

Analisis Desain PLTB Horizontal 0,3 kW Berbasis QBlade di Tangerang

Eri Prabowo¹, Trassanda Scudetto Widestomo Putra², Tom Rizkon Uzarni Paradongan³

¹²³¹Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi PLN, Jakarta, Indonesia

Email: ¹eriprabowo@itpln.ac.id, ³Trassanda2410505@ITPLN.AC.ID, ³rizkontom@gmail.com

Abstract

The low utilization of small-scale wind energy in urban residential areas requires a technical design approach that considers local wind speed, blade geometry, rotor configuration, and generator suitability. This paper analyzes a 0.3 kW horizontal-axis wind power design for the Grand Duta residential area, Tangerang, using the QBlade simulation approach. The design uses a three-blade horizontal rotor with a 2 m rotor radius, NACA 4412 airfoil, and taperless blade concept. Wind data were obtained from BMKG and direct anemometer measurements, then simplified into design parameters. The local average wind speed used in the design was approximately 4 m/s, with cut-in, rated, and cut-out references of 2.8 m/s, 8.0 m/s, and 12.0 m/s, respectively. The selected blade design used NACA 4412 with an optimum angle of attack of 6 degrees, Cl/Cd of 133.5, and Cl of 1.12. The QBlade simulation at 0 degree pitch showed that the rotor produced 252.676 W at 4 m/s and 300 rpm, while the maximum simulated power reached 2324 W at 20 m/s. At 6 degree pitch, the maximum simulated power reached 2837 W. The results indicate that the design is technically feasible as a small horizontal-axis wind turbine concept, although further prototype testing is required to validate structural strength, generator matching, and field performance.

Keywords: HAWT; NACA 4412; QBlade; Tangerang; wind turbine

Abstrak

Pemanfaatan energi angin skala kecil pada kawasan permukiman perkotaan memerlukan pendekatan desain yang mempertimbangkan kecepatan angin lokal, geometri bilah, konfigurasi rotor, dan kesesuaian generator. Artikel ini menganalisis rancangan PLTB poros horizontal 0,3 kW untuk kawasan Perumahan Grand Duta Tangerang menggunakan pendekatan simulasi QBlade. Rancangan menggunakan rotor horizontal tiga bilah dengan jari-jari 2 m, airfoil NACA 4412, dan konsep bilah taperless. Data angin diperoleh dari BMKG dan pengukuran langsung menggunakan anemometer, kemudian disederhanakan menjadi parameter desain. Kecepatan angin rata-rata lokal yang digunakan dalam perancangan sekitar 4 m/s, dengan acuan cut-in, rated, dan cut-out masing-masing 2,8 m/s, 8,0 m/s, dan 12,0 m/s. Desain bilah menggunakan NACA 4412 dengan sudut serang optimum 6 derajat, Cl/Cd 133,5, dan Cl 1,12. Hasil simulasi QBlade pada pitch 0 derajat menunjukkan rotor menghasilkan 252,676 W pada kecepatan angin 4 m/s dan putaran 300 rpm, sedangkan daya maksimum simulasi mencapai 2324 W pada 20 m/s. Pada pitch 6 derajat, daya maksimum simulasi mencapai 2837 W. Hasil ini menunjukkan rancangan layak secara teknis sebagai konsep turbin angin horizontal skala kecil, namun tetap membutuhkan pengujian prototipe untuk memvalidasi kekuatan struktur, kesesuaian generator, dan performa lapangan.

Kata kunci: HAWT; NACA 4412; QBlade; Tangerang; turbin angin

1. Pendahuluan

Kebutuhan listrik terus meningkat seiring bertambahnya aktivitas rumah tangga, komersial, dan layanan publik. Pada saat yang sama, penggunaan bahan bakar fosil menimbulkan persoalan lingkungan dan ketersediaan energi jangka panjang. Kondisi tersebut mendorong pemanfaatan energi baru terbarukan, termasuk energi angin, sebagai sumber energi alternatif yang dapat diterapkan pada skala kecil maupun besar. Energi angin menjadi pilihan yang relevan karena tidak memerlukan bahan bakar selama operasi dan prinsip konversinya telah banyak dibahas dalam kajian desain turbin angin modern [2,14,15].

Energi angin dapat dikonversi menjadi energi listrik melalui beberapa konfigurasi turbin, antara lain horizontal axis wind turbine (HAWT), vertical axis wind turbine (VAWT), dan variasi rotor kecil lain. Meskipun potensi angin di wilayah perkotaan tidak selalu tinggi, sistem turbin angin mikro tetap dapat dipertimbangkan untuk edukasi, penerangan ringan, pengisian baterai, atau sistem hibrida dengan panel surya. Beberapa kajian menunjukkan bahwa performa turbin dipengaruhi oleh jumlah bilah, jenis airfoil, konfigurasi rotor, kondisi bangunan sekitar, dan rancangan prototipe yang digunakan [4-8,17-19]. Perancangan turbin angin kecil perlu diawali dengan pemilihan data angin, pemilihan airfoil, dan simulasi awal agar geometri bilah sesuai dengan kondisi angin lokal. Dalam penelitian ini, data angin rujukan berasal dari BMKG dan pengukuran lapangan, sedangkan

performa bilah dievaluasi dengan QBlade dan profil NACA 4412. Rujukan kecepatan cut-in, rated, dan cut-out serta rancangan untuk daerah berkecepatan angin rendah digunakan untuk memastikan rancangan tetap realistis pada skala mikro [10-13,20].

Penelitian ini membahas rancangan PLTB poros horizontal 0,3 kW di wilayah Kota Tangerang, khususnya kawasan Perumahan Grand Duta. Rancangan menggunakan tiga bilah dengan jari-jari rotor 2 m, material bilah kayu albasia, dan generator magnet permanen 300 W. Analisis difokuskan pada parameter desain, rumus perancangan, simulasi QBlade, dan evaluasi kelayakan rancangan agar naskah lebih ringkas, teknis, dan sesuai dengan format Jurnal Teknik Mesin [1,3,9,11,16].

2. Metode Penelitian

2.1. Lokasi dan Data Angin

Penelitian dilakukan di kawasan Perumahan Grand Duta Tangerang, Kota Tangerang, Banten. Data angin diperoleh dari dua sumber, yaitu data BMKG sebagai data sekunder dan pengukuran langsung menggunakan anemometer sebagai data lapangan. Data BMKG digunakan untuk melihat gambaran umum arah dan kecepatan angin harian, sedangkan data anemometer digunakan sebagai dasar rancangan karena lebih dekat dengan kondisi lokasi pemasangan turbin.

Tabel 1. Parameter lokasi dan data angin rancangan

Parameter	Nilai	Keterangan
Lokasi	Grand Duta Tangerang	Kota Tangerang, Banten
Koordinat rujukan	-6,17782; 106,594313	Wilayah penelitian
Sumber data	BMKG dan anemometer	Data sekunder dan primer
Kecepatan rata-rata rancangan	4 m/s	Pembulatan dari data lapangan
Kecepatan cut-in, V_{in}	2,8 m/s	Mulai menghasilkan daya
Kecepatan rated, V_r	8,0 m/s	Acuan daya nominal
Kecepatan cut-out, V_{out}	12,0 m/s	Batas operasi rancangan

Data anemometer pada lampiran menunjukkan beberapa hari memiliki kecepatan rata-rata sekitar 3,6-4,8 m/s pada jam pengukuran, sehingga nilai desain 4 m/s dipilih sebagai kondisi representatif. Nilai ini tidak dimaksudkan sebagai rata-rata tahunan, tetapi sebagai dasar perhitungan awal untuk mengevaluasi apakah rancangan turbin 0,3 kW dapat bekerja pada kecepatan angin rendah sampai sedang.

2.2. Kriteria Rancangan Turbin

Turbin dirancang sebagai horizontal axis wind turbine (HAWT) dengan tiga bilah. Pemilihan tiga bilah dilakukan karena konfigurasi ini lebih seimbang, umum digunakan, serta memiliki performa aerodinamik yang baik pada turbin kecil. Airfoil yang digunakan adalah NACA 4412 karena bentuknya relatif mudah dibuat dan memiliki karakteristik lift-to-drag yang baik. Material bilah yang direncanakan adalah kayu albasia karena mudah dibentuk, ringan, dan mudah diperoleh.

Tabel 2. Kriteria utama rancangan PLTB

Komponen/parameter	Nilai desain	Keterangan
Jenis turbin	Poros horizontal	Horizontal axis wind turbine
Target daya	0,3 kW	Daya rancangan skala kecil
Jumlah bilah	3 buah	Konfigurasi stabil
Jari-jari rotor	2 m	Radius bilah
Airfoil	NACA 4412	Profil bilah utama
Tip speed ratio desain	4	Acuan geometri awal
Material bilah	Kayu albasia	ρ sekitar 605 kg/m ³
Generator	Magnet permanen 300 W	Output sistem 12 V DC

2.3. Rumus Perancangan

Daya angin teoritis dihitung dari massa jenis udara, luas sapuan rotor, dan kecepatan angin pangkat tiga. Karena pengaruh kecepatan bersifat kubik, sedikit perubahan kecepatan angin dapat menghasilkan perubahan daya yang besar.

$$P_{\text{angin}} = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (1)$$

Daya mekanik rotor berhubungan dengan torsi dan kecepatan sudut. Pada turbin angin, hubungan ini digunakan untuk membaca pengaruh putaran rotor terhadap daya keluaran hasil simulasi.

$$P_{\text{mekanik}} = T \cdot \omega \quad (2)$$

Tip speed ratio menunjukkan perbandingan kecepatan ujung bilah terhadap kecepatan angin. Nilai TSR menjadi parameter penting karena menentukan kecocokan putaran rotor dengan karakteristik bilah.

$$\lambda = \omega R / V \quad (3)$$

$$\lambda = 2\pi n R / 60 V \quad (4)$$

Koefisien daya menunjukkan kemampuan rotor mengubah daya angin menjadi daya mekanik. Nilai ini dibandingkan dengan batas Betz sebesar 16/27 atau sekitar 0,593 untuk memperoleh gambaran efisiensi teoritis.

$$C_p = P_{\text{mekanik}} / P_{\text{angin}} \quad (5)$$

$$\eta = C_p / (16/27) \quad (6)$$

Kecepatan cut-in, rated, dan cut-out diturunkan dari kecepatan rata-rata angin menggunakan pendekatan empiris UPTLAGG/BPPT. Pendekatan ini berguna untuk menentukan rentang operasi awal turbin sebelum pengujian prototipe.

$$V_{\text{in}} = (0,5-0,7) V_{\text{rata-rata}} \quad (7)$$

$$V_r = (1,5-2,0) V_{\text{rata-rata}} \quad (8)$$

$$V_{\text{out}} = 3 V_{\text{rata-rata}} \quad (9)$$

2.4. Simulasi QBlade

Simulasi dilakukan menggunakan QBlade dengan metode blade element momentum. Data geometri bilah yang dimasukkan meliputi jari-jari parsial, chord, twist linear, jumlah bilah, airfoil NACA 4412, serta variasi pitch. Hasil simulasi digunakan untuk membaca kurva coefficient performance terhadap TSR, hubungan daya terhadap rpm, serta nilai torsi dan thrust pada beberapa kondisi kecepatan angin.

Tabel 3. Parameter airfoil dan simulasi

Parameter	Nilai	Keterangan
Airfoil	NACA 4412	Profil bilah
Sudut serang optimum	6 derajat	Dari analisis Cl dan Cl/Cd
Cl/Cd	133,5	Rasio lift-to-drag
Cl	1,12	Koefisien gaya angkat
Jumlah iterasi	1000	Simulasi BEM
Massa jenis udara	1,225 kg/m ³	Parameter simulasi
Viskositas dinamik	1,647 x 10 ⁻⁵ Nm/s ²	Parameter simulasi

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Evaluasi Data Angin

Data BMKG menunjukkan kecepatan angin harian yang relatif rendah, sedangkan pengukuran lapangan pada jam tertentu menunjukkan nilai rata-rata yang lebih tinggi. Perbedaan ini wajar karena data BMKG mewakili pengamatan meteorologis pada stasiun, sedangkan data anemometer mewakili lokasi dan jam tertentu. Dalam rancangan ini, nilai 4 m/s digunakan karena sesuai dengan data lapangan dan masih mencerminkan kondisi angin rendah yang realistis untuk turbin mikro.

Dari kecepatan rata-rata 4 m/s diperoleh V_{in} sebesar 2,8 m/s, V_r sebesar 8,0 m/s, dan V_{out} sebesar 12,0 m/s. Nilai cut-in yang rendah penting agar turbin dapat mulai menghasilkan daya pada kondisi angin perkotaan. Akan tetapi, nilai rated 8 m/s menunjukkan bahwa untuk mencapai daya nominal yang stabil, lokasi pemasangan harus dipilih pada area yang lebih terbuka, misalnya atap bangunan, area lapang, atau titik dengan gangguan bangunan lebih kecil.

3.2. Geometri dan Pemilihan Bilah

Bilah yang dirancang menggunakan NACA 4412 dan konsep taperless. Bentuk taperless memiliki chord yang relatif tetap dari pangkal menuju ujung sehingga area tangkap angin lebih besar dan proses fabrikasi lebih sederhana. Kelemahannya, bilah taperless dapat lebih rentan terhadap beban angin besar sehingga analisis kekuatan dan pembatasan putaran tetap diperlukan pada tahap prototipe.

Jumlah tiga bilah dipilih karena memiliki keseimbangan dinamis lebih baik dibanding satu atau dua bilah. Pada turbin kecil, tiga bilah juga lebih aman secara visual dan umum digunakan karena distribusi gaya aerodinamiknya lebih merata. Dengan radius 2 m, luas sapuan rotor cukup besar untuk menangkap energi pada kecepatan angin rendah, namun dimensi ini juga menuntut rancangan hub, poros, dan tower yang kaku.

Tabel 4. Ringkasan geometri bilah rancangan

Parameter	Nilai	Implikasi desain
Radius rotor	2 m	Luas sapuan besar untuk angin rendah
Jumlah bilah	3	Lebih seimbang dan umum untuk HAWT
Jenis bilah	Taperless	Mudah dibuat, area tangkap besar
Airfoil	NACA 4412	Lift-to-drag ratio baik
Material	Kayu albasia	Ringan dan mudah dibentuk
Pitch awal	0 derajat dan 6 derajat	Variasi performa simulasi

3.3. Hasil Simulasi Pitch 0 Derajat

Pada pitch 0 derajat, simulasi menunjukkan bahwa daya terbesar terjadi pada kecepatan angin 20 m/s dengan putaran 1201 rpm, yaitu sebesar 2324 W. Nilai ini menunjukkan kapasitas aerodinamik rotor pada kondisi angin tinggi. Namun, kondisi yang lebih relevan untuk rancangan harian adalah kecepatan angin 4 m/s. Pada kondisi tersebut, turbin menghasilkan daya 252,676 W pada putaran 300 rpm.

Daya 252,676 W mendekati target 0,3 kW dan sudah menunjukkan bahwa rancangan dapat bekerja pada kecepatan angin rendah. Selisih terhadap 300 W dapat dipengaruhi oleh efisiensi aktual generator, rugi mekanik, pitch, dan karakter turbulensi di kawasan permukiman. Oleh karena itu, rancangan layak dijadikan dasar pengembangan, tetapi perlu optimasi lebih lanjut agar daya nominal 0,3 kW dapat dicapai secara stabil.

Tabel 5. Hasil penting simulasi QBlade pada pitch 0 derajat

Kondisi	Nilai hasil	Keterangan
Daya pada 4 m/s	252,676 W	Putaran 300 rpm
Daya maksimum	2324 W	Pada 20 m/s dan 1201 rpm
Torsi maksimum	22,95 Nm	Pada 20 m/s dan 801 rpm
Thrust maksimum	162,21 N	Pada 1201 rpm
Kecenderungan performa	Naik terhadap kecepatan	Dibatasi kebutuhan proteksi

3.4. Pengaruh Pitch 6 Derajat

Variasi pitch 6 derajat menunjukkan adanya perubahan performa rotor. Pada sudut ini, daya maksimum hasil simulasi mencapai 2837 W pada kecepatan angin 20 m/s. Rotor torque maksimum sebesar 23,33 Nm pada 1001 rpm, sedangkan thrust maksimum mencapai 245,636 N pada 1401 rpm. Kenaikan thrust menunjukkan bahwa perubahan pitch tidak hanya mempengaruhi daya, tetapi juga meningkatkan beban aksial pada struktur. Hasil ini penting untuk rancangan mekanik karena komponen tower, hub, poros, dan sambungan bilah harus mampu menahan beban thrust dan torsi. Pitch yang menghasilkan daya lebih besar belum tentu menjadi pilihan paling aman jika beban struktur meningkat secara signifikan. Untuk aplikasi permukiman, pemilihan pitch perlu mempertimbangkan kompromi antara daya, keamanan, kebisingan, dan usia pakai komponen.

3.5. Kelayakan Rancangan PLTB 0,3 kW

Secara teknis, rancangan PLTB horizontal ini dapat dinilai layak sebagai konsep awal. Indikator utamanya adalah rotor mampu menghasilkan daya 252,676 W pada 4 m/s dan 300 rpm. Nilai tersebut mendekati kapasitas 0,3 kW sehingga masih berada dalam rentang yang relevan untuk sistem turbin mikro. Jika generator, kontroler, dan baterai dipilih dengan efisiensi yang sesuai, daya tersebut dapat dimanfaatkan untuk beban kecil atau pengisian baterai. Namun, kelayakan praktis tidak hanya ditentukan oleh hasil QBlade. Pemasangan di lingkungan perumahan perlu mempertimbangkan turbulensi akibat bangunan, perubahan arah angin, getaran, kebisingan, dan aspek keselamatan. Turbin sebaiknya dipasang pada titik terbuka dengan ketinggian yang cukup, karena peningkatan ketinggian

dapat meningkatkan kecepatan angin dan kestabilan aliran. Jika dipasang terlalu dekat dengan atap atau dinding, performa aktual dapat lebih rendah dari simulasi.

Tabel 6. Evaluasi kelayakan rancangan

Aspek	Hasil evaluasi	Catatan teknis
Aerodinamika	Layak awal	Daya 252,676 W pada 4 m/s
Target 0,3 kW	Mendekati	Perlu optimasi generator dan pitch
Struktur	Perlu uji lanjut	Beban thrust dan torsi harus dihitung
Lokasi permukiman	Perlu seleksi titik	Hindari turbulensi bangunan
Sistem listrik	Perlu integrasi	Generator, controller, baterai, inverter

3.6. Sistem Kelistrikan dan Integrasi

Sistem PLTB skala kecil tidak hanya terdiri atas rotor dan bilah. Putaran bilah diteruskan ke generator magnet permanen, kemudian tegangan keluaran diproses melalui controller. Controller berfungsi sebagai penyearah dari AC tiga fasa menjadi DC dan mengatur proses pengisian baterai. Pada sistem yang menggunakan beban AC, inverter diperlukan untuk mengubah tegangan DC baterai menjadi AC 220 V. Pemilihan generator harus mengikuti karakteristik rotor. Jika generator membutuhkan rpm terlalu tinggi, maka diperlukan gear tambahan. Penambahan gear dapat meningkatkan kompleksitas, kebutuhan perawatan, dan kerugian mekanik. Oleh karena itu, generator low rpm lebih disarankan untuk turbin angin kecil pada kawasan dengan kecepatan angin rendah. Dengan pasangan rotor-generator yang tepat, daya aktual dapat lebih mendekati hasil simulasi.

Tabel 7. Komponen sistem PLTB mikro

Komponen	Fungsi	Catatan desain
Rotor dan bilah	Menangkap energi angin	NACA 4412, tiga bilah
Hub dan poros	Meneruskan putaran	Harus tahan torsi dan fatigue
Generator	Mengubah energi mekanik menjadi listrik	Disarankan low rpm
Controller MPPT/rectifier	Menyearahkan dan mengatur pengisian	Proteksi tegangan penting
Baterai	Menyimpan energi	Disesuaikan dengan daya harian
Inverter	Mengubah DC ke AC	Dipakai untuk beban AC

3.7. Implikasi Struktur dan Perawatan

Rancangan turbin dengan radius 2 m menghasilkan diameter rotor 4 m. Ukuran ini tidak kecil untuk kawasan permukiman, sehingga kekuatan struktur perlu diperhatikan. Bilah kayu albasia memang mudah dibentuk, tetapi harus diberi perlindungan terhadap kelembapan dan retak. Permukaan bilah perlu dihaluskan karena kekasaran dapat menurunkan performa aerodinamik dan meningkatkan kebisingan. Komponen yang perlu diperiksa secara berkala meliputi sambungan bilah ke hub, bearing, poros, baut tower, kabel keluaran generator, controller, dan sistem pengereman. Karena rotor dapat menghasilkan thrust tinggi pada kecepatan angin besar, sistem proteksi putaran menjadi penting. Proteksi dapat berupa furling sederhana, pengereman elektrik, atau pengaturan beban untuk menghindari overspeed.

Dalam implementasi lapangan, uji prototipe perlu dilakukan bertahap. Tahap awal dapat menggunakan putaran tanpa beban untuk melihat keseimbangan rotor, dilanjutkan dengan pengujian beban listrik kecil, dan kemudian pengujian pada variasi kecepatan angin. Data uji sebaiknya mencatat kecepatan angin, rpm, tegangan, arus, daya, getaran, dan suhu komponen agar hasil simulasi dapat dibandingkan dengan kondisi nyata.

3.8. Perbandingan dengan Target Publikasi JTM

Untuk kebutuhan publikasi jurnal, hasil skripsi perlu disajikan secara ringkas tetapi tetap kuantitatif. Pembahasan tidak perlu memuat seluruh gambar komponen detail, melainkan cukup menonjolkan data utama seperti kecepatan angin, parameter bilah, rumus desain, hasil QBlade, serta evaluasi kelayakan. Dengan cara ini, artikel lebih fokus pada kontribusi teknik mesin, yaitu rancangan aerodinamik dan performa rotor.

Judul artikel juga dibuat berbeda dari judul skripsi agar tidak terjadi kesamaan penuh. Judul yang digunakan menekankan analisis desain PLTB horizontal berbasis QBlade di Tangerang. Struktur artikel disusun dalam bagian Abstract, Abstrak, Pendahuluan, Metode Penelitian, Hasil dan Pembahasan, Kesimpulan, Ucapan Terima Kasih, dan Daftar Rujukan sesuai format JTM.

3.9. Analisis Daya terhadap Kecepatan Angin

Karakter paling penting pada turbin angin adalah sensitivitas daya terhadap kecepatan angin. Berdasarkan persamaan daya angin, nilai daya berbanding lurus dengan pangkat tiga kecepatan. Artinya, peningkatan kecepatan angin dari 4 m/s menjadi 8 m/s tidak hanya menggandakan daya, tetapi meningkatkan potensi daya hingga delapan kali lipat. Fenomena ini menjelaskan mengapa penentuan lokasi dan ketinggian pemasangan menjadi sangat penting pada turbin angin mikro. Pada kawasan permukiman, kecepatan angin cenderung tidak seragam karena pengaruh bangunan, pohon, dinding pagar, dan turbulensi lokal. Oleh karena itu, daya 252,676 W pada 4 m/s perlu dipahami sebagai hasil simulasi pada kondisi aliran yang disederhanakan. Pada kondisi nyata, daya aktual dapat lebih rendah apabila arah angin berubah cepat, aliran tidak sejajar rotor, atau terjadi turbulensi yang menyebabkan sudut serang bilah berubah-ubah.

Meskipun demikian, hasil simulasi tetap penting karena memberikan batas awal performa. Apabila pada kondisi teoritis rotor sudah tidak mampu mendekati target daya, maka desain perlu diubah sejak tahap awal. Dalam rancangan ini, hasil 252,676 W pada 4 m/s menunjukkan bahwa rotor memiliki kemampuan tangkap energi yang cukup dekat dengan target 0,3 kW sehingga masih layak untuk dikembangkan melalui optimasi generator, pitch, dan posisi pemasangan.

Tabel 8. Implikasi kecepatan angin terhadap rancangan

Kecepatan	Implikasi daya	Catatan
Di bawah 2,8 m/s	Daya sangat kecil	Turbin belum efektif menghasilkan listrik
Sekitar 4 m/s	Daya mendekati target	Hasil simulasi 252,676 W pada 300 rpm
Sekitar 8 m/s	Menuju daya nominal	Perlu pengaturan beban dan proteksi
Mendekati 12 m/s	Beban mekanik meningkat	Perlu pembatasan putaran
Di atas kondisi desain	Risiko overspeed	Diperlukan rem atau furling

3.10. Evaluasi Airfoil NACA 4412

NACA 4412 dipilih karena memiliki camber 4% pada 40% chord dan tebal maksimum 12% chord. Pada turbin angin kecil, profil ini cukup populer karena mampu menghasilkan gaya angkat pada sudut serang moderat dan tidak terlalu sulit dibentuk secara manual. Untuk material kayu, bentuk NACA 4412 juga lebih memungkinkan dikerjakan dibanding profil yang sangat tipis atau terlalu kompleks. Hasil pembacaan karakteristik airfoil menunjukkan sudut serang optimum sekitar 6 derajat dengan Cl/Cd 133,5 dan Cl 1,12. Nilai Cl/Cd yang besar menunjukkan bahwa gaya angkat lebih dominan dibanding gaya hambat. Kondisi ini sesuai dengan prinsip kerja turbin angin horizontal modern yang memanfaatkan gaya lift untuk memutar rotor. Bila gaya hambat terlalu besar, rotor menjadi lambat dan energi lebih banyak hilang sebagai resistansi aerodinamik.

Pada rancangan aktual, nilai sudut serang harus dikendalikan melalui kombinasi twist, pitch, dan tip speed ratio. Jika sudut serang terlalu kecil, gaya angkat belum cukup besar. Jika terlalu besar, aliran dapat mengalami stall sehingga daya turun dan getaran meningkat. Oleh karena itu, proses linearisasi twist perlu dilakukan hati-hati agar bentuk bilah tetap mudah dibuat tetapi tidak terlalu jauh dari geometri aerodinamik optimum.

Tabel 9. Ringkasan karakteristik NACA 4412 dalam rancangan

Parameter	Nilai	Makna teknis
Camber maksimum	4% chord	Membantu menghasilkan lift
Posisi camber	40% chord	Ciri seri NACA 4412
Tebal maksimum	12% chord	Masih cukup kuat untuk bilah kecil
Sudut serang optimum	6 derajat	Dipakai sebagai acuan desain
Cl/Cd	133,5	Lift dominan terhadap drag
Cl	1,12	Koefisien gaya angkat hasil analisis

3.11. Analisis Torsi, Thrust, dan Keselamatan

Selain daya, parameter torsi dan thrust harus diperhatikan karena berkaitan langsung dengan rancangan mekanik. Torsi menentukan beban puntir pada poros dan hub, sedangkan thrust menentukan gaya aksial yang mendorong rotor ke arah tower. Pada pitch 0 derajat, torsi maksimum simulasi sebesar 22,95 Nm dan thrust maksimum 162,21 N. Pada pitch 6 derajat, torsi maksimum meningkat menjadi 23,33 Nm dan thrust maksimum mencapai 245,636 N. Kenaikan thrust pada pitch 6 derajat menunjukkan bahwa peningkatan daya tidak selalu gratis secara struktur. Hub, poros, dudukan generator, bearing, dan tower harus dirancang untuk menahan beban tersebut secara berulang. Beban berulang dapat menyebabkan fatigue, terutama pada sambungan bilah kayu ke hub. Oleh sebab itu, desain sambungan perlu menggunakan baut, pelat penjepit, dan distribusi tegangan yang aman.

Aspek keselamatan juga mencakup pengendalian overspeed. Pada angin yang lebih tinggi dari kondisi desain, putaran rotor dapat meningkat cepat. Jika rotor dibiarkan tanpa pembatas, risiko kerusakan bilah, lepasnya sambungan, atau kerusakan generator akan meningkat. Untuk aplikasi perumahan, sistem rem elektrik, pembatas beban, dan mekanisme ekor yang dapat menghindar dari arah angin kencang perlu dipertimbangkan.

Tabel 10. Parameter mekanik hasil simulasi yang perlu diperhatikan

Parameter	Pitch 0 derajat	Pitch 6 derajat
Daya maksimum	2324 W	2837 W
Torsi maksimum	22,95 Nm	23,33 Nm
Thrust maksimum	162,21 N	245,636 N
Implikasi	Beban struktur sedang	Beban aksial lebih besar

3.12. Keterbatasan Data dan Simulasi

Keterbatasan pertama terletak pada durasi dan metode pengukuran angin. Pengukuran selama satu bulan dan pada jam tertentu belum dapat menggantikan data angin tahunan. Potensi PLTB sebaiknya dievaluasi menggunakan data jangka panjang, minimal mencakup variasi musim, arah angin dominan, dan distribusi frekuensi kecepatan. Tanpa data tersebut, estimasi energi tahunan belum dapat dinyatakan secara kuat. Keterbatasan kedua adalah asumsi simulasi. QBlade memberikan gambaran performa rotor berdasarkan model aerodinamik, tetapi kondisi nyata dapat berbeda akibat turbulensi, ketidaksempurnaan fabrikasi bilah, rugi bearing, ketidakseimbangan rotor, rugi transmisi, dan ketidaksesuaian karakter generator. Oleh karena itu, hasil simulasi tidak boleh langsung dianggap sama dengan daya listrik netto yang diterima beban.

Keterbatasan ketiga adalah belum adanya validasi struktural rinci. Kayu albasia memiliki massa jenis rendah dan mudah dibentuk, tetapi kekuatan terhadap beban siklik, kelembapan, dan sambungan baut perlu diuji. Bilah yang berputar pada ratusan rpm mengalami gaya sentrifugal dan beban lentur yang berubah-ubah. Karena itu, desain akhir perlu dilengkapi analisis kekuatan, uji keseimbangan, dan uji putaran bertahap sebelum dipasang di area terbuka.

3.13. Rekomendasi Implementasi Prototipe

Implementasi prototipe sebaiknya dilakukan secara bertahap. Tahap pertama adalah pembuatan satu bilah uji untuk memastikan bentuk airfoil, berat, dan kekasaran permukaan sesuai rancangan. Tahap kedua adalah balancing rotor tiga bilah sebelum dipasang pada tower. Rotor yang tidak seimbang dapat menimbulkan getaran, mempercepat kerusakan bearing, dan mengurangi umur sambungan. Tahap ketiga adalah pengujian tanpa beban dan dengan beban. Pengujian tanpa beban berguna untuk melihat cut-in speed, getaran, dan respons yaw. Pengujian berbeban diperlukan untuk menilai tegangan, arus, daya, dan kestabilan controller. Data yang diukur sebaiknya meliputi kecepatan angin, rpm rotor, tegangan DC, arus pengisian baterai, tegangan baterai, dan temperatur komponen listrik.

Tahap keempat adalah optimasi generator dan sistem kontrol. Jika generator terlalu berat secara elektromagnetik, rotor sulit mulai berputar pada angin rendah. Sebaliknya, jika beban generator terlalu kecil, rotor dapat berputar terlalu cepat dan daya yang diserap tidak optimal. Oleh karena itu, matching antara rotor, generator, controller, dan baterai menjadi faktor penting agar hasil lapangan mendekati hasil simulasi.

Tabel 11. Tahapan pengujian prototipe yang disarankan

Tahap	Tujuan	Data yang dicatat
Pembuatan bilah uji	Memastikan geometri dan massa bilah	Dimensi, massa, kekasaran permukaan
Balancing rotor	Mengurangi getaran	Deviasi massa dan getaran visual
Uji tanpa beban	Melihat cut-in dan kestabilan putaran	V, rpm, suara, getaran
Uji berbeban	Mengukur daya listrik	V, I, P, rpm, tegangan baterai
Uji durasi	Menilai keandalan	Data harian, kerusakan, penurunan performa

3.14. Nomenklatur

Simbol/Istilah	Keterangan	Satuan
V	Kecepatan angin	m/s
V _{in}	Kecepatan mulai menghasilkan daya	m/s
V _r	Kecepatan angin nominal	m/s
V _{out}	Kecepatan batas operasi	m/s
P _{angin}	Daya angin teoritis	W
P _{mekanik}	Daya mekanik rotor	W
Rho	Massa jenis udara	kg/m ³
A	Luas sapuan rotor	m ²
R	Jari-jari rotor	m
T	Torsi rotor	Nm
omega	Kecepatan sudut	rad/s
lambda	Tip speed ratio	-
C _p	Koefisien daya	-
HAWT	Horizontal axis wind turbine	-

3.15. Pembahasan Kesesuaian untuk Kawasan Permukiman

Penerapan turbin angin mikro pada kawasan permukiman memiliki karakter yang berbeda dari penerapan di daerah pantai terbuka atau lahan luas. Di kawasan permukiman, aliran angin cenderung terpecah oleh bangunan, pepohonan, pagar, dan perbedaan tinggi atap. Akibatnya, rotor tidak selalu menerima aliran seragam seperti pada simulasi. Kondisi ini dapat menimbulkan fluktuasi putaran dan variasi daya yang cukup besar dari waktu ke waktu. Untuk mengurangi pengaruh tersebut, lokasi pemasangan harus dipilih pada titik yang paling terbuka dan memiliki jarak cukup dari halangan utama. Atap bangunan bertingkat dapat meningkatkan peluang mendapatkan kecepatan angin lebih besar, tetapi struktur atap harus diperiksa agar mampu menahan beban dinamis rotor dan getaran. Pemasangan pada tiang mandiri dapat lebih aman jika tersedia lahan dan pondasi yang memadai.

Kebisingan juga harus diperhatikan. Bilah dengan TSR tinggi cenderung menghasilkan suara aerodinamik lebih besar. Pada rancangan ini, TSR desain dibuat moderat sehingga dapat membantu mengurangi risiko kebisingan. Walaupun demikian, pengujian prototipe tetap perlu mengukur suara pada beberapa jarak karena penerimaan masyarakat menjadi faktor penting dalam penerapan PLTB skala permukiman. Dari sisi manfaat, turbin angin mikro dapat digunakan sebagai sarana pembelajaran energi terbarukan dan sebagai suplai energi tambahan untuk beban ringan. Contoh beban yang realistis adalah lampu taman, lampu pos keamanan, sensor lingkungan, pengisian baterai kecil, atau sistem informasi sederhana. Untuk beban rumah tangga besar, sistem 0,3 kW tidak cukup jika berdiri sendiri, sehingga sebaiknya diposisikan sebagai sumber tambahan atau bagian dari sistem hybrid.

3.16. Strategi Optimasi Rancangan

Optimasi rancangan dapat dilakukan pada empat bagian utama, yaitu bilah, pitch, generator, dan sistem kontrol. Pada bagian bilah, optimasi dapat dilakukan dengan membandingkan NACA 4412 dengan airfoil lain yang memiliki performa lebih baik pada Reynolds rendah. Selain itu, bentuk taperless dapat dibandingkan dengan taper atau inverse taper untuk melihat pengaruhnya terhadap start-

up, torsi, dan daya maksimum. Pada bagian pitch, hasil simulasi menunjukkan bahwa pitch 6 derajat dapat meningkatkan daya maksimum, tetapi juga meningkatkan thrust. Oleh karena itu, pitch optimum tidak hanya dicari berdasarkan daya terbesar, melainkan berdasarkan kombinasi daya, beban struktur, dan keamanan. Jika sistem dibuat sederhana, pitch tetap dapat dipilih. Namun, jika ingin performa lebih stabil, mekanisme pitch pasif atau furling dapat dipertimbangkan.

Pada bagian generator, pemilihan generator magnet permanen 300 W harus dicocokkan dengan putaran rotor. Generator yang mulai menghasilkan tegangan pada rpm rendah lebih cocok untuk lokasi dengan kecepatan angin rendah. Apabila generator baru menghasilkan daya efektif pada rpm tinggi, rotor akan sering berputar tanpa menghasilkan daya signifikan. Matching generator dapat dilakukan dengan melihat kurva torsi-rpm generator dan kurva torsi-rpm rotor hasil simulasi. Pada bagian kontrol, controller dengan MPPT dapat membantu mencari titik kerja daya maksimum. Tanpa kontrol yang baik, energi yang ditangkap rotor tidak selalu terserap optimal oleh baterai. Controller juga perlu memiliki proteksi tegangan lebih dan arus lebih agar sistem aman ketika angin meningkat. Dengan optimasi empat bagian tersebut, rancangan yang semula menghasilkan 252,676 W pada 4 m/s dapat berpeluang mendekati atau melampaui target 0,3 kW pada kondisi lapangan tertentu.

Tabel 12. Arah optimasi rancangan PLTB 0,3 kW

Bagian	Masalah potensial	Arah optimasi
Bilah	Performa turun pada Reynolds rendah	Uji airfoil alternatif dan variasi chord
Pitch	Daya besar tetapi thrust meningkat	Cari kompromi daya dan beban struktur
Generator	Cut-in listrik terlalu tinggi	Gunakan generator low rpm
Controller	Titik kerja tidak optimal	Gunakan MPPT dan proteksi tegangan
Tower	Turbulensi akibat bangunan	Naikkan posisi rotor dan pilih area terbuka

4. Kesimpulan

- 1) Rancangan PLTB poros horizontal 0,3 kW menggunakan tiga bilah NACA 4412, radius rotor 2 m, dan material bilah kayu albasia dapat digunakan sebagai konsep awal turbin angin mikro di wilayah Tangerang.
- 2) Kecepatan angin rata-rata rancangan sebesar 4 m/s menghasilkan acuan V_{in} 2,8 m/s, V_r 8,0 m/s, dan V_{out} 12,0 m/s.
- 3) Hasil simulasi QBlade pada pitch 0 derajat menunjukkan daya 252,676 W pada kecepatan angin 4 m/s dan putaran 300 rpm.
- 4) Pada pitch 0 derajat, daya maksimum simulasi mencapai 2324 W pada 20 m/s, sedangkan pada pitch 6 derajat daya maksimum mencapai 2837 W.
- 5) Rancangan layak sebagai dasar pengembangan PLTB mikro, tetapi perlu uji prototipe untuk memvalidasi kekuatan struktur, kesesuaian generator, sistem kontrol, dan performa aktual di lapangan.

4.1 Saran

Penelitian lanjutan perlu membuat prototipe fisik untuk membandingkan hasil simulasi QBlade dengan performa aktual. Pengujian sebaiknya dilakukan pada beberapa ketinggian tower dan beberapa kondisi beban listrik agar diperoleh kurva hubungan kecepatan angin, rpm, tegangan, arus, dan daya.

Analisis struktur bilah, hub, poros, dan tower juga perlu dilakukan karena hasil simulasi menunjukkan adanya torsi dan thrust yang cukup besar pada kecepatan angin tinggi. Selain itu, pemilihan generator low rpm, controller, baterai, dan inverter harus disesuaikan agar daya rotor dapat dikonversi menjadi listrik secara efisien.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Mesin Institut Teknologi PLN, dosen pembimbing, serta pihak Perumahan Grand Duta Tangerang yang mendukung proses pengambilan data dan penyusunan rancangan PLTB ini.

Daftar Rujukan

1. Cao H. Aerodynamics Analysis of Small Horizontal Axis Wind Turbine Blades by Using 2D and 3D CFD Modelling. University of Central Lancashire; 2011.
2. Manwell JF, McGowan JG, Rogers AL. Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. 2nd ed. London: John Wiley & Sons; 2009.
3. Khurmi RS, Gupta JK. Machine Design. New Delhi: Eurasia Publishing House; 2005.
4. Sarwando AG, Budiarto U, Zakki AF. Analisa efektifitas wind turbine sumbu horizontal dengan variasi jumlah dan jenis airfoil sebagai sumber energi listrik tambahan pada fisheries inspection. Jurnal Teknik Perkapalan. 2016;4(4).
5. Ghofur MA. Rancang bangun konfigurasi three straight blade vertical axis wind turbine GR-1. Prosiding Senastindo AAU. 2019.
6. Takahashi S, et al. Behaviour of the blade tip vortices of a wind turbine equipped with a brimmed-diffuser shroud. Energies. 2012;5:5229.
7. Sun H, Kyojuka Y. Analysis of performances of a shrouded horizontal axis tidal turbine. OCEANS Conference; 2012.
8. Perwita D, Banar W. A technical review of building integrated wind turbine system and a sample simulation model in Central Java, Indonesia. Energy Procedia. 2014;47:29-36.
9. Hidayatullah NA, Nur H, Ningrum K. Optimalisasi daya pembangkit listrik tenaga angin turbin sumbu horizontal menggunakan metode maximum power point tracker. JEECAE. 2016;1(1):7-12.
10. BMKG. Data Online Pusat Database BMKG: data kecepatan angin Stasiun Geofisika Tangerang. Jakarta: BMKG; 2023.
11. QBlade. QBlade wind turbine design and simulation documentation. Technical documentation.
12. Airfoil Tools. NACA 4412 airfoil coordinate and aerodynamic data. Technical database.
13. Daryanto Y. Kajian potensi angin untuk pembangkit listrik tenaga bayu. Yogyakarta: Balai PPTAGG UPT-LAGG; 2007.
14. Burton T, Jenkins N, Sharpe D, Bossanyi E. Wind Energy Handbook. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons; 2011.
15. Hansen MOL. Aerodynamics of Wind Turbines. 2nd ed. London: Earthscan; 2008.
16. Piggott H. A Wind Turbine Recipe Book. Scotland: Scoraig Wind Electric; 2006.
17. Rifadil M, Azim A, Jalil M. Comparison of horizontal axis wind turbine and vertical axis wind turbine. Technical paper.
18. Ahmad S, Novi C. Perancangan dan pembuatan kincir angin tipe horizontal axis wind turbine untuk daerah pantai selatan Jawa. Jurnal Teknik Energi.
19. Noppi E, Rozeff P, Eko P. Perancangan prototipe pembangkit listrik turbin angin empat blade tipe Savonius. Jurnal Teknik Elektro. Paramet P, Thanad K. A new design of blade for small horizontal axis wind turbine with low wind speed operation. Engineering paper; 2013.
20. 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.