



Optimasi Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu di Kabupaten Sukabumi

Moh. Ngapan Hadi¹

¹Institut Teknologi PLN, Jakarta, Indonesia, mohngapan2310539@itpln.ac.id

Corresponding Author: mohngapan2310539@itpln.ac.id¹

Abstract: *The utilization of wind energy as a renewable electricity source in Sukabumi Regency holds significant potential but has yet to be optimally developed. This study aims to assess the feasibility of developing a Wind Power Plant (PLTB) through a comprehensive approach encompassing wind potential analysis, technical feasibility, and financial evaluation. Five large-scale wind turbine types were analyzed: Siemens SWT-3.6-130, Vestas V100-2.0 MW, GE Renewable Energy 6.6 MW, Goldwind GWH252-10 MW, and Windey WD236-8.5 MW. Historical wind speed data were analyzed using the two-parameter Weibull distribution to obtain shape (k) and scale (λ) parameters, which were then used to calculate Annual Energy Production (AEP) and Capacity Factor (CF). The technical assessment was carried out by comparing each turbine's energy output and efficiency, while the financial feasibility was evaluated using four main indicators: Net Present Value (NPV), Benefit-Cost Ratio (BCR), Internal Rate of Return (IRR), and Payback Period (PP). The results indicate that the Windey WD236-8.5 MW turbine delivers the best overall performance, with the highest NPV, an IRR of 9,63%, a BCR of 3,59, and a payback period of 20 years. Based on these findings, it can be concluded that the development of a PLTB project in Sukabumi is feasible, with turbine technology selection adapted to local wind potential and investment efficiency.*

Keyword: *Optimization, Renewable energy, Wind power plant.*

Abstrak: Pemanfaatan energi angin sebagai sumber listrik terbarukan di Kabupaten Sukabumi memiliki potensi yang besar namun belum dimanfaatkan secara optimal. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kelayakan pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) melalui pendekatan komprehensif yang mencakup analisis potensi angin, kelayakan teknis, dan aspek finansial. Lima jenis turbin angin skala besar dianalisis, yaitu *Siemens SWT-3.6-130*, *Vestas V100-2.0 MW*, *GE Renewable Energy 6.6 MW*, *Goldwind GWH252-10 MW* dan *Windey WD236-8.5 MW*. Analisis potensi angin dilakukan menggunakan distribusi Weibull dua parameter untuk memperoleh parameter bentuk (k) dan skala (λ), yang selanjutnya digunakan untuk menghitung produksi energi tahunan (*Annual Energy Production/AEP*) dan kapasitas faktor (*Capacity Factor/CF*). Evaluasi teknis dilakukan dengan membandingkan output energi dan efisiensi masing-masing turbin, sedangkan analisis finansial mencakup perhitungan *Net Present Value (NPV)*, *Benefit-Cost Ratio (BCR)*,

Internal Rate of Return (IRR) dan *Payback Period (PP)*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa turbin *Windey WD236-8.5 MW* memberikan hasil paling optimal dengan nilai NPV tertinggi, BCR sebesar 3,59, dan IRR sebesar 9,63%, serta masa pengembalian modal (PP) selama 20 tahun. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa pengembangan PLTB di Sukabumi layak dilaksanakan, dengan pemilihan jenis turbin yang disesuaikan terhadap karakteristik angin lokal dan efisiensi investasi.

Kata Kunci: *Optimasi, Energi terbarukan, PLTB.*

PENDAHULUAN

Peningkatan permintaan energi global dan desakan untuk mengurangi dampak perubahan iklim telah menempatkan pengembangan sumber energi terbarukan sebagai prioritas utama dalam agenda pembangunan nasional dan global. Indonesia, sebagai negara kepulauan, menghadapi tantangan besar dalam memenuhi kebutuhan listrik yang terus bertumbuh sambil secara bertahap mengurangi ketergantungan pada energi fosil, terutama batubara, yang saat ini mendominasi bauran energi nasional. Ketergantungan ini tidak hanya memicu masalah lingkungan, tetapi juga kerentanan terhadap fluktuasi harga komoditas global. Oleh karena itu, diversifikasi dan optimalisasi potensi energi bersih seperti tenaga angin menjadi langkah strategis yang krusial.

Provinsi Jawa Barat, sebagai salah satu kawasan industri dan populasi terpadat di Indonesia, mengalami tekanan yang signifikan terhadap pasokan listriknya. Data menunjukkan bahwa sebagian besar pasokan listrik di Jawa Barat masih bergantung pada pembangkit berbahan bakar fosil yang berada di luar wilayahnya, yang membutuhkan transmisi jarak jauh dan menimbulkan risiko ketidakstabilan sistem. (Regional Government of West Java Province, 2019) Dalam konteks ini, Kabupaten Sukabumi, khususnya kawasan pesisir selatan dan Geopark Ciletuh, teridentifikasi memiliki potensi sumber daya angin yang menjanjikan (KEMENTRIAN ESDM, 2024a), (Pemerintah Kabupaten Sukabumi, 2024). Analisis awal dari *Global Wind Atlas* mengindikasikan bahwa wilayah ini memiliki sebaran angin terbanyak di Jawa Barat, dengan kecepatan angin rata-rata tahunan di ketinggian 100 meter mencapai 7,86 m/s, sebuah angka yang sangat mendukung kelayakan teknis pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) skala besar. (Pemerintah Republik Indonesia, 2017)

Meskipun potensi ini telah terdeteksi, kajian komprehensif yang mengintegrasikan analisis potensi angin spesifik lokasi dengan evaluasi teknis dan finansial dari teknologi turbin modern skala besar masih terbatas. Penelitian terdahulu seringkali bersifat umum atau hanya berfokus pada analisis *resource assessment* tanpa meninjau kelayakan implementasi proyek secara menyeluruh. (Twindell & Weir, 2015) Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menjembatani kesenjangan tersebut dengan menyajikan sebuah studi optimasi yang mendalam. Secara spesifik, penelitian ini menguji perbandingan kinerja teknis dari lima jenis turbin angin komersial skala besar (Siemens SWT-3.6-130, Vestas V100-2.0 MW, GE 6.6 MW, Goldwind 10 MW, dan Windey 8.5 MW) dalam skenario proyek berkapasitas 400 MW. (IRENA Renewable Cost Database, 2020) (KEMENTRIAN ESDM, 2024b) Optimasi ini tidak hanya berlandaskan pada perhitungan *Annual Energy Production (AEP)* dan *Capacity Factor (CF)* menggunakan model Distribusi Weibull, tetapi juga diperkuat dengan analisis kelayakan finansial yang ketat, meliputi *Net Present Value (NPV)*, *Internal Rate of Return (IRR)*, *Benefit-Cost Ratio (BCR)*, dan *Payback Period (PP)* selama periode proyek 25 tahun. (IRENA, 2022) Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi teknis dan bisnis yang konkret bagi pemangku kepentingan, termasuk PT PLN dan investor, guna mempercepat realisasi proyek PLTB di Kabupaten Sukabumi dan secara substansial berkontribusi pada target bauran energi terbarukan Indonesia.

Kebaruan penelitian ini terletak pada (1) pemanfaatan potensi angin di kawasan konservasi strategis Geopark Ciletuh, (2) analisis komparatif teknis dan finansial yang komprehensif terhadap lima tipe turbin angin komersial skala besar (3.6 MW hingga 10 MW) untuk sistem 400 MW, dan (3) integrasi evaluasi kelayakan finansial jangka panjang (25 tahun) dengan pertimbangan aspek konservasi lingkungan, mengidentifikasi turbin angin yang paling optimal.

Secara keseluruhan, penelitian ini bertujuan untuk (1) menganalisis potensi angin di Kabupaten Sukabumi, (2) mengevaluasi dan membandingkan performa teknis (daya terpasang, *Capacity Factor*, dan *Annual Energy Production*) dari beberapa tipe turbin untuk menentukan jenis yang paling optimal, serta (3) menganalisis kelayakan finansial proyek PLTB melalui perhitungan faktor biaya dan manfaat.

METODE

Analisis data dalam penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dan mengoptimalkan potensi energi angin yang tersedia di Kabupaten Sukabumi untuk pembangkitan listrik tenaga bayu (PLTB). Analisis dilakukan secara kuantitatif menggunakan beberapa pendekatan teknis dan pemodelan finansial. Adapun tahapan metode analisis data adalah sebagai berikut:

Analisis Potensi Angin

Analisis potensi angin menggunakan Distribusi Weibull dua parameter. Parameter bentuk (k) dan parameter skala (λ) dihitung dari data kecepatan angin rata-rata (v) dan standar deviasi (σ) menggunakan metode momen statistik. Menurut Akdağ dan Dinler (Akdağ & Dinler, 2009), Penelitian ini secara luas digunakan dalam literatur untuk mengestimasi parameter Weibull (k dan λ) menggunakan kecepatan angin rata-rata dan standar deviasi dengan rumus perhitungan sebagai berikut:

$$f(v) = \left(\frac{k}{\lambda}\right) \cdot \left(\frac{v}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{\lambda}\right)^k} \quad (1)$$

Untuk menghitung nilai θ dan c , digunakan rumus berikut:

Parameter bentuk (k):

$$k = \left(\frac{\sigma}{v}\right)^{-1.086} \quad (2)$$

Parameter skala (λ):

$$\lambda = \frac{v}{\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)} \quad (3)$$

dengan Γ adalah fungsi gamma Euler.

Setelah diperoleh nilai θ dan λ , analisis dilanjutkan dengan menghitung *Annual Energy Production* (AEP) dari turbin angin berdasarkan potensi lokal. Proses ini penting untuk menilai kecocokan teknologi turbin yang akan digunakan serta memberikan dasar bagi analisis teknis dan finansial pada tahap berikutnya.

Analisis Teknis

Analisis teknis dalam penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi performa dari lima jenis turbin angin berdasarkan karakteristik teknis utamanya, seperti daya terpasang per unit, jumlah turbin yang dibutuhkan, serta estimasi produksi energi tahunan (AEP) dari masing-masing turbin. Informasi teknis diperoleh dari dokumen resmi pabrikan serta kajian implementasi turbin di proyek-proyek PLTB yang sudah berjalan.

Salah satu parameter utama dalam penilaian performa teknis adalah *Capacity Factor* (CF), yaitu rasio antara energi listrik yang benar-benar dihasilkan oleh turbin selama satu tahun dengan total energi maksimal yang mungkin dihasilkan jika turbin beroperasi penuh sepanjang waktu dalam satu tahun kalender. Parameter ini merefleksikan seberapa optimal

turbin dalam memanfaatkan potensi angin di lokasi yang diteliti. Menurut Manwell, McGowan, dan Rogers (Manwell et al., 2009), perhitungan digunakan untuk menghitung CF adalah sebagai berikut:

$$CF = \frac{\text{Energi Aktual}}{\text{Daya terpasang} \times 8.760} \quad (4)$$

Perhitungan nilai CF memberikan gambaran tentang tingkat efisiensi kerja turbin terhadap potensi energi angin yang tersedia. Semakin tinggi nilai CF, maka semakin efektif turbin tersebut dalam menghasilkan listrik. Analisis ini selanjutnya menjadi pertimbangan dalam menentukan jenis turbin yang paling sesuai untuk digunakan dalam pembangunan PLTB di Kabupaten Sukabumi. Selanjutnya parameter penilaian untuk performa teknis adalah perhitungan produksi energi tahunan (*Annual Energy Production*). Menurut Manwell, McGowan, dan Rogers (Manwell et al., 2009), perhitungan digunakan untuk menghitung AEP adalah sebagai berikut:

$$AEP = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot \lambda^3 \cdot \Gamma\left(\frac{3}{k}\right) \cdot C_p \cdot \eta \cdot T \quad (5)$$

Perhitungan ini memungkinkan estimasi total energi yang dapat dihasilkan oleh turbin pada suatu lokasi tertentu dalam satu tahun berdasarkan variasi kecepatan angin yang terjadi. Nilai AEP yang tinggi menunjukkan bahwa turbin yang digunakan dapat secara efektif memanfaatkan potensi energi angin di wilayah studi, dan menjadi dasar yang kuat dalam pengambilan keputusan pemilihan jenis turbin dalam proyek pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)

Analisi Finansial

Analisis finansial bertujuan untuk mengukur kelayakan ekonomi dari pembangunan PLTB di Kabupaten Sukabumi dengan menggunakan lima indikator utama, yaitu:

Metode perhitungan *Net Present Value* dalam penelitian ini mengacu pada pendekatan yang dijelaskan oleh (Soota, Tarun, 2015) dan (Assagaf, n.d.), dengan rumus sebagai berikut:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+i)^t} - I_0 \quad (6)$$

Kriteria penerimaan proyek adalah $NPV > 0$, yang menunjukkan proyek layak secara finansial (Soota, Tarun, 2015)

Perhitungan rasio antara nilai manfaat (revenue dari penjualan listrik) dengan total biaya (CAPEX dan OPEX). Perhitungan benefit-cost rati yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagaimana dikemukakan oleh R.C Mishra (2005) dengan formula sebagai berikut: (Soota, Tarun, 2015) (Assagaf, 2014)

$$BCR = \frac{PVB}{PVC} \quad (7)$$

Internal Rate Return (IRR) merupakan tingkat diskonto yang membuat NPV sama dengan nol, menggambarkan potensi pengembalian proyek. Perhitungan *Internal Rate of Return* yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagaimana dikemukakan oleh (Soota, Tarun, 2015) dan (Assagaf, n.d.) dengan formula sebagai berikut: (Soota, Tarun, 2015)

$$IRR = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+IRR)^t} = 0 \quad (8)$$

Metode Payback Period digunakan untuk menentukan jangka waktu yang dibutuhkan guna mengembalikan investasi awal proyek. Pendekatan ini merupakan salah satu metode evaluasi proyek yang paling awal dan formal dalam analisis penganggaran modal, sebagaimana dijelaskan oleh R.C. Mishra (2005). Perhitungan dilakukan dengan menjumlahkan arus kas tahunan hingga setara dengan nilai investasi awal. (Soota, Tarun, 2015)

$$PP = \text{Year before full recovery} + \frac{\text{Undercover cost at start of year}}{\text{Cash flow during year}} \quad (9)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Potensi Angin Kabupaten Sukabumi

Lokasi studi dalam penelitian ini difokuskan pada wilayah Ciemas, Kabupaten Sukabumi, Provinsi Jawa Barat, Indonesia. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada hasil pemetaan potensi energi angin yang diperoleh dari platform *Global Wind Atlas* (GWA) versi 4.0, yang dikembangkan oleh *DTU Wind Energy* dan *World Bank Group* melalui ESMAP (*Energy Sector Management Assistance Program*). Data yang digunakan dalam analisis bersumber dari model numerik, dengan resolusi spasial tinggi dan validasi berbasis pengukuran meteorologis satelit serta darat.

Secara geografis, titik koordinat pusat lokasi yang dianalisis berada pada garis lintang -7.22114° dan bujur 106.522408°. Lokasi ini terletak di bagian barat daya Kabupaten Sukabumi, tepatnya di kawasan perbukitan Ciemas yang memiliki kontur dan elevasi yang mendukung pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Daerah ini masuk dalam kawasan Geopark Ciletuh yang masuk dalam kategori Situs Taman Bumi Global UNESCO (UNESCO Global Geopark). Berdasarkan data GWA pada ketinggian 100 meter di atas permukaan tanah, rata-rata kecepatan angin tahunan di titik ini tercatat sebesar 7,86 meter per detik (m/s), dengan densitas daya angin mencapai 478 W/m². Nilai tersebut menunjukkan bahwa lokasi ini termasuk dalam kategori area dengan potensi angin tinggi di Pulau Jawa, khususnya jika dibandingkan dengan rata-rata nasional yang umumnya berada di bawah 5 m/s.



Sumber: (a) Global Wind Atlas; (b) Dokumentasi pribadi
Gambar 1. Data potensi angin pada Global Wind Atlas di wilayah Kabupaten Sukabumi; (b) Dokumentasi via drone rencana lokasi PLTB Sukabumi

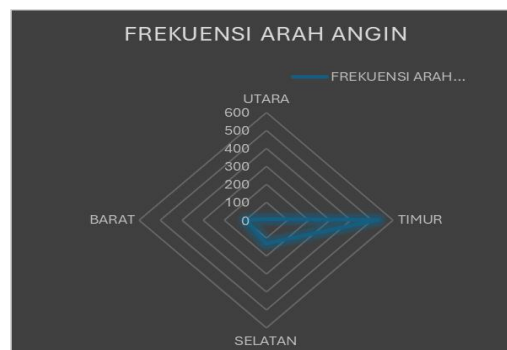
Data kecepatan angin yang dianalisis dalam penelitian ini diperoleh dari hasil pengukuran harian pada rentang waktu bulan Januari 2023 sampai dengan bulan Mei 2025 di wilayah Sukabumi, dengan titik pengamatan berada pada ketinggian 50 meter di atas permukaan tanah. Berdasarkan pengolahan data, diketahui bahwa kecepatan angin rata-rata selama periode tersebut adalah sebesar 6,29 meter per detik (m/s). Sesuai dengan U.S. Department of Energy (U.S. Department of Energy, 2003), klasifikasi Angin dengan kecepatan angin tersebut termasuk dalam kategori angin sedang yang bisa dikembangkan masuk kategori Layak bersyarat serta menunjukkan bahwa wilayah Sukabumi memiliki potensi teknis yang cukup menjanjikan untuk pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), khususnya jika menggunakan turbin yang dirancang untuk beroperasi optimal pada kecepatan angin menengah hingga rendah. Data sebaran angin kabupaten sukabumi pada periode 2 tahun dapat dilihat pada tabel 1.

**Tabel 1. Data angin pada NASA POWER Kabupaten Sukabumi periode 2 tahun
(Januari 2023 – Mei 2025)**

	Wind Direction at 50 Meters (Degrees)			Wind Speed at 50 Meters Maximum (m/s)			Wind Speed at 50 Meters Minimum (m/s)		
	2023	2024	2025	2023	2024	2025	2023	2024	2025
JAN	260.8	220.9	281.3	8.21	8.69	10.15	1.14	0.2	1.56
FEB	292.5	222	296.1	10.43	6.85	12.02	1.37	0.18	0.26
MAR	233.8	251.5	275.5	10.91	12.05	8.62	0.01	0.33	0.23
APR	199	143.3	172.9	6.65	8.2	8.19	0.2	0.23	0.14
MAY	140.9	134.4	158.6	9.36	8.27	9.5	0.87	0.26	0.05
JUN	138.7	134.7		8.67	9.3		0.64	0.09	
JUL	136.1	132.8		9.26	8.81		1.68	0.17	
AUG	135.9	135.9		8.8	9.2		2.32	2.42	
SEP	138.3	141.3		9.56	9.97		2.37	0.27	
OCT	142.2	149.1		8.32	9.22		1.85	0.61	
NOV	148.8	186.1		8.06	7.77		0.97	0.12	
DEC	159	281.7		7.17	12.2		1.39	0.62	

Sumber: data NASA POWER

Setelah dilakukan rekapitulasi data arah dan kecepatan angin di ketinggian 50 meter untuk periode tahun 2023 hingga 2025, diperoleh gambaran mengenai variasi kecepatan angin maksimum dan minimum tahunan di wilayah studi. Data ini mencerminkan dinamika angin di lokasi pengamatan dalam rentang waktu tiga tahun terakhir. Selanjutnya, untuk memahami karakteristik sebaran kecepatan angin pada tabel 1 secara lebih mendalam, dilakukan analisis statistik menggunakan pendekatan distribusi Weibull dua parameter, yaitu parameter bentuk (k) dan parameter skala (λ), yang umum digunakan dalam studi kelayakan teknis pembangkit listrik tenaga bayu. Distribusi Weibull dipilih karena kemampuannya dalam merepresentasikan variasi kecepatan angin secara probabilistik, serta memberikan informasi penting yang diperlukan untuk estimasi potensi energi angin tahunan (*Annual Energy Production/AEP*). Proses perhitungan dimulai dengan menentukan arah mata angin dengan mencari wind rose dari data arah mata angin pada ketinggian 50 meter yang didapat bahwa frekuensi arah mata angin lebih banyak mengarah menuju arah timur di wilayah Kabupaten Sukabumi yang dapat dilihat pada Gambar 2



Gambar 2. Wind rose terkait arah angin di wilayah kabupaten Sukabumi

Distribusi ini kemudian divisualisasikan dalam bentuk kurva Weibull, yang menunjukkan bahwa kecepatan angin paling sering terjadi di kisaran antara 4 hingga 6 m/s. Informasi ini sangat penting dalam tahap pemilihan jenis turbin, karena efisiensi pembangkitan listrik dari PLTB sangat bergantung pada kesesuaian karakteristik angin dengan spesifikasi teknis turbin. Dengan demikian, hasil analisis ini menjadi dasar untuk simulasi lebih lanjut terkait energi listrik tahunan yang dapat dihasilkan (*Annual Energy Production*) dan kelayakan teknis dari beberapa alternatif jenis turbin angin.

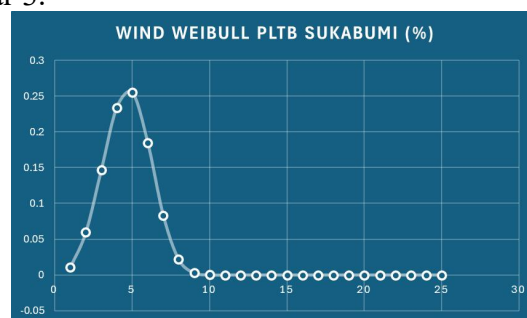
Dengan mempertimbangkan akurasi dan ketersediaan data, dalam penelitian ini digunakan metode momen statistik berbasis standar deviasi untuk menghitung parameter Weibull sebagai dasar pemodelan energi angin. Hasil perhitungan menggunakan metode statistik standart deviasi dengan media *Microfost Excel* menunjukkan bahwa nilai parameter bentuk (k) sebesar 3,518 dan parameter skala (λ) sebesar 5.898. Nilai $k > 3$ mengindikasikan bahwa variasi kecepatan angin relatif kecil dan stabil di sekitar rata-ratanya. Dari variable

nilai parameter bentuk (k) dan parameter skala (λ) dilakukan perhitungan distribusi Weibull yang dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Perhitungan distribusi Weibull kecepatan angin Kabupaten Sukabumi

FREKUENSI ANGIN (M/S)	WIND WEIBULL	WIND WEIBULL (%)
1	0.010881828	0.010881828
2	0.059608355	0.059608355
3	0.147067502	0.147067502
4	0.234332688	0.234332688
5	0.255207053	0.255207053
6	0.184838705	0.184838705
7	0.083487354	0.083487354
8	0.021591593	0.021591593
9	0.002893442	0.002893442
10	0.00017981	0.00017981
11	4.59498E-06	4.59498E-06
12	4.24752E-08	4.24752E-08
13	1.24034E-10	1.24034E-10
14	9.92622E-14	9.92622E-14
15	1.87691E-17	1.87691E-17
16	7.18713E-22	7.18713E-22
17	4.75032E-27	4.75032E-27
18	4.5944E-33	4.5944E-33
19	5.48427E-40	5.48427E-40
20	6.78079E-48	6.78079E-48
21	7.25287E-57	7.25287E-57
22	5.57925E-67	5.57925E-67
23	2.55429E-78	2.55429E-78
24	5.73411E-91	5.73411E-91
25	5.1779E-105	5.1779E-105

Sementara itu, pada tabel 4.2 didapatkan nilai λ yang mendekati rata-rata aktual mengonfirmasi bahwa distribusi Weibull cukup representatif dalam menggambarkan profil kecepatan angin di lokasi ini. Hasil perhitungan distribusi weibull tersebut didapatkan grafik wind weibull pada gambar 3.



Gambar 3. Grafik Wind Weibull berdasarkan data angin Kabupaten Sukabumi periode 2 tahun (Januari 2023 – Mei 2025)

Analisis Turbin Angin

Selanjutnya, dilakukan simulasi perhitungan AEP terhadap lima jenis turbin angin yang telah dipilih, yaitu Siemens SWT-3.6-130, Vestas V100-2.0 MW, GE Renewable Energy 6.6 MW, Goldwind GWH252-10 MW, dan Windey WD236-8.5MW.(IRENA, 2022) Kelima jenis turbin ini mewakili kategori turbin komersial modern dengan variasi diameter rotor dan kapasitas yang berbeda. Pemilihan turbin didasarkan pada ketersediaan data teknis

dan kesesuaian spesifikasi terhadap kondisi kecepatan angin di lokasi studi. Kelima jenis turbin tersebut bukan hanya representatif sebagai turbin komersial berskala besar, tetapi juga telah digunakan secara nyata dalam proyek-proyek PLTB di Indonesia dan dunia.

Turbin Siemens SWT-3.6-130 digunakan pada proyek PLTB Tolo di Kabupaten Jeneponto, Sulawesi Selatan, dengan konfigurasi 20 turbin berkapasitas total 72 MW. Sementara itu, Vestas V100-2.0 MW merupakan model yang digunakan dalam PLTB Sidrap di Kabupaten Sidenreng Rappang, Sulawesi Selatan, yang terdiri dari 30 unit turbin dengan total kapasitas 75 MW. Turbin GE Renewable Energy 6.6 MW merupakan model skala besar yang digunakan pada proyek PLTB Tanah Laut di Kalimantan Selatan, menjadikannya sebagai proyek pionir dalam pemanfaatan turbin berkapasitas tinggi di Indonesia, dengan total kapasitas 70 MW yang direncanakan dalam tahap awal.

Selanjutnya, turbin angin Goldwind GWH252-10 MW adalah turbin onshore berskala besar yang dikembangkan oleh Goldwind (Tiongkok) dan diuji coba pada tahun 2023 di lokasi daratan tinggi Provinsi Yunnan. Dengan diameter rotor mencapai 252 meter dan kapasitas 10 MW, turbin ini menjadi salah satu unit onshore terbesar yang pernah dibangun, dan dirancang khusus untuk wilayah dengan kepadatan angin sedang hingga tinggi. Meski belum digunakan secara luas secara komersial, model ini menunjukkan tren peningkatan kapasitas dan efisiensi turbin onshore di masa mendatang, terutama di negara dengan daratan luas seperti Tiongkok dan India.

Adapun turbin Windey WD236-8.5MW adalah produk dari produsen Windey Co., Ltd. yang juga berasal dari Tiongkok. Turbin ini diumumkan pada tahun 2023 sebagai bagian dari strategi pengembangan turbin onshore berkekuatan tinggi, dengan diameter rotor 236 meter dan kapasitas maksimum 8.5 MW. Turbin ini mengadopsi desain direct-drive dengan efisiensi tinggi dan ditujukan untuk pengoperasian di lokasi-lokasi onshore dengan akses logistik memadai. Meskipun pada saat ini lebih banyak digunakan dalam uji performa dan proyek demonstrasi, kapasitas dan spesifikasinya menjadikannya kandidat kuat untuk aplikasi di proyek-proyek PLTB skala besar masa depan di Asia dan kawasan lain dengan potensi angin tinggi.

Pemilihan kelima turbin ini didasarkan pada kesesuaian spesifikasi teknis terhadap karakteristik angin di lokasi penelitian serta mempertimbangkan ketersediaan data dan pengalaman implementasi di wilayah tropis Indonesia. Dengan menggunakan pendekatan distribusi Weibull dua parameter, perhitungan AEP pada masing-masing turbin dilakukan untuk mengukur seberapa optimal potensi angin di Sukabumi dapat dimanfaatkan apabila diimplementasikan salah satu dari tipe turbin tersebut. Data kapasitas turbin dan Diameter rotor kelima turbin yaitu Siemens SWT-3.6-130, Vestas V100-2.0 MW, GE Renewable Energy 6.6 MW, Goldwind GWH252-10 MW dan Windey WD236-8.5MW dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3 Data kapasitas turbin dan Diameter rotor

Tipe Turbin	Kapasitas per turbin (MW)	Diameter Rotor (m)
<i>Siemens SWT-3.6-130</i>	3.6	130
<i>Vestas V100-2.0 MW</i>	2	100
<i>GE Renewable Energy 6.6 MW</i>	6.6	158
<i>Goldwind GWH252-10 MW</i>	10	252
<i>Windey WD236-8.5MW</i>	8.5	236

Sumber: datasheet pabrikan turbin

Selanjutnya setelah dilaksanakan perhitungan bahwa didapatkan nilai AEP (Annual Energy Production) dengan kelima turbin yang dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4. Hasil perhitungan Turbin nilai AEP (Annual Energy Production)

Tipe Turbin	AEP TAHUNAN (GWh)	CF (%)
<i>Siemens SWT-3.6-130</i>	5.53	17.5%
<i>Vestas V100-2.0 MW</i>	3.27	18.7%
<i>GE Renewable Energy 6.6 MW</i>	8.17	14.1%
<i>Goldwind GWH252-10 MW</i>	20.78	23.7%
<i>Windey WD236-8.5MW</i>	18.22	24.5%

Berdasarkan hasil perhitungan, turbin Windey WD236-8.5MW memiliki AEP tahunan tertinggi kedua sebesar 18,22 GWh dan CF tertinggi di antara seluruh turbin, yaitu 24,5%. Artinya, turbin ini mampu beroperasi pada beban yang relatif tinggi dan konstan sepanjang tahun. Disusul oleh Goldwind GWH252-10 MW, dengan AEP sebesar 20,78 GWh dan CF sebesar 23,7%, yang juga menunjukkan performa sangat baik dalam konversi energi angin menjadi listrik.

Sebaliknya, turbin GE Renewable Energy 6.6 MW memiliki CF terendah yaitu 14,1%, dengan AEP sebesar 8,17 GWh per tahun. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun kapasitasnya lebih besar dibandingkan dua turbin lainnya (Siemens dan Vestas), efisiensi konversi energi angin terhadap kapasitasnya masih tergolong rendah. Sementara itu, turbin Siemens SWT-3.6-130 dan Vestas V100-2.0 MW masing-masing memiliki CF sebesar 17,5% dan 18,7%, yang menunjukkan performa menengah di antara lima turbin yang dikaji. Secara keseluruhan, turbin dengan kapasitas besar tidak selalu menghasilkan efisiensi tinggi, karena nilai CF sangat tergantung pada desain turbin, kondisi angin lokal, dan kecocokan karakteristik teknis terhadap lokasi pemasangan. Oleh karena itu, pemilihan turbin dalam studi kelayakan tidak hanya didasarkan pada kapasitas nominal, tetapi juga mempertimbangkan nilai AEP dan CF.

Analisis Finansial Pembangunan PLTB Sukabumi

Analisis finansial dalam studi ini dilakukan untuk mengevaluasi kelayakan finansial pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) di Kabupaten Sukabumi dengan mempertimbangkan komponen biaya investasi (CAPEX) dan biaya operasional tahunan (OPEX). Estimasi nilai CAPEX untuk masing-masing jenis turbin angin yang dianalisis, yakni Siemens SWT-3.6-130, Vestas V100-2.0 MW, GE 6.6 MW, Goldwind GWH252-10 MW, dan Windey WD236-8.5 MW, diambil berdasarkan harga pasar dan data referensi aktual dari proyek serupa. Lokasi implementasi teknologi tersebut mencakup proyek PLTB yang telah dibangun di Jenepono, Sidrap, dan Tanah Laut, serta mengacu pada referensi teknis dan biaya dari laporan *Renewable Power Generation Costs* (IRENA, 2022).

Sementara itu, nilai OPEX tahunan untuk masing-masing turbin diperoleh dari laporan “*Benchmarking Wind Power Operating Costs in the United States*” yang disusun oleh Wiser et al. (2019), yang menyatakan bahwa rata-rata biaya operasional dan pemeliharaan (O&M) tahunan untuk turbin angin onshore berkisar antara USD 33 hingga 59 per kW per tahun, atau setara dengan sekitar 2,2% hingga 3,9% dari nilai CAPEX tahunan, tergantung pada usia dan kapasitas turbin. (Wiser et al., 2019) Asumsi ini digunakan sebagai dasar dalam perhitungan indikator kelayakan finansial seperti Net Present Value (NPV), Benefit-Cost Ratio (BCR), Internal Rate of Return (IRR), dan Payback Period (PP). Nilai Capex dan OPEX dapat dilihat pada table 5.

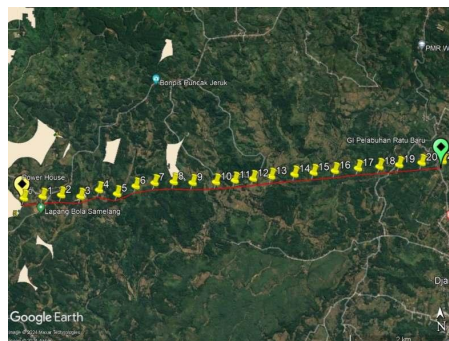
Tabel 5 Nilai CAPEX dan OPEX masing-masing turbin dengan referensi

Turbin Angin	HARGA per MW (jt Rupiah)	Referensi
Siemens SWT-3.6-130	24,000	PLTB Jeneponto
Vestas V100-2.0 MW	22,400	PLTB Sidrap
GE 6.6 MW	25,600	PLTB Tanah Laut
Goldwind GWH252-10 MW	27,440	IRENA 2022
Windey WD236-8.5MW	27,440	IRENA 2022

Jaringan Kelistrikan (*Grid System*) PLTB Kabupaten Sukabumi

Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) di wilayah Sukabumi tidak hanya membutuhkan kajian terhadap potensi energi dan performa teknologi, tetapi juga harus mempertimbangkan kesiapan dan kapasitas sistem jaringan kelistrikan (grid) yang ada. Agar energi listrik dari turbin angin dapat tersalurkan secara efektif ke jaringan distribusi, diperlukan pemetaan menyeluruh terhadap struktur jaringan lokal, titik sambung potensial, serta kemampuan infrastruktur untuk menerima beban tambahan. Oleh sebab itu, bagian ini membahas bagaimana sistem jaringan berperan penting dalam keberhasilan integrasi PLTB ke dalam sistem tenaga listrik nasional.

Dalam Perencana PLTB Sukabumi tersebut, pada Laporan Kementerian ESDM pengembangan PLTB Sukabumi dijelaskan bahwa PLTB Sukabumi akan diintegrasikan dengan Grid System 150 kV melalui GI 150 kV Pelabuhan Ratu Baru atau Jampang Kulon. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4 yang menunjukkan skema pembangunan transmisi dari GI PLTB ke arah Grid System di GI Pelabuhan Ratu Baru.(KEMENTRIAN ESDM, 2024b)



Gambar 4. Representasi skematis posisi saluran transmisi udara antara pembangkit listrik dan gardu induk Pelabuhan Ratu Baru

Kelayakan Turbin Angin dan Finansial

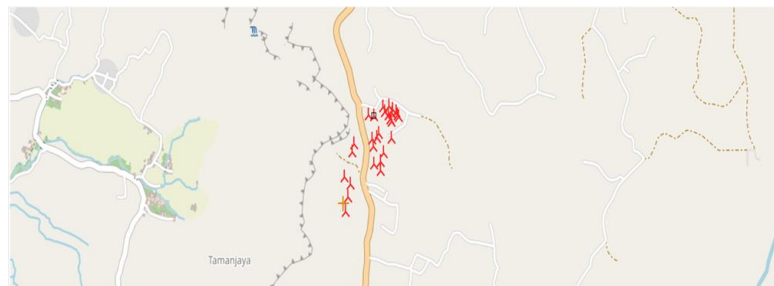
Dalam rangka mendukung perencanaan pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) di daerah Sukabumi, telah dilakukan kajian komprehensif terhadap aspek teknis dan ekonomis dari lima alternatif turbin angin yang dianalisis. Kajian ini melibatkan penilaian terhadap performa teknis melalui estimasi produksi energi tahunan (Annual Energy Production/AEP), serta evaluasi kelayakan finansial menggunakan indikator-indikator utama seperti Net Present Value (NPV), Benefit-Cost Ratio (BCR), Internal Rate of Return (IRR) dan Payback Period (PP). Tujuan dari analisis ini adalah untuk menentukan pilihan teknologi turbin yang paling optimal, tidak hanya dalam hal efisiensi konversi energi, tetapi juga dari sisi kelayakan investasi dalam jangka panjang. Temuan dari evaluasi ini menjadi dasar rekomendasi pemilihan jenis turbin yang paling sesuai untuk mendukung pengembangan PLTB di wilayah studi. Kesimpulan kelayakan teknis dan Ekonomi dapat dilihat pada tabel 6.

Tabel 6. Kelayakan Turbin angin dan Finansial PLTB Sukabumi

No	Tipe Turbin	Jumlah Turbin (400 MW)	AEP per Turbin (GWh)	Capacity Factor (%)	NPV (jt Rp)	BCR	IRR	PP (Tahun)
1	Siemens SWT-3.6-130	112	5.53	17.5%	-1,883,160	0.80	6.36%	>25 tahun
2	Vestas V100-2.0 MW	200	3.27	18.7%	-347,588	0.96	10.04%	>25 tahun
3	GE Renewable Energy 6.6 MW	61	8.17	14.1%	-4,744,983	1.81	2.22%	>25 tahun
4	Goldwind GWH252-10 MW	40	20.78	23.7%	81,478	2.27	9.10%	24 tahun
5	Windey WD236-8.5 MW	48	18.22	24.5%	536,247	3.59	9.63%	20 tahun

Berdasarkan hasil analisis, Windey WD236-8.5 MW menempati peringkat tertinggi dalam aspek kelayakan. Turbin ini hanya memerlukan 48 unit untuk mencapai kapasitas total 400 MW, dengan AEP sebesar 18,22 GWh per unit dan capacity factor sebesar 24,5%. Kinerja teknis ini menunjukkan efisiensi konversi energi yang tinggi dari potensi angin yang tersedia di lokasi studi. Dari sisi finansial, Windey mencatatkan performa terbaik dengan NPV sebesar Rp 536.247.000.000,-, BCR sebesar 3,59, dan IRR sebesar 9,63%, serta waktu pengembalian investasi yang paling cepat yaitu dalam 20 tahun. Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa proyek dengan menggunakan turbin Windey tidak hanya layak secara ekonomi, tetapi juga menguntungkan dalam jangka panjang. Sebagai alternatif, Goldwind GWH252-10 MW juga menunjukkan kinerja yang baik dengan capacity factor sebesar 23,7% dan AEP per unit mencapai 20,78 GWh. Turbin ini hanya memerlukan 40 unit, dan menghasilkan NPV sebesar Rp 81.478.000.000,-, BCR 2,27, serta IRR 9,10%, dengan Payback Period selama 24 tahun. Meskipun masih layak, nilai keekonomian Goldwind lebih rendah dibandingkan Windey.

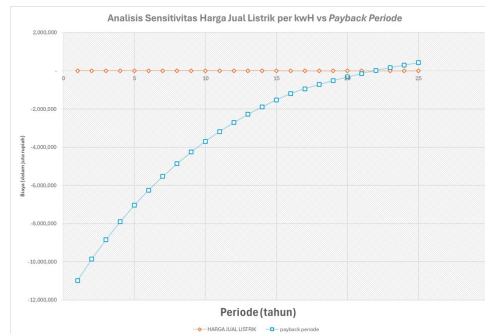
Dengan mempertimbangkan kombinasi antara efisiensi teknis dan profitabilitas finansial, dapat disimpulkan bahwa *Windey WD236-8.5 MW* merupakan pilihan paling layak dan optimal untuk proyek PLTB Sukabumi. Selain memberikan hasil yang paling menguntungkan secara ekonomi, jumlah turbin yang relatif sedikit juga mendukung pengurangan dampak visual dan lingkungan yang sesuai dengan prinsip pembangunan berkelanjutan di kawasan konservasi seperti Geopark Ciletuh. Pemilihan lokasi penempatan turbin angin diilustrasikan pada gambar 5 yang dilakukan secara strategis dengan mempertimbangkan beberapa aspek penting. Secara teknis, lokasi ini berada di wilayah perbukitan terbuka yang memiliki potensi kecepatan angin tinggi dan stabil, serta minim hambatan vegetasi tinggi, sehingga sangat ideal untuk pemasangan turbin angin. Selain itu, lokasi ini relatif mudah diakses melalui jalan utama, sehingga mendukung proses logistik, konstruksi, dan operasional jangka panjang.



Gambar 5. Ilustrasi Pemasangan Turbin Angin di pinggir area Geopark Ciletuh

Analisis Sensitivitas

Dalam studi ini, analisis sensitivitas difokuskan pada dua parameter utama, yaitu harga jual listrik per kWh dan Payback Period (PP). Penetapan fokus ini dilakukan karena kedua variabel tersebut memiliki pengaruh signifikan terhadap kelayakan investasi, harga jual listrik secara langsung mempengaruhi besarnya pendapatan tahunan proyek, sedangkan Payback Period sering dijadikan tolok ukur oleh investor untuk menilai risiko dan daya tarik investasi. Semakin pendek periode pengembalian modal, semakin menarik proyek tersebut untuk direalisasikan secara komersial.



Gambar 5. Grafik Analisis sensitivitas harga jual listrik terhadap *payback period*

Identifikasi Potensi Risiko PLTB Sukabumi

Pada bagian ini, dibahas berbagai kemungkinan risiko yang dapat timbul selama fase konstruksi, operasional, hingga pemeliharaan PLTB. Risiko tersebut mencakup aspek teknis, ekonomi, sosial, hingga lingkungan. Setiap risiko juga disertai dengan strategi mitigasi yang bertujuan untuk mengurangi dampak dan menjaga agar proyek tetap berjalan secara optimal sesuai dengan tujuan pembangunan energi bersih dan berkelanjutan. Detail Identifikasi potensi risiko PLTB Sukabumi dapat dilihat pada tabel 7.

Tabel 7. Identifikasi potensi risiko PLTB Sukabumi

Kategori Risiko	Potensi Risiko	Dampak yang mungkin terjadi	Strategi mitigasi
Teknis	Kerusakan turbin akibat kecepatan angin ekstrem	Produksi berhenti, kerugian energi	Desain pondasi dan turbin sesuai standar IEC, sistem kontrol otomatis cut-out
Teknis	Gangguan pada sistem grid saat integrasi listrik	Gangguan stabilitas tegangan/frekuensi, risiko black-out	Gunakan sistem inverter dan SCADA canggih, lakukan studi impact sistem grid
Finansial	Fluktuasi nilai tukar dan suku bunga	Kenaikan biaya impor komponen, beban bunga meningkat	Pembiayaan campuran (multilateral/dalam negeri)
Finansial	Harga jual listrik (PPA) lebih rendah dari proyeksi	Pendapatan proyek tidak mencukupi untuk menutup investasi	Negosiasi tarif keekonomian sesuai Perpres 112/2022, Optimasi OPEX
Lingkungan	Gangguan terhadap satwa (misalnya burung kelelawar)	Penurunan keanekaragaman hayati lokal	Lakukan studi Amdal, pilih lokasi jauh dari jalur migrasi satwa
Lingkungan	Polusi suara dan visual	Keluhan masyarakat, penurunan nilai estetika	Penempatan turbin di zona jauh pemukiman, konsultasi publik
Sosial	Penolakan masyarakat lokal	Tertundanya pembangunan, konflik sosial	Sosialisasi sejak awal, mekanisme benefit sharing untuk

						masyarakat
Operasional	Keterlambatan komponen turbin	pasokan	Proyek molor, biaya meningkat			Gunakan vendor lokal bila memungkinkan, kontrak suplai jangka panjang
Operasional	Keterbatasan dalam operasionalisasi turbin	SDM lokal	Ketergantungan pada teknisi luar daerah			Pelatihan teknis lokal, kerja sama dengan institusi pendidikan setempat
Perizinan dan Regulasi	Perubahan kebijakan terbarukan nasional	energi	Ketidakpastian proyek jangka panjang			Ikut serta dalam forum kebijakan, kaji ulang risiko regulasi secara berkala

Berbagai risiko telah diidentifikasi dalam pelaksanaan PLTB Sukabumi, mulai dari risiko teknis seperti kerusakan turbin akibat angin kencang, hingga risiko sosial seperti potensi penolakan masyarakat lokal. Untuk menanggulangi hal ini, diterapkan strategi mitigasi seperti penggunaan sistem kontrol otomatis, pelatihan SDM lokal, hingga sosialisasi kepada masyarakat. Risiko lingkungan juga diperhitungkan, seperti dampak terhadap satwa liar dan potensi gangguan visual yang ditangani dengan pemilihan lokasi yang tepat dan studi lingkungan yang mendalam. Risiko finansial ditangani dengan manajemen nilai tukar dan skema pembiayaan, sementara risiko regulasi diantisipasi melalui partisipasi dalam diskusi kebijakan. Dengan mitigasi yang tepat, proyek ini diharapkan dapat berjalan efektif dan berkelanjutan. (Pariaman et al., 2017)

KESIMPULAN

Kesimpulan disusun berdasarkan analisis data kecepatan angin, pemodelan distribusi Weibull, estimasi produksi energi tahunan, serta evaluasi kelayakan finansial dari beberapa jenis turbin angin. Dengan menyatukan seluruh temuan dari bab-bab sebelumnya, bagian ini bertujuan untuk memberikan jawaban atas tujuan penelitian dan menjadi dasar dalam merumuskan rekomendasi teknis yang dapat diimplementasikan dalam pengembangan proyek PLTB. Adapun kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Kabupaten Sukabumi memiliki potensi energi angin yang cukup signifikan untuk dikembangkan menjadi sumber energi terbarukan. Berdasarkan analisis distribusi Weibull dengan parameter $k = 3,518$ dan $\lambda = 5,898$ m/s, diperoleh rata-rata kecepatan angin yang memungkinkan pembangkitan listrik secara kontinu. Hal ini menunjukkan bahwa wilayah ini memenuhi syarat minimum untuk pendirian turbin angin berskala besar, dengan potensi daya output yang kompetitif.
2. Dari aspek teknis, perbandingan lima tipe turbin menunjukkan bahwa Windey WD236-8.5 MW merupakan turbin yang paling efisien, dengan capacity factor tertinggi sebesar 24,5% dan AEP per turbin sebesar 18,22 GWh, sehingga hanya diperlukan 48 unit turbin untuk mencapai kapasitas total 400 MW. Di sisi lain, turbin Siemens SWT-3.6-130 memerlukan hingga 112 unit turbin karena kapasitas per unit yang lebih kecil. Lokasi pembangunan di Geopark Ciletuh juga menuntut pemilihan teknologi yang sesuai dengan standar konservasi dan rendah dampak lingkungan, dan turbin Windey memberikan performa optimal dalam konteks ini.
3. Hasil analisis kelayakan finansial menunjukkan bahwa proyek PLTB Sukabumi layak untuk direalisasikan. Turbin Windey WD236-8.5 MW mencatat performa terbaik dari segi finansial dengan NPV sebesar Rp 536.247.000.000,-, BCR sebesar 3,59, dan IRR sebesar 9,63%, dan Payback Period tercepat yaitu 20 tahun. Hal ini menjadikan opsi Windey tidak hanya unggul secara teknis, tetapi juga menguntungkan secara ekonomi dibandingkan dengan alternatif lainnya seperti Goldwin, Vestas, Siemens, maupun GE.

REFERENSI

- Akdağ, S. A., & Dinler, A. (2009). A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications. *Energy Conversion and Management*, 50(7), 1761–1766. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.03.020>
- Assagaf, A. (n.d.). *Investment Analysis Which Relevance Measurement for Government Company (BUMN) – Case of Coal Power Generation.pdf*. 1–11.
- Assagaf, A. (2014). Influence Policy and Fitness State Electricity Company (PLN) Investment Business Generation. *Influence Policy and Fitness State Electricity Company (PLN) Investment Business Generation*, 3(5), 234–242.
- IRENA. (2022). Renewable Generation Costs in 2022. In *International Renewable Energy Agency*.
- IRENA Renewable Cost Database. (2020). Renewable Power Generation Costs in 2020. In *International Renewable Energy Agency*.
- KEMENTRIAN ESDM, R. I. (2024a). *BUKLET 8 Lokasi PLTB di Jawa dan Sumatera.pdf*.
- KEMENTRIAN ESDM, R. I. (2024b). *Pengembangan Energi Angin Proyek 400 MW di Ciracap, Jawa Barat*.
- Manwell, J. F., Mcgowan, J. G., & Rogers, A. . (2009). Wind Energy Explained. *Encyclopedia of the U.S. Government and the Environment: History, Policy, and Politics [2 Volumes]*, 2, V2-828-V2-829. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4189-8_5
- Pariaman, H., Garniwa, I., Surjandari, I., & Sugiarto, B. (2017). Availability analysis of the integrated maintenance technique based on reliability, risk, and condition in power plants. *International Journal of Technology*, 8(3), 497–507. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v8i3.4867>
- Pemerintah Kabupaten Sukabumi. (2024). Rencana Kerja Pemerintah Daerah Kabupaten Sukabumi 2024. *Suparyanto Dan Rosad (2015, 5(3), 248–253*.
- Pemerintah Republik Indonesia. (2017). RENCANA UMUM ENERGI NASIONAL 2017. In *Notes and Queries*. <https://doi.org/10.1093/nq/s7-XI.287.508-b>
- Regional Government of West Java Province. (2019). *Regional Regulation of West Java Province Number 2 of 2019 concerning the Regional Energy General Plan of West Java Province 2018-2050*.
- Soota, Tarun, R. C. M. (2015). Modern Project Management. In *Proceedings of the National Academy of Sciences* (Vol. 3, Issue 1). <http://dx.doi.org/10.1016/j.bpj.2015.06.056%0Ahttps://academic.oup.com/bioinformatics/article-abstract/34/13/2201/4852827%0Ainternal-pdf://semisupervised-3254828305/semisupervised.ppt%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.str.2013.02.005%0Ahttp://dx.doi.org/10.10>
- Twindell, J., & Weir, T. (2015). Renewable Energy Resources. In *Evaluation of the Built Environment for Sustainability*. <https://doi.org/10.4324/9780203362426>
- U.S. Department of Energy. (2003). Wind Energy Research. *TEACHING Exceptional Children*, 24(1), 5–5. <https://doi.org/10.1177/004005999102400102>
- Wiser, R., Bolinger, M., & Lantz, E. (2019). *Benchmarking Wind Power Operating Costs in the United States : January*.