

Pemilihan Turbin Angin Skala Kecil Berdasarkan Analisis Potensi Energi Angin Menggunakan Windographer

Dwi Risdianto¹, Nurry Widya Hesty¹, Toha Zaky¹, Rudi Purwo Wijayanto^{1,2}, Agustina Putri Mayasari¹, Ario Witjakso¹

¹ Pusat Riset Konversi dan Konservasi Energi, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Jalan Raya Puspiptek, Kota Tangerang Selatan, Banten 15310, Indonesia

² Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi Indonesia, Jalan Raya Puspiptek, Kota Tangerang Selatan, Banten 15310, Indonesia

[Diserahkan: 28 Juli 2023, Direvisi: 27 September 2023, Diterima: 8 Oktober 2024]

Penulis Korespondensi: Nurry Widya Hesty (nurr010@brin.go.id)

INTISARI — Energi angin merupakan sumber energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit energi listrik di pulau-pulau kecil yang tidak terkoneksi jaringan PLN. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan estimasi energi listrik yang dihasilkan oleh turbin angin skala kecil menggunakan Windographer berdasarkan analisis potensi energi angin menggunakan distribusi Weibull. Penelitian ini menganalisis pemilihan turbin angin skala kecil berdasarkan potensi energi angin dan kebutuhan energi listrik di Pulau Miangas, Sulawesi Utara. Estimasi produksi energi listrik dilakukan berdasarkan distribusi frekuensi kecepatan angin selama periode 2011-2020 dengan data kecepatan angin per jam pada ketinggian 50 m. Analisis potensi energi angin ini meliputi analisis kecepatan angin rata-rata, distribusi arah angin, distribusi Weibull, densitas daya angin rata-rata, dan estimasi produksi energi listrik per tahun. Hasil analisis dan simulasi menunjukkan bahwa Pulau Miangas memiliki kecepatan angin rata-rata tahunan 5,5 m/s dengan distribusi frekuensi kecepatan angin rata-rata 15% dan densitas daya angin rata-rata 160,9 W/m². Potensi angin dari hasil analisis tersebut disimulasikan menggunakan turbin angin skala kecil berkapasitas 50 kW, 35 kW, dan 10 kW secara berurutan dapat menghasilkan energi listrik sebesar 98.434,49 kWh/tahun, 75.738,78 kWh/tahun, dan 15.875,48 kWh/tahun. Ditinjau dari segi keseimbangan *supply-demand* energi, turbin angin kapasitas 35 kW menjadi pilihan yang optimal untuk mensuplai kebutuhan energi listrik di pulau Miangas, yaitu sebesar 25.550 kWh/tahun.

KATA KUNCI — Energi Angin, Kecepatan Angin, Pulau Miangas, Turbin Angin, Windographer.

I. PENDAHULUAN

Dengan adanya Kesepakatan Paris (Paris Agreement) tahun 2015 tentang perubahan iklim, usaha untuk mengurangi dampak perubahan iklim yang disebabkan oleh aktivitas manusia mengalami peningkatan yang signifikan. Salah satu peluang utama dalam mengatasi perubahan iklim global adalah meningkatkan pemanfaatan sumber energi terbarukan dan melakukan transformasi mendalam terhadap sistem energi global yang ada [1]. Pemanfaatan sumber energi terbarukan di seluruh dunia makin meningkat, sejalan dengan komitmen untuk mengurangi penggunaan bahan bakar fosil yang berdampak pada pemanasan global serta emisi gas rumah kaca [2]. Energi angin telah menjadi salah satu pilihan energi terbarukan yang paling dominan untuk mengurangi dampak negatif energi terhadap polutan antropogenik di atmosfer [3], [4]. Lebih lanjut, studi kasus untuk pulau yang jauh dari jaringan listrik utama menunjukkan bahwa penggunaan energi angin untuk pembangkit listrik sangat kompetitif dibandingkan dengan penggunaan energi fosil [5].

Referensi [6] menyatakan bahwa ada lebih dari 85.000 pulau di dunia, dengan sekitar 13% dari pulau-pulau tersebut dihuni oleh sekitar 740 juta orang. Selama beberapa dekade terakhir, pulau-pulau terpencil menjadi bagian penting dalam perancangan lokasi dengan 100% sumber energi terbarukan. Dampak perubahan iklim dan konsekuensi finansial dari pasokan listrik berbasis bahan bakar fosil dirasakan di banyak pulau kecil. Oleh karena itu, pulau-pulau kecil digunakan sebagai model untuk menilai tingkat penetrasi energi terbarukan dan percontohan sistem energi cerdas (*smart energy systems*). Kepulauan Sams dan Faroe merupakan daerah di Finlandia yang menggunakan 100% sumber energi terbarukan

[7]. Di Pasifik, Pulau Ta'u dan Hawaii memimpin Amerika Serikat dalam perjalanan menuju energi terbarukan 100% [8]. Kepulauan Galapagos menjadi standar bagi Amerika Latin dalam mencapai sistem energi terbarukan (*renewable energy system*, RES) 100% [9]. Pulau Jeju di Korea Selatan menjadi lokasi laboratorium uji coba RES 100% dan jaringan sistem energi cerdas [10]. Hal tersebut menjadi pendorong bagi Indonesia untuk ikut berperan aktif dalam pembangunan pembangkit listrik yang bersumber energi terbarukan di daerah terpencil dan pulau-pulau kecil.

Penelitian ini mengambil studi kasus di Pulau Miangas. Pulau Miangas merupakan pulau kecil terluar dengan luas wilayah 3,15 km² yang berbatasan dengan negara Filipina. Pulau Miangas terletak pada 05^o 33' 20.8'' LU dan 127^o 09' 6.8'' BT, yang berjarak 521 km dari ibu kota Provinsi Sulawesi Utara dan berada di antara laut Sulawesi dan laut Filipina. Pulau ini memiliki potensi hembusan angin kencang sepanjang hari. Saat ini, suplai energi listrik bagi masyarakat di Pulau Miangas dipasok dari pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD) dengan kapasitas 2 × 40 kW yang melayani 234 pelanggan rumah tangga dengan total konsumsi energi listrik 70 kWh per hari atau setara dengan 25.550 kWh per tahun. Cuaca ekstrem dan gelombang laut yang besar pada musim penghujan (November-April) membahayakan kapal pengangkut BBM yang bersandar di dermaga Pulau Miangas. Kondisi ini menyebabkan sering terjadinya keterlambatan pasokan bahan bakar minyak (BBM) untuk PLTD. Akibatnya, pasokan energi listrik bagi masyarakat menjadi terganggu.

Oleh karena itu, perlu adanya pembangkit energi listrik alternatif yang bersumber dari energi terbarukan, seperti energi angin, untuk menjamin kontinuitas penyediaan energi listrik

bagi masyarakat Pulau Miangas. Kondisi Pulau Miangas yang berupa pulau kecil yang jauh dari jaringan listrik PLN Sulawesi menyebabkan penyediaan energi listrik tersentralisasi sangat sulit dilakukan. Alih-alih membangun jaringan kelistrikan dari Sulawesi, penyediaan energi mandiri di Pulau Miangas menjadi suatu keharusan dengan pemanfaatan potensi energi terbarukan yang ada. Energi angin dapat menjadi alternatif pemenuhan kebutuhan energi karena bersifat terdesentralisasi dan dapat memenuhi kebutuhan energi listrik secara lokal, serta berada di dekat sisi beban yang membutuhkan energi dengan skala relatif kecil [11].

Namun, fluktuasi yang tinggi dari sumber energi angin yang bersifat intermiten menimbulkan tantangan dalam mencapai keseimbangan antara *supply-demand* [12]. Sejumlah penelitian telah dilakukan untuk menganalisis kemungkinan interkoneksi, pengelolaan permintaan, dan penyimpanan energi listrik guna mengatasi ketidakstabilan tersebut [13], [14]. Ketidakstabilan daya dapat mengakibatkan terjadinya fluktuasi tegangan atau *dip voltage* pada jaringan listrik, meskipun hanya beberapa siklus gelombang, sehingga dapat menyebabkan kerusakan pada konverter sisi rotor pada turbin angin [15]. Untuk menghadapi tantangan berupa sifat intermiten angin, diperlukan penilaian potensi angin pada skala waktu per jam atau lebih tinggi. Hal ini bertujuan untuk memperoleh pemahaman yang mendalam mengenai karakteristik sumber energi angin, termasuk tingkat keandalannya serta variabilitas yang terkait dengan perubahan musim.

Pola angin di suatu tempat dapat berubah dari tahun ke tahun dalam rentang 10% hingga 30% ketika terjadi perubahan hari ataupun musim [16]. Untuk menghitung dan menganalisis potensi energi angin, diperlukan data kecepatan angin, arah, dan besaran daya angin rata-rata tahunan. Berdasarkan [17], untuk menghitung kecepatan angin rata-rata dengan tepat diperlukan data kecepatan angin selama sepuluh tahun. Penelitian terkait analisis potensi angin sudah banyak dilaksanakan di berbagai negara, seperti di Pakistan [18], Singapura [19], Malaysia [20], China [21], Turki [22], India [23], Korea Selatan [24], dan Iran [25]. Di Indonesia, penelitian potensi energi angin telah dilakukan di beberapa lokasi [26], [27], [28]. Namun, penelitian potensi energi angin untuk pembangkit energi listrik di pulau-pulau kecil seperti Miangas masih belum banyak dilakukan.

Rentang kecepatan angin antara 3-25 m/s umumnya dianggap ideal untuk mengonversi angin menjadi energi listrik [29]. Selain distribusi kecepatan angin [30], arah angin juga merupakan aspek penting yang memengaruhi energi angin yang dihasilkan [31]. Oleh karena itu, penilaian menyeluruh terhadap karakteristik angin sangat penting dilakukan untuk memperkirakan potensi energi angin dan memilih sistem konversi energi angin yang optimal [32], [33]. Analisis potensi energi angin yang akurat sangat penting untuk keberhasilan implementasi pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB), terutama dalam perancangan dan pemilihan turbin angin yang tepat [34].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi energi angin di Pulau Miangas dan melakukan perhitungan besarnya energi listrik yang dihasilkan oleh turbin angin skala kecil menggunakan perangkat lunak Windographer. Turbin angin skala kecil yang digunakan memiliki kapasitas 50 kW, 35 kW, dan 10 kW. Pemilihan variasi kapasitas tersebut dilakukan berdasarkan ketersediaan kapasitas turbin angin skala kecil di pasaran dan konsumsi energi listrik di Pulau Miangas. Hasil estimasi produksi energi listrik turbin angin skala kecil ini diharapkan dapat memberikan informasi pemilihan turbin

angin yang tepat secara cepat berdasarkan keseimbangan *supply-demand* energi dan dapat menjadi data dukung kebijakan pengembangan PLTB di Pulau Miangas.

II. BAHAN DAN METODOLOGI

A. ANALISIS POTENSI ENERGI ANGIN

Untuk mengetahui potensi energi angin, pada penelitian ini digunakan data pengukuran angin selama sepuluh tahun (2011-2020) dengan ketinggian 50 m di atas permukaan tanah dengan interval waktu 60 menit. Data angin yang digunakan merupakan hasil pengamatan satelit penginderaan jauh menggunakan model atmosfer dan asimilasi data meteorologi yang direpresentasikan oleh *grid* global dengan resolusi spasial 0,5° lintang dan 0,5° bujur. Data angin diperoleh dari NASA Langley Research Center (LaRC) kemudian diolah menggunakan perangkat lunak Windographer untuk mengetahui arah dan kecepatan angin rata-rata, distribusi frekuensi kecepatan angin per tahun, dan densitas daya angin dengan metode analisis statistik.

Distribusi frekuensi kecepatan angin ditampilkan dalam distribusi Weibull dalam periode bulanan dan tahunan, dengan memasukkan (1), (2) dan (3) [35].

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

dengan v adalah kecepatan angin rata-rata (m/s), Γ merupakan fungsi gamma (x), c adalah parameter skala (m/s), dan k merupakan parameter bentuk tanpa dimensi.

Distribusi Weibull dihitung menggunakan fungsi probabilitas densitas (2) dan fungsi distribusi kumulatif (3).

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{(k-1)} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (2)$$

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

dengan $f(v)$ adalah fungsi probabilitas densitas, $F(v)$ adalah fungsi distribusi kumulatif, c merupakan parameter skala (m/s), k adalah parameter bentuk tanpa dimensi, dan v adalah kecepatan angin (m/s).

Selanjutnya, densitas daya angin dihitung berdasarkan distribusi Weibull menggunakan (4) [36].

$$P = \int_0^{\infty} \frac{p(v)}{A} f(v) = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (4)$$

dengan P adalah densitas daya angin per area sapuan sudu rotor turbin angin dengan arah laju angin tegak lurus terhadap area sapuan sudu rotor turbin (W/m^2), ρ merupakan rapat massa udara (1.225 kg/m^3), c adalah parameter skala (m/s), dan k yaitu parameter bentuk tanpa dimensi.

B. ESTIMASI ENERGI LISTRIK YANG DIHASILKAN TURBIN ANGIN SKALA KECIL

Energi listrik yang dihasilkan turbin angin merupakan konversi energi kinetik angin menjadi energi mekanik yang memutar generator, sehingga menghasilkan energi listrik. Dengan demikian, besarnya energi listrik yang dihasilkan oleh turbin angin dipengaruhi oleh kecepatan angin dan kapasitas daya turbin angin. Kapasitas daya listrik yang dihasilkan turbin angin dihitung menggunakan (5) [37].

$$P_{WT_e}(v) = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \eta_m \eta_G \quad (5)$$

dengan $P_{WT_e}(v)$ adalah daya listrik yang dihasilkan turbin angin pada kecepatan angin tertentu (W), ρ adalah rapat massa udara (1.225 kg/m^3), A adalah luas area sapuan sudu turbin

angin (m^2), V merupakan kecepatan angin (m/s), C_p adalah koefisien daya turbin angin, η_m adalah efisiensi sistem mekanik, dan η_G merupakan efisiensi generator.

Kapasitas daya listrik turbin angin merupakan daya listrik optimum yang dihasilkan turbin angin pada kecepatan angin rancangan (V_{rated}), sehingga daya listrik yang dihasilkan turbin angin dipengaruhi oleh karakteristik turbin angin berupa kurva daya yang ditentukan oleh produsen. Kurva daya turbin angin dibatasi dengan kecepatan angin *cut in*, kecepatan angin *rated*, dan kecepatan angin *cut out*, seperti pada (6).

$$P_{WT_e} = \begin{cases} 0 & v < v_{cut\ in} \\ \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \eta_m \eta_G & v_{cut\ in} \leq v \leq v_{rated} \\ 0 & v > v_{cut\ out} \end{cases} \quad (6)$$

dengan $V_{cut\ in}$ merupakan kecepatan angin awal turbin angin menghasilkan daya listrik (m/s), V_{rated} adalah kecepatan angin optimum saat turbin angin menghasilkan daya listrik maksimum (m/s), dan $V_{cut\ out}$ adalah kecepatan angin maksimum untuk turbin angin berhenti dalam menghasilkan daya listrik (m/s).

Setelah kapasitas daya turbin angin dan distribusi kecepatan angin diketahui, energi listrik yang dihasilkan turbin angin per tahun dapat dihitung dengan (7).

$$E_{WT} = \sum_i^0 P(V_i) \times f(V_i) \Delta V \quad (7)$$

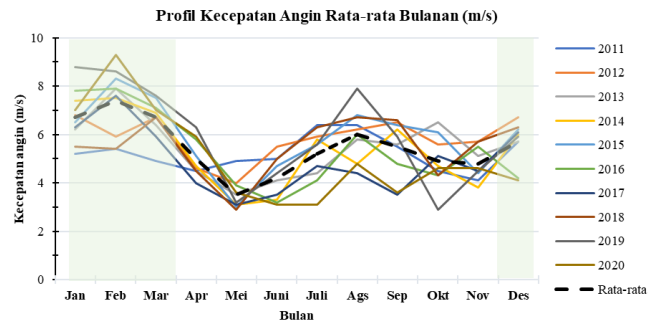
dengan E_{WT} adalah energi listrik yang dihasilkan turbin angin (kWh), $P(V_i)$ merupakan kurva daya listrik turbin angin pada kecepatan angin tertentu (W), dan $f(V_i) \Delta V$ ialah probabilitas distribusi frekuensi kecepatan angin tertentu per tahun selama 8.760 jam (%).

Penelitian ini menggunakan skenario penggunaan turbin angin sumbu horizontal skala kecil kapasitas 50 kW merek Seaforth Energy AOC15/50 dengan karakteristik tinggi *hub* 30 m, diameter rotor 15 m, kecepatan angin *cut in* 4,6 m/s, kecepatan angin *rated* 11 m/s, dan kecepatan angin *cut out* 22,4 m/s. Digunakan juga turbin angin 35 kW merek Endurance G-3120 dengan karakteristik tinggi *hub* 30 m, diameter rotor 19 m, kecepatan angin *cut in* 3,5 m/s, kecepatan angin *rated* 11 m/s, dan kecepatan angin *cut out* 25 m/s; serta turbin angin 10 kW merek Bergey Excel S dengan karakteristik tinggi *hub* 18 m, diameter rotor 7 m, kecepatan angin *cut in* 2,5 m/s, kecepatan angin *rated* 11 m/s, dan kecepatan angin *cut out* 20 m/s yang tersedia di pasaran. Selain faktor ketersediaan turbin angin di pasaran, pemilihan turbin angin skala kecil tersebut mempertimbangkan konsumsi energi listrik saat ini di Pulau Miangas. Metode penghitungan energi listrik yang dihasilkan turbin angin mengacu pada (5) sampai (7) dengan menggunakan perangkat lunak Windographer.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. KECEPATAN ANGIN RATA RATA

Hasil pengolahan data kecepatan angin per jam pada ketinggian 50 meter di atas permukaan tanah selama tahun 2011-2020 dengan nilai rata-rata per bulan disajikan pada Tabel I dan Gambar 1. Dalam kurun waktu sepuluh tahun, kecepatan angin rata-rata adalah 5,5 m/s, yang menunjukkan bahwa angin di Pulau Miangas termasuk kategori kecepatan angin sedang. Kecepatan rata-rata tahunan paling rendah adalah 4,9 m/s, yang terjadi pada tahun 2017, sedangkan yang paling tinggi terjadi pada tahun 2015 dan 2019, yakni sebesar 5,9 m/s. Berdasarkan data sepuluh tahun tersebut, hanya tiga tahun yang memiliki nilai rata-rata tahunan di atas 5,5 m/s,



Gambar 1. Kecepatan angin rata-rata per bulan selama sepuluh tahun.

TABEL I
KECEPATAN ANGIN RATA-RATA BULANAN

Bulan	Kecepatan Angin Rata-Rata per Bulan (2011-2020) (m/s)
Januari	6,79
Februari	7,43
Maret	6,71
April	5,06
Mei	3,57
Juni	4,23
Juli	5,24
Agustus	6,03
September	5,50
Oktober	4,91
November	4,85
Desember	5,73
Rata-rata	5,50

sedangkan sisanya memiliki nilai rata-rata di bawah atau sama dengan 5,5 m/s. Informasi tersebut menunjukkan bahwa potensi pemanfaatan pembangkit energi listrik adalah untuk skala rumah tangga. Hal ini digunakan sebagai salah satu pertimbangan dalam pemilihan kapasitas turbin angin.

Karakteristik angin per bulan selama sepuluh tahun secara detail ditunjukkan pada Gambar 1. Terlihat bahwa kecepatan angin rata-rata tertinggi sepanjang tahun terjadi pada bulan Januari atau Februari, kecuali pada tahun 2011 dan 2018, yaitu terjadi pada bulan Agustus. Bulan Februari memiliki kecepatan angin rata-rata bulanan tertinggi, sebesar 7,43 m/s, sedangkan bulan Mei memiliki kecepatan angin rata-rata bulanan terendah, yaitu sebesar 3,57 m/s. Dalam kurun waktu sepuluh tahun, nilai tertinggi yang tercatat adalah 9,4 m/s pada bulan Februari 2020. Sementara itu, nilai terendah adalah 2,9 m/s, yang terjadi pada bulan Mei 2018. Distribusi terbesar terjadi pada tahun 2019 dan 2020, dengan nilai simpangan baku 2,0 dan 1,9 secara berurutan.

Lebih lanjut, Tabel I memperlihatkan bahwa pada bulan Januari sampai Maret, Agustus, dan Desember, potensi kecepatan angin berada di atas kecepatan rata-rata 5,5 m/s. Sementara itu, bulan April hingga Juli dan September hingga November memiliki potensi kecepatan angin sama dengan atau di bawah rata-rata. Distribusi kecepatan angin rata-rata per bulan atau nilai simpangan bakunya sebesar 1,1, sehingga dapat dikategorikan cukup fluktuatif.

Variasi kecepatan angin bulanan ini dipengaruhi oleh siklus angin muson. Pada bulan November sampai Maret, terjadi musim angin timur laut yang kencang. Di bulan Mei, terjadi perubahan angin muson, yaitu dari timur laut menjadi angin muson barat daya, dengan arah yang saling bertolak belakang. Hal tersebut menjadi salah satu hal yang menyebabkan kecepatan angin rata-rata pada bulan Mei menjadi paling

rendah. Angin muson timur laut terjadi ketika posisi matahari berada di sebelah selatan, sehingga belahan bumi bagian selatan lebih hangat dibandingkan dengan belahan bumi utara. Sesuai dengan karakteristik angin yang berhembus dari daerah dengan tekanan udara tinggi ke rendah, angin muson timur laut membawa angin dari arah utara, yang lebih dominan melalui perairan yang luas. Sebaliknya, angin muson barat daya membawa angin dari daratan Australia yang bersifat panas dan umumnya memiliki tekanan lebih rendah. Angin muson barat daya terjadi pada saat matahari berada di belahan bumi utara, yaitu dari Juni hingga Oktober. Pada waktu tersebut, angin bertiup dari belahan bumi selatan. Karakteristik kecepatan angin per bulan diperlukan untuk pengaturan optimasi penggunaan dan pengaturan alokasi pembangkit dalam pemenuhan energi listrik secara kontinu.

Tabel II menunjukkan kecepatan angin rata-rata per tahun dari Tahun 2011-2020. Selama sepuluh tahun, kecepatan angin rata-rata per tahun adalah 5,5 m/s. Kecepatan angin per tahun melebihi rata-rata tahunan terjadi pada tahun 2012, 2015, dan 2019. Kecepatan angin tahunan terendah terjadi pada tahun 2017, sedangkan kecepatan tertinggi terjadi pada tahun 2015 dan 2019.

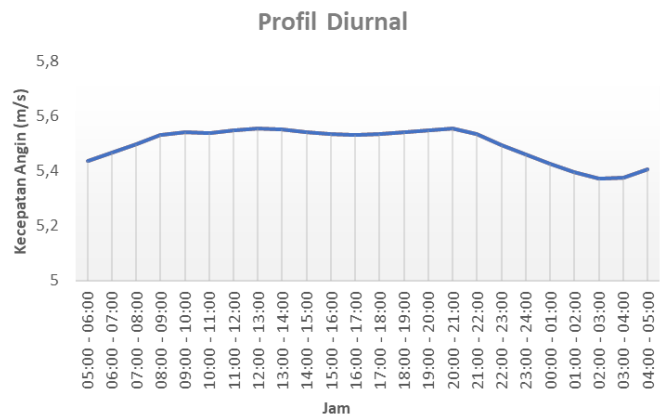
Karakteristik kecepatan angin rata-rata per jam yang diperoleh dari nilai rata-rata harian selama sepuluh tahun (data tahun 2011-2020) ditunjukkan pada Gambar 2. Dari profil tersebut, terlihat kecepatan angin rata-rata selama 24 jam cenderung stabil pada kecepatan 5,5 m/s. Pada siang hari, kecepatan angin lebih tinggi dan stabil, yaitu terjadi pada pukul 08.00 hingga 21.00. Sementara itu, pada malam hari kecepatan angin cenderung mengalami penurunan, dengan puncak penurunan terjadi pada pukul 03.00.

Perbedaan tekanan dan temperatur pada permukaan laut dan daratan menjadi salah satu penyebab peningkatan kecepatan angin pada siang hari. Ketika matahari bersinar, daratan lebih cepat menjadi panas daripada lautan, sehingga terjadi hembusan angin dari laut ke darat. Sebaliknya, pada malam hari daratan lebih cepat mengalami penurunan suhu dibandingkan dengan lautan, sehingga hembusan angin terjadi pada arah sebaliknya. Luasan daratan Pulau Miangas lebih kecil dari lautan. Hal ini yang menyebabkan angin laut berhembus lebih kencang jika dibandingkan dengan angin darat. Pola kecepatan angin harian ini berguna untuk memperkirakan durasi angin tenang, yaitu lamanya angin berada di atas kecepatan *cut-in* dan berada di bawah kecepatan *cut-out*. Pada kondisi tersebut, turbin angin berada dalam kisaran putaran optimal dan menghasilkan energi listrik yang kontinu. Pola diurnal ini sangat diperlukan dalam penentuan optimasi metode penyimpanan dan pembebanan energi.

Apabila dilihat dari konsep keseimbangan *supply-demand* energi listrik, profil diurnal seperti pada Gambar 2 cukup menguntungkan. Penggunaan beban rumah tangga rata-rata terjadi pada pagi hingga sore menjelang malam hari (07.00 sampai 21.00). Pada rentang waktu tersebut, kecepatan angin rata-rata cenderung lebih tinggi dan stabil. Dalam rentang waktu tersebut, tidak dapat dipungkiri terdapat beban puncak yang berlangsung 2 sampai 3 jam. Secara teori, penggunaan PLTB kurang sesuai untuk menyuplai beban puncak, sehingga diperlukan sistem *back up* dari diesel atau sumber energi lain sebagai sistem pembangkit beban puncak.

B. DISTRIBUSI ARAH ANGIN

Hasil analisis menunjukkan bahwa arah angin yang kuat dan dominan sepanjang tahun berasal dari timur laut (30°



Gambar 2. Variasi kecepatan angin harian (data tahun 2011-2020).

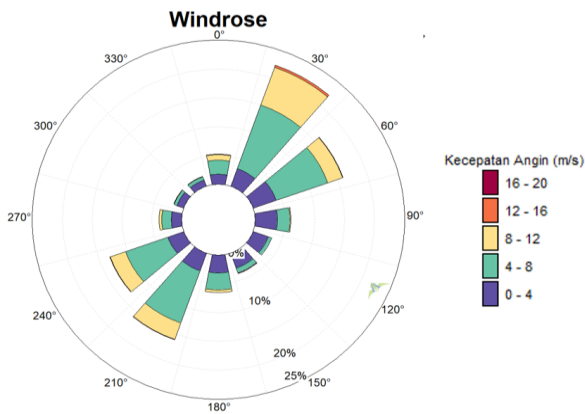
TABEL II
KECEPATAN ANGIN RATA-RATA TAHUNAN

Tahun	Kecepatan Angin Rata-Rata per Tahun (2011-2020) (m/s)
2011	5,2
2012	5,8
2013	5,5
2014	5,3
2015	5,9
2016	5,4
2017	4,9
2018	5,5
2019	5,9
2020	5,1
Rata-rata	5,5

sampai 60°) dan barat daya (210° sampai 240°), seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Arah angin ini dipengaruhi oleh musim angin muson, baik muson timur maupun muson barat. Arah angin dominan pada bulan November hingga April berasal dari timur laut, yang masuk dalam musim muson barat, sedangkan bulan Mei hingga Oktober arah angin dominan dari barat daya, yang masuk dalam musim muson timur. Peta distribusi angin diperlukan dalam penentuan sistem pengarah turbin angin. Hal ini penting untuk memastikan posisi bilah turbin tetap tegak lurus terhadap arah angin, sehingga turbin angin dapat menangkap energi angin secara maksimal. Selain itu, penentuan arah angin berperan dalam mengevaluasi potensi energi angin dan mencari lokasi yang ideal untuk pemasangan menara [33], [38]. Secara keseluruhan, kecepatan angin yang paling sering terjadi sepanjang tahun adalah antara 4 m/s hingga 7 m/s. Namun, terdapat periode angin bertiup kencang yang terjadi pada bulan Februari, dengan kecepatan angin antara 8 m/s hingga 10 m/s, seperti terlihat pada Gambar 3.

C. DISTRIBUSI KECEPATAN ANGIN DAN DENSITAS DAYA ANGIN

Pada Tabel III, disajikan parameter Weibull dengan nilai minimum parameter *k* terjadi di bulan Mei dan Oktober, yaitu 1,95, dan nilai maksimum parameter *k*, yaitu 3,19, terjadi pada bulan Maret dan Agustus. Nilai parameter *k* ini menjadi indikator bahwa distribusi angin di lokasi tersebut stabil dengan pola angin yang seragam karena memiliki rentang variasi yang kecil, yakni mendekati nilai 2. Dari Tabel III juga terlihat bahwa nilai parameter *k* di antara 2 dan 3, yang menunjukkan kurva distribusi Weibull condong ke arah kecepatan angin tinggi. Hal tersebut menunjukkan bahwa kecepatan angin tinggi akan lebih sering terjadi [39]. Nilai parameter *c*



Gambar 3. Distribusi arah angin rata-rata per tahun (data tahun 2011-2020).

TABEL III
PARAMETER WEIBULL DAN DENSITAS DAYA ANGIN (DATA 2011-2020)

Bulan	Parameter Weibull		Densitas Daya Angin (W/m ²)
	<i>k</i>	<i>c</i> (m/s)	
Januari	2,56	7,64	296,82
Februari	2,89	8,31	357,24
Maret	3,19	7,48	249,78
April	2,69	5,68	117,99
Mei	1,99	4,03	45,25
Juni	2,04	4,77	86,58
Juli	2,23	5,92	152,14
Agustus	2,95	6,77	190,96
September	2,41	6,21	165,66
Oktober	1,95	5,54	142,42
November	2,39	5,47	113,69
Desember	2,38	6,46	187,56
Rata-rata	2,47	6,19	160,97

menggambarkan kecepatan angin. Nilai *c* yang makin tinggi menandakan tingginya kecepatan angin rata-rata. Dari Tabel III terlihat bahwa nilai parameter *c* tertinggi berada di bulan Februari, yaitu sebesar 8,31 m/s. Ini berarti bahwa dalam rentang satu tahun, bulan Februari berpotensi memiliki energi angin yang lebih besar dibandingkan bulan lainnya. Di sisi lain, nilai parameter *c* terendah terjadi pada bulan Mei, yaitu 4,03 m/s. Hal ini mengindikasikan kecepatan angin rata-rata rendah di bulan Mei, yang akan berpengaruh pada kecilnya energi listrik yang dihasilkan di bulan tersebut.

Hasil perhitungan densitas daya angin rata-rata menggunakan data parameter Weibull ditunjukkan pada Tabel III. Terlihat bahwa densitas daya angin rata-rata satu tahun adalah sebesar 160,97 W/m², sehingga potensi energi angin yang tersedia dalam satu tahun adalah 115,90 kWh/m². Bulan Februari memiliki densitas daya angin tertinggi sepanjang tahun, sebesar 357,24 W/m², dengan potensi energi angin yang dihasilkan sebesar 257,21 kWh/m². Hal ini disebabkan oleh seringnya kecepatan angin tinggi terjadi pada bulan Februari, antara 7,4 m/s sampai 8,3 m/s, yang menunjukkan pada bulan tersebut berpotensi menghasilkan energi listrik yang besar. Di sisi lain, bulan Mei memiliki densitas daya angin terendah sepanjang tahun, yaitu 45,25 W/m², dengan energi angin yang dihasilkan sebesar 32,58 kWh/m². Kondisi ini menjadi indikator bahwa produksi energi listrik turbin angin akan rendah di bulan Mei disebabkan kecepatan angin yang rendah, antara 3,5 m/s hingga 4,0 m/s.

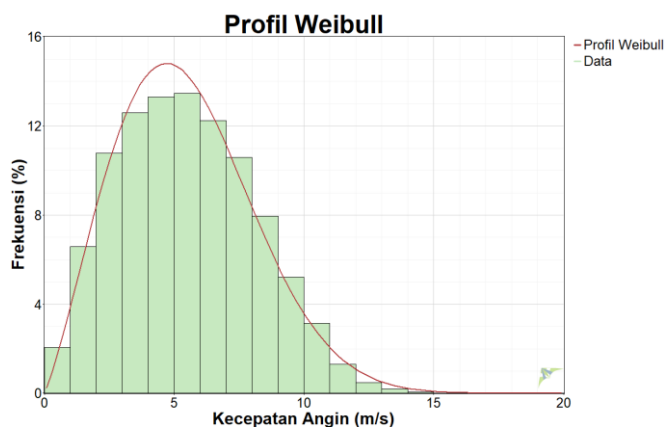
Profil Weibull pada Gambar 4 menggambarkan distribusi frekuensi kecepatan angin rata-rata tahunan selama sepuluh tahun (tahun 2011 sampai 2020). Dari Gambar 4 tampak bahwa distribusi frekuensi kecepatan angin rata-rata dalam satu tahun antara 5 sampai 6 m/s sebanyak 15%. Ini menunjukkan bahwa angin dengan kecepatan 5 hingga 6 m/s terjadi selama 1.314 jam per tahun. Informasi ini dapat digunakan untuk memprediksi produksi energi listrik yang dihasilkan oleh turbin angin yang akan dipasang di lokasi tersebut.

D. ESTIMASI PRODUKSI ENERGI LISTRIK TUBIN ANGIN

Berdasarkan kebutuhan energi listrik di pulau Miangas sebesar 25.550 kWh per tahun dan ketersediaan turbin angin di pasaran serta kondisi infrastruktur yang ada, maka turbin angin kapasitas 50 kW, 35 kW, dan 10 kW menjadi pilihan dalam penghitungan skenario *supply-demand* energi. Jenis turbin yang digunakan adalah turbin angin sumbu horizontal karena memiliki *capacity factor* dan potensi produksi energi tahunan yang lebih besar dibandingkan turbin angin jenis vertikal [40]. Perhitungan produksi energi turbin angin dilakukan sesuai dengan karakteristik daya turbin angin yang diberikan oleh produsen. Mengingat tinggi *hub* turbin yang berbeda dari tinggi data pengukuran, yaitu 50 m, dilakukan ekstrapolasi untuk tinggi 18 m dan 30 m. Hasil simulasi produksi energi listrik per tahun yang dapat dihasilkan oleh turbin angin kapasitas 50 kW, 35 kW, dan 10 kW berdasarkan distribusi kecepatan angin dan kurva daya menggunakan (5) sampai (7) ditunjukkan pada Tabel IV. Dari Tabel IV tersebut terlihat bahwa jumlah energi listrik rata-rata per tahun yang diproduksi oleh turbin angin kapasitas 50 kW sebesar 98.434,49 kWh, turbin angin kapasitas 35 kW sebesar 75.738,78 kWh, dan turbin angin 10 kW sebesar 15.875,48 kWh. Jumlah energi listrik yang dihasilkan dari turbin angin 10 kW ini melebihi hasil penilaian potensi angin di Barangay Bagasbas, Filipina [34], negara yang berbatasan dengan Pulau Miangas dan memiliki karakteristik angin serupa. Penelitian sebelumnya melakukan perhitungan produksi listrik menggunakan turbin angin kapasitas 3 kW, 5 kW, 10 kW, dan 20 kW [41]. Turbin angin 10 kW menghasilkan energi listrik sebesar 10.014,71 kWh.

Lebih lanjut, pada Tabel IV terlihat turbin angin kapasitas 10 kW menghasilkan energi listrik di bawah konsumsi energi listrik masyarakat Pulau Miangas per tahun, sehingga tidak layak untuk diaplikasikan. Turbin angin kapasitas 50 kW menghasilkan energi listrik sebesar 98.434,49 kWh, jauh melampaui konsumsi energi listrik masyarakat pulau Miangas yang hanya sebesar 25.550 kWh. Jika dilihat dari sisi keseimbangan antara *supply-demand* energi listrik, turbin angin 50 kW juga kurang tepat untuk dipasang di Pulau Miangas. Turbin angin kapasitas 35 kW menjadi pilihan yang tepat untuk dipasang di pulau Miangas karena turbin angin ini dapat menghasilkan energi listrik 75.738,78 kWh/tahun. Produksi energi listrik ini cukup untuk menyuplai kebutuhan energi listrik masyarakat pulau Miangas sebesar 25.550 kWh/tahun.

Tabel IV juga memperlihatkan efek cuaca musiman terhadap produksi energi listrik. Produksi energi listrik selama musim hujan (November sampai April) lebih tinggi dibandingkan dengan musim kemarau. Penelitian yang dilakukan di Solovetsky Island, sebuah pulau terpencil di daerah Arktik Rusia, menunjukkan peningkatan produksi energi listrik pada musim dingin (November hingga April) dibandingkan dengan musim panas [42]. Pada musim dingin ini terjadi angin dingin kutub dan fenomena seperti badai salju



Gambar 4. Distribusi kecepatan angin rata-rata per tahun.

TABEL IV
PRODUKSI ENERGI LISTRIK TURBIN ANGIN SKALA KECIL PER TAHUN

Bulan	Energi Listrik (kWh)		
	Turbin Angin 10 kW	Turbin Angin 35 kW	Turbin Angin 50 kW
Januari	15.875,48	111.513,22	144.843,94
Februari	17.412,36	120.388,34	155.161,52
Maret	14.481,49	114.384,82	143.638,00
April	7.044,24	59.889,11	78.777,25
Mei	3.266,30	25.109,01	36.307,42
Juni	5.137,36	41.045,91	55.246,32
Juli	9.010,12	70.905,96	92.161,88
Agustus	11.495,40	92.490,27	117.793,14
September	9.438,44	74.139,29	96.021,73
Oktober	8.158,01	60.944,79	81.010,66
November	6.690,47	55.648,78	73.419,95
Desember	10.665,06	82.404,93	106.829,57
Total	118.674,86	908.865,44	1.181.213,88
Rata-rata per tahun	15.875,48	75.738,78	98.434,49

serta hembusan angin kencang. Produksi energi listrik terendah terjadi di tahun 2017 dan tertinggi terjadi di tahun 2019. Produksi listrik yang tinggi terjadi karena kecepatan angin di tahun 2019 lebih tinggi dibanding tahun lainnya. Laporan tahunan siklon tropis Filipina tahun 2019 menyebutkan bahwa di tahun itu Filipina lebih sering mengalami hujan badai dan meningkat menjadi angin topan. The Philippine Atmospheric, Geophysical and Astronomical Services Administration (PAGASA) memberi nama baru kepada 21 angin siklon tropis yang terjadi di tahun 2019. Bulan Agustus, September, dan November adalah bulan-bulan paling aktif dalam musim siklon tropis dan bulan November memiliki aktivitas siklon tropis yang lebih tinggi dibanding kondisi normal klimatologis [43].

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini melakukan estimasi energi listrik yang dihasilkan oleh turbin angin skala kecil 10 kW, 35 kW, dan 50 kW berdasarkan analisis potensi energi angin di Pulau Miangas menggunakan data angin NASA Langley Research Center periode tahun 2011 hingga 2020. Dari hasil analisis potensi energi angin, diketahui bahwa pulau Miangas memiliki kecepatan angin rata-rata tahunan 5,5 m/s dengan distribusi frekuensi kecepatan angin rata-rata 15% dan arah angin dominan dari timur laut dan barat daya. Kecepatan angin rata-rata bulanan tertinggi terjadi pada bulan Februari, sebesar 7,43

m/s, sedangkan yang terendah terjadi pada bulan Mei, sebesar 3,57 m/s. Kecepatan angin rata-rata tersebut termasuk dalam kategori kecepatan angin sedang dan dapat dimanfaatkan untuk pembangkit energi listrik skala rumah tangga. Hasil simulasi produksi energi listrik menunjukkan produksi energi pada musim hujan (November hingga April) lebih besar daripada di musim kemarau. Berdasarkan distribusi kecepatan angin dan kurva daya, turbin angin kapasitas 35 kW mampu menghasilkan energi listrik sebesar 75.738,78 kWh/ tahun, sehingga cukup untuk memenuhi konsumsi energi listrik dari 234 pelanggan rumah tangga di Pulau Miangas sebesar 25.550 kWh/tahun. Ditinjau dari aspek keseimbangan *supply-demand* energi listrik, turbin angin kapasitas 35 kW menjadi pilihan yang tepat untuk diaplikasikan di pulau Miangas. Penelitian ini berhasil mengidentifikasi potensi energi angin di Pulau Miangas sebagai sumber energi listrik yang berkelanjutan. Namun, keterbatasan data satelit menggarisbawahi pentingnya penelitian lebih lanjut dengan menggunakan data pengukuran langsung yang lebih detail. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mempertimbangkan faktor-faktor seperti topografi, penggunaan lahan, dan profil beban listrik untuk optimalisasi sistem energi angin.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa penelitian ini dikerjakan dan ditulis dengan tidak terdapat konflik kepentingan.

KONTRIBUSI PENULIS

Konseptualisasi, Dwi Risdianto dan Nurry Widya Hesty; metodologi, Dwi Risdianto; perangkat lunak, Nurry Widya Hesty; validasi, Dwi Risdianto, Toha Zaky, dan Ario Witjakso; analisis formal, Rudi Purwo Wijayanto; kurasi data, Agustina Putri Mayasari; penulisan—penyusunan draf asli, Dwi Risdianto dan Nurry Widya Hesty; penulisan—peninjauan dan penyuntingan, Dwi Risdianto, Toha Zaky, Rudi Purwo Wijayanto, dan Aryo Witjakso; visualisasi, Rudi Wijayanto.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Kepala Pusat Riset Konversi dan Konservasi Energi, Badan Riset Dan Inovasi Nasional dan kelompok riset energi angin PRKKE-BRIN atas izin dan dukungannya terhadap penelitian ini.

REFERENSI

- [1] D. Bogdanov dkk., "Low-cost renewable electricity as the key driver of the global energy transition towards sustainability," *Energy*, vol. 227, hal. 1–12, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.120467.
- [2] X.-Y. Tang dkk., "Micro-scale wind resource assessment in complex terrain based on CFD coupled measurement from multiple masts," *Appl. Energy*, vol. 238, hal. 806–815, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.129.
- [3] C. Jung dan D. Schindler, "Introducing a new approach for wind energy potential assessment under climate change at the wind turbine scale," *Energy Convers. Manag.*, vol. 225, hal. 1–13, Des. 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113425.
- [4] D.G. Cendrawati dkk., "Short-term wind energy resource prediction using weather research forecasting model for a location in Indonesia," *Int. J. Technol.*, vol. 14, no. 3, hal. 584–595, Mei 2023, doi: 10.14716/ijtech.v14i3.5803.
- [5] L.M. Bensalah, F. Chellali, dan B.M. Islem, "Estimation of wind energy potential using WAsP model in the sub watershed of Oued-Sakni region-Algeria," *Wind Eng.*, vol. 46, no. 5, hal. 1657–1672, Okt. 2022, doi: 10.1177/0309524X221096247.
- [6] H. Meschede, P. Holzappel, F. Kadelbach, and J. Hesselbach, "Classification of global island regarding the opportunity of using RES," *Appl. Energy*, vol. 175, hal. 251–258, Agu. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.05.018.

- [7] K. Sperling, "How does a pioneer community energy project succeed in practice? The case of the Samsø renewable energy island," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 71, hal. 884–897, Mei 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.12.116.
- [8] B.S. Hodge dkk., "Addressing technical challenges in 100% variable inverter-based renewable energy power systems," *WIREs Energy Environ.*, vol. 9, no. 5, hal. 1–19, Sep./Okt. 2020, doi: 10.1002/wene.376.
- [9] A. Eras-Almeida dkk., "Decarbonizing the Galapagos Islands: Techno-economic perspectives for the hybrid renewable mini-grid Baltra–Santa Cruz," *Sustainability*, vol. 12, no. 6, hal. 1–47, Mar. 2020, doi: 10.3390/su12062282.
- [10] T. Woo dkk., "Three energy self-sufficient networks of wastewater treatment plants developed by nonlinear bi-level optimization models in Jeju Island," *J. Clean. Prod.*, vol. 379, no. 1, hal. 1–17, Des. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.134465.
- [11] Firdaus, O. Penangsang, R.S. Wibowo, dan Umar, "Alokasi optimal DG sumber energi terbarukan menggunakan algoritme multi-verse optimizer," *J. Nas. Tek. Elekt. Teknol. Inf.*, vol. 10, no. 3, hal. 291–299, Agu. 2021, doi: 10.22146/jnteti.v10i3.1462.
- [12] G. Ren dkk., "Overview of wind power intermittency: Impacts, measurements, and mitigation solutions," *Appl. Energy*, vol. 204, hal. 47–65, Okt. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.06.098.
- [13] T.R. Ayodele dan A.S.O. Ogunjuyigbe, "Mitigation of wind power intermittency: Storage technology approach," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 44, hal. 447–456, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.12.034.
- [14] M.Y. Suberu, M.W. Mustafa, dan N. Bashir, "Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 35, hal. 499–514, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.04.009.
- [15] D.D. Artakusuma, F.D. Wijaya, dan E. Firmansyah, "Aplikasi magnetic energy recovery switch sebagai dynamic voltage restorer pada motor induksi," *J. Nas. Tek. Elekt. Teknol. Inf.*, vol. 7, no. 2, hal. 236–240, Mei 2018.
- [16] J. Matevosyan, T. Ackermann, dan S. Bolik, "Technical regulations for the interconnection of wind farms to the power system," dalam *Wind Power in Power Systems*, West Sussex, Inggris: John Wiley & Sons, 2005, ch. 7, hal. 115–142.
- [17] I. Caglayan, dkk., "Analysis of wind energy potential; A case study of Kocaeli University campus," *Fuel*, vol. 253, hal. 1333–1341, Okt. 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2019.05.123.
- [18] Z.H. Hulio, W. Jiang, dan S. Rehman, "Technical and economic assessment of wind power potential of Nooriabad, Pakistan," *Energy Sustain. Soc.*, vol. 7, hal. 1–14, Nov. 2017, doi: 10.1186/s13705-017-0137-9.
- [19] B.R. Karthikeya, P.S. Negi, dan N. Srikanth, "Wind resource assessment for urban renewable energy application in Singapore," *Renew. Energy*, vol. 87, no. 1, hal. 403–414, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.10.010.
- [20] Z. Saberi, A. Fudholi, dan K. Sopian, "Potential evaluation of wind energy in Kuala Terengganu, Malaysia through Weibull distribution method," dalam *Int. Conf. Sustain. Energy Green Technol.*, 2019, hal. 1–7, doi: 10.1088/1755-1315/268/1/012074.
- [21] Y. Gao dkk., "Assessing the wind energy potential of China in considering its variability/intermittency," *Energy Convers. Manag.*, vol. 226, hal. 1–13, Des. 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113580.
- [22] C. İlkiliç, "Wind energy and assessment of wind energy potential in Turkey," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 2, hal. 1165–1173, Feb. 2012, doi: 10.1016/j.rser.2011.11.021.
- [23] M. Gao dkk., "Secular decrease of wind power potential in India associated with warming in the Indian Ocean," *Sci. Adv.*, vol. 4, no. 12, hal. 1–8, Des. 2018, doi: 10.1126/sciadv.aat5256.
- [24] S. Ali, S.-M. Lee, dan C.-M. Jang, "Techno-economic assessment of wind energy potential at three locations in South Korea using long-term measured wind data," *Energies*, vol. 10, no. 9, hal. 1–24, Sep. 2017, doi: 10.3390/en10091442.
- [25] H. Mohamadi dkk., "Assessment of wind energy potential and economic evaluation of four wind turbine models for the east of Iran," *Heliyon*, vol. 7, no. 6, hal. 1–10, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e07234.
- [26] A. Musyafa, I.M.Y. Negara, dan I. Robandi, "Wind-electric power potential assessment for three locations in East Java–Indonesia," *IPTEK, J. Technol. Sci.*, vol. 22, no. 3, hal. 122–128, Agu. 2011, doi: 10.12962/j20882033.v22i3.71.
- [27] N.W. Hesty dkk., "Estimasi potensi energi angin Indonesia menggunakan model weather research and forecast-four dimension data assimilation (WRF-FDDA)," *J. Sains Dirgant.*, vol. 19, no. 2, hal. 11–20, 2022.
- [28] I. Abdullah, J. Nurdin, dan Hasanuddin, "Kajian potensi energi angin di daerah kawasan pesisir Pantai Serdang Bedagai untuk menghasilkan energi listrik," *Mekanik*, vol. 2, no. 1, hal. 31–38, Mei 2016.
- [29] Z.H. Hulio, "Assessment of wind characteristics and wind power potential of Gharo, Pakistan," *J. Renew. Energy*, vol. 2021, no. 1, hal. 1–17, Feb. 2021, doi: 10.1155/2021/8960190.
- [30] M. Aslam, "Testing average wind speed using sampling plan for Weibull distribution under indeterminacy," *Sci. Rep.*, vol. 11, hal. 1–9 Apr. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-87136-8.
- [31] Q. Han dan F. Chu, "Directional wind energy assessment of China based on nonparametric copula models," *Renew. Energy*, vol. 164, hal. 1334–1349, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.renene.2020.10.149.
- [32] Q. Hu dkk., "On estimating uncertainty of wind energy with mixture of distributions," *Energy*, vol. 112, hal. 935–962, Okt. 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.06.112.
- [33] I. Ifanda dkk., "Optimizing turbine siting and wind farm layout in Indonesia," *Int. J. Renew. Energy Res. (IJRER)*, vol. 13, no. 3, hal. 1351–1363, Sep. 2023, doi: 10.20508/ijrer.v13i3.14070.g8806.
- [34] N.W. Hesty, D.G. Cendrawati, R. Nepal, dan M.I.A. Irsyad, "Wind energy potential assessment based-on WRF four-dimensional data assimilation system and cross-calibrated multi-platform dataset," dalam *4th Int. Conf. Renew. Energy Environ. Eng.*, 2021, hal. 1–7, doi: 10.1088/1755-1315/897/1/012004.
- [35] M. Bassyouni dkk., "Assessment and analysis of wind power resource using Weibull parameters," *Energy Explor. Exploit.*, vol. 33, no. 1, hal. 105–122, Feb. 2015, doi: 10.1260/0144-5987.33.1.105.
- [36] D. Mohammed, A.S.M. Abdelaziz, E. Mohammed, dan E. Elmostapha, "Analysis of wind speed data and wind energy potential using Weibull distribution in Zagora, Morocco," *Int. J. Renew. Energy Dev.*, vol. 8, no. 3, hal. 267–273, Okt. 2019, doi: 10.14710/ijred.8.3.267-273.
- [37] C. Diyoke, "A new approximate capacity factor method for matching wind turbines to a site: Case study of Humber region, UK," *Int. J. Energy Environ. Eng.*, vol. 10, no. 4, hal. 451–462, Des. 2019, doi: 10.1007/s40095-019-00320-5.
- [38] K. Sharma dan M.R. Ahmed, "Wind energy resource assessment for the Fiji Islands: Kadavu Island and Suva Peninsula," *Renew. Energy*, vol. 89, hal. 168–180, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.12.014.
- [39] A. Mostafaeipour dkk., "Evaluation of wind energy potential as a power generation source for electricity production in Binalood, Iran," *Renew. Energy*, vol. 52, hal. 222–229, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.renene.2012.10.030.
- [40] N. Firdaus dkk., "Wind energy potential on a highrise building: A preliminary study," *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, vol. 88, no. 3, hal. 20–30, Des. 2021, doi: 10.37934/arfmts.88.3.2030.
- [41] J. Olalo dkk., "Determination of a potential for the installation of small-scale wind turbine in Barangay Bagasbas, Daet Camarines Norte, Philippines," *ASEAN Eng. J.*, vol. 12, no. 1, hal. 17–26, Mar. 2022, doi: 10.11113/aej.v12.16503.
- [42] R. Ghani dkk., "Wind energy at remote islands in Arctic region—A case study of Solovetsky islands," *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 11, no. 5, hal. 1–14, Sep. 2019, doi: 10.1063/1.5110756.
- [43] Philippine Atmospheric, Geophysical and Astronomical Services Administration (PAGASA), "Annual Report on Philippine Tropical Cyclones 2019," 2021. [Online]. Tersedia: https://pubfiles.pagasa.dost.gov.ph/pagasaweb/files/tamss/weather/tcsu/mmary/PAGASA_ARTC_2019.pdf