

SKRIPSI

STUDI POTENSI KECEPATAN ANGIN UNTUK APLIKASI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN MENGGUNAKAN DISTRIBUSI WEIBULL, NAKAGAMI, DAN RAYLEIGH

Disusun dan diajukan oleh:

AFLAH FIKRI MAHMUD
D041 20 1058



PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024



LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

STUDI POTENSI KECEPATAN ANGIN UNTUK APLIKASI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN MENGGUNAKAN DISTRIBUSI WEIBULL, NAKAGAMI, DAN RAYLEIGH

Disusun dan diajukan oleh

Aflah Fikri Mahmud
D041201058

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 24 April 2024
Dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,
Pembimbing Utama,

Prof. Dr. Eng. Ir. Syafaruddin, S.T., M.Eng., IPU.
NIP. 197405301999031003

Ketua Program Studi,



Dr. Eng. Ir. Dewiani, MT.
NIP. 196910261994122001



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Aflah Fikri Mahmud

NIM : D041201058

Program Studi : Teknik Elektro

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

STUDI POTENSI KECEPATAN ANGIN UNTUK APLIKASI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN MENGGUNAKAN DISTRIBUSI WEIBULL, NAKAGAMI, DAN RAYLEIGH

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 23 April 2024

Yang Menyatakan

A handwritten signature in black ink is written over a 10,000 Indonesian postage stamp. The stamp features the Garuda Pancasila emblem and the text '10000', 'METERAI TEMPEL', and the serial number '27649ALX133979549'.

Aflah Fikri Mahmud



ABSTRAK

Aflah Fikri Mahmud. *Studi Potensi Kecepatan Angin untuk Aplikasi Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan Distribusi Weibull, Nakagami, dan Rayleigh (dibimbing oleh Syafaruddin)*

Tren pemanfaatan energi baru terbarukan di Indonesia terus meningkat seiring waktu, sebagaimana yang tertuang pada Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 79 Tahun 2014, dengan target paling sedikit 23% di tahun 2025 dan 31% di tahun 2050. Salah satu energi baru terbarukan yang sangat melimpah di Indonesia adalah energi angin dengan potensi pemanfaatan 155 GW. Namun, pemanfaatan energi angin masih sangat minim, sebesar 0,15 GW. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui data kecepatan angin, distribusi kecepatan angin menggunakan tiga metode distribusi serta perbandingannya, dan produksi energi angin di *offshore* Jeneponto, Banda Aceh, dan Kaliantan Lombok. Penelitian ini berguna untuk melakukan asesmen lokasi dan menambah referensi ilmiah pada utiliasi energi angin. Adapun metodologi penelitian ini menggunakan distribusi Weibull, Nakagami, dan Rayleigh untuk melakukan asesmen potensi angin yang dimulai dengan estimasi parameter masing-masing distribusi. Validasi dilakukan untuk menentukan metode distribusi mana yang paling mendekati hasil observasi menggunakan metode R^2 dan RMSE. Terakhir, dilakukan perhitungan produksi energi angin kumulatif dengan menggunakan kurva daya turbin angin skala kecil Aventa V-7. Hasil menunjukkan nilai parameter k dan c sebesar 2,9239 dan 8,1043, m dan Ω sebesar 2,3117 dan 59,4929, serta σ sebesar 5,454 di lokasi *offshore* Jeneponto. Di lokasi Banda Aceh, nilai parameter k dan c sebesar 2,5520 dan 5,3175, m dan Ω sebesar 1,6970 dan 26,2341, serta σ sebesar 3,622. Di lokasi Kaliantan Lombok nilai parameter k dan c sebesar 2,9755 dan 6,7810, m dan Ω sebesar 2,2311 dan 41,5548, serta σ sebesar 4,558. Adapun, distribusi weibull menunjukkan kesesuaian dengan data hasil observasi di lokasi *offshore* Jeneponto dan distribusi Rayleigh untuk lokasi Banda Aceh. Adapun, distribusi Weibull untuk R^2 dan Rayleigh untuk RMSE di lokasi Kaliantan Lombok. Berdasarkan hitungan produksi energi kumulatif, didapatkan nilai hasil observasi, di lokasi *offshore* Jeneponto, Banda Aceh, dan Kaliantan Lombok masing-masingnya sebesar 45259,19 kWh/tahun, 30555,13 kWh/tahun, dan 28631,53 kWh/tahun

Kata Kunci: Energi Baru Terbarukan, Energi Angin, Distribusi Weibull, Distribusi Nakagami, Distribusi Rayleigh



ABSTRACT

Aflah Fikri Mahmud. *Potential Study of Wind Speed for Wind Turbine Applications Using Weibull, Nakagami, and Rayleigh Distributions* (supervised by Syafaruddin)

Renewable energy utilization in Indonesia continues to increase, as stated in the Government Regulation of the Republic of Indonesia No. 79 Year 2014, with a target of at least 23% in 2025 and 31% in 2050. The abundant renewable energy in Indonesia is wind energy with a potential utilization of 155 GW, while the utilization is accounted for only 0,15 GW. This study aims to determine wind speed data, distribution, and wind energy production in *offshore* Jeneponto, Banda Aceh, and Kaliantan Lombok. This research is used to conduct site assessments and adding scientific references to wind energy utilization. The research methodology utilizes the Weibull, Nakagami, and Rayleigh distributions to assess wind potential, starting with the estimation of the parameters. R^2 and RMSE test was conducted to determine which distribution method is closest to the observations. Lastly, cumulative wind energy production was calculated using the Aventa V-7 small-scale wind turbine. The results show that the parameter values of k and c are 2,9239 and 8,1043, m and Ω are 2,3117 and 59,4929, and σ is 5,454 at Jeneponto *offshore* location. At Banda Aceh location, the parameter values of k and c are 2,5520 and 5,3175, m and Ω are 1,6970 and 26,2341, and σ is 3,622. At the Kaliantan Lombok location, the parameter values of k and c are 2,9755 and 6,7810, m and Ω are 2,2311 and 41,5548, and σ is 4,558. Meanwhile, the Weibull distribution shows conformity with the observed data at Jeneponto *offshore* location and the Rayleigh distribution for Banda Aceh location, while Weibull distribution for R^2 and Rayleigh distribution for RMSE at Kaliantan Lombok location. Based on the cumulative energy production calculation, the observed values at Jeneponto, Banda Aceh, and Kaliantan Lombok *offshore* locations are 45259,19 kWh/annual, 30555,13 kWh/annual, and 28631,53 kWh/ annual, respectively.

Key Words: Renewable Energy, Wind Energy, Weibull Distribution, Nakagami Distribution, Rayleigh Distribution



DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN	ii
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT.....	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR LAMPIRAN	x
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Manfaat Penelitian.....	6
1.5 Batasan Masalah.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Dasar Fisika Angin.....	8
2.2 Persamaan Fundamental Daya Angin	8
2.3 Turbin Angin	10
2.4 Daya Keluaran Dari Turbin Angin	12
2.5 Distribusi Weibull	14
2.6 Distribusi Rayleigh.....	16
2.7 Distribusi Nakagami.....	17
2.8 Goodness of Fit Test.....	18
2.9 PLTB Offshore	18
2.10 Windguru.....	19
2.11 Global Wind Atlas.....	19
2.12 Aventa AV-7	20
2.13 Ulasan Penelitian Serupa.....	20
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	24
3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian.....	24
3.2 Variabel Penelitian	24
3.2.1 Kecepatan Angin.....	25
3.2.2 Distribusi Weibull.....	25
3.2.3 Distribusi Nakagami	25
3.2.4 Distribusi Rayleigh	25
3.2.5 Periode waktu	26
3.3 Alat dan Bahan	26
3.4 Teknik Pengumpulan Data	26
3.5 Teknik Analisis Data	27
3.6 Alur Penelitian.....	28
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	30
4.1 Analisa Kecepatan Angin Hasil Observasi.....	30
4.1.1 Analisa Kecepatan Angin Hasil Observasi Jeneponto	30
4.1.2 Analisa Kecepatan Angin Hasil Observasi Banda Aceh.....	32
4.1.3 Analisa Kecepatan Angin Hasil Observasi Kaliantan Lombok	33
4.2 Analisa Potensi Kecepatan Angin	34
4.2.1 Estimasi Parameter Distribusi Weibull, Nakagami, dan Rayleigh	34



4.2.2 Perbandingan Grafik Fungsi Kepadatan Probrabilitas dan Fungsi Kepadatan Kumulatif Distribusi	35
4.3 Kalkulasi <i>Goodness of Fit Test</i>	41
4.4 Analisa Global Wind Atlas.....	42
4.4.1 Analisa Kecepatan Angin	42
4.4.2 Analisa Perbandingan	47
4.5 Kalkulasi Wind Energy Production (WEP).....	51
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	55
5.1 Kesimpulan.....	55
5.2 Saran.....	57
DAFTAR PUSTAKA.....	58



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Potensi kecepatan angin Sulawesi Selatan	2
Gambar 2 Skematik aliran udara melewati luas penampang silinder	9
Gambar 3 Komponen utama turbin angin sumbu horizontal	11
Gambar 4 Grafik daya turbin angin tipikal (kiri) & grafik distribusi frekuensi angin (kanan).....	13
Gambar 5 Grafik fungsi kepadatan probabilitas & fungsi kepadatan kumulatif Weibull.....	14
Gambar 6 Grafik fungsi kepadatan probabilitas & fungsi kepadatan kumulatif Rayleigh	16
Gambar 7 Grafik fungsi kepadatan probabilitas & fungsi kepadatan kumulatif Nakagami	17
Gambar 8 Kurva daya Aventa AV-7.....	20
Gambar 9 Lokasi penelitian	24
Gambar 10 Diagram alur penelitian	28
Gambar 11 Grafik & tabel deskripsi statistik kecepatan angin offshore Jeneponto tahun 2023.....	31
Gambar 12 Grafik & tabel deskripsi statistik kecepatan angin Banda Aceh tahun 2023.....	32
Gambar 13 Grafik & tabel deskripsi statistik kecepatan angin Kaliantan Lombok tahun 2023.....	33
Gambar 14 Perbandingan fungsi kepadatan probabilitas kecepatan angin offshore Jeneponto Tahun 2023	36
Gambar 15 Perbandingan fungsi kepadatan kumulatif kecepatan angin offshore Jeneponto Tahun 2023	37
Gambar 16 Perbandingan fungsi kepadatan probabilitas kecepatan angin Banda Aceh Tahun 2023	38
Gambar 17 Perbandingan fungsi kepadatan kumulatif kecepatan angin Banda Aceh Tahun 2023.....	39
Gambar 18 Perbandingan fungsi kepadatan probabilitas kecepatan angin Kaliantan Lombok Tahun 2023.....	39
Gambar 19 Perbandingan fungsi kepadatan kumulatif kecepatan angin Banda Aceh Tahun 2023.....	40
Gambar 20 Kecepatan angin rata-rata per jam offshore Jeneponto	43
Gambar 21 Kecepatan angin rata-rata per jam Banda Aceh.....	44
Gambar 22 Kecepatan angin rata-rata per jam Kaliantan Lombok.....	44
Gambar 23 Kecepatan angin rata-rata bulanan offshore Jeneponto.....	45
Gambar 24 Kecepatan angin rata-rata bulanan Banda Aceh	45
Gambar 25 Kecepatan angin rata-rata bulanan Kaliantan Lombok.....	46
Gambar 26 Kecepatan angin rata-rata tahunan offshore Jeneponto.....	46
Gambar 27 Kecepatan rata-rata tahunan Banda Aceh	47
Gambar 28 Kecepatan angin rata-rata tahunan Kaliantan Lombok.....	47
Gambar 29 Perbandingan kecepatan rata-rata angin dataset Windguru periode 2023 al Wind Atlas akumulasi periode 2008 – 2017 di offshore Jeneponto....	49
Gambar 30 Perbandingan kecepatan rata-rata angin dataset Windguru periode 2023 al Wind Atlas akumulasi periode 2008 – 2017 di Banda Aceh.....	50



Gambar 31 Perbandingan kecepatan rata-rata angin dataset Windguru periode 2023 dan Global Wind Atlas akumulasi periode 2008 – 2017 di Kaliantan Lombok51

Gambar 32 Perbandingan produksi energi kumulatif hasil observasi, distribusi Weibull, distribusi Nakagami, dan distribusi Rayleigh di lokasi offshore Jeneponto52

Gambar 33 Perbandingan produksi energi kumulatif hasil observasi, distribusi Weibull, distribusi Nakagami, dan distribusi Rayleigh di lokasi Banda Aceh53

Gambar 34 Perbandingan produksi energi kumulatif hasil observasi, distribusi Weibull, distribusi Nakagami, dan distribusi Rayleigh di lokasi Kaliantan Lombok53



DAFTAR TABEL

Tabel 1 Klasifikasi daya angin berdasarkan densitas daya angin & kecepatan angin	10
Tabel 2 Datasheet Aventa AV-7	20
Tabel 3 Ulasan penelitian serupa	21
Tabel 4 Kecepatan angin rata-rata bulanan offshore Jeneponto	31
Tabel 5 Kecepatan angin rata-rata bulanan Banda Aceh	32
Tabel 6 Kecepatan angin rata-rata bulanan Kaliantan Lombok.....	34
Tabel 7 Estimasi parameter distribusi Weibull, Nakagami, dan Rayleigh untuk kecepatan angin tahun 2023	35
Tabel 8 Evaluasi error R^2 dan RMSE tahunan pada distribusi Nakagami, Weibull, dan Rayleigh.....	41
Tabel 9 Data Global Wind Atlas untuk densitas daya angin dan kecepatan rata-rata angin di lokasi penelitian pada ketinggian berbeda	42
Tabel 10 Perbandingan kecepatan rata-rata Global Wind Atlas & hasil observasi.....	48



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Data kecepatan angin.....	62
Lampiran 2 Kode MATLAB untuk estimasi parameter distribusi Weibull, Nakagami, dan Rayleigh, serta menampilkan plot PDF dan CDF.....	110
Lampiran 3 Tabel hasil error distribusi Weibull, Nakagami, dan Rayleigh terhadap hasil observasi	113
Lampiran 4 Tabel hasil perhitungan fungsi kepadatan kumulatif hasil observasi, distribusi Weibull, distribusi Nakagami, dan distribusi Rayleigh	116
Lampiran 5 Tabel perhitungan produksi energi kumulatif hasil observasi, distribusi Weibull, distribusi Nakagami, dan distribusi Rayleigh	119



KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur penulis panjatkan kepada Allah Subhanahu Wa Ta'ala, atas berkat dan limpahan rahmat, kesehatan, dan petunjuk sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul “STUDI POTENSI KECEPATAN ANGIN UNTUK APLIKASI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN MENGGUNAKAN DISTRIBUSI WEIBULL, NAKAGAMI, DAN RAYLEIGH”. Penyusunan tugas akhir merupakan salah satu syarat kelulusan pada pendidikan strata satu (S1) di Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin sehingga penulisan tugas akhir ini tidak terlepas sebagai pemenuhan penulis untuk menyelesaikan studi sarjana.

Tugas akhir ini berisi penelitian yang bertujuan untuk mengetahui data kecepatan angin, distribusi kecepatan angin menggunakan tiga metode distribusi serta perbandingannya, dan untuk mengetahui produksi energi angin di *offshore* Jeneponto, Banda Aceh, dan Kaliantan Lombok. Selain itu, penelitian ini berguna untuk melakukan asesmen lokasi dan menambah referensi ilmiah pada utiliasi energi angin. Adapun metodologi penelitian ini menggunakan distribusi Weibull, Nakagami, dan Rayleigh untuk melakukan asesmen potensi angin yang dimulai dengan estimasi parameter masing-masing distribusi.

Dalam penyelesaian tugas akhir, penulis menyadari banyaknya dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Ibu dan Ayah tercinta, Ibu Asryirani Abdullah dan Bapak Mahmud Thahir, serta keluarga besar yang tak henti-hentinya memberikan semangat, dukungan, dan do'a sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik
2. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Syafaruddin, S.T, M.Eng., IPU. selaku dosen pembimbing penulis yang telah meluangkan waktunya untuk bertukar pikiran serta memberikan inspirasi, masukan, dan evaluasi dalam penyelesaian tugas akhir ini
3. Bapak Dr. Ikhlas Kitta, ST.MT dan Ibu Dr. Ir. Sri Mawar Said, M.T selaku dosen penguji yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan saran, koreksi, dan arahan dalam penyelesaian tugas akhir penulis



4. Seluruh dosen pengajar dan pegawai Departemen Teknik Elektro Universitas Hasanuddin atas bimbingan, didikan, kemudahan, dan bantuan yang telah diberikan kepada penulis selama menempuh perkuliahan di Universitas Hasanuddin yang sedikit banyaknya membantu penulis dalam menyelesaikan tugas akhir
5. Rekan-rekan mentor elektro angkatan 2020 yang telah menjadi wadah untuk melampiaskan keluh, kesah, canda, tawa, hingga tangis dan haru selama berjalannya perkuliahan serta dukungan dan dorongan moral selama penyelesaian tugas akhir
6. Jajaran Society of Renewable Energy Universitas Hasanuddin periode 2023/2024 yang telah menjadi wadah untuk bertukar pikiran, berbagi inspirasi, dan melakukan kerja-kerja progresif selama kepemimpinan berlangsung. Tidak mudah manajemen organisasi sebagai angkatan perintis. Namun, kita buktikan pada semua, walau dengan keterbatasan yang ada, kita percaya bahwa kita mampu untuk mengakhiri label angkatan perintis dengan lompatan luar biasa yang telah kita lakukan, yang bahkan tidak semua organisasi bisa melakukannya.
7. Keluarga besar IGNITE Smudama yang telah mendukung perjuangan penulis dari awal hingga akhir perkuliahan dan menjadi tempat kembali untuk bercerita tentang apa yang telah dilewati selama ini
8. Seluruh rekan-rekan hebat PROCEZ20R yang telah menemani penulis dalam berjuang menempuh perkuliahan sejak awal dan selalu ada sebagai wadah untuk berbagi wawasan, cerita, canda, dan tawa. Terima kasih telah hadir dalam perjalanan hidup penulis sebagai rekan kuliah yang memberikan warna dan makna di masa-masa perkuliahan. Seluruh tantangan yang tidak mudah kita alami bersama. Namun, kita kirimkan pesan pada semua, bahwa kebersamaan mempersatukan kita yang menjadikan tantangan bukan halangan. Semoga dimanapun kalian berada dan apapun yang dicita-citakan selalu diberikan kemudahan dan kesuksesan, serta selalu menginspirasi yang lain bahwa kebersamaan tidak can pandang umur, waktu, dan jarak.



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

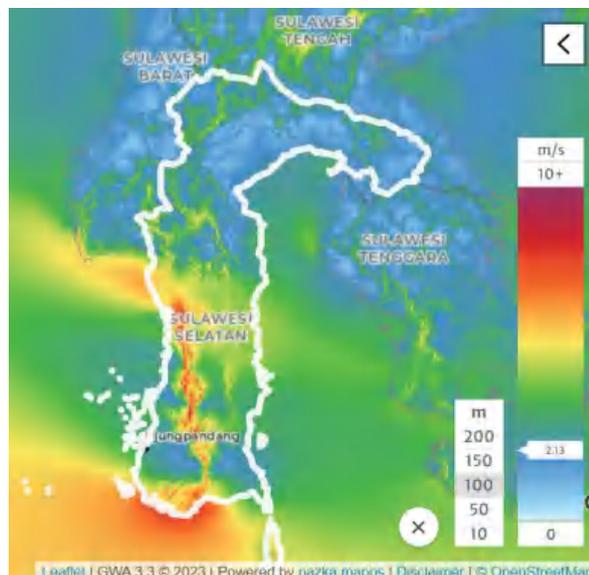
Tren pemanfaatan energi baru terbarukan (EBT) dalam sektor ketenagalistrikan di dunia terus meningkat seiring waktu, termasuk Indonesia. Energi keberlanjutan ini, menurut Peraturan Pemerintah (PP) Republik Indonesia No. 79 Tahun 2014, ditargetkan mencapai paling sedikit 23% di tahun 2025 dan 31% di tahun 2050. Bahkan, berdasarkan target skenario 1,5°C, yaitu target ambisius untuk mencapai net-zero emission secara global, Indonesia ditargetkan untuk dapat mencapai bauran EBT sebesar 100% di 2050 (IRENA, 2021). Target ini merupakan lompatan sangat jauh bagi Indonesia di dalam sektor ketenagalistrikan mengingat bauran EBT dalam sektor ini baru mencapai 19% di tahun 2019 (Climate Transparency, 2022). Oleh karenanya, topik energi baru terbarukan ini menjadi pembahasan utama bagi Indonesia di pertemuan-pertemuan penting dunia hingga domestik.

Perhatian pemerintah dalam sektor energi bukanlah tanpa sebab. Hal ini tidak terlepas dari komitmen Indonesia untuk menurunkan emisi karbon yang dilepaskan ke atmosfer sebagai manifestasi Indonesia yang telah menandatangani Paris Agreement pada COP 26. Sejalan dengan itu, berdasarkan data, sektor energi menempati posisi pertama sebagai penghasil emisi gas rumah kaca terbesar sebesar 65% di tahun 2019 (Climate Transparency, 2022). Di saat yang sama, sektor ketenagalistrikan juga menjadi sektor terkotor dengan menyumbang emisi CO₂ sebesar 43%, diikuti oleh sektor transportasi di urutan kedua sebesar 25%. Tentu hal ini sangat disayangkan mengingat Indonesia merupakan negara yang kaya atas sumber daya alam, termasuk sumber EBT.

Sebagai negara beriklim tropis, terletak pada cincin api dunia dan jalur khatulistiwa, serta salah satu negara kepulauan terbesar di dunia, Indonesia memiliki sumber potensi energi baru terbarukan yang sangat melimpah, salah satunya adalah energi angin. Energi ini memiliki potensi pemanfaatan sebagai tenaga listrik sebesar 155 GW, menjadi terbesar ketiga setelah energi surya (Dirjen EBTKE, 2023). Bahkan, potensi pemanfaatan turbin angin mencapai 108 GW di ketinggian 50 m dan 88 GW di ketinggian 100 m



(IESR, 2021). Tak hanya itu, potensi pemanfaatan turbin angin *offshore* juga sangat fantastis sebesar 14,722 TWh/tahun (Gernaat *et al.*, 2014) dan 6,816 TWh/tahun untuk pemanfaatan *low-wind-speed* turbin (Langer *et al.*, 2022). Potensi angin dengan kecepatan di atas 6 m/det ini banyak ditemui di Nusa Tenggara Timur (NTT), Kalimantan Selatan, Sulawesi Selatan, Nanggroe Aceh Darussalam, dan Riau (Dirjen EBTKE, 2023) dan potensi *offshore* dengan kecepatan di atas 8 m/det terletak di *offshore* Banten, *offshore* Kab. Kepulauan Tanimbar, *offshore* Kupang, *offshore* Pulau Wetar, *offshore* Sukabumi, dan *offshore* Kab. Jeneponto (Dirjen EBTKE, 2021). Walau demikian, pemanfaatan energi angin masih sangat minim, sebesar 0,15 GW atau kurang dari 0,1% dari potensinya (Dirjen EBTKE, 2023). Pemanfaatan PLTB ini hanya terletak di dua lokasi di Indonesia, yaitu di Kabupaten Sidrap dan Kabupaten Jeneponto, Sulawesi Selatan dengan masing-masing kapasitas sebesar 75 MW dan 72 MW.



Gambar 1 Potensi kecepatan angin Sulawesi Selatan (sumber: Global Wind Atlas)

Provinsi Sulawesi Selatan merupakan salah satu daerah dengan potensi energi angin yang potensial. Dari hasil penelitian sebelumnya, Sulawesi Selatan merupakan lokasi dengan energi *onshore* angin cukup tinggi dengan kecepatan 6 - 8 m/det, rapat daya 400 - 500 W/m², dan produksi energi tahunan 4 - 5 GWh/tahun, sedangkan potensi *offshore* terletak di Kab. Jeneponto dengan kecepatan rata-rata di atas 8 m/det pada ketinggian 100 m, rapat daya 500-600 W/m², dan produksi energi tahunan 5-6 GWh/tahun (Dirjen EBTKE, 2021; Mertosaputro dan Murti, 2013; Murti *et al.*, 2021). Lebih detail, data yang dianalisis oleh ESMAP menunjukkan



beberapa daerah di Sulawesi Selatan dengan kecepatan di atas 6 m/det, seperti Kab. Jeneponto, Kab. Pangkajene Kepulauan, *offshore* Jeneponto, Kab. Maros, Kab. Gowa, Kab. Barru, Kab. Soppeng, dan Kab. Sidrap. Namun, energi angin bukanlah utilitas pembangkit terbesar di jaringan listrik PLN Sulawesi Bagian Selatan, bahkan menjadi yang terakhir. Baruan pembangkit terbesar di jaringan ini adalah PLTU dan PLTA, sebesar 39,4% dan 32,9% masing-masingnya, dimana *variable renewable energy* (VRE) hanya sebesar 5,6%. Tak hanya itu, berdasarkan Rancangan Umum Penyedia 2021 – 2030, hingga tahun 2030, penambahan pembangkit berbasis energi angin ini hanya sebesar 130 MW (PLN, 2021). Semua hal ini mengindikasikan bahwa penambahan PLTB di jaringan PLN masih belum menjadi prioritas dan masih tersentralisasi di provinsi Sulawesi Selatan. Padahal, kesempatan untuk melakukan 100% penetrasi energi baru terbarukan dapat dilakukan, bahkan tanpa penyimpanan energi, dengan merealisasikan banyak pembangkit *variable renewable energy*, termasuk PLTB dan PLTS, dan melakukan superposisi profil energi untuk memenuhi permintaan energi (Al-Ghussain *et al.*, 2021). Oleh karenanya, penelitian tentang potensi studi potensi kecepatan angin perlu dilakukan, termasuk di luar daerah Sulawesi.

Beberapa penelitian sebelumnya telah dilakukan untuk menentukan potensi energi angin berdasarkan kecepatan angin menggunakan *weibull distribution*. Penelitian dari (Azad *et al.*, 2014) menunjukkan bahwa *weibull distribution* merepresentasikan hasil yang hampir sama dengan data hasil observasi lapangan. Dengan hasil yang sama, penelitian dari (Kang, 2021) menunjukkan *weibull distribution* memiliki *error* yang sangat kecil untuk menghitung distribusi kecepatan angin di pesisir Republik Korea dari data 10 tahun terakhir, utamanya menggunakan *moment method*, *empirical method of justus*, *empirical method of lysen*, dan *standard deviation method*. Penelitian lainnya, menunjukkan bahwa *weibull distribution* dapat digunakan untuk melakukan asesment eksploitasi energi angin melalui PLTB di beberapa lokasi di Indonesia, salah satunya di *offshore* Jeneponto, dengan beberapa skenario angin (Fauzy *et al.*, 2021). Terakhir,

1 dari (Martosapurto dan Murti, 2013) menunjukkan penggunaan *weibull distribution* untuk melakukan asesmen lokasi potensial di Sulawesi Selatan, seperti 2, Sidrap, dan Selayar. Namun, penelitian ini hanya memberikan hasil



berupa kerapatan daya secara tahunan. Dua penelitian yang disebutkan sebelumnya juga belum menyebutkan koordinat spesifik dari masing-masing lokasi, menggunakan data terbaru di tahun 2015, dan hanya terbatas di daerah-daerah dengan data yang tersedia oleh satelit atau badan klimatologi setempat.

Terkait distribusi Rayleigh, beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan penggunaan metode distribusi ini untuk beberapa asesmen kecepatan angin, salah satunya penelitian dari (Ahmad, 2020) yang menunjukkan prediksi yang mendekati hasil observasi asli, utamanya menggunakan metode *probability weighted moment* (PWM). Penelitian lain dari (Arikan *et al.*, 2015) menunjukkan penggunaan distribusi Rayleigh untuk menghitung karakteristik kecepatan angin wilayah Elmadag dengan menggunakan data per-jam dari tahun 2012 – 2013 pada ketinggian 10 meter. Namun, penelitian ini pula menyebutkan distribusi Rayleigh lebih cocok digunakan pada data dengan rata-rata kecepatan angin 4,5 m/det. Terakhir, penelitian dari (Gorla *et al.*, 2020) menunjukkan penggunaan dari distribusi ini di Ohio menggunakan data periode Januari 2009 hingga Desember 2018 dimana menghasilkan *power density function* (PDF) yang lebih dari hasil observasi yang diakibatkan dari adanya ketidakpastian prediksi dari kecepatan angin dan gangguan natural, seperti tornado dan badai.

Beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa distribusi Nakagami lebih cocok untuk mengevaluasi lokasi potensial untuk energi angin. Alavi *et al.* (2016) membandingkan delapan jenis distribusi untuk lima kota berbeda di Iran yang menunjukkan bahwa distribusi Nakagami lebih baik dalam memodelkan distribusi probabilitas data kecepatan angin, walau hasil antara distribusi Nakagami dan Weibull hampir seimbang. Penelitian Dookie *et al.* (2018) dan Yu *et al.* (2019) menunjukkan bahwa sebaran Nakagami memberikan hasil yang sangat baik dalam memprediksi data sebaran kecepatan angin untuk wilayah pesisir. Ounis dan Aries (2021) menyelidiki potensi tenaga angin di Aljazair; penelitian mereka menunjukkan bahwa distribusi Nakagami dan Weibull menunjukkan kinerja yang baik untuk distribusi kecepatan angin dengan kecepatan rata-rata tinggi.



litian ini melibatkan penggunaan tiga probabilitas, yaitu distribusi Rayleigh, dan Nakagami, untuk mengevaluasi potensi energi angin di lokasi. Ketiga metode distribusi probabilitas ini digunakan karena dapat

menghasilkan hasil prediksi yang mendekati dengan hasil observasi. Pun demikian, penelitian ini juga akan membandingkan ketiga metode ini untuk mendapatkan metode yang paling mendekati hasil observasi. Adapun, Kebaruan penelitian ini didasarkan dari penggunaan data kecepatan angin harian terbaru tahun 2023 yang menjadi acuan pengolahan data untuk distribusi probabilitas. Selain itu, pemilihan lokasi penelitian yang sebelumnya belum pernah diteliti untuk potensi angin juga menjadi keunikan dari penelitian ini. Tak hanya itu, penelitian yang menggunakan metode distribusi probabilitas ini akan berkontribusi pada pengidentifikasian potensi angin pada lokasi yang jarang diteliti sebelumnya. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat berdampak signifikan terhadap komparasi distribusi probabilitas dan identifikasi potensi angin di wilayah yang belum memiliki PLTB.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian di atas, maka dapat dirumuskan permasalahan pada penelitian ini, yaitu:

1. Bagaimana data kecepatan angin di *offshore* Jeneponto, Banda Aceh, dan Kaliantan Lombok?
2. Bagaimana distribusi kecepatan angin menggunakan distribusi Weibull, Nakagami, dan Rayleigh di *offshore* Jeneponto, Banda Aceh, dan Kaliantan Lombok?
3. Bagaimana perbandingan distribusi Weibull, Nakagami, dan Rayleigh terhadap data hasil observasi di lokasi *offshore* Jeneponto, Banda Aceh, dan Kaliantan Lombok?
4. Bagaimana produksi energi angin di *offshore* Jeneponto, Banda Aceh, dan Kaliantan Lombok?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui data kecepatan angin di *offshore* Jeneponto, Banda Aceh, dan Kaliantan Lombok



2. Untuk mengetahui distribusi kecepatan angin menggunakan distribusi Weibull, Nakagami, dan Rayleigh di *offshore* Jeneponto, Banda Aceh, dan Kaliantan Lombok
3. Untuk mengetahui perbandingan distribusi Weibull, Nakagami, dan Rayleigh terhadap data hasil observasi di lokasi *offshore* Jeneponto, Banda Aceh, dan Kaliantan Lombok
4. Untuk mengetahui produksi energi angin di *offshore* Jeneponto, Banda Aceh, dan Kaliantan Lombok

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini, yaitu:

1. Untuk melakukan asesmen lokasi pembangkit listrik tenaga bayu berdasarkan kecepatan angin menggunakan distribusi Weibull, Nakagami, dan Rayleigh di *offshore* Jeneponto, Banda Aceh, dan Kaliantan Lombok
2. Untuk menambah data dan referensi ilmiah pada bidang energi baru terbarukan, khususnya pada pengembangan implementasi pembangkit listrik tenaga bayu di *offshore* Jeneponto, Banda Aceh, dan Kaliantan Lombok
3. Penelitian ini diharapkan menjadi tolak ukur kemampuan dan potensi sebagai disiplin ilmu yang telah diperoleh di bangku perkuliahan

1.5 Batasan Masalah

Agar penelitian lebih terarah, ruang lingkup perlu untuk didefinisikan dalam penelitian ini, di antaranya:

1. Penelitian ini difokuskan pada lokasi di *offshore* Jeneponto, Banda Aceh, dan Kaliantan Lombok dengan titik koordinat yang telah ditentukan
2. Penelitian ini akan terbatas pada data sehingga variabilitas cuaca dan fluktuasi kecepatan angin akan mengandalkan data historis yang tersedia pada platform Windguru.



Penelitian ini menggunakan analisis Weibull, Nakagami, dan Rayleigh *distribution* sebagai kerangka kerja utama untuk mengevaluasi pola

kecepatan angin yang luarannya adalah distribusi probabilitas kecepatan angin di wilayah penelitian

4. Dalam melakukan asesmen potensi angin, penelitian ini hanya mempertimbangkan kecepatan angin sehingga aspek lain, seperti geografis, sosial, lingkungan, dan ekonomi, tidak dipertimbangkan



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dasar Fisika Angin

Sebagai salah satu elemen dasar di lingkungan, angin adalah udara atmosfer yang bergerak. Angin dapat terasa ringan dan alus, diam dan tidak terlihat dengan mata, atau bahkan kuat dan destruktif. Sumber dari angin ini adalah radiasi matahari dimana radiasi elektromagnetik dari matahari memancar secara tidak merata di permukaan Bumi (Kalmikov, 2009). Pemanasan yang tidak merata ini akan berdampak pada perbedaan hidrostatis sehingga kita akan menemui daerah-daerah dengan dominan tekanan tinggi maupun tekanan rendah. Dari sini, udara akan terdorong dari daerah bertekanan tinggi ke tekanan yang rendah sebagai akibat dari penyeimbangan gaya gesekan dan inersia akibat rotasi Bumi.

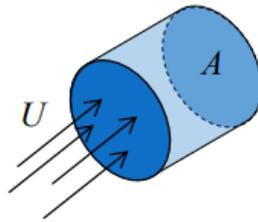
Salah satu karakteristik dari angin adalah variabilitas (Burton *et al.*, 2001). Dalam skala besar, variabilitas spasial merepresentasikan fakta bahwa iklim di dunia sangat bervariasi, ada yang berangin lebih dari lokasi lain, yang berdasar pada garis lintang. Dalam skala yang lebih lokal, angin akan bervariasi yang berdasar pada kondisi geografis. Tak hanya itu, data tahunan angin akan sangat sulit untuk diprediksi secara akurat, sedangkan variasi musiman lebih mudah untuk diprediksi, meskipun dalam skala waktu yang lebih kecil seperti waktu, tidak mudah untuk melakukan prediksi.

2.2 Persamaan Fundamental Daya Angin

Energi angin erat kaitannya dengan energi kinetik sebagai akibat dari adanya pergerakan udara. Ketika berbicara tentang *wind energy*, ini tidak terlepas dari pembahasan *wind power*. Daya merupakan *time-rate* dari energi, sehingga *wind power* adalah fluks energi angin dari luasan area tertentu per waktu. Fluks sendiri adalah konsep dasar dalam mekanika fluida, yang mengukur laju aliran kuantitas apa pun yang dibawa bersama fluida bergerak per satuan luas. Energi angin sendiri

gantungan pada tiga variabel, yaitu volume udara, kecepatan udara, dan area (Kalmikov, 2009). Sedangkan, *wind power* adalah energi yang tersedia sesuai dengan pangkat tiga dari kecepatan angin





Gambar 2 Skematik aliran udara melewati luas penampang silinder (sumber: Kalmikov, 2009)

Untuk memahami rumusan dari *wind power*, kita misalkan area elemen silinder $A \text{ m}^2$ yang dilewati oleh kecepatan angin U . Dengan rumusan volume berikut:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

dimana ρ adalah massa jenis medium, m adalah massa, dan V adalah volume dari ruang yang dilalui oleh angin, dan dengan menganggap bahwa bangun ruang yang terbentuk adalah silinder dimana didapatkan besaran volume dari perkalian A dengan panjang $U \text{ dt}$, sehingga didapatkan persamaan

$$\frac{dm}{dt} = \rho AU \quad (2)$$

Dari penjelasan sebelumnya, energi angin merupakan energi yang dihasilkan dari pergerakan udara, yang erat kaitannya dengan energi kinetik dan dapat dirumuskan sebagai

$$KE = \frac{1}{2} mU^2 \quad (3)$$

Wind power merepresentasikan energi angin persatuan waktu. Dengan demikian, dengan menggunakan artian didapatkan persamaan

$$Pw = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} U^2 \quad (4)$$

Dengan melakukan substitusi dari persamaan awal ke persamaan di atas, didapatkan rumusan fundamental dari *wind power*

$$Pw = \frac{1}{2} \rho AU^3 \quad (5)$$

Selain itu, dari persamaan di atas didapatkan pula persamaan rapat daya angin yang dapat diartikan sebagai besaran fluks dari energi angin

$$\frac{Pw}{A} = \frac{1}{2} \rho U^3 \quad (6)$$



at daya angin ini sering digunakan untuk melakukan perbandingan angin
medulikan ukuran turbin angin dan menjadi basis kuantitatif dalam

klasifikasi standar *wind power* dari National Renewable Energy Laboratory (NREL) (Kalmikov, 2009).

Tabel 1 Klasifikasi daya angin berdasarkan densitas daya angin & kecepatan angin

	Kelas Daya Angin	Densitas Daya Angin (Wm^{-2})	Kecepatan Angin (m/det)	Potensi Sumber
1	1-	0 – 100	0 – 4,381	<i>Very Poor</i>
	1+	100 – 200	4,381 – 5,588	
2	2-	200 – 250	5,588 – 6,035	<i>Poor</i>
	2+	250 – 300	6,053 – 6,393	
3	3-	300 – 350	6,393 – 6,706	<i>Marginal</i>
	3+	350 – 400	6,706 – 7,018	
4	4-	400 – 450	7,018 – 7,287	<i>Good</i>
	4+	450 – 500	7,287 – 7,510	
5	5-	500 – 550	7,510 – 7,778	<i>Very Good</i>
	5+	550 – 600	7,778 – 8,002	
6	6-	600 – 700	8,002 – 8,404	<i>Excellent</i>
	6+	700 – 800	8,404 – 8,807	

Sumber: National Renewable Energy Laboratory (NREL)

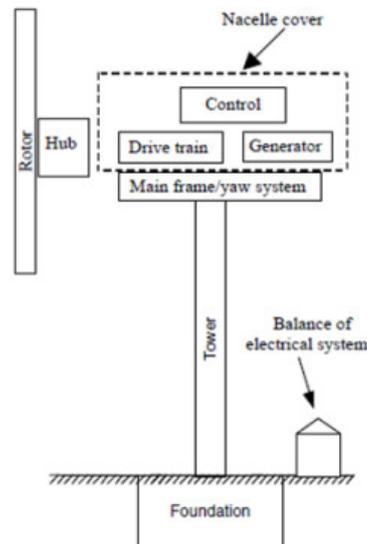
2.3 Turbin Angin

Turbin angin adalah mesin yang dapat mengonversi daya pada angin menjadi listrik. Proses konversi ini menggunakan gaya angkat aerodinamis dasar untuk menghasilkan torsi positif pada poros yang berputar, kemudian menghasilkan produksi tenaga mekanis, dan ditransformasikan menjadi energi listrik dalam generator (Manwell et al., 2009). Namun, tidak seperti kebanyakan generator, turbin angin memproduksi energi hanya ketika angin tersedia sehingga keluaran dari turbin angin pada dasarnya adalah *fluctuating* dan *non-dispatchable*.

Secara umum, turbin angin terbagi atas dua jenis jika diklasifikasikan berdasarkan sumbu putaran poros rotor, yaitu turbin angin sumbu horizontal dan turbin angin sumbu vertikal. Turbin angin sumbu horizontal, sering dikenal sebagai *horizontal axis wind turbine* (HAWT), merupakan turbin angin yang memiliki sumbu putaran poros rotor horizontal dan generator elektrik yang keduanya terletak di puncak menara turbin. Berkebalikan dengan turbin angin sumbu vertikal, atau sering disebut sebagai *vertical axis wind turbine* (VAWT), merupakan turbin angin sumbu putaran poros rotor vertikal yang memiliki generator dan *gearbox* di bagian bawah turbin serta bentuk bilah rotor yang unik yang didesain



untuk menghasilkan daya dari angin tanpa memedulikan ke arah mana angin bertiup.



Gambar 3 Komponen utama turbin angin sumbu horizontal

Saat ini, tipe turbin angin yang sangat banyak ditemukan sebagai utilitas pembangkit skala besar adalah turbin angin sumbu horizontal. Turbin angin ini memiliki beberapa komponen utama, di antaranya:

- Rotor, yaitu bilah berbentuk aerofoil yang mengambil angin dan secara aerodinamis mengubah energi kinetiknya menjadi energi mekanik melalui poros yang terhubung.
- Gearbox, yaitu komponen yang mengubah kecepatan putaran poros agar sesuai dengan generator.
- Generator, yaitu perangkat yang memproduksi listrik ketika kerja mekanik diberikan kepada sistem.
- Nacelle, merupakan komponen yang melindungi komponen penting, seperti generator dan kontrol, yang berada di atas turbin dari gangguan eksternal, misalnya cuaca
- Sistem yaw, merupakan sistem yang diperlukan untuk menjaga poros rotor tetap sejajar dengan angin.



ontrol dan Sistem Proteksi, yaitu komponen yang memastikan bahwa turbin tidak akan bekerja dalam kondisi berbahaya, termasuk sistem rem yang dipicu

oleh sinyak kecepatan angin yang lebih tinggi untuk menghentikan pergerakan rotor di bawah hembusan angin yang berlebihan.

- Menara, merupakan poros utama yang menghubungkan rotor di ketinggian tertentu dengan pondasi.
- Pondasi, yaitu penopang seluruh turbin angin yang dipasang di tanah. Biasanya dibangun dari benda padat, seperti beton, untuk menjaga integritas strukturalnya.

2.4 Daya Keluaran Dari Turbin Angin

Fraksi daya yang dihasilkan dari daya angin oleh turbin angin secara praktis biasanya diberi simbol C_p yang berarti koefisien kinerja dimana nilai koefisien kinerja ini tidak konstan, melainkan bergantung pada kecepatan angin, kecepatan rotasional, dan parameter bilah turbin. Menggunakan notasi ini, keluaran daya mekanis sebenarnya dapat ditulis sebagai (Johnson, 2006)

$$P_m = C_p \left(\frac{1}{2} \rho A U^3 \right) = C_p P_w \quad (7)$$

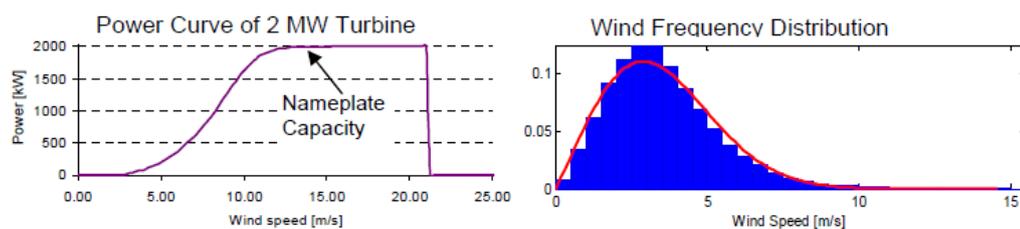
dimana nilai P_m akan selalu kecil daripada P_w . Faktanya, terdapat batas atas teoritis pada fraksi daya maksimum yang dapat diekstraksi - dikenal sebagai Betz Limit. Menurut teori Betz, koefisien daya maksimum yang mungkin $C_p = 16/27$ (efisiensi 59%) adalah cara terbaik yang dapat dilakukan turbin angin konvensional dalam mengekstraksi tenaga dari angin. Alasan mengapa lebih tinggi, mis. 100%, efisiensi tidak mungkin terjadi karena sifat mekanis fluida tenaga angin, bergantung pada aliran udara yang terus menerus bergerak. Jika, secara hipotesis, 100% energi kinetik diekstraksi, maka aliran udara akan berkurang hingga berhenti total dan tidak ada kecepatan yang tersedia untuk mempertahankan aliran melalui perangkat ekstraksi energi, terlepas dari teknologi turbin angin spesifik yang digunakan. Efisiensi ekstraksi maksimum dicapai pada keseimbangan optimal perlambatan angin terbesar yang masih mempertahankan aliran cukup cepat melewati turbin.

Metrik penting lainnya dalam efisiensi tenaga angin adalah *capacity factor* (CF) yang mengukur fraksi kapasitas pembangkit terpasang yang menghasilkan listrik (Lmikov, 2009).

$$CF = \frac{E_{actual}}{E_{ideal}} = \frac{time \cdot \bar{P}}{time \cdot P_n} = \frac{\bar{P}}{P_n} \quad (8)$$



CF adalah rasio energi aktual yang dihasilkan dengan energi yang berpotensi dihasilkan oleh sistem dalam kondisi lingkungan ideal. Mengingat energi adalah hasil kali laju waktu, yaitu daya dengan waktu, maka rasio energi ini sama dengan rasio daya rata-rata P terhadap daya nominal sistem. Untuk turbin angin tunggal, daya nominalnya sama dengan kapasitas papan namanya, biasanya merupakan daya maksimum yang dapat dihasilkan dalam kondisi angin yang optimal, yang merupakan grafik pada saat angin kencang tepat di bawah kecepatan angin *cut-out* pada kurva daya (*power curve*).



Gambar 4 Grafik daya turbin angin tipikal (kiri) & grafik distribusi frekuensi angin (kanan) (sumber: Kalmikov, 2009)

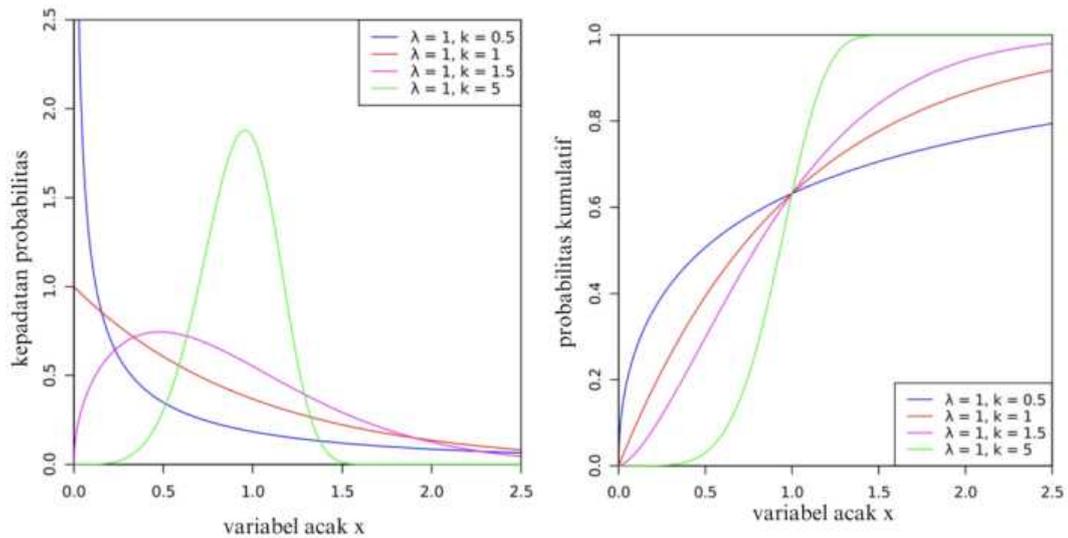
Nilai rata-rata CF untuk proyek yang layak secara ekonomi adalah 30%, dan mencapai sekitar 50% di wilayah dengan sumber daya angin yang sangat baik. CF didasarkan pada karakteristik turbin dan lokasi – dengan mengintegrasikan kurva daya dengan variabilitas sumber daya angin menghasilkan pembangkitan aktual atau daya rata-rata.

Dalam perhitungan daya keluaran turbin, produksi energi kumulatif dapat menjadi acuan suatu potensi energi yang dihasilkan oleh turbin di lokasi tertentu. Produksi energi kumulatif adalah jumlah total energi yang dihasilkan sumber daya energi, dalam hal ini energi angin dari turbin angin, selama periode tertentu (biasanya dalam periode satu tahun). Perhitungan produksi energi kumulatif ini akan melibatkan kurva daya dan distribusi probabilitas. Adapun rumusan dari energi produksi energi kumulatif adalah sebagai berikut:

$$CEP = \int_0^V P(v) \cdot f(v) \cdot dv \quad (9)$$



2.5 Distribusi Weibull



Gambar 5 Grafik fungsi kepadatan probabilitas & fungsi kepadatan kumulatif Weibull

Ada beberapa fungsi kepadatan yang dapat digunakan untuk menggambarkan kurva frekuensi kecepatan angin. Dua fungsi yang paling umum adalah fungsi Weibull dan fungsi Rayleigh. Untuk pembaca yang cenderung statistik, Weibull adalah kasus khusus dari Pearson Tipe III atau distribusi gamma umum, sedangkan distribusi Rayleigh [atau chi dengan dua derajat kebebasan (χ^2)] adalah bagian dari Weibull. Weibull adalah distribusi dua parameter sedangkan Rayleigh hanya memiliki satu parameter. Hal ini membuat Weibull lebih serbaguna dibandingkan Rayleigh. Dalam distribusi weibull, fungsi densitas probabilitas dan fungsi densitas kumulatif akan dilibatkan. Dalam probabilitas dan statistik, fungsi densitas probabilitas adalah fungsi yang merepresentasikan distribusi probabilitas dari suatu variabel acak kontinu, sedangkan fungsi distribusi kumulatif adalah fungsi yang mengilustrasikan variabel acak tersebut akan mengambil nilai kurang dari atau sama dengan suatu nilai.

Parameter skala (c) dan parameter bentuk (k) memiliki hubungan terhadap grafik fungsi kepadatan probabilitas dan fungsi kepadatan kumulatif (Jiang, 2011). Ketika parameter skala (c) bernilai besar, ini memungkinkan kecepatan angin yang sangat tinggi mungkin terjadi, sedangkan ketika bernilai kecil distribusi akan probabilitas signifikan untuk kecepatan angin rendah sehingga angin lebih sering terjadi. Untuk parameter bentuk (k), nilai k lebih dari 1 entasikan kecepatan angin yang meningkat seiring dengan berjalannya



waktu, sedangkan nilai kurang dari 1 mengilustrasikan kecepatan angin yang menurun seiring dengan berjalannya waktu.

Ekspresi umum fungsi kepadatan probabilitas Weibull dua parameter untuk kecepatan angin dapat ditunjukkan dengan persamaan berikut (Karsli dan Geçit, 2003; Incecik dan Erdogmus, 1995).

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp \left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (10)$$

dimana $f(v)$, v , k , dan c menyatakan masing-masingnya adalah fungsi weibull terhadap kecepatan angin, kecepatan angin, serta dua parameter weibull, yaitu parameter *shape* dan parameter *scale*. Selain itu, fungsi distribusi Weibull kumulatif dapat dinyatakan sebagai berikut (Ulgen dan Hepbasli, 2002; Persaud et al., 1999).

$$F(v) = 1 - \exp \left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (11)$$

Ada beberapa metode untuk menentukan parameter distribusi weibul. Menurut penelitian dari (Kang et al., 2021), metode *empirical method of Justus* (EMJ) dan *empirical method of Lysen* (EML) merupakan dua metode yang dapat digunakan untuk menghitung parameter distribusi weibull karena menghasilkan *error level* dan fluktuasi yang kecil dan memberikan prediksi kecepatan angin yang dapat mendekati hasil sebenarnya.

EMJ menyatakan faktor bentuk berdasarkan kecepatan angin rata-rata dan deviasi standarnya. Faktor bentuk dinyatakan sebagai fungsi gamma sebagai berikut (Costa Rocha et al., 2012; Hove et al., 2014):

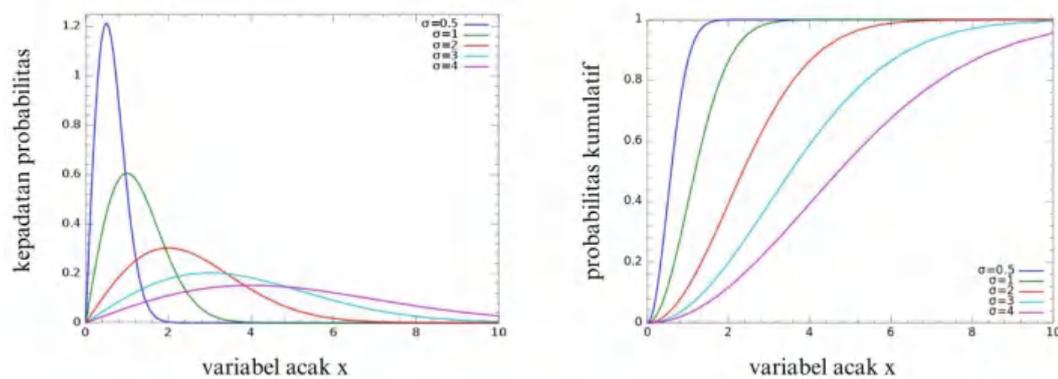
$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^{-1.086} \quad (12)$$

Dalam EML, faktor skala dapat dirumuskan sebagai berikut (Elie Bertrand et al., 2020)

$$c = \bar{v} \left(0.568 + \frac{0.433}{k}\right)^{-1/k} \quad (13)$$



2.6 Distribusi Rayleigh



Gambar 6 Grafik fungsi kepadatan probabilitas & fungsi kepadatan kumulatif Rayleigh

Distribusi Rayleigh merupakan distribusi probabilitas kontinu yang diutilisasi untuk memodelkan variabel acak yang hanya dapat mengambil nilai lebih besar atau sama dengan nol. Distribusi ini dikenalkan pertama kali oleh Lord Rayleigh. Fungsi Rayleigh juga sering diaplikasikan dalam studi tentang asesmen lokasi pembangkit listrik berdasarkan kecepatan angin. Jika di suatu wilayah kurang cocok memakai distribusi Weibull maka distribusi Rayleigh menjadi pilihan berikutnya. Distribusi ini memiliki parameter utama, yaitu parameter skala σ . Parameter skala ini mengontrol seberapa lebar distribusi, semakin besar nilai σ , semakin besar lebar nilai harapan dari distribusi dan lebar distribusi, sebaliknya, semakin kecil nilai σ , semakin sempit distribusi. Parameter ini dapat diestimasi dengan menggunakan pendekatan *maximum likelihood estimation* (MLE) dengan rumusan

$$\hat{\sigma}_{ML} = \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n v_i^2} \quad (14)$$

Adapun, ekspresi umum fungsi kepadatan probabilitas Rayleigh untuk kecepatan angin dapat ditunjukkan dengan persamaan berikut (Anderson, 2023)

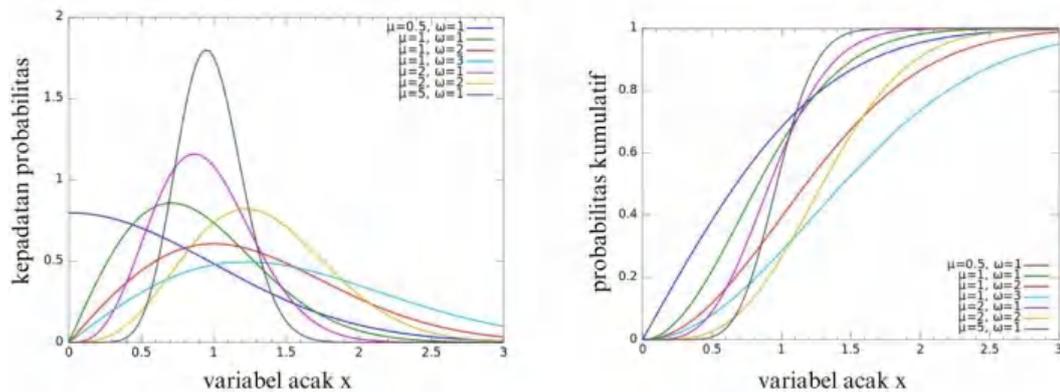
$$f(x; \sigma) = \frac{v}{\sigma^2} e^{-v^2/(2\sigma^2)} \quad (15)$$

dimana $f(x, \sigma)$, σ , dan v menyatakan masing-masingnya adalah fungsi distribusi densitas Rayleigh terhadap kecepatan angin, parameter skala distribusi, dan variabel acak kontinu berupa angin, Selain itu, fungsi distribusi Rayleigh kumulatif dapat dinyatakan sebagai berikut

$$F(x; \sigma) = 1 - e^{-v^2/(2\sigma^2)} \quad (16)$$



2.7 Distribusi Nakagami



Gambar 7 Grafik fungsi kepadatan probabilitas & fungsi kepadatan kumulatif Nakagami

Distribusi Nakagami yang juga dikenal sebagai distribusi Nakagami- m adalah model umum yang diusulkan oleh Nakagami (Nakagami, 1960) Model ini adalah distribusi probabilitas dengan dua parameter yang terkait dengan distribusi gamma. Pada awalnya, distribusi Nakagami digunakan untuk memodelkan sinyal radio seluler dan saluran fading (Badrudduza et al., 2020; Noga dan Studański, 2016; Sánchez et al., 2021). Distribusi Nakagami mulai banyak digunakan dalam beberapa penelitian untuk memodelkan data distribusi kecepatan angin dan dianggap sebagai alternatif dari distribusi Weibull dalam pemodelan data distribusi kecepatan angin.

Berbeda dengan distribusi Weibull, distribusi Nakagami menggunakan parameter bentuk dan skala yang masing-masingnya dapat dituliskan sebagai m dan Ω (m/\det). Parameter bentuk m akan mempengaruhi bentuk distribusi, sedangkan parameter skala Ω mengontrol skala distribusi. Semakin besar m , distribusi semakin mirip dengan distribusi Gaussian dan lebih terpusat, sedangkan semakin besar nilai Ω menghasilkan distribusi yang lebih lebar. Kedua parameter ini dapat dicari menggunakan program Matlab dengan menggunakan metode *maximum likelihood estimation* (MLE) berdasarkan persamaan di bawah (Suriadi et al., 2023)

$$m = \frac{E[v^2]^2}{\text{Var}[v^2]} \quad (17)$$

$$\Omega = E[v^2] \quad (18)$$



si densitas probabilitas (PDF), fungsi densitas kumulatif (CDF), serta rata-kecepatan angin \bar{v} dapat dikalkulasikan dengan persamaan di bawah (Suriadi et al., 2023)

$$f(v, m, \Omega) = \frac{2m^m}{\Gamma(m)\Omega^m} v^{2m-1} \exp\left[-\frac{m}{\Omega} v^2\right] \quad (19)$$

$$F(v, m, \Omega) = 1 - \frac{P\left(m, \frac{m}{\Omega} v^2\right)}{\Gamma(m)} \quad (20)$$

$$\bar{v} = \frac{\Gamma\left(m + \frac{1}{2}\right)}{\Gamma(m)} \left(\frac{\Omega}{2m}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

2.8 Goodness of Fit Test

Untuk melakukan asesmen terhadap fungsi kepadatan probabilitas dalam memodelkan kecepatan angin, ada beberapa metode yang dapat digunakan, di antaranya menggunakan indikator *coefficient of determination* R^2 dan *root mean square error* (RMSE). Koefisien determinasi R^2 adalah ukuran yang digunakan untuk mengevaluasi seberapa baik model statistik memprediksi hasil (Turney, 2022). Indikator ini digunakan untuk mengukur hubungan linear antara probabilitas dan prediksi probabilitas dalam suatu distribusi, R^2 dapat dirumuskan dengan

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (22)$$

Di sisi lain, *root mean square error* (RMSE) adalah ukuran yang digunakan untuk mengevaluasi seberapa baik model statistik memprediksi hasil. RMSE mengukur perbedaan antara nilai aktual dari data dan nilai prediksi dari model statistik. RMSE dapat dihitung dengan rumus berikut (Aziz, 2023):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (23)$$

dengan y_i adalah nilai aktual dari data ke- i , \hat{y}_i adalah nilai prediksi dari model statistik pada data ke- i , dan n adalah jumlah data

2.9 PLTB Offshore

Pembangkit Listrik Tenaga Bayu merupakan salah satu pembangkit yang masih digunakan di negara dengan kategori angin tinggi, utamanya PLTB lepas pantai. Melalui ladang turbin angin di lepas pantai, PLTB *offshore* dapat menghasilkan energi lebih tinggi per jumlah turbin terpasang dibandingkan pembangkit angin di darat. Selain itu, instalasi PLTB di lepas pantai memiliki beberapa keunggulan, di antaranya tidak memiliki permasalahan lahan, mengingat lahan dibutuhkan untuk PLTB *on-land* terbilang besar dan kompleks, dan instalasi



di laut yang lebih mudah dibandingkan instalasi di darat, mulai dari distribusi komponen ke target lokasi, pemasangan pondasi, hingga pendirian turbin angin.

PLTB *offshore* jenis *low-wind-speed* dinilai lebih cocok untuk diterapkan di Indonesia sebagai negara yang termasuk dalam kategori angin rendah, seperti PLTB 2,1 MW dengan diameter 114 m yang dimodifikasi dengan *cut-in speed* 1,5 m/det dan *rated wind speed* 9 m/det. Dengan penggunaan turbin ini pada kawasan dengan kedalaman 55 meter, potensi PLTB lepas pantai yang dapat dihasilkan adalah sebesar 6,816 TWh/tahun (Langer et al., 2022). Proyeksi ini bernilai 11 – 25 kali lebih besar dari proyeksi listrik pada tahun 2018 dan 1,3 – 3 kali dari proyeksi listrik pada tahun 2050.

2.10 Windguru

Windguru adalah platform website penyedia informasi meteorologi, seperti angin, arah angin, temperatur udara, gelombang laut, arah gelombang laut, periode gelombang laut, presipitasi, dan kondisi awan. Windguru menyediakan informasi ramalan untuk beberapa waktu ke depan maupun arsip dari parameter meteorologi beberapa waktu ke belakang. Windguru mengumpulkan data melalui Windguru Wind Station yang tersebar di 550 lokasi di seluruh dunia. Windguru Wind Station melaporkan rata-rata, kecepatan angin minimum dan maksimum, serta arah angin setiap menit, bersamaan dengan suhu. Windguru Wind Stations menggunakan anemometer buatan Amerika Serikat untuk akurasi dan ketahanan alat. Ada beberapa pemodelan cuaca Windguru yang akan menentukan akurasi dan durasi dari prediksi parameter meteorologi, seperti GSF 13 km (Global Forecast System), 4WRF 3 km et 9 km (Weather Research and Forecasting), ZEPHR-HD 4 km et 9 km (Modèle Zephyr) Spain – Portugal, ICON 7 km (Icosahedral Nonhydrostatic) Europe, dan HIRLAM 7,5 km (High Resolution Limited Area Model) Europe.

2.11 Global Wind Atlas

Global Wind Atlas adalah web gratis yang dikembangkan untuk mengumpulkan nsi angin di seluruh tempat di dunia. Global Wind Atlas dikembangkan artemen Energi Angin di DTU Wind Energy dan World Bank. Global atlas diluncurkan pada Tahun 2015 oleh IRENA dan DTU dan



disempurnakan dengan data yang akurat pada 2021. Global Wind Atlas mengolah data angin dengan menggunakan metode pemodelan mikroskala yang dapat menangkap variasi kecepatan angin pada skala kecil, sehingga menghasilkan estimasi yang lebih akurat. Metode ini didasarkan pada metodologi atlas angin berbasis observasi, yang dikembangkan untuk Atlas Angin Denmark dan kemudian Atlas Angin Eropa, dan diimplementasikan dalam perangkat lunak WasP.

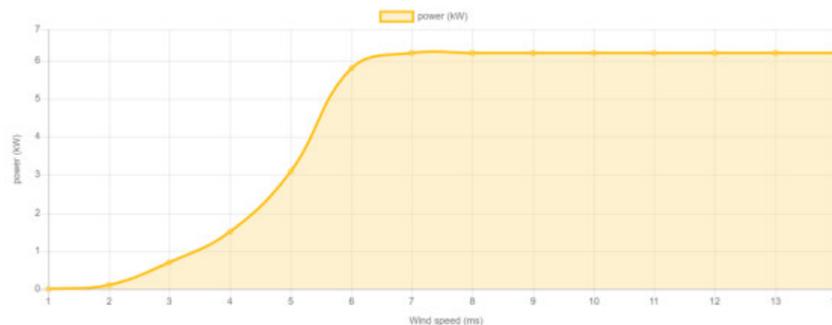
2.12 Aventa AV-7

Turbin angin model Aventa AV-7 merupakan turbin angin kelas kecil yang dikeluarkan oleh perusahaan asal Swiss, yaitu Aventa. Adapun, spesifikasi dari model turbin ini sebagai berikut (Suriadi et al., 2023):

Tabel 2 Datasheet Aventa AV-7

Model Turbin	P_{rs} (kW)	v_{ci} (m/det)	v_{rs} (m/det)	v_{co} (m/det)	Ketinggian Hub (m)	Diameter (m)
Aventa AV-7	6,2	2	6	14	18	12,8

Sedangkan kurva daya dari turbin Aventa AV-7 adalah sebagai berikut



Gambar 8 Kurva daya Aventa AV-7

2.13 Ulasan Penelitian Serupa

Berdasarkan *literature review* yang telah dilakukan, berikut adalah penelitian serupa yang menunjang penelitian ini



Tabel 3 Ulasan penelitian serupa

Penulis	Metode	Sumber Data	Periode	Pengujian	Lokasi
Suriadi et al., 2023	Weibull (Empirical Method of Justus) & Nakagami (Maximum Likelihood Estimatio)	Windguru	1 tahun (2021)	R ² & Root Mean Square Error	Kuta Raja, Banda Aceh & Lhoknga, Aceh Besar (Indonesia)
Fauzy et al., 2021	Weibull	WRF mesoscale	1 tahun (2015)	-	Banyuwangi, Baron, Sukabumi, dan Lebak (<i>onshore</i>) & Banten, Jeneponto, dan Pulau Wetar (<i>offshore</i>) (Indonesia)
Kang et al., 2021	Weibull (Empirical Method of Justus, Empirical Method of Lysen, Power Density Method, Moment Method, Maximum Likelihood Method, Graphical Method, Energy Pattern Factor Method, Modified Maximum Likelihood Method, Standard Deviation Method, Modified Energy Pattern Factor method, Alternative Minimum Likelihood Method, Equivalent Energy Method)	Stasiun Lokal	10 tahun (2010- 2019)	R ² , Root Mean Square Error, chi-square (χ^2), Mean Absolute Percentage Error, Kolmogorov-Sminrnov Test, Relative Percentage Error, Mean Percentage Error, Correlation Coeffecient, Relative Root Mean Square Error, Index of Agreement, Mean Absolute Percentage Error, Relative Bias, Best Bin Size	Pulau Maldo (Korea Selatan)



Penulis	Metode	Sumber Data	Periode	Pengujian	Lokasi
Alavi et al., 2016	Weibull (Maximum Likelihood Estimation, Exponential, Gamma, Lognormal, Inverse Gaussian, Log - Logistic, Nakagami (Maximum Likelihood Estimation, Generalized Exterme Value)	Stasiun Lokal	Berbeda-beda tiap lokasi (minimum 1 tahun & maksimum 5 tahun)	R^2 , Root Mean Square Error, Akaike Information Criterion, Bayesian Information Criterion	Chabahar, Khaf, Lutak, Rafsanjan, Zabol (IRAN)
Ahmad, 2020	Rayleigh (Probability Weighted Moment, Maximum Likelihood Method, Moment Method, Ordinary Least Square)	Stasiun Lokal	31 tahun (1980-2011)	Mean Absolute Error & Mean Squared Error	Muscat (Oman)
Aziz et al., 2023	Weibull (Graphical Method, Empirical Method of Justus, Empirical Method of Lysen, Energy Pattern Factor Method, Moment Method, Maximum Likelihood Method, Modified Maximum Likelihood Method, Alternative Maximum Likelihood Method, Least Square Method, Weighted Least Square Method, Curve Fitting Method, Wind Variability Method, Moroccan Method, Median and Quartile Method)	Stasiun Lokal	10 tahun (2005-2014)	Root Mean Square Error & R^2	Congo, Botswana, Mauritania
	Rayleigh	Stasiun Lokal	1 tahun (2012-2013)	-	Ankara (Turki)

Penulis	Metode	Sumber Data	Periode	Pengujian	Lokasi
Gorla et al., 2020	Rayleigh	National Centers for Environmental Information	9 tahun (2009- 2018)	-	Ohio (US)
Azad et al., 2014	Weibull (Graphical Method, Method of Moments, Standard Deviation Method, Equivalent Energy Method)	Statisun Lokal	6 tahun (1998- 2004)	Relative Percentage Error, Root Mean Square Error, Mean Percentage Error, Mean Absolute Percentage Error, Chi-SE, R ²	Pulau Hatiya (Bangladesh)
Mertosaputro dan Murti, 2013	Weibull	BMKG, LAPAN, Winrock International USA, Wind Guar Germany	15 tahun	-	Baron (DIY), Lebak (Banten), Nusa Penida (Bali), Oelbubuk (NTT), Bantul (DIY), Sukabumi (Jawa Timur), Purworejo (Jawa Tengah), Garut (West Java), Sidrap (Sulawesi Selatan), Jeneponto (Sulawesi Selatan), Selayar (Sulawesi Selatan)

