

Perancangan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Berdasarkan Analisis Distribusi Weibull di Desa Ranupani

Chevin Rendhiantoro Joko, Tri Wrahatnolo, Subuh Isnur Haryudo

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Email: chevin.21059mhs.unesa.ac.id, joko@unesa.ac.id, triwrahatnolo@unesa.ac.id, subuhisnur@unesa.ac.id

Abstract (English)

The need for reliable electrical energy in mountainous areas remain a challenge in supporting sustainable community activities. Ranupani Village, Senduro District, Lumajang Regency, has wind energy potential that can be utilized as a renewable energy source through a Wind Power Plant (WPP) system. The main issue at the research location is the instability of electricity supply caused by geographical conditions and changing weather patterns. In addition, the high altitude location affects air density, which influences the wind to electricity energy conversion process. The study employed a quantitative method with a technical analysis approach through mathematical modeling of the wind power generation system. Wind speed data from 2019-2023 were analyzed using the Weibull distribution as the basic for designing the Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) and Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG). The result showed that the Weibull scale parameter of 3.49 m/s and air density of 0.966 kg/m^3 produced a total active power output of 1108.8 Watts with a configuration of 10 turbine units. After being converted into apparent power, the system produced 1386 VA and was theoretically capable of supplying approximately 3 household with a 450 VA electricity capacity.

Article History

Submitted: 10 May 2026

Accepted: 11 May 2026

Published: 13 May 2026

Key Words

Wind Power Plant, VAWT, PMSG, Weibull Distribution, Wind Energy.

Abstrak (Indonesia)

Kebutuhan energi listrik yang andal di wilayah pegunungan menjadi tantangan dalam mendukung aktivitas masyarakat secara berkelanjutan. Desa Ranupani, Kecamatan Senduro, Kabupaten Lumajang, memiliki potensi energi angin yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan menjadi sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Permasalahan pada lokasi penelitian adalah gangguan kestabilan pasokan listrik akibat kondisi geografis dan cuaca yang berubah-ubah. Selain itu, kondisi ketinggian wilayah memengaruhi kerapatan udara sehingga berpengaruh terhadap proses konversi energi angin menjadi energi listrik. Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan analisis teknis melalui pemodelan matematis sistem PLTB. Data kecepatan angin periode 2019-2023 dianalisis menggunakan distribusi Weibull sebagai dasar perancangan turbin VAWT dan generator PMSG. Hasil penelitian menunjukkan parameter skala Weibull sebesar 3,49 m/s dengan massa jenis udara $0,966 \text{ kg/m}^3$ menghasilkan daya aktif sistem sebesar 1108,8 Watt pada konfigurasi 10 unit turbin. Setelah dikonversi ke daya semu, sistem menghasilkan 1386 VA dan secara teoritis mampu melayani sekitar 3 rumah tangga dengan kategori daya 450 VA.

Sejarah Artikel

Submitted: 10 Mei 2026

Accepted: 11 Mei 2026

Published: 13 Mei 2026

Kata Kunci

PLTB, VAWT, PMSG, distribusi Weibull, energi angin.

PENDAHULUAN

Memasuki tahun 2026, akselerasi transisi energi di Indonesia semakin krusial guna mencapai target *Net Zero Emission* (NZE) pada tahun 2060 melalui integrasi massif Energi Baru Terbarukan (EBT) ke dalam jaringan nasional [1]. Meskipun potensi energi hijau melimpah, pencapaian target bauran energi nasional per tahun 2025 masih menghadapi kendala efisiensi yang memerlukan solusi teknis tingkat lokal [2]. Pembangunan infrastruktur energi di kawasan dataran tinggi sering kali terhambat oleh indeks keandalan yang rendah akibat kerentanan infrastruktur terhadap faktor alam yang ekstrem.

Desa Ranupani, yang terletak pada ketinggian ± 2.100 mdpl di lereng Gunung Semeru, merupakan kawasan strategis pariwisata yang masih menghadapi krisis stabilitas energi. Berdasarkan data lapangan, pemadaman listrik di wilayah ini mencapai 4 hingga 5 kali per bulan yang dipicu oleh cuaca ekstrem yang merusak jaringan distribusi konvensional. Kondisi geografis yang sulit menyebabkan pasokan energi sering kali terhenti, sehingga pengembangan sumber energi mandiri menjadi urgensi teknis yang tidak dapat diabaikan guna mendukung kesejahteraan masyarakat dan keberlanjutan lingkungan di kawasan tersebut [3].

Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) di dataran tinggi memiliki tantangan berupa rendahnya kerapatan udara (*air density*). Pada elevasi 2.100 mdpl, densitas udara tercatat hanya sebesar $0,966 \text{ kg/m}^3$, jauh dibawah standar permukaan laut sebesar $1,225 \text{ kg/m}^3$, yang secara langsung menurunkan efisiensi ekstraksi daya mekanik pada bilah turbin [4]. Selain itu, karakteristik aliran angin di kawasan pegunungan cenderung bersifat intermiten dan turbulen akibat pengaruh topografi kompleks [5]. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa pada kondisi atmosferik yang tipis, fluktuasi kecepatan angin memerlukan pemodelan statistik distribusi Weibull yang lebih presisi untuk menentukan ketersediaan energi tahunan [6].

Teknologi *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) kini digunakan dalam riset energi global untuk lingkungan ekstrem karena sifatnya yang *omni-directional* dan ketahanannya terhadap turbulensi [7]. Penggunaan VAWT yang dipadukan dengan *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) memungkinkan sistem beroperasi pada kecepatan rendah tanpa bantuan *gearbox*, sehingga meningkatkan efisiensi energi yang dihasilkan dan menurunkan biaya perawatan di lokasi yang sulit dijangkau [8]. Studi eksperimental membuktikan bahwa konfigurasi klaster pada VAWT dapat memitigasi efek *wake* dan mengoptimalkan penyerapan energi kinetik angin pada kecepatan rendah [9].

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis teknis potensi energi angin di Desa Ranupani menggunakan data sekunder NASA POWER periode 2019-2023. Fokus utama kajian ini adalah mengevaluasi kinerja klaster 10 unit turbin angin dalam menghasilkan luaran daya semu dengan satuan Volt-Ampere (VA) guna menyesuaikan dengan standar kapasitas beban listrik di Indonesia. Melalui pemodelan sistem, penelitian ini diarahkan untuk menentukan kapasitas layanan sistem terhadap satuan rumah tinggal, sehingga dapat menyajikan parameter teknis yang aplikatif bagi pengembangan energi terbarukan di kawasan dataran tinggi secara berkelanjutan.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan analisis teknis untuk mengkaji proses konversi energi angin secara sistematis melalui pemodelan matematis. Studi kasus dilakukan di Desa Ranupani dengan memanfaatkan data sekunder kecepatan angin harian selama 5 tahun dari *database* NASA POWER. Tahapan pengolahan data diawali dengan melakukan konversi kecepatan angin dari ketinggian referensi ke hub turbin yang direncanakan menggunakan rumus eksponensial berdasarkan koefisien kekasaran permukaan kawasan pegunungan. Untuk memetakan potensi secara statistik, digunakan fungsi distribusi Weibull dengan penentuan parameter bentuk (k) dan skala (c) guna mengetahui probabilitas distribusi kecepatan angin lokal. Akurasi analisis potensi diperkuat dengan perhitungan kerapatan udara (ρ) menggunakan persamaan gas ideal yang mempertimbangkan variabel tekanan atmosferik dan suhu rata-rata pada elevasi 2.100 mdpl sebagai parameter koreksi daya.

Estimasi energi tahunan atau *Annual Energy Production* (AEP) dilakukan dengan mengintegrasikan nilai densitas daya angin terhadap durasi waktu operasional sistem dalam satu tahun guna memprediksi volume produksi energi secara periodik. Pemodelan teknis difokuskan pada unit *Vertical Wind Axis Turbine* (VAWT) untuk mengekstraksi daya mekanik berdasarkan variabel luas sapuan rotor serta koefisien daya (C_p) turbin. Hasil konversi mekanik tersebut kemudian diintegrasikan dengan pemodelan *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) untuk menghitung besaran tegangan induksi melalui analisis kecepatan sudut dan fluks magnetik. Selanjutnya, luaran energi diproyeksikan dalam satuan daya semu atau Volt-Ampere (VA) dengan mempertimbangkan variabel faktor daya ($\cos \phi$) guna menyelaraskan hasil perhitungan dengan standar kategori kapasitas sambungan listrik domestik. Seluruh parameter teknis tersebut dikonfigurasi dalam sistem kluster untuk mengevaluasi kapasitas layanan sistem terhadap satuan unit rumah tinggal guna menentukan jumlah hunian yang dapat disuplai secara mandiri..

Secara singkat, penelitian ini dilaksanakan sesuai alur penelitian yang ditunjukkan pada gambar 3.1, dimulai dari identifikasi masalah, studi literatur, analisis potensi angin, perhitungan luaran daya semu, analisis kapasitas layanan, lalu diakhiri dengan kesimpulan dan saran. Seluruh proses penelitian diharuskan mengikuti diagram alir pada gambar 3.1 agar penelitian berjalan secara sistematis dan terstruktur.



Gambar 3.1 Alur Penelitian

Rumusan Masalah

1. Bagaimana karakteristik potensi energi angin di Desa Ranupani berdasarkan analisis data sekunder dengan mempertimbangkan kondisi kerapatan udara?

2. Bagaimana menentukan konfigurasi spesifikasi turbin VAWT dan generator PMSG yang paling optimal?
3. Bagaimana estimasi luaran daya semu yang dihasilkan sistem berdasarkan perhitungan matematis?
4. Berapa jumlah unit rumah tinggal standar yang dapat disuplai secara mandiri oleh sistem kluster tersebut?

1. Identifikasi Masalah

Identifikasi masalah dalam penelitian ini diawali dengan rendahnya stabilitas energi listrik di Desa Ranupani yang disebabkan oleh letak geografis di kawasan dataran tinggi dan kerentanan jaringan distribusi konvensional terhadap cuaca ekstrem. Hal ini memicu frekuensi pemadaman yang tinggi, sehingga diperlukan sumber energi mandiri yang mampu menjaga kontinuitas pasokan listrik bagi masyarakat dan kawasan wisata. Dengan ketinggian wilayah 2.100 mdpl, lokasi ini memiliki kerapatan udara (*air density*) lebih rendah dari dataran rendah, sehingga proses konversi energi kinetik angin menurun. Selain itu belum adanya rancangan sistem pembangkit energi mandiri di wilayah ini yang menjadi urgensi dalam penelitian ini.

2. Studi Literatur

Studi literatur dalam penelitian ini menekankan bahwa ekstraksi energi angin pada elevasi 2.100 mdpl, seperti di Desa Ranupani sangat dipengaruhi oleh rendahnya kerapatan udara sehingga memerlukan koreksi densitas udara serta pemodelan statistik melalui distribusi Weibull untuk mendapatkan estimasi potensi yang akurat. Implementasi teknologi *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) diprioritaskan karena sifatnya yang *omni-directional* dan andal dalam menghadapi aliran angin di kawasan pegunungan, yang kemudian diintegrasikan dengan *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) untuk meningkatkan efisiensi konversi pada kecepatan rendah. Sebagai elemen kebaruan, luaran daya sistem diproyeksikan dalam satuan Volt-Ampere (VA) agar selaras dengan standar kapasitas sambungan listrik domestik di Indonesia, sehingga kapasitas layanan pembangkit dapat dievaluasi secara praktis terhadap jumlah unit rumah tinggal yang mampu di suplai secara mandiri.

3. Perhitungan Potensi Energi Angin

Perancangan sistem PLTB di Desa Ranupani memerlukan penyesuaian parameter fisik yang presisi karena kondisi lingkungan mikronya yang spesifik. Berikut adalah tahapan perhitungan teknis yang menjadi dasar optimasi sistem:

a) Perhitungan kerapatan udara

Kerapatan udara (ρ) merupakan variabel yang paling sensitif terhadap ketinggian lokasi penelitian. Dengan suhu rata-rata 10°C (283,15 K) dan estimasi tekanan udara 78.485 Pa, densitas udara dihitung menggunakan persamaan:

$$\rho = \frac{p}{R \cdot T} = \frac{78.485}{287,058 \times 283,15} \approx 0,966 \text{ kg/m}^3$$

Hasil ini menunjukkan bahwa kerapatan udara di Desa Ranupani jauh dibawah standar permukaan laut ($1,225 \text{ kg/m}^3$), sehingga luas sapuan rotor perlu diperbesar untuk mengompensasi penurunan massa jenis udara tersebut.

b) Pemodelan statistik Weibull

Untuk memetakan probabilitas kecepatan angin, digunakan fungsi kepadatan peluang Weibull:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-(v/c)^k}$$

Untuk mendukung analisis distribusi angin, dihitung pula standar deviasi kecepatan angin menggunakan:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(v - V_{avg})^2}{n}}$$

$$\sigma = 0,953$$

Parameter bentuk (k) dihitung menggunakan pendekatan:

$$k = \left(\frac{\sigma}{v_{avg}}\right)^{-1,086}$$

$$k = \left(\frac{0,953}{3,29}\right)^{-1,086}$$

$$k = (0,2896)^{-1,086}$$

$$k = 3,84$$

Parameter skala (c) dihitung menggunakan:

$$c = \frac{v_{avg}}{y \left(1 + \frac{1}{k}\right)}$$

$$1 + \frac{1}{k} = 1 + \frac{1}{3,84} = 1,2604$$

$$\gamma(1,2604) \approx 0,951$$

$$c \approx 3,49 \text{ m/s}$$

Nilai dari parameter skala (c) digunakan sebagai titik acuan kecepatan angin yang paling representatif untuk menghitung produksi energi tahunan.

c) Densitas daya angin

Potensi energi murni yang terkandung dalam aliran angin per satuan luas sapuan rotor dihitung melalui persamaan berikut:

$$P = \frac{1}{2} \rho c^3 \gamma \left(1 + \frac{3}{k}\right)$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot 0,966 \cdot 3,46^3 \cdot \gamma \left(1 + \frac{3}{3,84}\right)$$

$$P \approx 17,2 \text{ W/m}^2$$

Untuk memperoleh gambaran awal mengenai kondisi lokasi penelitian, dilakukan identifikasi terhadap parameter lingkungan dan karakteristik angin yang memengaruhi potensi pembangkitan energi. Parameter utama yang digunakan dalam analisis ditunjukkan pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Karakteristik lokasi dan data angin

Parameter	Nilai	Satuan
-----------	-------	--------

Ketinggian lokasi	2100	mdpl
Massa jenis udara	0,966	Kg/m ³
Kecepatan angin rata-rata	3,29	m/s
Parameter bentuk Weibull (k)	3,84	...
Parameter skala Weibull (c)	3,49	m/s

4. Perancangan Teknis Turbin Angin

Dalam penelitian ini menggunakan turbin jenis *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) dengan pertimbangan karakteristik angin wilayah yang turbulen, serta efisiensi yang cukup dan tanpa memerlukan sistem *yaw* sehingga lebih cocok untuk kondisi geografis penelitian. Berdasarkan hasil analisis potensi angin, selanjutnya ditentukan parameter desain turbin yang sesuai dengan kondisi lokasi penelitian pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 Parameter desain turbin

Parameter	Nilai	Satuan
Jenis turbin	VAWT	-
Diameter rotor	3	m
Tinggi rotor	4	m
Luas sapuan rotor	12	m ²
TSR	5	-
Koefisien daya (C _p)	0,5	-
Jumlah turbin	10	unit

a) Luas sapuan rotor

Luas sapuan menentukan seberapa besar energi angin dapat ditangkap oleh turbin. Untuk turbin VAWT, luas sapuan dihitung sebagai berikut:

$$A = D \times H$$

$$A = 3 \times 4$$

$$A = 12 \text{ m}^2$$

b) Tip Speed Ratio (TSR)

Perhitungan kecepatan sudu turbin dihitung sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{\omega \cdot r}{v}$$

$$\omega = \frac{\lambda \cdot v}{r}$$

$$\omega = \frac{5 \cdot 3,49}{1,5} = 11,63 \text{ rad/s}$$

c) Kecepatan putar rotor

Perhitungan kecepatan putar rotor dihitung sebagai berikut:

$$n = \frac{60 \times 11,63}{6,2832}$$

$$n = \frac{697,8}{6,2832}$$

$$n = 111,05 \text{ rpm}$$

$$n \approx 111 \text{ rpm}$$

d) Daya mekanik

Perhitungan daya mekanik turbin dihitung sebagai berikut:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p$$

$$P = 0,5 \cdot 0,966 \cdot 12 \cdot 3,49^3 \cdot 0,5$$

$$P = 123,2 \text{ Watt}$$

e) Total daya klaster 10 turbin

Daya mekanik untuk 10 unit turbin dihitung sebagai berikut:

$$P_{total} = N \times P$$

$$P_{total} = 1232 \text{ Watt} \approx 1,232 \text{ kW}$$

Hasil perhitungan parameter teknis rotor, mulai dari kecepatan sudut, putaran rotor, hingga daya mekanik yang dihasilkan, dirangkum untuk mempermudah analisis performa turbin. Ringkasan hasil perhitungan tersebut disajikan pada tabel 3.4.

Tabel 3.3 Hasil perhitungan turbin

Parameter	Nilai	Satuan
Jari-jari rotor	1,5	m
Kecepatan putar rotor	11,63	rad/s
Putaran rotor	111	rpm
Daya angin	246,4	W
Daya mekanik turbin	123,2	W

5. Perhitungan Tegangan Induksi Generator

Perhitungan tegangan induksi pada generator dilakukan untuk mengetahui besarnya listrik yang dihasilkan berdasarkan kecepatan putar turbin. Pada penelitian ini dipilih *Permanent Magnett Synchronous Generator* (PMSG).

a) Tegangan induksi generator

Pada *Permanent Magnet Synchronous Generator*, tegangan induksi di perhitungkan sebagai berikut, dengan asumsi konstanta generator skala kecil adalah 2,5 V/(rad/s):

$$E = K_e \cdot \omega$$

$$E = 2,5 \times 11,62$$

$$E = 29,05 \text{ Volt}$$

b) Daya listrik generator

Daya listrik pada generator dihitung dengan mempertimbangkan efisiensi generator untuk PMSG, efisiensi umum berada padarentang 85-95%. Pada penelitian ini digunakan:

$$\eta_g = 90\% = 0,9$$

maka:

$$P_e = P_m \times \eta_g$$

$$P_e = 123,2 \times 0,9$$

$$P_e = 110,88 \text{ Watt}$$

c) Total daya listrik sistem

Dengan menggunakan klaster 10 unit turbin maka total daya listrik yang dihasilkan sebagai berikut:

$$P_{total} = N \times P_e$$

$$P_{total} = 10 \times 110,88$$

$$P_{total} = 1108,8 \text{ Watt}$$

$$P_{total} \approx 1,11 \text{ kW}$$

d) Estimasi produksi energi harian

Jika sistem beroperasi aktif selama 24 jam, energi listrik harian yang dihasilkan adalah:

$$E = P \times t$$

$$E = 1,1088 \times 24$$

$$E = 26,61 \text{ kWh/hari}$$

Berdasarkan perhitungan, generator PMSG yang dirancang pada turbin VAWT pada putaran 111 rpm mampu menghasilkan tegangan induksi sebesar 29,05 Volt per unit. Dengan efisiensi generator sebesar 90%, daya listrik yang dihasilkan mencapai 110,88 Watt per turbin. Pada konfigurasi 10 unit turbin, total daya listrik sistem mencapai 1,11 kW atau setara 26,61 kWh per hari. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi VAWT + PMSG cukup layak diterapkan pada kondisi angin Desa Ranupani karena mampu bekerja pada putaran rendah dan menghasilkan energi listrik yang relatif stabil. Hasil perhitungan parameter kelistrikan generator ditunjukkan pada tabel 3.4.

Tabel 3.4 Spesifikasi dan hasil generator

Parameter	Nilai	Satuan
Jenis generator	PMSG	-
Putaran generator	111	rpm

Efisiensi generator	90	%
Tegangan induksi	29,05	V
Daya listrik per unit	110,88	W
Total daya listrik	1108,8	W

6. Konversi Daya Listrik ke Daya Semu

Berdasarkan hasil perhitungan sebelumnya, konfigurasi 10 unit turbin VAWT yang dikombinasikan dengan generator PMSG menghasilkan total daya aktif sebesar 1108,8 Watt. Lalu daya listrik keluaran generator dikonversi ke dalam satuan daya semu (Volt-Ampere/VA) agar dapat dibandingkan secara langsung dengan standar sambungan listrik rumah tangga di Indonesia. Hal ini dilakukan karena kebutuhan daya pelanggan rumah tangga umumnya dinyatakan dalam satuan VA.

$$S = \frac{P}{\cos \phi}$$

Keterangan:

S = daya semu (VA)

P = daya aktif (W)

$\cos \phi$ = faktor daya

$$S = \frac{1108,8}{0,8}$$

$$S = 1386 \text{ VA}$$

$$S \approx 1,39 \text{ kVA}$$

Nilai daya semu tersebut kemudian dianalisis terhadap kapasitas layanan rumah tangga. Dengan asumsi standar sambungan listrik rumah tangga sederhana sebesar 450 VA, jumlah rumah secara teoritis dapat dilayani dihitung menggunakan:

$$N = \frac{1386}{450}$$

$$N = 3,08$$

$N \approx 3$ rumah tangga

Hasil ini menunjukkan bahwa sistem PLTB yang dirancang dengan 10 unit turbin mampu menghasilkan kapasitas listrik yang cukup untuk memenuhi kebutuhan listrik dasar sekitar 3 rumah tangga kategori 450 VA. Kapasitas tersebut masih tergolong skala kecil, namun cukup potensial untuk diterapkan sebagai sumber energi mandiri bagi beban prioritas, seperti rumah tinggal, penerangan jalan umum, maupun fasilitas sosial di Desa Ranupani. Selain itu, kapasitas layanan masih dapat ditingkatkan melalui pengembangan jumlah turbin, optimasi efisiensi sistem, maupun integrasi dengan sumber energi terbarukan lainnya seperti Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Hasil kapasitas layanan sistem disajikan pada tabel 3.5.

Parameter	Nilai
Daya aktif sistem	1108,8 W
Daya semu sistem	1386 VA
Standar rumah tangga	450 VA
Jumlah rumah terlayani	3 rumah
Total rumah desa	501 rumah
Kontribusi sistem	0,60%

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil perancangan sistem, turbin angin tipe VAWT dengan diameter rotor 3 meter, tinggi rotor 4 meter, dan jumlah instalasi sebanyak 10 unit menghasilkan daya mekanik total sebesar 1.232 Watt pada kecepatan angin acuan berdasarkan parameter skala distribusi Weibull sebesar 3,49 m/s. Energi mekanik tersebut kemudian dikonversi menjadi energi listrik menggunakan generator PMSG dengan efisiensi generator sebesar 90%, sehingga diperoleh daya aktif keluaran sistem sebesar:

$$P = 1232 \times 0,9$$

$$P = 1108,8 \text{ Watt}$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu mengkonversi energi angin menjadi energi listrik secara optimal pada kondisi angin rata-rata di Desa Ranupani. Penggunaan generator PMSG pada sistem *direct-drive* juga memungkinkan turbin tetap menghasilkan listrik pada putaran rendah, yaitu sekitar 111 rpm, sehingga sesuai dengan karakteristik angin di wilayah pegunungan.

A. Analisis Kapasitas Layanan

Untuk mengetahui kapasitas layanan sistem terhadap kebutuhan rumah tangga, daya aktif keluaran generator dikonversi ke dalam bentuk daya semu (VA). Hal ini dilakukan karena standar sambungan listrik rumah tangga di Indonesia menggunakan satuan Volt-Ampere (VA) dan didapatkan sekitar 1,39 kVA. Berdasarkan hasil tersebut, jumlah rumah tangga yang dapat dilayani dihitung menggunakan asumsi standar sambungan listrik rumah sederhana sebesar 450 VA dapat menyuplai sekitar 3 rumah tangga. Jika dibandingkan dengan jumlah rumah penduduk di Desa ranupani sebanyak 501 rumah, maka tingkat kontribusi sistem terhadap total kebutuhan rumah tangga hanya sekitar 0,60%. Hasil ini menunjukkan bahwa konfigurasi awal 10 unit turbin VAWT masih menghasilkan kapasitas layanan dalam skala terbatas. Meskipun demikian, sistem yang dirancang tetap memiliki potensi implementasi sebagai sumber energi mandiri untuk beban prioritas.

Selain itu, hasil analisis juga menunjukkan bahwa kombinasi antara rotor berdiameter 3 meter, tinggi 4 meter, nilai *Tip Speed Ratio* (TSR) sebesar 5, serta penggunaan generator PMSG memberikan performa yang cukup baik pada kecepatan angin rendah hingga menengah. Dengan

karakteristik geografis Desa Ranupani yang berada pada ketinggian 2.100 mdpl, sistem ini berpotensi dikembangkan lebih lanjut melalui penambahan jumlah turbin, optimasi desain rotor, maupun integrasi dengan sistem energi terbarukan lainnya guna meningkatkan kapasitas suplai listrik secara lebih signifikan.

B. Skenario Pengembangan Kapasitas Sistem PLTB

Sebagai evaluasi lanjutan terhadap desain sistem, dilakukan simulasi pengembangan kapasitas melalui optimasi dimensi rotor dengan mempertahankan jumlah turbin tetap sebanyak 10 unit. Parameter yang divariasikan meliputi diameter dan tinggi rotor, sedangkan parameter lain seperti kecepatan angin, nilai *Tip Speed Ratio* (TSR), koefisien daya (C_p), dan efisiensi generator diasumsikan tetap. Tujuannya adalah untuk mengetahui pengaruh perubahan dimensi rotor terhadap peningkatan kapasitas layanan sistem. Hasil simulasi ditunjukkan pada tabel 4.1.

Table 4.1 Skenario pengembangan berdasarkan dimensi rotor

Diameter × tinggi rotor	Luas rotor (m ²)	Daya aktif sistem (W)	Daya semu sistem (VA)	Kapasitas layanan (450 VA)
3 m × 4 m	12	1108,8	1386	3 rumah
4 m × 4 m	16	1478,4	1848	4 rumah
4 m × 5 m	20	1848	2310	5 rumah
5 m × 5 m	25	2310	2887,5	6 rumah

Berdasarkan tabel 4.1, dapat diketahui peningkatan dimensi rotor memberikan pengaruh langsung terhadap kapasitas daya keluaran sistem. Pada konfigurasi awal dengan diameter 3 meter dan tinggi 4 meter, sistem menghasilkan daya semu sebesar 1386 VA dan mampu melayani 3 rumah tangga. Ketika diameter rotor ditingkatkan menjadi 4 meter dengan tinggi tetap, luas sapuan rotor meningkat menjadi 16 m², sehingga kapasitas layanan naik menjadi sekitar 4 rumah tangga. Pada skenario rotor 4 × 5 meter, sistem menghasilkan daya semu sebesar 2310 VA dan mampu melayani sekitar 5 rumah tangga. Sementara pada konfigurasi rotor 5 × 5 meter, kapasitas sistem meningkat hingga 2887,5 VA, yang secara teoritis dapat melayani sekitar 6 rumah tangga.

Simpulan

Berdasarkan hasil analisis potensi energi angin dan perancangan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) di Desa Ranupani, Kecamatan Senduro, Kabupaten Lumajang, dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil analisis data angin menggunakan distribusi Weibull, lokasi penelitian memiliki parameter skala sebesar 3,49 m/s yang menunjukkan bahwa Desa Ranupani memiliki potensi energi angin yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan meskipun memiliki kerapatan udara yang lebih rendah sekitar $0,966 \text{ kg/m}^3$.
2. Hasil perancangan turbin angin tipe *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) dengan diameter rotor 3 meter, tinggi 4 meter, dan nilai *Tip Speed Ratio* (TSR) sebesar 5 menghasilkan luas sapuan rotor sebesar 12 m^2 , kecepatan sudut rotor sebesar 11,63 rad/s, serta putaran rotor sebesar 111 rpm. Pada kondisi kecepatan angin 3,49 m/s satu unit turbin mampu menghasilkan daya mekanik sebesar 123,2 Watt.
3. Sistem yang terdiri dari 10 unit turbin VAWT yang dikombinasikan dengan PMSG menghasilkan total daya aktif sebesar 1108,8 Watt. Setelah dikonversi ke daya semu dengan faktor daya 0,8, diperoleh kapasitas sistem sebesar 1386 VA atau 1,39 kVA.
4. Berdasarkan kapasitas daya yang dihasilkan, sistem PLTB yang dirancang secara teoritis mampu melayani sekitar 3 rumah tangga dengan kategori sambungan listrik 450 VA. Jika dibandingkan dengan total 501 rumah di Desa Ranupani, kontribusi sistem hanya sekitar 0,60% terhadap kebutuhan listrik rumah tangga.
5. Hasil simulasi pengembangan sistem menunjukkan bahwa kapasitas pembangkit listrik masih dapat ditingkatkan melalui optimasi parameter desain, seperti peningkatan dimensi rotor, serta penambahan jumlah unit turbin sesuai dengan kondisi lahan dan potensi angin yang tersedia. Dengan perancangan kapasitas yang sesuai, sistem PLTB berbasis VAWT-PMSG berpotensi menjadi solusi pengembangan energi terbarukan yang dapat mendukung kebutuhan listrik masyarakat Desa Ranupani secara lebih luas.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Penelitian selanjutnya dapat menggunakan data kecepatan angin hasil pengukuran langsung dilapangan agar karakteristik angin yang diperoleh lebih akurat dibandingkan dengan data sekunder.
2. Pengembangan desain turbin dapat dilakukan melalui optimasi parameter teknis, seperti diameter rotor, tinggi rotor, jumlah bilah, dan profil sudu, guna meningkatkan kemampuan turbin dalam menangkap energi angin pada kondisi kecepatan angin rendah hingga menengah.
3. Untuk meningkatkan kapasitas pembangkitan, penelitian selanjutnya dapat melakukan simulasi kombinasi antara optimasi dimensi rotor dan penambahan jumlah unit turbin sesuai dengan ketersediaan lahan, kondisi topografi, dan kebutuhan energi masyarakat.
4. Pengujian performa generator PMSG secara eksperimental perlu dilakukan untuk mengetahui karakteristik tegangan, arus, efisiensi, dan kestabilan keluaran sistem pada berbagai variasi putaran rotor.
5. Sistem PLTB yang dirancang dapat dikembangkan lebih lanjut melalui integrasi dengan sistem penyimpanan energi, maupun kombinasi dengan sumber energi terbarukan lainnya seperti Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), sehingga kontinuitas dan keandalan suplai energi dapat lebih optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Budiono, “Strategi Pelaku Energi Indonesia Menuju Net Zero Emission,” *INDONESIAGOID*. [Online]. Available: <https://indonesia.go.id/informasi/nasional/detail/strategi-pelaku-energi-indonesia-menuju-net-zero-emission>
- [2] S. Yana and F. Hanum, “Potensi Ekonomi Energi Terbarukan Biomassa : Permasalahan dan Kendala Pengembangannya,” *J. Serambi Eng.*, vol. VIII, no. 3, pp. 6487–6492, 2023, doi: 10.32672/jse.v8i3.6448.
- [3] A. Ardiansyah and V. J. Jasmine, “IMPROVING COMMUNITY WELFARE THROUGH RENEWABLE ENERGY BASED DEVELOPMENT,” *Bina Bangsa Int. J. Bus. Manag.*, vol. 5, no. 1, pp. 59–82, 2025, doi: 10.46306/bbijbm.v5i1.117.
- [4] N. Jargalsaikhan, S. Ueda, F. Masahiro, and H. Matayoshi, “Exploring influence of air density deviation on power production of wind energy conversion system : Study on correction method,” *Renew. Energy*, vol. 220, no. October 2023, p. 119636, 2024, doi: 10.1016/j.renene.2023.119636.
- [5] T. Yan, J. Qin, M. Zhang, J. Long, and J. Zhang, “Investigation of wind profile and turbulent transport patterns in complex mountainous terrain based on clustering analysis,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 268, no. November 2025, p. 106289, 2026, doi: 10.1016/j.jweia.2025.106289.
- [6] J. Gräbner and J. Jahn, “Optimization of the distribution of wind speeds using convexly combined Weibull densities,” *Renewables Wind. Water, Sol.*, 2017, doi: 10.1186/s40807-017-0045-9.
- [7] G. Dinesh Kumar Reddy, M. Verma, and A. De, “Performance analysis of vertical-axis wind turbine clusters: Effect of inter-turbine spacing and turbine rotation,” *Phys. Fluids*, vol. 35, no. 10, pp. 1–34, 2023, doi: 10.1063/5.0169060.
- [8] S. Roga, S. Datta, and V. Kisku, “Performance of a vertical wind turbine with permanent magnet synchronous generator,” *ice Publ.*, pp. 1–11, 2022, doi: 10.1680/jener.21.00113.
- [9] D. V. G. Prasad, M. Verma, G. D. K. Reddy, and A. De, “Improving energy extraction in VAWT clusters : effect of blade count , wake synergy , and inter-turbine spacing,” *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, vol. 234, no. 23, pp. 6937–6957, 2026, doi: 10.1140/epjs/s11734-025-01818-2.