari seluruh data pengukuran, sedangkan daya angin dihitung dari massa jenis udara, luas sapuan rotor, dan pangkat tiga kecepatan angin.

$$\bar{V} = (1/n) \sum V_i \dots\dots\dots(1)$$

$$P_w = 1/2 \rho A V^3 \dots\dots\dots(2)$$

Efisiensi sistem dihitung dari perkalian efisiensi bilah, transmisi, generator, dan kontroler. Nilai efisiensi sistem kemudian dipakai untuk menentukan kebutuhan energi angin agar target energi listrik dapat tercapai.

$$K = \eta_b \times \eta_t \times \eta_g \times \eta_c \dots\dots\dots(3)$$

$$E_a = E / K \dots\dots\dots(4)$$

Geometri bilah dihitung dari luas sapuan dan jari-jari rotor. Untuk setiap segmen, nilai jari-jari parsial, TSR parsial, koefisien gaya angkat, flow angle, dan twist dihitung berdasarkan parameter rotor dan airfoil.

$$R = \sqrt{(A / \pi)} \dots\dots\dots(5)$$

$$\lambda_r = (r/R) \times \lambda_R \dots\dots\dots(6)$$

$$C_L = 16\pi R(R/r) / (9\lambda_r^2 BC_r) \dots\dots\dots(7)$$

$$\phi = (2/3) \tan^{-1}(1/\lambda_r) \dots\dots\dots(8)$$

$$\beta = \phi - \alpha \dots\dots\dots(9)$$

Hubungan jumlah bilah dan TSR maksimum digunakan untuk memahami pengaruh konfigurasi rotor. Semakin banyak bilah, nilai TSR optimum cenderung lebih rendah karena soliditas rotor meningkat.

$$TSR_{max} = 4\pi / N_b \dots\dots\dots(10)$$

$$\sigma = N_b C / R \dots\dots\dots(11)$$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Analisis Data Angin

Data primer menunjukkan kecepatan angin rata-rata 4,00 m/s. Nilai ini lebih tinggi dibanding data rata-rata BMKG Pekanbaru sebesar 2,31 m/s karena pengukuran primer dilakukan langsung di area pesisir Pantai Koneng pada jam tertentu, sedangkan data BMKG merepresentasikan rentang waktu yang lebih panjang dan lokasi stasiun pengamatan berbeda. Untuk desain mikro turbin di lokasi tertentu, data primer dianggap lebih representatif terhadap kondisi tapak pemasangan.

Kecepatan tertinggi rata-rata per jam sebesar 6,00 m/s menunjukkan adanya peluang peningkatan output pada periode angin lebih kuat. Namun rancangan tetap harus mempertimbangkan kecepatan rata-rata 4,00 m/s agar turbin tidak hanya bekerja pada kondisi puncak. Dengan asumsi rotor radius 2 m dan daya teoritis sekitar 100 W, turbin yang dirancang berada dalam kategori aplikasi skala kecil untuk kebutuhan lokal.

3.2. Hasil Perhitungan Awal

Efisiensi sistem dihitung menggunakan dua batas efisiensi bilah, yaitu 0,4 sebagai batas atas dan 0,3 sebagai batas bawah. Dengan efisiensi transmisi 0,9 serta efisiensi generator dan kontroler masing-masing 0,8, nilai efisiensi sistem berada pada 0,2304 dan 0,1728. Dari nilai tersebut dihitung energi angin yang dibutuhkan untuk menghasilkan energi listrik tertentu.

Tabel 3. Ringkasan hasil perhitungan awal

Parameter	Nilai 1	Nilai 2	Keterangan
Efisiensi sistem K	0,2304	0,1728	Batas atas dan bawah
Energi angin E _a	4340,278 J	5787,037 J	Untuk E = 1000 J
Luas sapuan A	11,07 m ²	14,76 m ²	Rentang hasil perhitungan
Jari-jari rotor R	1,9 m	2,2 m	Nilai tengah digunakan 2 m
Daya teoritis	78 W	dibulatkan 100 W	Target desain mikro

Nilai tengah jari-jari rotor sebesar 2 m dipilih agar desain mampu mencapai target daya dengan luas sapuan yang memadai, namun masih realistis untuk turbin skala kecil. Pemilihan radius ini juga memungkinkan perbandingan konfigurasi tiga dan lima bilah dilakukan pada ukuran rotor yang sama sehingga pengaruh jumlah bilah terhadap performa dapat dianalisis secara lebih adil.

3.3. Evaluasi Airfoil dan Geometri Bilah

Airfoil NACA 4424, NACA 4418, dan NACA 4412 digunakan secara bertahap dari pangkal menuju ujung bilah. NACA 4424 memiliki ketebalan lebih besar sehingga sesuai untuk bagian pangkal yang menerima beban struktur lebih tinggi. NACA 4418 digunakan pada bagian tengah sebagai kompromi antara kekuatan dan performa. NACA 4412 digunakan pada ujung bilah untuk mengurangi drag dan meningkatkan efisiensi pada bagian yang memiliki kecepatan tangensial lebih tinggi.

Tabel 4. Data Cl/Cd airfoil hasil QBlade

Airfoil	Cl/Cd maksimum	Alpha	Posisi segmen	Fungsi utama
NACA 4424	89,50	7 deg	1-4	Kekuatan pangkal bilah
NACA 4418	119,35	6,5 deg	5-8	Transisi tengah bilah
NACA 4412	133,64	5,5-6 deg	9-12	Efisiensi ujung bilah

Nilai Cl/Cd tertinggi berada pada NACA 4412, sehingga profil ini sesuai ditempatkan di ujung bilah. Pada bagian ujung, drag yang lebih rendah sangat penting karena kecepatan relatif lebih tinggi. Sebaliknya, bagian pangkal membutuhkan ketebalan dan kekuatan lebih besar sehingga NACA 4424 lebih sesuai walaupun nilai Cl/Cd-nya lebih rendah.

3.4. Perbandingan Desain Tiga dan Lima Bilah

Perhitungan desain menghasilkan distribusi nilai jari-jari parsial, TSR parsial, Cl, alpha, flow angle, dan twist pada setiap segmen. Pada konfigurasi tiga bilah, nilai twist cenderung lebih kecil pada pangkal dan meningkat menuju ujung. Pada konfigurasi lima bilah, twist pangkal lebih besar karena pengaruh jumlah bilah terhadap soliditas dan TSR optimum. Perbedaan ini menunjukkan bahwa jumlah bilah tidak hanya mempengaruhi estetika rotor, tetapi juga parameter geometri dan performa aerodinamis.

Tabel 5. Contoh distribusi parameter desain bilah

Konfigurasi	Segmen	r (m)	TSR parsial	Cl	Twist
3 bilah	0	0,63	2,19	1,91	1,22 deg
3 bilah	5	1,20	4,19	0,27	5,09 deg
3 bilah	12	2,00	7,00	0,06	5,20 deg
5 bilah	0	0,63	2,19	1,14	8,86 deg
5 bilah	5	1,20	4,19	0,16	8,30 deg
5 bilah	12	2,00	7,00	0,03	7,02 deg

Konfigurasi lima bilah memiliki soliditas lebih tinggi sehingga mampu menghasilkan torsi awal yang lebih besar, tetapi cenderung memiliki TSR optimum lebih rendah. Konfigurasi tiga bilah memiliki soliditas lebih rendah, tetapi lebih sesuai untuk putaran lebih tinggi dan dapat menghasilkan koefisien daya yang kompetitif pada TSR yang lebih besar. Untuk rancangan ini, data simulasi menjadi dasar utama pemilihan konfigurasi.

3.5. Hasil Simulasi QBlade

Simulasi QBlade dilakukan untuk mengevaluasi hubungan coefficient power terhadap rotational speed dan TSR. Pada konfigurasi tiga bilah, koefisien daya meningkat seiring kenaikan rotational speed hingga mencapai nilai maksimum sekitar 0,490 pada 200 rpm, kemudian menurun pada putaran lebih tinggi. Pada konfigurasi lima bilah, koefisien daya maksimum sekitar 0,500 terjadi pada 150 rpm. Meskipun nilai Cp maksimum lima bilah sedikit lebih tinggi, daya simulasi totalnya lebih rendah pada parameter windfield yang digunakan.

Tabel 6. Ringkasan hasil simulasi QBlade

Konfigurasi	Radius	Kecepatan angin	TSR	rpm	Cp	Daya simulasi
HAWT 3 bilah	2 m	4 m/s	7	200	0,468	230,793 W
HAWT 5 bilah	2 m	4 m/s	5	150	0,382	188,354 W

Hasil simulasi menunjukkan bahwa turbin tiga bilah menghasilkan daya lebih tinggi daripada lima bilah pada kondisi angin 4 m/s. Daya 230,793 W juga melampaui target desain 100 W, sehingga memberikan margin yang cukup terhadap rugi-rugi sistem dan variasi kecepatan angin. Konfigurasi lima bilah tetap mampu menghasilkan daya di atas target teoritis, tetapi lebih rendah dibanding konfigurasi tiga bilah.

Perbedaan performa ini dapat dijelaskan melalui hubungan jumlah bilah dengan TSR dan soliditas. Rotor lima bilah memiliki area bilah lebih besar sehingga soliditas meningkat. Akibatnya, rotor cenderung bekerja pada TSR

lebih rendah dan putaran lebih rendah. Rotor tiga bilah memiliki soliditas lebih kecil sehingga lebih sesuai untuk TSR 7 dan putaran 200 rpm. Pada turbin angin sumbu horizontal modern, konfigurasi tiga bilah juga banyak digunakan karena memberikan keseimbangan antara efisiensi, stabilitas, getaran, dan kemudahan manufaktur.

3.6. Implikasi Desain dan Kelayakan Aplikasi

Dari sisi kelayakan teknis, perancangan turbin angin horizontal 100 W di Pantai Koneng dapat diterapkan sebagai prototipe skala kecil. Kondisi angin rata-rata 4,00 m/s termasuk rendah, tetapi masih dapat dimanfaatkan oleh rotor berdiameter 4 m. Dengan output simulasi 230,793 W pada konfigurasi tiga bilah, turbin memiliki peluang menghasilkan daya yang cukup untuk beban kecil atau sistem penyimpanan baterai, terutama saat kecepatan angin berada di atas rata-rata. Keterbatasan utama desain adalah belum adanya pengujian prototipe fisik. Simulasi QBlade memberikan indikasi performa aerodinamika, tetapi nilai aktual akan dipengaruhi oleh kualitas fabrikasi bilah, generator, gearbox, rugi mekanik, balancing rotor, kontrol yaw, kekakuan tower, serta kondisi turbulensi lapangan. Oleh karena itu, hasil simulasi sebaiknya dipakai sebagai dasar pembuatan prototipe, bukan sebagai performa final yang pasti.

Untuk implementasi lapangan, perlu diperhatikan keselamatan mekanik dan penempatan tower. Lokasi pesisir memiliki potensi korosi sehingga material logam, sambungan, dan rumah generator harus diberi proteksi. Bilah polyurethane dengan struktur internal aluminium perlu dievaluasi lebih lanjut terhadap beban lentur, fatigue, dan kondisi cuaca. Selain itu, sistem pengereman atau pembatas putaran perlu disiapkan untuk kondisi angin kencang.

3.7. Analisis Sensitivitas Kecepatan Angin

Daya angin sangat sensitif terhadap perubahan kecepatan karena hubungan daya dan kecepatan mengikuti pangkat tiga. Dengan radius rotor 2 m, luas sapuan rotor mencapai 12,57 m². Pada kecepatan rendah, perubahan kecil pada kecepatan angin dapat memberikan perbedaan daya yang besar. Oleh karena itu, desain turbin untuk Pantai Koneng tidak cukup hanya mempertimbangkan kecepatan maksimum sesaat, tetapi harus memperhatikan kecepatan rata-rata dan sebaran operasinya.

Bila koefisien daya hasil simulasi tiga bilah sebesar 0,468 digunakan sebagai pendekatan rotor, daya rotor teoritis pada kecepatan 4 m/s mendekati 230 W. Nilai ini konsisten dengan hasil simulasi QBlade. Ketika kecepatan turun menjadi 3 m/s, daya rotor turun mendekati 97 W, sehingga sistem kelistrikan perlu dirancang agar tetap dapat menyimpan energi pada kondisi angin rendah. Sebaliknya, pada kecepatan 5-6 m/s, daya rotor dapat meningkat signifikan sehingga diperlukan kontrol beban, proteksi generator, atau sistem pengereman untuk mencegah putaran berlebih.

Tabel 7. Estimasi daya terhadap variasi kecepatan angin

V (m/s)	Daya angin teoritis (W)	Daya rotor 3 bilah Cp 0,468 (W)	Implikasi operasi
3	207,8	97,3	Mendekati target 100 W
4	492,6	230,6	Kondisi desain utama
5	962,1	450,3	Perlu pengaturan beban
6	1662,4	778,0	Perlu proteksi overspeed

Tabel 7 memperlihatkan bahwa desain tiga bilah memiliki margin daya yang cukup pada kecepatan rata-rata 4 m/s. Namun margin ini tidak boleh langsung dianggap sebagai daya listrik bersih karena daya mekanis rotor masih akan mengalami rugi-rugi pada poros, transmisi, generator, kontroler, kabel, dan penyimpanan baterai. Dengan demikian, hasil simulasi menjadi dasar optimistis untuk desain rotor, sedangkan desain sistem kelistrikan harus tetap mempertimbangkan efisiensi komponen aktual.

3.8. Pertimbangan Konstruksi Prototipe

Tahap berikutnya setelah simulasi adalah pembuatan prototipe. Pada prototipe, konsistensi geometri bilah menjadi aspek paling penting. Kesalahan kecil pada chord, sudut twist, atau ketidakseimbangan massa bilah dapat menimbulkan getaran dan menurunkan performa. Oleh karena itu, setiap bilah harus dibuat dengan cetakan atau jig yang sama, kemudian dilakukan balancing statis sebelum dipasang pada hub.

Material polyurethane 20GF 65D dengan struktur internal aluminium dapat memberikan kombinasi kekakuan dan bobot yang sesuai untuk skala kecil. Namun lokasi pantai memiliki kelembapan tinggi dan paparan garam, sehingga komponen logam seperti hub, baut, poros, bearing, dan struktur tower harus diberi perlindungan korosi. Pemilihan bearing perlu mempertimbangkan beban radial dan aksial akibat rotor serta kemungkinan beban kejut ketika arah angin berubah.

Tower dengan tinggi hub 2,5 m sebagaimana parameter simulasi cukup untuk pengujian awal, tetapi untuk aplikasi lapangan, ketinggian lebih besar dapat dipertimbangkan agar rotor memperoleh aliran angin yang lebih stabil dan tidak terlalu terganggu oleh objek sekitar. Walaupun demikian, kenaikan tinggi tower harus disertai analisis kekuatan struktur, pondasi, guy wire bila digunakan, dan prosedur keselamatan saat perawatan.

Tabel 8. Komponen utama yang perlu divalidasi pada prototipe

Komponen	Parameter validasi	Alasan teknis
Bilah	Chord, twist, massa, dan kekasaran permukaan	Menentukan performa aerodinamika dan getaran
Hub	Konsentrisitas dan kekuatan sambungan	Mencegah ketidakseimbangan rotor
Poros dan bearing	Beban radial, aksial, dan gesekan	Menjamin putaran stabil
Generator	Kurva tegangan terhadap rpm	Menentukan daya listrik aktual
Tower	Kekakuan, pondasi, dan ketahanan korosi	Menjamin keselamatan instalasi
Kontroler	Proteksi tegangan, arus, dan overspeed	Melindungi beban dan baterai

3.9. Rencana Pengujian Lapangan

Pengujian lapangan perlu dilakukan bertahap. Tahap pertama adalah uji tanpa beban untuk memastikan rotor dapat berputar bebas, tidak mengalami gesekan berlebih, dan tidak muncul getaran berbahaya. Tahap kedua adalah uji beban ringan untuk melihat hubungan putaran rotor, tegangan keluaran, arus, dan kecepatan angin. Tahap ketiga adalah uji dengan beban atau baterai sesuai desain sistem kelistrikan.

Data yang sebaiknya dicatat meliputi kecepatan angin, arah angin, rpm rotor, tegangan, arus, daya listrik, temperatur generator, dan kondisi getaran. Pencatatan dapat dilakukan pada interval 1-10 menit agar data dapat dibandingkan dengan metode pengukuran angin standar. Pengujian minimal dilakukan beberapa hari pada kondisi cuaca berbeda sehingga performa prototipe tidak hanya merepresentasikan satu kondisi angin.

Perbandingan hasil prototipe dengan simulasi QBlade dapat dilakukan melalui rasio daya aktual terhadap daya simulasi. Apabila daya aktual jauh lebih rendah, penyebabnya dapat berasal dari rugi mekanik, mismatch generator, bentuk bilah tidak sesuai desain, kualitas permukaan bilah kurang baik, atau turbulensi lokasi. Evaluasi tersebut menjadi dasar perbaikan desain generasi berikutnya.

Tabel 9. Tahapan pengujian prototipe turbin angin

Tahap	Kegiatan	Output yang diharapkan
Uji visual	Pemeriksaan bilah, hub, tower, dan sambungan	Tidak ada cacat fisik kritis
Uji tanpa beban	Rotor diputar oleh angin tanpa beban listrik	Putaran halus dan getaran rendah
Uji beban ringan	Pengukuran tegangan, arus, rpm, dan angin	Kurva awal performa listrik
Uji beban baterai	Pengisian baterai melalui kontroler	Daya listrik aktual terukur
Uji keselamatan	Pengamatan overspeed dan pengereman	Sistem proteksi berfungsi
Evaluasi	Membandingkan data prototipe dan simulasi	Rekomendasi perbaikan desain

3.10. Keterbatasan dan Pengembangan Lanjutan

Keterbatasan penelitian ini adalah data primer diambil selama dua hari sehingga belum mewakili variasi angin tahunan. Data BMKG digunakan sebagai pembanding, tetapi lokasi stasiun dan ketinggian pengukuran dapat berbeda dari lokasi pemasangan turbin. Untuk rancangan akhir, pengukuran jangka panjang dengan data logger pada ketinggian hub yang direncanakan lebih disarankan.

Simulasi QBlade juga memiliki asumsi aerodinamika tertentu. Hasil simulasi rotor belum memasukkan seluruh rugi kelistrikan dan mekanik yang terjadi pada sistem nyata. Oleh sebab itu, desain generator, transmisi, kontroler, dan baterai harus dihitung secara terpisah. Pengembangan lanjutan dapat mencakup desain gearbox atau direct drive generator, analisis kekuatan bilah, analisis fatigue, serta optimasi airfoil untuk kecepatan angin rendah.

Dari sisi publikasi jurnal, kontribusi utama artikel ini adalah menunjukkan alur desain turbin angin mikro yang berbasis data lapangan, perhitungan geometri bilah, dan validasi awal melalui simulasi. Agar artikel semakin kuat, penelitian lanjutan sebaiknya menambahkan hasil prototipe aktual sehingga rekomendasi konfigurasi tiga bilah tidak hanya didasarkan pada simulasi, tetapi juga pada pengukuran performa nyata di Pantai Koneng.

3.11. Perbandingan terhadap Target Daya 100 W

Target rancangan sebesar 100 W harus dibaca sebagai target daya nominal skala kecil, bukan jaminan daya konstan setiap saat. Pada turbin angin, daya keluaran berubah mengikuti kecepatan angin, efisiensi rotor, dan kecocokan generator. Karena itu, hasil simulasi yang melampaui 100 W pada kecepatan 4 m/s memberikan cadangan desain yang penting. Cadangan tersebut berguna untuk mengkompensasi rugi-rugi pada sistem nyata, seperti rugi bearing, rugi transmisi, rugi generator, rugi kontroler, rugi kabel, dan rugi pengisian baterai.

Apabila daya rotor tiga bilah sebesar 230,793 W diproses melalui sistem kelistrikan dengan efisiensi gabungan misalnya 60-70%, maka daya listrik bersih masih berada pada kisaran 138-162 W. Nilai ini tetap lebih tinggi dari target 100 W. Pada konfigurasi lima bilah, daya rotor 188,354 W dengan efisiensi gabungan yang sama menghasilkan sekitar 113-132 W. Kedua konfigurasi secara prinsip masih memungkinkan memenuhi target, tetapi konfigurasi tiga bilah memberikan margin yang lebih besar.

Tabel 10. Estimasi daya bersih berdasarkan efisiensi sistem

Konfigurasi	Daya rotor simulasi	Daya bersih 60%	Daya bersih 70%	Evaluasi
3 bilah	230,793 W	138,48 W	161,56 W	Margin tinggi terhadap target 100 W
5 bilah	188,354 W	113,01 W	131,85 W	Masih memenuhi target, margin lebih kecil

Margin daya juga bermanfaat ketika kecepatan angin aktual turun di bawah rata-rata. Pada kecepatan 3 m/s, daya rotor teoritis tiga bilah mendekati 97 W sebelum rugi sistem sehingga daya listrik bersih kemungkinan berada di bawah target. Oleh sebab itu, sistem penyimpanan energi tetap diperlukan agar beban kecil dapat disuplai lebih stabil. Untuk aplikasi rumah tangga sederhana, turbin ini lebih tepat digunakan sebagai sistem pengisian baterai atau suplai beban ringan, bukan sebagai satu-satunya sumber daya kontinu.

Dari sisi desain, konfigurasi tiga bilah lebih efisien untuk target daya. Jumlah bilah yang lebih sedikit mengurangi kebutuhan material, menurunkan bobot rotor, dan mempermudah proses balancing. Selain itu, putaran optimum 200 rpm memberikan ruang lebih baik untuk pemilihan generator kecil yang membutuhkan putaran menengah. Pada lima bilah, putaran optimum lebih rendah sehingga torsi awal mungkin lebih baik, tetapi matching dengan generator perlu diperhatikan agar tidak menurunkan efisiensi listrik.

3.12. Rekomendasi Desain Akhir

Berdasarkan hasil perhitungan dan simulasi, desain akhir yang disarankan adalah turbin angin sumbu horizontal tiga bilah dengan radius 2 m, chord 0,145 m, dan TSR rancangan 7. Bilah dibagi menjadi dua belas segmen dengan airfoil bertahap dari NACA 4424 di pangkal, NACA 4418 di bagian tengah, dan NACA 4412 di bagian ujung. Konfigurasi ini memberikan kombinasi kekuatan struktur dan performa aerodinamis yang lebih baik untuk skala 100 W.

Hub sebaiknya dirancang dengan kemampuan pemasangan bilah yang presisi pada sudut pitch yang ditetapkan. Kesalahan sudut pitch beberapa derajat dapat mempengaruhi daya secara nyata karena mengubah sudut serang setiap segmen. Untuk prototipe awal, pitch tetap dapat digunakan agar konstruksi sederhana. Namun, jika pengembangan dilanjutkan, mekanisme pitch sederhana atau pengaturan sudut pemasangan bilah dapat diuji untuk mencari titik operasi terbaik pada kecepatan angin Pantai Koneng.

Generator sebaiknya dipilih berdasarkan kurva rpm dan daya yang sesuai dengan putaran 150-250 rpm. Bila generator membutuhkan putaran lebih tinggi, maka dibutuhkan transmisi. Namun transmisi menambah rugi mekanik dan kompleksitas perawatan. Alternatif yang lebih sederhana adalah generator direct drive dengan karakteristik low rpm, tetapi ukuran dan biaya generator dapat menjadi lebih tinggi. Pemilihan ini perlu disesuaikan dengan tujuan akhir, apakah untuk prototipe edukasi, beban penerangan, atau pengisian baterai.

Tabel 11. Spesifikasi desain akhir yang direkomendasikan

Parameter	Rekomendasi	Pertimbangan
Jenis turbin	HAWT upwind 3 bilah	Efisiensi dan stabilitas lebih baik
Radius rotor	2 m	Sesuai hasil perhitungan luas sapuan
Chord	0,145 m taperless	Lebih sederhana untuk manufaktur
TSR desain	7	Sesuai performa optimum tiga bilah
Putaran desain	±200 rpm	Titik performa simulasi terbaik
Airfoil pangkal	NACA 4424	Mendukung kekuatan struktur
Airfoil tengah	NACA 4418	Transisi aerodinamika dan struktur
Airfoil ujung	NACA 4412	Mengurangi drag pada tip
Target sistem	Pengisian baterai atau beban ringan	Daya angin bersifat fluktuatif

Rekomendasi desain akhir ini tetap memerlukan validasi fisik. Pada tahap manufaktur, geometri bilah perlu dicek menggunakan template tiap segmen. Setelah rotor terpasang, pengujian balancing dan getaran harus dilakukan sebelum turbin dijalankan pada kecepatan angin tinggi. Tahapan ini penting agar hasil simulasi dapat diterjemahkan menjadi prototipe yang aman, stabil, dan dapat dievaluasi secara ilmiah.

3.13. Kontribusi terhadap Aplikasi Energi Terbarukan Lokal

Hasil perancangan ini memiliki nilai aplikatif untuk edukasi dan demonstrasi energi terbarukan di wilayah pesisir. Walaupun skala daya relatif kecil, turbin angin 100 W dapat memperlihatkan prinsip konversi energi angin menjadi energi listrik secara nyata. Pada lingkungan pendidikan atau komunitas, prototipe dapat digunakan untuk mengukur pengaruh cuaca, kecepatan angin, putaran rotor, dan beban listrik terhadap produksi energi. Di wilayah seperti Pantai Koneng, penggunaan turbin angin mikro dapat dikombinasikan dengan panel surya untuk membentuk sistem hybrid kecil. Panel surya bekerja lebih baik saat radiasi matahari tinggi, sedangkan turbin angin dapat tetap menghasilkan energi ketika terdapat aliran angin pada sore atau malam hari. Kombinasi ini dapat meningkatkan kontinuitas suplai untuk beban kecil seperti lampu, sensor, kamera pemantauan, atau fasilitas wisata sederhana.

Dari sudut pandang penelitian lanjutan, desain ini dapat dikembangkan menjadi platform uji. Variabel yang dapat diuji meliputi jumlah bilah, tipe airfoil, pitch, material bilah, tinggi tower, dan tipe generator. Dengan pengujian bertahap, desain turbin angin mikro dapat disesuaikan dengan karakter angin lokal sehingga tidak hanya menyalin desain umum, tetapi benar-benar berbasis data tapak. Manfaat lain dari penelitian ini adalah memberikan contoh bahwa software simulasi seperti QBlade dapat digunakan sebagai alat awal dalam desain teknik mesin. Perangkat lunak tidak menggantikan pengujian lapangan, tetapi dapat mengurangi jumlah percobaan fisik yang tidak perlu. Dengan simulasi, peneliti dapat mempersempit pilihan desain sebelum masuk ke tahap fabrikasi yang membutuhkan biaya dan waktu lebih besar.

3.14. Aspek Keamanan dan Perawatan

Aspek keamanan perlu menjadi bagian dari rancangan sejak awal karena turbin memiliki komponen berputar dan ditempatkan di area terbuka. Rotor berdiameter 4 m harus dipasang pada lokasi yang tidak mudah dijangkau langsung oleh pengunjung. Area sekitar tower perlu diberi jarak aman, terutama ketika pengujian dilakukan pada kecepatan angin tinggi. Jika turbin diterapkan pada kawasan wisata pantai, sistem pengaman fisik dan papan informasi perlu disiapkan agar masyarakat memahami risiko putaran bilah. Sistem pengereman atau pembatas putaran juga diperlukan. Pada angin di atas kondisi rancangan, daya meningkat secara kubik sehingga rotor dapat berputar lebih cepat dari titik optimum. Pembatasan dapat dilakukan melalui pengaturan beban listrik, short-circuit brake pada generator tertentu, mekanisme furling sederhana, atau rem mekanik. Pilihan sistem proteksi harus disesuaikan dengan generator dan konfigurasi mekanik yang dipakai pada prototipe.

Perawatan berkala sebaiknya mencakup pemeriksaan kekencangan baut bilah, kondisi bearing, korosi pada hub dan tower, retak pada bilah, serta kondisi kabel dari nacelle menuju kontroler. Karena lokasi berada di pesisir, korosi dapat berlangsung lebih cepat dibanding lokasi daratan. Pengecatan ulang, penggunaan grease yang sesuai, dan pemilihan baut tahan karat menjadi bagian penting dalam mempertahankan umur pakai turbin.

Pemeriksaan performa juga perlu dilakukan secara periodik. Jika pada kecepatan angin yang sama daya keluaran menurun, kemungkinan terjadi perubahan pada permukaan bilah, gesekan bearing meningkat,

ketidakseimbangan rotor, atau degradasi generator. Catatan operasi harian yang memuat kecepatan angin, rpm, tegangan, arus, dan kondisi visual dapat membantu mendeteksi penurunan performa lebih awal. Dengan demikian, rancangan turbin tidak hanya dinilai dari hasil simulasi, tetapi juga dari kemudahan dirawat setelah dipasang.

Tabel 12. Rencana inspeksi perawatan turbin angin mikro

Interval	Item inspeksi	Tindakan
Harian saat uji	Getaran, suara tidak normal, tegangan dan arus	Hentikan pengujian bila muncul anomali
Mingguan	Baut bilah, hub, bearing, dan kabel	Kencangkan sambungan dan rapikan kabel
Bulanan	Korosi, retak bilah, kondisi tower	Bersihkan, cat ulang lokal, dan ganti komponen rusak
Setiap musim	Kurva performa terhadap kecepatan angin	Bandingkan dengan data awal prototipe

Tabel 13. Nomenklatur

Simbol/Istilah	Keterangan	Satuan
V	Kecepatan angin	m/s
V_avg	Kecepatan angin rata-rata	m/s
P_w	Daya angin teoritis	W
Rho	Massa jenis udara	kg/m ³
A	Luas sapuan rotor	m ²
R	Jari-jari rotor	m
C_r	Chord bilah	m
Cp	Koefisien daya rotor	-
TSR	Tip speed ratio	-
Beta	Sudut puntir atau twist	deg
HAWT	Horizontal axis wind turbine	-
QBlade	Perangkat lunak desain dan simulasi turbin angin	-

4. Kesimpulan

- 1) Kecepatan angin rata-rata terukur di Pantai Koneng sebesar 4,00 m/s, sehingga lokasi dapat dipertimbangkan untuk turbin angin skala kecil.
- 2) Desain rotor menggunakan radius 2 m, chord 0,145 m, dua belas segmen, serta kombinasi airfoil NACA 4424, NACA 4418, dan NACA 4412.
- 3) Hasil simulasi QBlade menunjukkan konfigurasi tiga bilah menghasilkan 230,793 W, Cp 0,468, TSR 7, dan 200 rpm.
- 4) Konfigurasi lima bilah menghasilkan 188,354 W, Cp 0,382, TSR 5, dan 150 rpm.
- 5) Konfigurasi tiga bilah direkomendasikan karena menghasilkan daya simulasi lebih tinggi dan lebih sesuai untuk target turbin angin horizontal 100 W di Pantai Koneng.

Saran

Pengembangan selanjutnya perlu difokuskan pada pembuatan prototipe fisik agar hasil simulasi dapat dibandingkan dengan performa aktual. Pengujian sebaiknya dilakukan pada beberapa variasi beban listrik, variasi kecepatan angin, serta durasi pengamatan yang lebih panjang. Dengan demikian, kurva hubungan antara kecepatan angin, putaran rotor, tegangan, arus, dan daya listrik dapat diperoleh secara lebih lengkap. Pengukuran angin jangka panjang juga disarankan karena data dua hari belum cukup untuk mewakili karakter angin tahunan. Pemasangan data logger pada ketinggian hub akan memberikan data yang lebih tepat untuk menentukan cut-in speed, jam operasi efektif, potensi energi harian, serta kelayakan pemanfaatan turbin angin mikro di Pantai Koneng.

Pada tahap desain lanjutan, generator low rpm, sistem kontrol pengisian baterai, sistem pengereman, dan proteksi korosi perlu dihitung sebagai satu kesatuan. Analisis kekuatan bilah juga perlu dilakukan untuk memastikan rotor aman terhadap beban lentur, gaya sentrifugal, dan kondisi angin kencang. Dengan

pengembangan tersebut, rancangan turbin angin tidak hanya layak secara simulasi, tetapi juga siap diuji sebagai teknologi tepat guna skala kecil.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Mesin Institut Teknologi PLN, dosen pembimbing, serta pihak yang mendukung pengambilan data dan penggunaan perangkat lunak QBlade dalam penelitian perancangan turbin angin ini.

Daftar Rujukan

- 1) Manwell JF, McGowan JG, Rogers AL. Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. 2nd ed. Chichester: Wiley; 2009.
- 2) Mathew S. Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics. Berlin: Springer; 2007.
- 3) Hau E. Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics. Berlin: Springer; 2013.
- 4) Piggott H. Windpower Workshop: Building Your Own Wind Turbine. Centre for Alternative Technology; 1997.
- 5) Prayudi, Nurhasanah R, Madi B, Maulana H, Suardi A, Antono V. Rancang bangun turbin angin untuk pembangkit listrik hybrid one pole energy. 2020;82-88.
- 6) Hidayanti D, Dewangga G, Yoreniko PM, Sarita I, Sumarno FG, Purwati W. Rancang bangun pembangkit hybrid tenaga angin dan surya dengan penggerak otomatis pada panel surya. 2019;93-101.
- 7) Saputra M, Kurniawan R, Munawir A. Rancang bangun turbin angin skala kecil untuk kawasan kampus Universitas Teuku Umar. 2019.
- 8) Sari NH, Laksmana WG. Perancangan bilah taperless pada kincir angin: studi kasus di PT Lentera Bumi Nusantara Tasikmalaya. 2019;104-109.
- 9) Tong W. Wind Power Generation and Wind Turbine Design. Southampton: WIT Press; 2010.
- 10) Pusat Pendidikan dan Pelatihan UPDL Makassar PT PLN (Persero). Materi potensi energi angin dan pengukuran data angin. Makassar; 2022.
- 11) Kementerian ESDM. Statistik Ketenagalistrikan Tahun 2020. Jakarta: Kementerian ESDM; 2021.
- 12) Kementerian ESDM. Statistik Ketenagalistrikan Tahun 2021. Jakarta: Kementerian ESDM; 2022.
- 13) BMKG Pekanbaru. Data kecepatan angin Stasiun Pinang Kampai Dumai periode 2021-2022. Pekanbaru; 2023.
- 14) QBlade. QBlade wind turbine design and simulation software documentation. Technical documentation.
- 15) UIUC Applied Aerodynamics Group. UIUC Airfoil Coordinates Database. University of Illinois at Urbana-Champaign.
- 16) Putra TS, Prabowo E, Ramadani F. Pengaruh Overhaul Terhadap Kinerja High Pressure Heater Unit 3 PLTU Banten Lontar. JTM: JURNAL TEKNIK MESIN. 2026 Feb 1;2(1):10-5.