



Studi Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) di Pantai Teluk Penyu Cilacap Menggunakan Analisis Distribusi Weibull

Ulikaryani^{1*}, Agus Santoso², Bayu Aji Girawan³, Radhi Ariawan⁴, Unggul Satria Jati⁵,
Jenal Sodikin⁶, Ari Kristiningsih⁷

¹⁻⁷ Politeknik Negeri Cilacap, Indonesia

Email: ulikaryani@pnc.ac.id¹, agus.santoso@pnc.ac.id², bayuajigirawan@pnc.ac.id³,
radhi.ariawan@pnc.ac.id⁴, unggul@pnc.ac.id⁵, jenal.sodikin@pnc.ac.id⁶, ari.kristiningsih@pnc.ac.id⁷

*Penulis Korespondensi: ulikaryani@pnc.ac.id

Abstract. The ever-increasing demand for electrical energy drives the utilization of renewable energy as a sustainable alternative source. Wind energy is one such potential renewable energy source. As a region situated on the southern coast of Java, Cilacap Regency possesses relatively stable wind characteristics, making it a promising location for the development of wind power plants. This study aims to analyze the wind energy potential in the Cilacap region using the Weibull distribution. The Weibull method was employed to determine the shape parameter (k) and scale parameter (c) based on wind speed data. The analysis results indicate an average wind speed of 6.225 m/s in the Cilacap region especially Teluk Penyu Beach, with Weibull parameters of $k = 2.972$ and $c = 6.973$ m/s. These values reflect wind characteristics that are relatively stable and favorable for the development of small- to medium-scale wind power plants. The calculated wind power density (WPD) indicates that the coastal area of Cilacap is suitable for harnessing wind energy as an alternative energy source.

Keywords: Teluk Penyu Beach; Weibull; Wind Energy; Wind Power Density; Wind Power Plant.

Abstrak. Kebutuhan energi listrik yang terus meningkat mendorong pemanfaatan energi terbarukan sebagai alternatif sumber energi berkelanjutan. Salah satu sumber energi terbarukan yang potensial adalah energi angin. Kabupaten Cilacap sebagai wilayah pesisir selatan Jawa memiliki karakteristik angin yang cukup stabil sehingga berpotensi dikembangkan sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi energi angin di wilayah Cilacap menggunakan distribusi Weibull. Metode Weibull digunakan untuk menentukan parameter bentuk (k) dan parameter skala (c) berdasarkan data kecepatan angin. Hasil analisis menunjukkan bahwa kecepatan angin rata-rata di wilayah Pantai Teluk Penyu Cilacap sebesar 6,225 m/s dengan parameter Weibull $k = 2,972$ dan $c = 6,973$ m/s. Nilai tersebut menunjukkan karakteristik angin yang relatif stabil dan cukup baik untuk pengembangan PLTB skala kecil hingga menengah. Nilai *wind power density* (WPD) yang diperoleh menunjukkan bahwa wilayah pesisir Cilacap termasuk dalam kategori layak untuk pemanfaatan energi angin sebagai sumber energi alternatif.

Kata Kunci: Energi Angin; Pantai Teluk Penyu; PLTB; Weibull; Wind Power Density.

1. LATAR BELAKANG

Krisis energi fosil dan peningkatan emisi karbon telah mendorong pengembangan energi baru terbarukan di berbagai negara (Susanti et al., 2025; Tanoto et al., 2026). Indonesia memiliki potensi besar dalam pengembangan energi angin, terutama di wilayah pesisir (Faqih et al., 2023; Hasan et al., 2024). Berdasarkan data Kementerian ESDM, potensi energi angin nasional mencapai lebih dari 60 GW, namun pemanfaatannya masih relatif kecil (Pondera & IIEE, 2024). Kabupaten Cilacap memiliki garis pantai panjang di pesisir selatan Jawa yang memungkinkan adanya pola angin laut yang konsisten (Widagdo & Setijadi, 2013). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa wilayah pesisir Cilacap memiliki kecepatan angin rata-rata sekitar 3,2–3,3 m/s dengan pola distribusi yang cukup sesuai dengan model Weibull

(Widiyanto, 2013). Hal ini menjadikan wilayah Cilacap menarik untuk dikaji lebih lanjut dalam konteks pengembangan PLTB. Oleh Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi energi angin di wilayah Cilacap menggunakan pendekatan distribusi Weibull.

2. KAJIAN TEORITIS

Distribusi Weibull merupakan metode statistik yang umum digunakan untuk analisis probabilitas kecepatan angin karena mampu menggambarkan karakteristik distribusi secara baik (Pham, 2006). Parameter Weibull dapat digunakan untuk menentukan estimasi energi angin dan densitas daya. Distribusi Weibull menggunakan dua parameter utama, yakni parameter bentuk (k) dan parameter skala (c), untuk memodelkan karakteristik kecepatan angin. Parameter ini digunakan untuk menghitung probabilitas kecepatan angin, potensi energi tahunan, dan densitas daya angin di suatu lokasi (Fauzan & Hiendro, 2025). Seguro & Lambert (2000) dengan rumus fungsi kerapatan probabilitas (PDF) Weibull untuk kecepatan angin (v) adalah:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \dots\dots\dots (1)$$

Parameter Weibull terdiri dari 2 parameter yaitu: Parameter Skala (c) merupakan skala kecepatan angin (m/s) yang berkaitan langsung dengan rata-rata kecepatan angin tahunan. Parameter Bentuk (k) merupakan bentuk kurva (distribusi frekuensi) angin. Semakin tinggi nilai (k), semakin seragam kecepatan angin di wilayah tersebut. Sedangkan, fungsi Gamma (Γ) biasanya digunakan untuk mencari nilai kecepatan angin rata-rata ($\bar{v}$) melalui persamaan $\bar{v} = c\Gamma(1 + \frac{1}{k})$. Metode ini memberikan estimasi yang lebih akurat dibandingkan menggunakan kecepatan angin rata-rata.

Estimasi densitas daya angin (P_w) dalam Watt per meter persegi (W/m^2) dapat ditentukan menggunakan parameter Weibull dan rapat massa udara (ρ):

$$P_w = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma(1 + \frac{3}{k}) \dots\dots\dots (2)$$

3. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan di Pantai Teluk Penyu Kabupaten Cilacap, Jawa Tengah, Indonesia. Wilayah ini terletak pada koordinat 7°754' LS dan 109°025' BT. Data yang digunakan berupa data kecepatan angin harian dari NASA POWER selama periode 1 tahun pengamatan. Distribusi Probabilitas Weibull dinyatakan dengan persamaan:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \dots\dots\dots (3)$$

Dengan:

v = kecepatan angin (m/s)

k = *shape parameter*

c = *scale parameter*

Parameter Weibull dihitung menggunakan metode statistik:

$$k = \left(\frac{\sigma}{V_m}\right)^{(-1,086)} \dots\dots\dots(4)$$

$$c = \frac{V_m}{\Gamma(1+\frac{1}{k})} \dots\dots\dots(5)$$

Dimana:

σ = standar deviasi

V_m = kecepatan angin rata-rata

Wind Power Density dihitung dengan persamaan:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho V^3 \dots\dots\dots(6)$$

Dengan:

ρ = densitas udara (1.225 kg/m³)

Kerapatan daya angin dihitung menggunakan distribusi Weibull untuk memperhitungkan sifat stokastik dari variasi kecepatan angin. Nilai harapan kecepatan angin pangkat tiga ditentukan menggunakan parameter Weibull berdasarkan:

$$WPD = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma(1 + \frac{3}{k}) \dots\dots\dots(7)$$

Di mana (ρ) adalah massa jenis udara, (c) adalah parameter skala, (k) adalah parameter bentuk, dan (Γ) adalah fungsi gamma.

Penelitian dilakukan dengan memasukkan data koordinat wilayah di website NASA POWER kemudian dilakukan analisis untuk 1 tahun pengamatan dan dengan data pengamatan setiap 1 jam sehingga diperoleh jumlah data (n) sebanyak 9408 jam. Karakteristik data angin diambil pada ketinggian 10 m dan 50 m (NASA-POWER, 2026). Maka diperoleh data sebagai berikut.

Karakteristik Kecepatan Angin

Berdasarkan hasil analisis data kecepatan angin yang diperoleh setiap 1 jam selama 1 tahun menggunakan data NASA POWER maka berdasarkan rumus:

$$V_m = \frac{\sum V_i}{n} \dots\dots\dots (8)$$

Diperoleh hasil kecepatan angin rata-rata $V_m = 6,225$ m/s. Artinya secara rata-rata angin di ketinggian 50 m cukup baik untuk PLTB. Sedangkan, standar deviasinya adalah:

$$\sigma = s^2 \dots\dots\dots (9)$$

$$\sigma = 2,283 \text{ m/s}$$

Shape factor atau parameter bentuk (k) diperoleh:

$$k = \left(\frac{\sigma}{V_m}\right)^{(-1,086)} \dots\dots\dots (10)$$

$$k = 2,972$$

Scale factor atau parameter skala (c) diperoleh:

$$c = \frac{V_m}{\Gamma(1+\frac{1}{k})} \dots\dots\dots (11)$$

$$c = 6,973 \text{ m/s}$$

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan bersumber dari data yang diperoleh NASA POWER, maka hasil penelitian menunjukkan rata-rata kecepatan angin sebesar 6,225 m/s pada ketinggian 50 m.

Berdasarkan hasil perhitungan distribusi Weibull diperoleh:

$$\text{Shape parameter } (k) = 2,972$$

$$\text{Scale parameter } (c) = 6,973 \text{ m/s}$$

Dimana, interpretasinya:

$k < 2 \rightarrow$ artinya angin sangat fluktuatif

$2 < k < 3 \rightarrow$ artinya angin cukup stabil

$k > 3 \rightarrow$ artinya angin stabil

Sehingga, dapat diketahui bahwasannya lokasi di Teluk Penyus ini termasuk cukup stabil. Sedangkan, nilai *shape parameter* di atas 3 menunjukkan pola angin yang cukup stabil.

Distribusi Probabilitas Weibull

Probability Density Function atau fungsi kepadatan probabilitas yaitu probabilitas kemunculan angin (PDF) diperoleh seperti yang ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 1. Probabilitas Kemunculan Angin.

V (m/s)	PDF
0.15	0.00022
2.21	0.04284
4.27	0.12847
6.33	0.16629
8.40	0.10828
10.46	0.03379

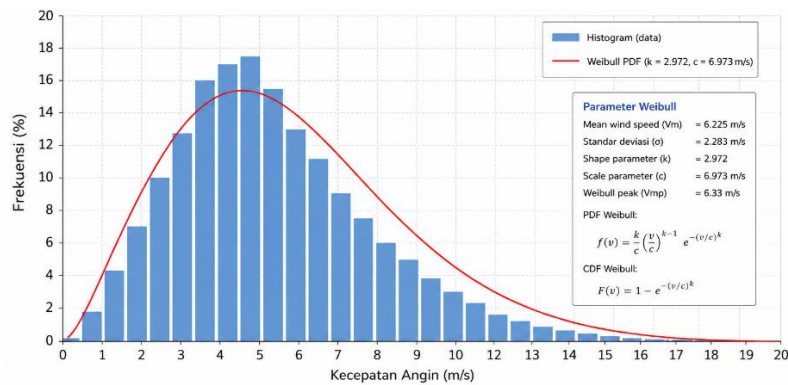
PDF menunjukkan seberapa besar peluang suatu kecepatan angin tertentu terjadi (Fu et al., 2024). Sehingga, dari data pada Tabel 1. tersebut terlihat bahwa kecepatan angin yang paling sering muncul atau dominan adalah 6,33 m/s dengan probabilitas sekitar 16,63%.

Tabel 2. Probabilitas Kumulatif.

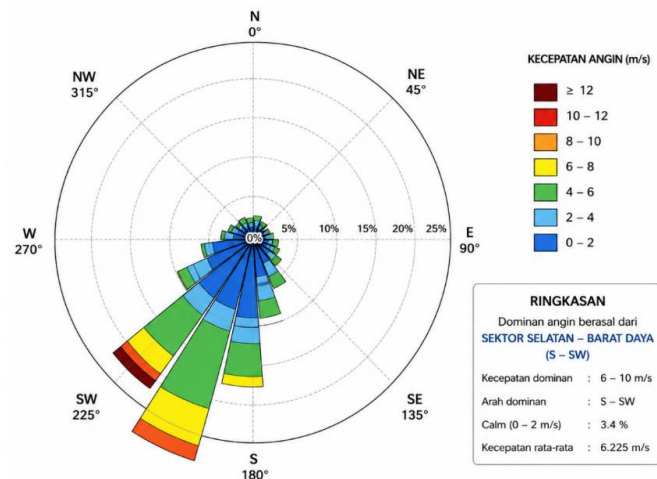
V (m/s)	CDF
2.21	0.032
4.27	0.208
6.33	0.528
8.40	0.824
10.46	0.964

Probabilitas kumulatif yang ditampilkan pada tabel 2 di atas. *Cumulative Distribution Function* atau fungsi distribusi kumulatif (CDF) yang terlihat pada Tabel 2 tersebut diatas menunjukkan akumulasi peluang dari kecepatan angin 0 m/s sampai kecepatan angin tertinggi 6,33 m/s atau waktu kecepatan angin ≤ 6.33 m/s yaitu sekitar 52.8%. Distribusi probabilitas menunjukkan bahwa kecepatan angin dominan berada pada rentang 6–7 m/s, yang merupakan kategori cukup baik untuk PLTB skala kecil.

Adapun histogram kecepatan angin dan kurva distribusi Weibull dengan lokasi pengamatan di Pantai Teluk Penyus Cilacap dapat dilihat pada Gambar 1. Terlihat pada gambar bahwa dengan memasukkan parameter kecepatan angin rata-rata, standar deviasi, *shape parameter*, dan *scale parameter* maka diperoleh puncak kecepatan angin berdasarkan distribusi Weibull yaitu 6,33 m/s.



Gambar 1. Histogram kecepatan angin dan kurva distribusi Weibull di Pantai Teluk Penyul.



Gambar 2. Wind Rose distribusi frekuensi arah angin di Pantai Teluk Penyul.

Wind rose pada Gambar 2. memperlihatkan dimana panjang setiap batang menunjukkan persentase frekuensi kejadian dari arah tersebut. Sedangkan, warna pada batang menunjukkan kelas kecepatan angin. Lingkaran konsentris menunjukkan persentase frekuensi 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25 %. Sehingga, pada berdasarkan wind rose tersebut, terlihat dominan arah angin berasal dari Sektor Selatan (S) - Barat Daya (SW).

Wind Power Density

Wind Power Density (WPD) adalah ukuran berapa besar energi angin yang tersedia per satuan luas. Yaitu, berapa Watt energi angin yang melewati 1 m² area sapuan turbin. Untuk menilai potensi tenaga angin di lokasi terpilih, kecepatan angin perlu dipertimbangkan (Abdulkadir, 2025). Dengan menggunakan rata-rata kecepatan angin yaitu 6,225 m/s dan densitas dari angin (ρ) adalah 1,225 kg/m³, maka dapat dihitung wind power density (WPD), yaitu:

$$WPD = \frac{1}{2} 1,225 (6,225)^3 \dots\dots\dots (12)$$

$$WPD = 208,55 \text{ W/m}^2$$

Tabel 3. Klasifikasi tenaga angin menurut NREL pada ketinggian 50 m.

<i>Wind Power Classification</i>	<i>Wind Density (W/m²)</i>	<i>Description</i>
1	0-200	<i>Unsuitable for any wind application</i>
2	200-300	<i>Suitable for Stand-alone</i>
3	300-400	<i>Good</i>
4	400-500	<i>Good</i>
5	500-600	<i>Excellent</i>
6	600-800	<i>Outstanding</i>
7	800-2000	<i>Superb</i>

Berdasarkan klasifikasi tenaga angin NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) (Beiter & Musial, 2016). Wilayah studi ini termasuk dalam Kelas 2 dengan kepadatan daya angin sebesar 208,55 W/m² pada ketinggian hub 50 meter. Hal ini menunjukkan potensi sumber daya angin yang tergolong masih layak untuk aplikasi energi angin skala kecil hingga menengah. Lokasi di Cilacap Selatan dalam hal ini daerah Pantai Teluk Penyus masih sangat sesuai dan berpotensi cukup layak untuk sistem energi terbarukan *hybrid*, khususnya dalam skenario elektrifikasi wilayah pesisir, sistem *off-grid* nelayan, pompa air tenaga angin dan penyediaan energi untuk daerah terisolasi.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Wilayah pesisir Cilacap terutama daerah Teluk Penyus Cilacap Selatan memiliki potensi energi angin yang cukup baik untuk pengembangan PLTB skala kecil hingga menengah. Hasil analisis Weibull menunjukkan nilai parameter $k = 2,972$ dan $c = 6,973$ m/s yang mengindikasikan kestabilan angin yang baik. Dengan rata-rata kecepatan angin 6,225 m/s dan *wind power density* sebesar 208,55 W/m², wilayah ini layak untuk sistem pembangkit *hybrid* atau *standalone* skala kecil.

DAFTAR REFERENSI

- Abdulkadir, M. K. (2025). Wind Speed Distribution Analysis and Wind Power Density for Katsina, Nigeria. *Journal of Energy Technology and Environment*, 7(2), 10–19.
- Beiter, P., & Musial, W. (2016). *Terminology Guideline for Classifying Offshore Wind Energy Resources Terminology Guideline for Classifying Offshore Wind Energy Resources Philipp Beiter and Walt Musial* (Issue September).
- Faqih, A., Dasanto, B. D., & Astiani, A. M. (2023). *Proyeksi Sebaran Potensi Energi Angin di Indonesia Menggunakan ScenarioMIP dan GeoMIP* [IPB University]. <http://repository.ipb.ac.id/handle/123456789/125358>
- Fauzan, D. M., & Hiendro, A. (2025). Kajian Potensi Turbin Angin Sumbu Horizontal Menggunakan Metode Simpangan Baku Distribusi Weibull. *Jurnal Serambi Engineering*, X(4), 15839–15848.
- Fu, B., Fan, G., Wang, Y., Zhang, M., & Zheng, S. (2024). Wind Speed Probability Distribution and Parameter Estimation Methods. *Research Square*.

- Hasan, S., Lihawa, F., & Baderan, D. W. K. (2024). Studi Literatur: Potensi dan Pengembangan Energi Angin sebagai Sumber Energi Baru Terbarukan di Wilayah Gorontalo Dosen Program Studi Magister Kependudukan dan Lingkungan Hidup Pascasajana. *Jurnal Wilayah, Kota Dan Lingkungan Berkelanjutan*, 3(2), 245–253.
- Muliadi, M., & Asyadi, T. M. (2021). Penentuan Parameter Weibull Untuk Mendapatkan Densitas Daya Angin Di Kawasan Blang Bintang Aceh Besar. *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 3(2), 51–55.
- NASA-POWER. (2026). NASA POWER. POWERing the Future of Energy, Infrastructure, and Agroclimatology. <https://power.larc.nasa.gov/>
- Pham, H. (2006). Weibull Distribution and Their Application. In *Springer Handbook of Engineering Statistics* (pp. 63–76). Springer-Verlag London Limited.
- Pondera, & IIEE, I. I. for E. E. (2024). *Peta Jalan Pengembangan Energi Angin Darat di Indonesia*.
- Seguro, J. V., & Lambert, T. W. (2000). Modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 85(1), 75–84. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(99\)00122-1](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(99)00122-1)
- Susanti, A., Nabila, Z. M., Nuriansyah, F., & Hakam, L. I. (2025). Kebijakan Green Economy Melalui Sektor Energi Terbarukan dalam Pencapaian SDGs: Systematic Literature Review. *EKONOMIS: Jurnal Ekonomi Dan Bisnis*, 18(1), 25–46.
- Tanoto, Y., Diprasetya, L., Jr, N., & Saptono, H. (2026). Utility-scale wind power generation potential in low-wind regions : Insights for achieving the sustainable energy transition in developing countries. *International Journal of Renewable Energy Development*, 15(3), 584–595.
- Widagdo, A., & Setijadi, R. (2013). Studi Pendahuluan Perubahan Garis Pantai Selama Zaman Kuartar di Daerah Kroya sampai Binangun Kabupaten Cilacap-Jawa Tengah. *Dinamika Rekayasa*, 9(1).
- Widiyanto, W. (2013). Analisis Probabilitas Kecepatan Angin untuk Pesisir Cilacap dengan Menerapkan Distribusi Weibull dan Rayleigh Probability Analysis of Wind Speed for Cilacap Coast by Applying Weibull and Rayleigh Distribution. *Dinamika Rekayasa*, 9(1).