

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi di seluruh dunia terus meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi dan perkembangan industri. Dalam konteks ini, pencarian sumber energi terbarukan menjadi semakin mendesak, terutama untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil yang berdampak negatif terhadap lingkungan. Energi angin, sebagai salah satu sumber energi terbarukan yang paling menjanjikan, menawarkan potensi yang signifikan untuk memenuhi kebutuhan energi tersebut.

Provinsi Maluku adalah wilayah strategis di Indonesia dengan potensi energi angin yang cukup besar. Keberadaan angin yang berhembus di provinsi ini dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan. Studi tentang potensi energi angin di provinsi ini menunjukkan bahwa beberapa wilayah, seperti Kota Ambon dan Pulau Seram, memiliki kecepatan angin rata-rata yang cukup tinggi. Misalnya, penelitian oleh (Habibie et al., 2011) menemukan bahwa di beberapa lokasi di Maluku, kecepatan angin bisa mencapai 4,3 m/s. Penemuan ini menunjukkan bahwa wilayah-wilayah dengan kecepatan angin yang tinggi ini dapat menjadi lokasi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) yang efektif. Selain itu, dengan adanya kebijakan pemerintah yang mendukung pengembangan energi terbarukan, yang membuat potensi ini semakin penting untuk dikaji lebih lanjut.

Tinjauan komprehensif yang diterbitkan dalam *Renewable and Sustainable Energy Reviews* pada bulan November 2024 meneliti pesatnya perluasan energi angin lepas pantai. Studi tersebut menyoroti bahwa sejak tahun 2014, kapasitas terpasang hampir meningkat tiga kali lipat secara global, melampaui 1 terawatt (TW) untuk pertama kalinya pada tahun 2023. Pertumbuhan ini disebabkan oleh kebutuhan akan sumber energi terbarukan, kemajuan teknologi, dan peningkatan investasi (Jung, 2024).

Kondisi geografi Provinsi Maluku, yang terdiri dari banyak pulau dan memiliki garis pantai yang panjang, menjadi salah satu pengaruh pola angin yang ada. Angin yang berhembus di daerah pesisir cenderung lebih kencang dibandingkan dengan daerah pedalaman. Dalam penelitian oleh Suherman dan Raharjo (2024) mengungkapkan bahwa Provinsi Maluku memiliki potensi tenaga angin yang signifikan dengan daya rata-rata $5,16 \times 10^4$ Watt. Pentingnya pengembangan infrastruktur untuk mendukung pemanfaatan energi angin mengingat keuntungan ekonomi dan lingkungan yang dapat diperoleh. Oleh karena itu, pengukuran dan analisis lebih lanjut diperlukan untuk mengeksplorasi potensi tenaga angin di Provinsi Maluku (Muhamad Arif Jumansa et al., 2024).

Sejarah kebencanaan di Provinsi Maluku menunjukkan bahwa bencana alam seperti gempa bumi dapat berdampak pada infrastruktur dan pengembangan energi angin terbarukan. Namun, energi angin masih merupakan alternatif yang menjanjikan untuk memenuhi kebutuhan listrik masyarakat. Dalam situasi ini, penting untuk melakukan kajian klimatologis angin yang menyeluruh untuk menentukan lokasi yang paling tepat untuk pembangunan PLTB. Penelitian ini akan mempertimbangkan ketidakpastian dalam analisis data angin. Dengan demikian, hasilnya akan memberikan gambaran yang lebih akurat tentang potensi energi angin Provinsi Maluku (Rizal Fachri et al., 2017). Hasil analisis ini diharapkan dapat mengidentifikasi pola dan distribusi kecepatan angin serta memberikan rekomendasi untuk lokasi yang mungkin untuk pembangunan PLTB. Hal ini sejalan dengan upaya pemerintah dalam meningkatkan penggunaan energi terbarukan dan mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil.

Oleh karena itu, ekspansi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) di Indonesia, khususnya di daerah dengan potensi tenaga angin yang tinggi seperti Maluku, merupakan langkah strategis untuk diversifikasi sumber energi dan mendukung upaya mitigasi perubahan iklim. Dengan memanfaatkan teknologi modern dalam pengumpulan dan analisis data klimatologis, kita dapat lebih efektif dalam merencanakan pembangunan PLTB di masa depan. Dengan demikian, kajian klimatologis angin untuk penentuan lokasi PLTB di Provinsi Maluku sangat penting dilakukan. Penelitian ini tidak hanya akan memberikan informasi mengenai potensi energi angin di wilayah tersebut tetapi juga akan berkontribusi terhadap upaya pencapaian target penggunaan energi terbarukan di Indonesia. Mengingat kondisi geografis dan iklim yang mendukung, pengembangan PLTB di Provinsi Maluku dapat menjadi langkah strategis dalam menciptakan sistem energi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan bagi masyarakat (Kementerian ESDM, 2021).

1.2 Tujuan dan Manfaat

1.2.1 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisis potensi energi angin sebagai alternatif sumber listrik di Provinsi Maluku.
2. Menentukan lokasi yang optimal atau strategis dalam konteks pembangunan PLTB berdasarkan analisis klimatologis angin.

1.2.2 Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat dalam mengidentifikasi karakteristik potensi angin di Provinsi Maluku guna menentukan lokasi optimal untuk pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB).

1.3 Landasan Teori

1.3.1 Angin

Pergerakan udara dalam kaitannya dengan permukaan bumi dikenal sebagai angin, dan sebagian besar disebabkan oleh variasi tekanan atmosfer yang disebabkan oleh perubahan suhu. Angin dengan kecepatan yang berbeda dihasilkan saat udara bergerak dari daerah bertekanan tinggi ke daerah bertekanan rendah. Efek Coriolis membelokkan gerakan ini pada bola bumi yang berputar seperti Bumi, sehingga mengubah arah angin. Rotasi Bumi dan perbedaan suhu antara ekuator dan kutub mempengaruhi pola angin berskala besar dalam skala global. Gesekan di permukaan memperlambat angin dan membuatnya bertiup lebih jauh ke dalam ke daerah bertekanan rendah.

Dalam fisika atmosfer, gagasan tentang angin geostropik, di mana gaya Coriolis dan gaya gradien tekanan seimbang sangat penting. Perkiraan awal untuk memahami pola angin di luar daerah tropis diberikan oleh angin yang mengalir sejajar dengan isobar sebagai hasil dari keseimbangan ini. Namun, angin sebenarnya menyimpang dari keseimbangan geostropik ini di dekat permukaan Bumi karena gaya gesekan (Holton & Hakim, 2013).

Area atmosfer yang langsung terkena dampak kontak dengan permukaan bumi dikenal sebagai lapisan batas planet (PBL). Dalam PBL, turbulensi sangat penting untuk pencampuran vertikal momentum, panas, dan kelembapan, sementara hambatan gesek memperlambat angin. Akibatnya, profil angin bervariasi menurut ketinggian, biasanya menunjukkan kecepatan angin yang lebih rendah di dekat permukaan dan kecepatan angin yang lebih tinggi saat seseorang naik ke atmosfer bebas, tempat keseimbangan geostropik berlaku (Meng et al., 2024).

Terdapat pembatasan potensial pada ekstraksi energi angin. Menurut hukum Betz, tidak ada turbin angin yang dapat menangkap lebih dari batas Betz, atau 59,3% energi kinetik dalam angin. Aliran udara yang melewati "cakram aktuator" imajiner yang menarik energi dari aliran angin tunduk pada kekekalan massa dan momentum, yang menghasilkan batas ini (Coelho, 2023).

Batasan fisik ekstraksi energi angin telah diteliti lebih lanjut dalam penelitian terkini. Cara termodinamika menetapkan jumlah energi angin yang dapat dihasilkan atmosfer dan persentase yang dapat diubah menjadi energi terbarukan dipelajari oleh (Kleidon, 2020). Menurut temuan penelitian tersebut, potensi sumber daya rata-rata sekitar $0,5 \text{ W/m}^2$ per luas permukaan dapat diperoleh dengan mengubah hanya sebagian kecil energi kinetik menjadi energi terbarukan.

Model-model baru untuk memperkirakan pembangkitan daya, gaya dorong, dan dinamika bangun rotor dalam berbagai situasi telah dikembangkan sebagai hasil dari kemajuan dalam aerodinamika turbin angin. Model momentum terpadu yang secara efektif memperkirakan parameter-parameter ini di berbagai rezim operasi tanpa perlu koreksi empiris telah dipresentasikan oleh (Liew et al., 2024). Tujuan dari model ini adalah untuk meningkatkan desain, pemodelan, dan alat kontrol turbin angin dari awal.

1.3.2 Kepulauan Maluku

Di Indonesia bagian timur, terdapat kepulauan yang disebut Kepulauan Maluku. Secara tektonik terletak di Zona Tumbukan Laut Maluku pada Lempeng Halmahera. Secara geografis terletak di utara dan timur Timor, barat Papua, dan timur Sulawesi. Kepulauan Maluku, yang merupakan bagian dari Wallacea, dipandang sebagai persimpangan budaya dan geografis antara Asia dan Oseania.

Maluku adalah kepulauan di bagian timur Indonesia yang kaya akan hasil laut dan rempah-rempah. Keanekaragaman seni, budaya, dan keindahan alam Maluku menjadi daya tarik bagi wisatawan lokal dan asing. Sebagian besar devisa negara berasal dari sektor pariwisata. Pariwisata sangat penting bagi ekonomi negara karena pertumbuhan pariwisata selalu lebih besar daripada pertumbuhannya (Irma Suryani, 2020).

Menurut sensus tahun 2020, Kepulauan Maluku yang merupakan bagian dari Provinsi Maluku di Indonesia memiliki jumlah penduduk sekitar 1,8 juta jiwa (Badan Pusat Statistik, 2020). Jumlah penduduk tersebut tersebar tidak merata di lebih dari 1.000 pulau, dengan tempat yang paling padat penduduknya adalah Seram, pulau terbesar di kelompok tersebut, dan Ambon, ibu kota provinsi, yang memiliki sekitar 400.000 jiwa yang tersebar di wilayah yang luas. Meskipun jumlah penduduknya lebih sedikit, pulau-pulau kecil seperti Buru, Ternate, dan Tidore tetap penting karena signifikansi historis dan ekonominya. Dibandingkan dengan pulau-pulau lain, Ambon memiliki kepadatan penduduk yang lebih besar dan merupakan wilayah yang paling terurbanisasi; sebaliknya, pulau-pulau pedesaan memiliki kepadatan penduduk yang lebih rendah. Penduduk asli termasuk masyarakat Ambon, Seram, dan Ternate termasuk di antara populasi yang beragam secara etnis (Kementerian Dalam Negeri Republik Indonesia, 2019).

Populasi Kepulauan Maluku tersebar di sejumlah kota dan kabupaten. Menurut sensus tahun 2020, terdapat sekitar 1,8 juta orang yang tinggal di provinsi Maluku. Pusat-pusat perkotaan utama terdapat di Pulau Ambon, yang juga merupakan ibu kota provinsi. Distribusi populasi bervariasi di sejumlah kabupaten dan kota.

1. Kota Ambon: Ibu kota provinsi, adalah kota terbesar di Maluku. Kota ini diperkirakan berpenduduk 400.000 jiwa. Ambon merupakan pusat ekonomi dan administrasi provinsi, dengan populasi perkotaan yang terus bertambah.
2. Pulau Seram: Di kepulauan Maluku, Seram merupakan pulau terbesar. Sekitar 500.000 orang tinggal di Seram, yang terbagi dalam beberapa kabupaten, seperti Seram Bagian Barat dan Seram Bagian Timur.
3. Pulau Buru: Pulau Buru berpenduduk sekitar 200.000 jiwa. Kabupaten yang ada di Pulau Buru antara lain Buru Selatan, Buru, dan Buru Utara.
4. Kota Tual: Tual, yang terletak di bagian tenggara Maluku, memiliki populasi sekitar 140.000 orang. Tual merupakan pintu gerbang ke banyak pulau kecil di wilayah tersebut.
5. Maluku Tengah: Mencakup beberapa pulau kecil, berpenduduk sekitar 200.000 orang.

6. Maluku Barat Daya: Meliputi pulau Wetar, Kisar, dan sekitarnya, berpenduduk sekitar 150.000 jiwa.

Sangat penting untuk mengevaluasi kebutuhan energi di wilayah tersebut guna memenuhi kebutuhan energi di Maluku, terutama mengingat populasi dan peluang ekonomi yang terus bertambah. Bergantung pada variabel seperti kepadatan penduduk, aktivitas ekonomi, dan ketersediaan infrastruktur, setiap kabupaten memiliki kebutuhan energi yang berbeda.

- a. Perhitungan Permintaan Energi: Menurut Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Indonesia, rata-rata konsumsi listrik per kapita di daerah pedesaan Indonesia adalah sekitar 400–600 kWh per tahun. Untuk daerah perkotaan seperti Ambon, permintaannya biasanya lebih tinggi, mendekati 1.000 kWh per tahun. Berdasarkan perkiraan ini:
 - Ambon (populasi: 400.000): $400.000 \times 1.000 \text{ kWh} = 400.000.000 \text{ kWh/tahun}$ (400 GWh/tahun).
 - Pulau Seram (populasi: 500.000): $500.000 \times 600 \text{ kWh} = 300.000.000 \text{ kWh/tahun}$ (300 GWh/tahun).
 - Pulau Buru (penduduk: 200.000): $200.000 \times 600 \text{ kWh} = 120.000.000 \text{ kWh/tahun}$ (120 GWh/tahun).

Total kebutuhan energi untuk wilayah Maluku akan mencapai sekitar 820 GWh per tahun untuk kebutuhan listrik perumahan dan komersial.

- b. Potensi Energi Terbarukan: Maluku memiliki potensi yang signifikan untuk pembangkitan energi terbarukan karena fitur geografis dan iklimnya:
 - Tenaga Air: Daerah pegunungan Maluku menjadikannya kandidat yang baik untuk pembangkit listrik tenaga air skala kecil, terutama di daerah seperti Pulau Seram.
 - Energi Angin: Daerah pesisir, terutama di Ambon dan pulau-pulau sekitarnya, memiliki kecepatan angin yang cocok untuk turbin angin berukuran kecil hingga sedang.
 - Energi Surya: Iklim tropis Maluku menawarkan potensi yang signifikan untuk tenaga surya, terutama di pulau-pulau seperti Seram, Buru, dan Ambon, di mana terdapat banyak sinar matahari sepanjang tahun.

Studi menunjukkan bahwa potensi tenaga surya di Kepulauan Maluku dapat mencapai $5 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$ (Halim et al., 2021), dan potensi energi angin dapat mencapai 3–6 m/s di wilayah pesisir, sehingga memungkinkan untuk menerapkan sistem tenaga surya dan angin guna memenuhi kebutuhan energi lokal (Rohman et al., 2022).

Untuk memenuhi total permintaan energi sebesar 820 GWh per tahun, kombinasi sumber energi terbarukan dapat digunakan di seluruh Kepulauan Maluku. Berdasarkan potensi pembangkitan energi:

- Tenaga surya: Dengan asumsi efisiensi panel surya sebesar 15%, ladang surya berkapasitas 1 MW dapat menghasilkan sekitar 1,5 GWh/tahun. Untuk memenuhi

permintaan tenaga surya sebesar 300 GWh, diperlukan kapasitas tenaga surya sekitar 200 MW.

- Tenaga angin: Rata-rata, turbin angin berkapasitas 1 MW dapat menghasilkan sekitar 2,5–3 GWh/tahun. Untuk memenuhi permintaan yang tersisa (520 GWh), sekitar 175 MW kapasitas angin dapat digunakan, tergantung pada kondisi angin setempat.

1.3.3 Parameter Angin

Untuk berbagai penggunaan, seperti produksi energi angin, perencanaan kota, dan penilaian lingkungan, pemahaman tentang karakteristik angin sangatlah penting. Untuk memaksimalkan kinerja turbin angin dan menjamin integritas struktural, faktor-faktor ini harus diukur dan dianalisis secara akurat. Misalnya, satu studi menekankan betapa pentingnya memahami fitur hembusan angin di medan yang rumit untuk meningkatkan teknik rekayasa angin (Hu et al., 2018).

Karena sifatnya yang serba guna, distribusi Weibull sering digunakan untuk memodelkan data kecepatan angin. *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) ditemukan sebagai pendekatan yang paling berhasil untuk aplikasi energi angin setelah analisis menyeluruh terhadap beberapa teknik estimasi parameter untuk distribusi Weibull (Abou El-Ela et al., 2023).

Pemodelan spasial sifat angin sangat penting untuk pembangunan berkelanjutan di lingkungan perkotaan. Mengatasi masalah yang terkait dengan meningkatnya urbanisasi dan perubahan iklim memerlukan teknik pemodelan yang canggih untuk menggambarkan aliran angin di kota dengan tepat, menurut sebuah tinjauan baru (Y. S. Liu et al., 2024). Selain itu, sejumlah faktor, seperti kecepatan rotor, desain bilah, dan kondisi iklim, memengaruhi kinerja dan desain turbin angin. Untuk mengoptimalkan desain turbin demi peningkatan efisiensi, sebuah studi meneliti faktor-faktor utama yang memengaruhi kinerja turbin angin dan dampaknya terhadap lingkungan (Bashir, 2022).

Karakterisasi parameter angin yang lebih baik telah menghasilkan prakiraan perilaku angin yang lebih akurat dan sistem energi angin yang lebih efektif karena kemajuan dalam teknik pengukuran, seperti penggunaan anemometer sonik 3D. Mengoptimalkan sistem energi angin dan mengatasi masalah lingkungan yang terkait dengan dinamika angin memerlukan pemahaman menyeluruh tentang parameter angin serta penggunaan alat pemodelan dan pengukuran yang sesuai (Hu et al., 2018).

1.3.4 Kalimatologi dan Energi Angin

Klimatologi adalah cabang ilmu yang mempelajari iklim, termasuk pola cuaca rata-rata, variabilitas iklim, dan perubahan iklim dalam jangka panjang. Ilmu ini berfokus pada kondisi atmosfer selama periode waktu yang lebih lama dan mencakup elemen seperti suhu, curah hujan, angin, dan faktor-faktor lain yang mempengaruhi iklim suatu tempat. Energi angin adalah salah satu contoh aplikasi praktis dari klimatologi. Sumber energi terbarukan yang berasal dari pergerakan udara di atmosfer dikenal sebagai energi angin. Untuk mengetahui potensi energi angin untuk menghasilkan listrik, sangat penting untuk

memahami pola, kecepatan, dan frekuensi angin (Doktor Manajemen Sumberdaya Pantai, 2011).

Studi telah dilakukan di berbagai daerah di Indonesia tentang potensi energi angin. Misalnya, studi yang diterbitkan dalam Jurnal Meteorologi dan Geofisika melihat potensi energi angin di daerah Maluku sekitar Laut Banda, termasuk Ternate, Saumlaki, Bandaneira, Ambon, dan Tual. Menurut hasil penelitian, daerah-daerah tersebut memiliki kecepatan angin yang tinggi dan kecenderungan konstan sepanjang tahun, yang menunjukkan bahwa mereka memiliki potensi untuk mengembangkan pembangkit listrik tenaga angin (Habibie et al., 2021).

Untuk memanfaatkan energi angin sebagai sumber energi alternatif di Indonesia, diperlukan analisis menyeluruh tentang karakteristik angin di berbagai wilayah. Data ini penting untuk memilih desain turbin yang tepat dan memastikan bahwa konversi energi angin menjadi listrik berjalan dengan efisiensi. Oleh karena itu, pengembangan sumber energi terbarukan yang berkelanjutan di Indonesia sangat bergantung pada kombinasi teknologi energi angin dan ilmu klimatologi (Murniati, 2022).

Klimatologi angin merupakan faktor kunci dalam menentukan efisiensi fasilitas tenaga angin, yang juga dikenal sebagai PLTB (Pembangkit Listrik Tenaga Angin). Menurut gagasan klimatologi angin, pola angin, kecepatan, dan konsistensi sepanjang tahun semuanya memiliki dampak yang signifikan terhadap produksi energi angin. Penting untuk diingat bahwa pembangkit listrik tenaga angin tidak selalu bergantung sepenuhnya pada angin karena turbin angin kontemporer dilengkapi dengan sistem yang memungkinkannya beroperasi pada kecepatan angin yang lebih rendah (biasanya antara 3 m/s dan 4 m/s), tetapi mereka juga dapat beroperasi hingga 25 m/s sebelum dimatikan untuk mencegah kerusakan (Van Kuik et al., 2019). Turbin angin dapat berhenti menghasilkan listrik jika tidak ada angin, namun sistem jaringan yang menggunakan sumber energi cadangan atau menawarkan penyimpanan energi dapat mengatasinya (Borthwick et al., 2020). Selain itu, beberapa generator angin terletak dekat pantai, di mana pola angin regional seperti angin laut dapat memengaruhi ketersediaan angin bahkan selama periode tenang di pedalaman.

Dalam konteks wilayah Maluku, pasang surut mengacu pada siklus pasang surut permukaan laut (banjir) dan surutnya (surut), yang dapat memengaruhi pola angin lokal, terutama di sepanjang pantai. Angin laut dan angin darat yang menghasilkan pola angin lokal dapat dihasilkan di wilayah ini oleh pasang surut serta dampak perubahan suhu antara daratan dan laut. Karena daratan lebih cepat menghangat daripada air pada siang hari, udara naik dan terbentuklah daerah bertekanan rendah. Karena perbedaan tekanan ini, udara yang lebih dingin dari laut mengalir masuk, sehingga turbin angin memperoleh pasokan angin yang stabil. Angin darat dihasilkan pada malam hari ketika daratan mendingin lebih cepat daripada laut, yang menyebabkan angin berbalik arah. Bagi PLTB yang terletak di daerah pesisir seperti Ambon dan Seram, angin lokal ini sangat penting karena menjamin sejumlah keluaran energi angin yang stabil (McWilliams et al., 2021).

Menurut penelitian terkini, pembangkit listrik tenaga angin di daerah dengan siklus pasang surut yang signifikan sering kali menggunakan campuran sistem cadangan,

dampak samudra, dan sumber daya angin lokal untuk memaksimalkan keluaran energi dan mengurangi waktu henti selama angin bertiup rendah (Borthwick et al., 2020). Meskipun kondisi angin tidak menentu, sistem ini dibuat untuk memanfaatkan karakteristik geografis dan iklim yang berbeda di daerah pesisir guna menghasilkan energi terbarukan yang andal.

1.3.5 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)

Pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB), juga disebut sebagai pembangkit listrik tenaga angin, menggunakan turbin angin untuk menghasilkan energi listrik dari energi kinetik angin. Indonesia, dengan garis pantai yang panjang dan kondisi geografis yang beragam, memiliki potensi besar untuk pengembangan PLTB sebagai bagian dari upaya untuk diversifikasi sumber energi dan meningkatkan penggunaan energi terbarukan. Kapasitas turbin angin atau turbin yang akan digunakan untuk memilih pembangkit dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut (Bachtar & Hayyatul, 2018):

$$P = P_{tpem} \times \frac{100}{x} \quad (1)$$

Dimana:

P = kapasitas turbin

P_{tpem} = kapasitas turbin pemasok

X = efisiensi kecepatan angin

Kajian yang dilakukan oleh *Institute for Essential Services Reform* (IESR) pada tahun 2021 menunjukkan bahwa Indonesia memiliki potensi teknis untuk energi angin sebesar 19,8 hingga 106,5 gigawatt (GW). Angka ini lebih tinggi dari informasi yang ditemukan dalam Rencana Umum Energi Nasional (RUEN), yang mencatat potensi sebesar 60,6 GW; perbedaan ini menunjukkan bahwa Indonesia memiliki potensi yang sangat besar untuk energi angin dan masih belum dimanfaatkan secara efektif (Puspitarini et al., 2021).

Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Sidrap (PLTB Sidrap) yang terletak di Kabupaten Sidenreng Rappang, Sulawesi Selatan, merupakan salah satu contoh nyata dari pemanfaatan energi angin di Indonesia. PLTB Sidrap memiliki kapasitas terpasang sebesar 75 megawatt (MW) dan terdiri dari 30 turbin angin, masing-masing berkapasitas 2,5 MW. Dalam dua tahun pertama operasinya, PLTB Sidrap telah menghasilkan lebih dari 400.000 megawatt-jam (MWh) listrik, melampaui proyeksi awal.

Meskipun PLTB memiliki banyak potensi, pertumbuhannya di Indonesia menghadapi beberapa masalah, seperti:

1. Variabilitas Kecepatan Angin: Kecepatan angin dapat mempengaruhi efisiensi produksi listrik di beberapa tempat.
2. Investasi dan Biaya: Investasi awal dalam pembangunan PLTB masih cukup besar, yang dapat menghalangi pengembangan lebih lanjut.
3. Infrastruktur dan Teknologi: Infrastruktur dan teknologi pendukung yang diperlukan untuk operasi dan pemeliharaan PLTB terbatas.

Dalam Kebijakan Energi Nasional, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Indonesia telah menetapkan target untuk meningkatkan porsi energi terbarukan, termasuk energi angin, menjadi 23% dari bauran energi nasional pada tahun 2025. Selain itu, berbagai undang-undang dan insentif telah diberlakukan untuk mendorong investasi dan pengembangan PLTB di berbagai daerah (Sianipar et al., 2024).

Sejumlah isu, seperti menipisnya cadangan bahan bakar fosil, dampak negatif konsumsi bahan bakar fosil terhadap lingkungan, dan meningkatnya kebutuhan akan sumber energi berkelanjutan, mendorong peralihan dari bahan bakar fosil ke Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), atau energi angin. Karena sifatnya yang tidak terbarukan, cadangan bahan bakar fosil terutama batu bara, minyak, dan gas alam telah menipis karena penggunaan global telah melampaui penemuan dan kemampuan produksi baru. Jika dibandingkan dengan cadangan minyak dan gas alam, yang masing-masing diperkirakan akan bertahan sekitar 50 dan 52 tahun, *International Energy Agency* (IEA) memperkirakan bahwa cadangan batu bara global akan bertahan sekitar 133 tahun pada tingkat konsumsi saat ini (IEA, 2020). Gerakan global untuk merangkul sumber energi terbarukan seperti tenaga angin telah dipicu oleh menipisnya sumber daya bahan bakar fosil ini serta konsekuensinya yang merugikan terhadap lingkungan, termasuk emisi karbon.

Dalam peralihan ke energi terbarukan ini, nikel sangat penting, khususnya dalam pembuatan baterai untuk kendaraan listrik (EV) dan perangkat penyimpanan energi. Katoda baterai lithium-ion, yang penting untuk menyimpan energi dari sumber terbarukan yang sporadis seperti tenaga surya dan angin, mengandung nikel. Kebutuhan akan nikel terus meningkat seiring dengan kebutuhan akan sistem penyimpanan energi terbarukan dan mobil listrik. Seiring dengan semakin banyaknya kendaraan listrik dan penyimpanan energi hijau di dunia, wilayah Maluku yang memiliki cadangan nikel yang melimpah menjadi wilayah yang penting secara strategis. Liao dkk. (2020) memperkirakan bahwa pada tahun 2030, produksi nikel akan meningkat hampir 20%, yang akan berkontribusi pada transisi menuju energi yang lebih bersih. Hal ini pada gilirannya akan mendorong strategi yang lebih komprehensif untuk energi berkelanjutan di Indonesia, negara dengan cadangan nikel yang besar.

Dalam hal aksesibilitas PLTB, masyarakat mungkin merasa sangat mudah untuk mengadopsi sistem energi angin, terutama di wilayah pesisir seperti Maluku, di mana angin terus-menerus dan pola angin lokal membuat pembangkitan listrik tenaga angin menjadi fenomena alami. Jika sumber daya angin cukup, memasang turbin angin merupakan prosedur yang cukup sederhana. Memasang turbin angin skala kecil kontemporer di wilayah pesisir atau pedesaan dapat mengurangi ketergantungan pada infrastruktur energi terpusat dan memberikan penduduk setempat akses langsung ke listrik bersih dan terbarukan. PLTB dapat menyediakan listrik yang dapat diandalkan di tempat-tempat dengan akses terbatas ke jaringan listrik nasional, yang sering mengalami masalah keandalan karena lokasinya yang terpencil di banyak wilayah Indonesia, terutama wilayah Maluku yang terisolasi (Yanti et al., 2020). Koperasi energi berbasis masyarakat, di mana masyarakat setempat memiliki dan mengelola ladang angin,

merupakan cara lain untuk memasukkan energi angin ke dalam ekonomi lokal. Seperti yang ditunjukkan di negara-negara seperti Denmark dan Jerman, di mana energi angin semakin digerakkan secara lokal, hal ini mendorong pertumbuhan ekonomi dan kemandirian energi.

Selain itu, PLTB mendukung inisiatif Indonesia untuk mencapai tujuannya dalam energi terbarukan. Pada tahun 2025, Indonesia ingin agar 23% bauran energinya berasal dari sumber terbarukan, sesuai dengan Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) (Pusat Studi Energi UI, 2020). Inisiatif nasional ini sejalan dengan gerakan global untuk mengurangi emisi gas rumah kaca, melakukan dekarbonisasi, dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil.

Saat ini, Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) utama di Indonesia, khususnya fasilitas Sidrap dan Jeneponto, berlokasi di Sulawesi Selatan. Dengan 30 turbin yang masing-masing menghasilkan 2,5 MW, PLTB Sidrap di Kabupaten Sidenreng Rappang memiliki kapasitas 75 MW. Demikian pula, dengan 20 turbin, PLTB Jeneponto di Kabupaten Jeneponto dapat menghasilkan 72 MW. Alasan utama tingginya konsentrasi PLTB di Sulawesi Selatan adalah kondisi angin yang ideal di daerah tersebut, yang memungkinkan produksi energi angin dengan kecepatan rata-rata sekitar 7,7 m/s. Meskipun demikian, inisiatif sedang berlangsung untuk memperluas infrastruktur energi angin ke daerah yang lebih jauh. Misalnya, pada tahun 2027, PT Perusahaan Listrik Negara (PLN) bermaksud membangun tiga pembangkit listrik tenaga angin baru dengan kapasitas gabungan sebesar 152 MW: PLTB Timor, PLTB Tanah Laut, dan PLTB Sulbagsel. Perubahan ini menunjukkan bahwa Indonesia semakin berkomitmen untuk mendiversifikasi sumber energi terbarukannya di luar Sulawesi Selatan (Cendrawati et al., 2023).

Kepulauan Maluku di Indonesia, yang terletak ideal di antara Samudra Pasifik dan Samudra Hindia, memiliki pola angin yang luar biasa yang menjadikannya lokasi utama untuk produksi tenaga angin. Hal ini dikarenakan angin yang stabil dan kuat yang disebabkan oleh perbedaan suhu antara kedua samudra ini. Sebuah turbin Savonius dan metodologi dinamika fluida komputasional digunakan dalam sebuah penelitian untuk mengevaluasi kelayakan energi angin di Maluku, dan hasilnya menunjukkan harapan besar untuk pembangkitan tenaga angin di wilayah tersebut. Selain menurunkan emisi gas rumah kaca dan mendorong pembangunan berkelanjutan di lingkungan sekitar, pengembangan tenaga angin di Maluku dapat menawarkan pasokan energi yang dapat diandalkan dan berkelanjutan (Jurnal et al., 2024).

1.3.5.1 Kelebihan dan Kekurangan Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTB) Dibandingkan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS).

1. Keuntungan PLTB

a. Efisiensi Lebih Tinggi di Wilayah Tertentu

Ladang angin bekerja dengan sangat baik di daerah dengan kecepatan angin tinggi. Bhattacharya dkk. (2019) mengklaim bahwa PLTB memiliki faktor kapasitas yang lebih besar daripada PLTS, terutama di tempat-tempat dengan pola angin yang teratur, seperti

wilayah pesisir atau dataran tinggi. Panel surya biasanya memiliki faktor kapasitas 15–25%, meskipun turbin angin dapat mencapai efisiensi hingga 35–40%.

b. Produksi Energi di Malam Hari

Selama kondisi angin memungkinkan, PLTB dapat beroperasi terus-menerus, tidak seperti PLTS yang mengandalkan sinar matahari untuk menghasilkan energi. Karena itu, energi angin menyediakan sumber listrik yang dapat diandalkan, bahkan pada hari mendung atau gelap (Zhao et al., 2021). Akibatnya, PLTB membantu mengurangi permintaan untuk penyeimbangan jaringan dan penyimpanan energi.

c. Pemanfaatan Lahan

Karena ukuran dan kebutuhan jaraknya, turbin angin memerlukan ruang yang lebih besar untuk dipasang. Namun, turbin angin dapat digunakan di lepas pantai atau lahan pertanian, sehingga memungkinkan penggunaan lahan ganda. Salah satu manfaat utama PLTB dibandingkan PLTS, yang memerlukan ruang khusus untuk panel surya, adalah kemampuannya untuk hidup berdampingan dengan ladang angin saat bercocok tanam atau merumput (Zhu et al., 2020).

2. Kekurangan PLTB

a. Intermitensi dan Variabilitas

Intermitensi PLTB merupakan salah satu masalah utamanya. Variabilitas kecepatan angin dapat menyebabkan variasi produksi energi. Untuk menjaga stabilitas jaringan, ketidakpastian ini memerlukan teknologi pembangkitan tambahan, termasuk pembangkit listrik tenaga air atau gas alam, atau penyimpanan energi cadangan (Jouini et al., 2020). Di sisi lain, energi surya lebih dapat diprediksi karena pola cuaca, meskipun PLTS juga rentan terhadap intermitensi.

b. Kebisingan dan Dampak Estetika

Karena pergerakan bilah turbin, turbin angin menghasilkan suara yang dapat mengganggu penduduk di sekitarnya (Moller et al., 2019). Selain itu, penduduk setempat dan industri pariwisata khawatir tentang dampak estetika ladang angin besar di lingkungan yang indah.

c. Dampak terhadap Satwa Liar

Karena adanya laporan tabrakan dengan bilah turbin, turbin angin dapat membahayakan populasi kelelawar dan burung (Kunz et al., 2007). Dalam sistem energi surya, di mana interaksi dengan satwa liar lebih sedikit, masalah ini tidak terlalu terlihat.

3. Keuntungan PLTS

a. Biaya Perawatan Lebih Rendah

Secara umum, PLTS memerlukan perawatan yang lebih sedikit daripada PLTB. Karena panel surya memiliki lebih sedikit komponen yang bergerak, kegagalan mekanis lebih

kecil kemungkinannya terjadi. Menurut Chu dan Majumdar (2012), turbin angin mungkin memiliki persyaratan perawatan yang lebih rumit dan masa pakai pengoperasian yang lebih pendek daripada sistem surya, yang biasanya bertahan 25 tahun tanpa perawatan.

b. Skalabilitas dan Fleksibilitas

Dari sistem atap kecil hingga ladang surya besar, ada beberapa ukuran tempat tenaga surya dapat dipasang. Karena sifatnya yang adaptif, PLTS merupakan pilihan yang diinginkan baik untuk lingkungan perkotaan maupun pinggiran kota (Mekhilef et al., 2011). Di sisi lain, ladang angin kurang cocok untuk lingkungan perumahan atau perkotaan skala kecil dan lebih cocok untuk bentangan yang luas.

c. Dampak Lingkungan Minimal

Sistem energi surya memiliki dampak lingkungan yang lebih rendah dalam hal kebisingan dan gangguan terhadap satwa liar. Pemasangan panel surya tidak menimbulkan ancaman langsung terhadap burung atau kelelawar, dan tidak menimbulkan polusi suara (Hernandez et al., 2014).

4. Kekurangan PLTS

a. Ketergantungan Pada Sinar Matahari

Karena PLTS sangat bergantung pada sinar matahari, hari yang mendung atau hujan akan mengurangi efektivitasnya secara drastis. Selain itu, produksi dibatasi pada malam hari, sehingga memerlukan daya cadangan atau solusi penyimpanan yang efektif (Liu et al., 2018). Karena itu, PLTS kurang dapat diandalkan dibandingkan PLTB di beberapa wilayah dengan sinar matahari yang tidak merata.

b. Pemanfaatan Lahan dan Persyaratan Ruang

Lahan yang luas diperlukan untuk ladang surya berskala besar, terutama di tempat-tempat dengan sinar matahari yang lemah. Sistem PV yang besar dapat bersaing dengan habitat alami dan lahan pertanian (Fthenakis et al., 2009). Meskipun PLTS dapat dipasang di atap, solusi tenaga surya berskala besar mungkin sulit diterapkan di lokasi metropolitan dengan ruang terbatas.

c. Kebutuhan Penyimpanan Energi

Perangkat penyimpanan energi, seperti baterai, sering kali dibutuhkan untuk menyimpan energi ekstra untuk penggunaan selanjutnya karena PLTS hanya menghasilkan listrik saat matahari bersinar. Namun, kendala utama terhadap penggunaan listrik tenaga surya secara luas adalah tingginya biaya sistem penyimpanan energi (Mulligan et al., 2020).

1.3.6 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) di Dunia

Pemanfaatan energi angin telah berlangsung selama ribuan tahun, dimulai dari penggunaan kincir angin di Persia sekitar 200 SM untuk menggiling gandum dan memompa air. Teknologi ini kemudian berkembang di Eropa, terutama di Belanda pada abad ke-12, untuk sistem irigasi dan penggilingan biji-bijian. Revolusi industri pada abad

ke-19 membawa perubahan signifikan dalam pemanfaatan energi angin, dengan pengembangan turbin angin pertama oleh James Blyth pada tahun 1887 di Skotlandia. Pada tahun yang sama, Charles F. Brush di Amerika Serikat menciptakan turbin angin listrik pertama dengan kapasitas sekitar 12 kW (Small, 2017).

1.3.6.1 Gansu Wind Farm

Gansu Wind Farm, juga dikenal sebagai *Jiuquan Wind Power Base*, adalah proyek pembangkit listrik tenaga bayu yang terletak di provinsi Gansu, Tiongkok. Proyek ini dimulai pada tahun 2009 dan direncanakan mencapai kapasitas total 20 GigaWatt (GW) saat selesai sepenuhnya. Hingga tahun 2017, kapasitas yang telah terpasang mencapai 10,45 GW. PLTB ini terdiri dari beberapa ladang angin yang tersebar di area gurun dekat kota Jiuquan, khususnya di wilayah Guazhou County dan dekat Kota Yumen. Proyek ini merupakan bagian dari enam mega proyek tenaga angin nasional yang disetujui oleh pemerintah Tiongkok, dengan tujuan meningkatkan penggunaan energi terbarukan dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil.

Proyek ini dibagi menjadi beberapa fase:

- Fase Pertama: Melibatkan pemasangan lebih dari 3.500 turbin angin dengan kapasitas terpasang sekitar 5.160 MW, selesai pada November 2010.
- Fase Kedua: Direncanakan menambah kapasitas 8.000 MW, terdiri dari empat puluh ladang angin masing-masing 200 MW.

Pada tahun 2017, jalur transmisi HVDC Jiuquan-Hunan sepanjang 2.383 km mulai beroperasi, menghubungkan kompleks ini ke jaringan regional Hunan dan memungkinkan pemanfaatan penuh kapasitas pembangkitannya. Meskipun memiliki kapasitas besar, Gansu Wind Farm menghadapi tantangan dalam pemanfaatan kapasitas. Pada tahun 2015, kompleks ini beroperasi dengan tingkat pemanfaatan di bawah 40% dari kapasitas 8 GW yang ada saat itu, terutama karena keterbatasan infrastruktur transmisi listrik dan lokasi yang jauh dari pusat permintaan energi utama di Tiongkok (Li & Gao, 2019).

1.3.6.2 Hornsea Wind Farm

Hornsea Wind Farm adalah kompleks pembangkit listrik tenaga bayu lepas pantai yang terletak di Laut Utara, sekitar 120 km di lepas pantai timur Inggris. Proyek ini dibagi menjadi beberapa fase, dengan tujuan mencapai total kapasitas hingga 6 GW (Smith & Brown, 2020).

Proyek ini dibagi menjadi beberapa fase perkembangan:

- *Hornsea One*: Memiliki kapasitas 1.218 MW, terdiri dari 174 turbin angin masing-masing 7 MW. Konstruksi dimulai pada Januari 2018, dan turbin pertama mulai memasok listrik ke jaringan nasional Inggris pada Februari 2019. Semua turbin selesai dipasang pada Oktober 2019, dan seluruh peralatan sepenuhnya beroperasi pada Desember 2019.
- *Hornsea Two*: Dengan kapasitas 1.386 MW, terdiri dari 165 turbin angin masing-masing 8,4 MW. Proyek ini mencapai produksi listrik pertama pada Desember 2021

dan mulai beroperasi penuh pada Agustus 2022, menjadikannya pembangkit listrik tenaga bayu lepas pantai terbesar di dunia saat itu.

- *Hornsea Three* dan Empat: Direncanakan menambah kapasitas masing-masing sekitar 1–2 GW dan 1 GW. Pada Juli 2023, pemerintah Inggris memberikan persetujuan akhir untuk *Hornsea Four*, yang diharapkan menghasilkan 2,6 GW dengan 180 turbin angin raksasa, cukup untuk memasok energi terbarukan bagi 1 juta rumah di Inggris.

1.3.7 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) di Indonesia

Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), atau pembangkit listrik tenaga angin, memanfaatkan turbin angin untuk mengonversi energi kinetik angin menjadi energi listrik. Dengan garis pantai yang panjang dan kondisi geografis yang beragam, Indonesia memiliki potensi besar untuk mengembangkan PLTB sebagai bagian dari diversifikasi sumber energi dan peningkatan pemanfaatan energi terbarukan (Bachtar & Hayyatul, 2018). Kajian oleh *Institute for Essential Services Reform* (IESR) pada tahun 2021 menunjukkan bahwa Indonesia memiliki potensi teknis energi angin sebesar 19,8 hingga 106 GW, lebih tinggi dari angka 60,6 GW yang tercatat dalam Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) (Puspitarini et al., 2021).

1.3.7.1 PLTB Sidrap

PLTB Sidrap, atau Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Sidrap, adalah pembangkit listrik tenaga angin skala komersial pertama di Indonesia. Terletak di Pegunungan Pabbareng, Desa Mattirotasi dan Desa Lainungan, Kecamatan Watang Pulu, Kabupaten Sidenreng Rappang, Sulawesi Selatan, PLTB ini memiliki kapasitas terpasang sebesar 75 megawatt (MW). Proyek ini dikembangkan oleh PT UPC Sidrap Bayu Energi, sebuah perusahaan khusus yang dibentuk oleh konsorsium UPC Renewables. Investasi untuk pembangunan PLTB Sidrap mencapai sekitar US\$150 juta, atau setara dengan Rp2 triliun.

Spesifikasi Teknis

- Jumlah Turbin: 30 unit
- Kapasitas per Turbin: 2,5 MW
- Tinggi Menara Turbin: 80 m
- Panjang Baling-Baling: 57 m

Dengan spesifikasi tersebut, PLTB Sidrap mampu menghasilkan listrik yang dapat menerangi sekitar 70.000 rumah di Sulawesi Selatan. Selama fase konstruksi, proyek ini mempekerjakan 709 orang, dengan 95% di antaranya adalah warga negara Indonesia. Selain itu, pembangunan PLTB Sidrap juga berdampak pada infrastruktur lokal dengan pembangunan jalan baru sepanjang 10 km dan empat jembatan baru, dengan total biaya sebesar US\$350 ribu. Pembangunan PLTB Sidrap selesai pada Januari 2018, dan diresmikan oleh Presiden Joko Widodo pada 2 Juli 2018. PLTB ini menjadi tonggak penting dalam upaya Indonesia meningkatkan penggunaan energi terbarukan dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil (Santoyo & Wijaya, 2019).

1.3.7.2 PLTB Tolo 1

PLTB Tolo 1 terletak di Kecamatan Binamu, Kabupaten Jeneponto, Sulawesi Selatan. Pembangkit listrik ini memiliki kapasitas terpasang sebesar 72 MW dan merupakan kebun angin skala besar kedua di Indonesia setelah PLTB Sidrap.

Spesifikasi Teknis

- Jumlah Turbin: 20 unit
- Kapasitas per Turbin: 3,6 MW
- Tinggi Menara Turbin: 133 m
- Panjang Baling-Baling: 63 m

Dengan kecepatan angin rata-rata 6 meter per detik, PLTB Tolo 1 diperkirakan dapat menghasilkan listrik sebesar 198,6 gigawatt jam (GWh) per tahun. PLTB Tolo 1 diharapkan mampu melistriki sekitar 300.000 rumah tangga pelanggan 900 VA. Selain itu, pembangkit listrik tenaga bayu ini tidak menghasilkan limbah dan tidak mengganggu aktivitas warga, sehingga memenuhi kriteria energi hijau yang ramah lingkungan. Investasi untuk pembangunan PLTB Tolo 1 mencapai US\$150 juta. Pembangkit listrik ini mulai beroperasi sejak September 2019, berkontribusi pada target bauran energi nasional dan pemanfaatan potensi energi angin di wilayah tersebut (Rahman & Putra, 2020).

1.3.8 Perbandingan PLTB di Dunia dengan PLTB di Indonesia

Perbandingan antara PLTB di dunia yaitu *Gansu Wind Farm* di Tiongkok dan *Hornsea Wind Farm* di Inggris, dengan PLTB di Indonesia yaitu PLTB Sidrap dan PLTB Tolo 1 Jeneponto di Sulawesi Selatan dapat dilihat pada **Tabel 1**. berikut.

Tabel 1. Perbandingan PLTB Dunia dan Indonesia.

Aspek	Gansu Wind Farm (Tiongkok)	Hornsea Wind Farm (Inggris)	PLTB Sidrap (Indonesia)	PLTB Tolo 1 (Indonesia)
Lokasi	Provinsi Gansu, Tiongkok	Laut Utara, Inggris	Sidenreng Rappang, Sulawesi Selatan	Jeneponto, Sulawesi Selatan
Tipe	Onshore (Darat)	Offshore (Lepas Pantai)	Onshore (Darat)	Onshore (Darat)
Kapasitas Total	20.000 MW (target) – 10.450 MW (saat ini)	6.000 MW (target) – 2.604 MW (saat ini)	75 MW	72 MW
Jumlah Turbin	Ribuan turbin kecil dan menengah	174 (Hornsea One), 165 (Hornsea Two)	30 turbin	20 turbin
Tinggi Turbin	Bervariasi (50–100 m)	190 m	80 m	133 m

Panjang Baling-Baling	Bervasiasi	75 m	57 m	63 m
Investasi	± US\$17,5 miliar	± US\$8 miliar	US\$150 juta	US\$150 juta
Produksi Listrik Tahunan	± 15 TWh	± 18 TWh	± 250 GWh	± 198,6 GWh
Operasional	Sejak 2009 (bertahap)	Hornsea One (2019), Hornsea Two (2022)	Sejak 2018	Sejak 2019

1.3.9 Turbin Angin

1.3.9.1 Spesifikasi Umum Turbin Angin

Turbin angin dirancang berdasarkan berbagai spesifikasi, termasuk kapasitas, diameter rotor, tinggi menara, dan kecepatan angin operasional. Komponen utama turbin angin meliputi (Kaldellis, J. 2021):

1. Kapasitas: Ini merujuk pada daya keluaran maksimum turbin, biasanya diukur dalam kilowatt (kW) atau megawatt (MW). Turbin kecil mungkin memiliki kapasitas kurang dari 100 kW, sedangkan turbin komersial besar dapat menghasilkan 2–4 MW atau lebih.
2. Diameter Rotor: Diameter rotor mengacu pada ukuran bilah turbin dan secara langsung memengaruhi jumlah energi angin yang dapat ditangkap turbin. Diameter yang lebih besar memungkinkan turbin menangkap lebih banyak energi, sehingga lebih efisien di area dengan kecepatan angin yang lebih rendah (Zhang, X., 2022).
3. Kecepatan Angin Masuk: Kecepatan angin minimum yang diperlukan untuk menghasilkan listrik, biasanya sekitar 3–4 (meter per detik).
4. Kecepatan Angin Terukur: Kecepatan angin di mana turbin menghasilkan kapasitas terukurnya, biasanya sekitar 12–15 .
5. Kecepatan Angin Putus: Kecepatan angin maksimum di mana turbin akan beroperasi sebelum mati secara otomatis untuk menghindari kerusakan, umumnya sekitar 25 m/s.
6. Ketinggian Menara: Menara yang lebih tinggi memungkinkan turbin mengakses angin yang lebih kuat dan lebih konsisten. Ketinggian standar berkisar antara 50 hingga 120 meter untuk turbin komersial, sedangkan menara yang lebih tinggi lebih efektif di wilayah dengan kondisi angin yang bervariasi.

1.3.9.2 Jenis Turbin Angin

Pembangkit listrik dapat dibuat dengan mengkombinasikan beberapa turbin angin untuk menghasilkan listrik yang disalurkan ke unit distribusi. Energi listrik tersebut dialirkan melalui kabel transmisi dan disebarkan ke berbagai lokasi, seperti rumah, kantor, dan sekolah. Beberapa jenis turbin angin yang dapat digunakan adalah (Bachtiar & Hayyatul, 2018):

1. Turbin Angin Sumbu Horizontal (*Horizontal Axis Wind Turbine*)

Ini adalah jenis turbin angin yang paling umum di seluruh dunia, dirancang untuk menangkap angin secara lebih efisien dan beroperasi pada kapasitas yang lebih tinggi. Untuk Maluku, turbin angin sumbu horizontal skala menengah hingga besar dengan diameter rotor 30–120 meter dan kapasitas terukur 500 kW hingga 2 MW akan sesuai untuk daerah dengan angin yang konsisten. **Gambar 1.** menunjukkan Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH) dengan poros rotor utama dan generator listrik di puncak menara.



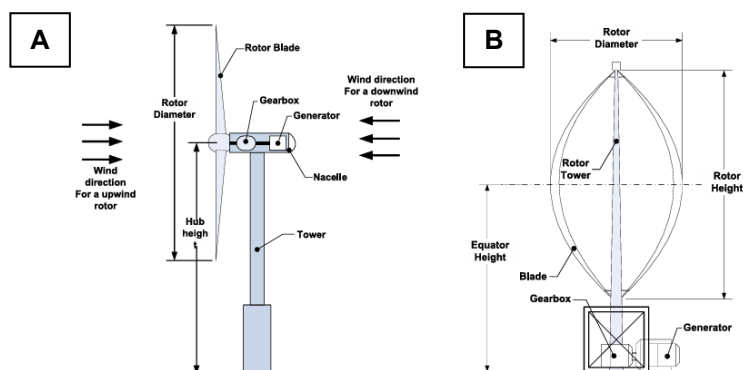
Gambar 1. Turbin angin sumbu horizontal (Saad & Asmuin, 2014)

2. Turbin Angin Sumbu Vertikal (*Vertical Axis Wind Turbine*)

Turbin Angin Sumbu Vertikal/tegak (TASV), seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.** memiliki poros rotor yang tegak lurus dan berfungsi untuk menangkap angin dari berbagai arah. Meskipun kurang umum, VAWT lebih cocok untuk daerah dengan arah angin yang berubah-ubah dan kecepatan angin yang lebih rendah. Turbin ini dapat beroperasi dalam kondisi angin yang bergejolak, sehingga cocok untuk daerah dengan kecepatan angin yang kurang konsisten, seperti beberapa bagian di Maluku.



Gambar 2. Turbin angin sumbu vertikal (Bachtiar & Hayyatul, 2018)



Gambar 3. Komponen turbin angin. (A) Horizontal Axis Wind Turbin (VAWT), (B) Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) (Kusuma. dkk, 2024)

Pengelompokan turbin angin atau PLTB umumnya dibagi menjadi skala kecil, menengah, dan besar. Namun, klasifikasi ini juga dapat mencakup skala mikro, kecil, dan besar, seperti yang ditampilkan pada **Tabel 2**. (Pakpahan. S, 2023).

Tabel 2. Kelas turbin angin (SNI 3851-1-2018).

Turbin Angin	Kapasitas
Skala Kecil	1-10 kW
Skala Menengah	10-100 kW
Skala Besar	>100 kW

1. Turbin Angin Skala Kecil

Istilah "Pembangkit Listrik Angin" (PLTB) digunakan untuk menggambarkan pembangkitan listrik yang bersumber dari tenaga angin atau bayu, seperti halnya PLTS, PLTD, PLTMH, dan jenis pembangkit listrik lainnya. PLTB dapat terdiri dari satu turbin angin yang berfungsi sebagai sistem pembangkit listrik mandiri di suatu lokasi, biasanya berskala besar, atau dapat terdiri dari sejumlah turbin angin. Penggunaan istilah PLTB (Pembangkit Listrik Tenaga Bayu) bertujuan untuk membedakannya dari PLTA, yang merupakan pembangkit listrik berbasis tenaga air. **Tabel 2**. berikut menunjukkan prototipe turbin angin skala kecil yang telah dikembangkan di Indonesia.

Tabel 3. Turbin angin skala kecil (Dokumen LAPAN).

Kapasitas	Diameter rotor, m	Jumlah Sudu	Tegangan Keluaran
50 W	1	6	12 VDC
1000 W	1.7	3	12/24 VDC
1500 W	3	3	12/24 VDC
2500 W	3	2	12/24 VDC
10 kW	7	3	230 VAC, 50 Hz
3,5 kW	4.5	6	230 VAC, 50Hz

2. Turbin Angin Skala Besar

Pada skala besar, produsen turbin angin tersebar di berbagai negara seperti Spanyol, Jerman, Amerika Serikat, Denmark, dan India, sebagaimana ditampilkan dalam **Tabel 3**. Data mengenai dimensi rotor, jumlah sudu, dan tinggi menara memberikan gambaran tentang ukuran turbin yang sangat besar, dengan panjang sudu mencapai puluhan hingga ratusan meter atau lebih. Karena ukurannya yang masif, diperlukan penanganan yang cermat dalam proses pengiriman ke lokasi, pendirian menara, pemasangan komponen turbin angin, serta penyediaan peralatan pendukung yang diperlukan.

Tabel 4. Turbin angin skala besar (Orde MW) (Dokumen LAPAN).

Kapasitas MW	Diameter rotor, m	Jumlah Sudu	Tinggi Menara (m)
1,0	58.6	3	89
1,5	70/77/83/87	3	70/70/80/70
2,0	100/110	3	99/80
2,5	114	3	80
4,0	150	3	150
4,2	117/138/136	3	150
4,5	114	3	140
4,5	155/163	3	150

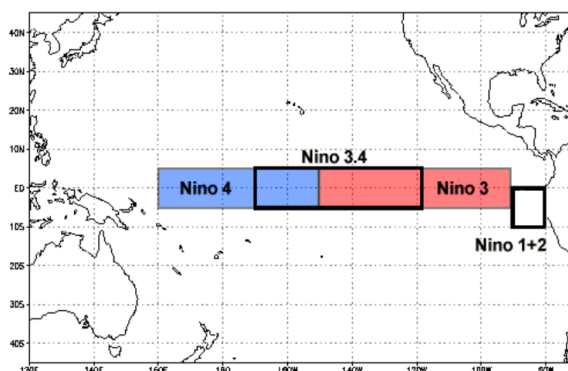
1.3.10 *El Nino Southern Oscillation (ENSO)*

Dalam dua bagian utamanya, *El Nino–Southern Oscillation (ENSO)* merupakan peristiwa meteorologi penting yang terjadi di Samudra Pasifik tropis. Peristiwa ini ditandai dengan perubahan berkala pada suhu laut dan kondisi atmosfer di sekitarnya.

1. El Nino: Pada tahap ini, suhu permukaan laut di Pasifik ekuator tengah dan timur mulai meningkat.
2. La Nina: Periode ini ditandai dengan penurunan suhu permukaan laut di wilayah yang sama.

Interaksi antara elemen samudra dan atmosfer ini sangat memengaruhi pola cuaca dan iklim global. Perubahan samudra dan atmosfer ini terkait erat dengan Osilasi Selatan (Timmermann et al., 2018).

Di Pasifik khatulistiwa, interaksi antara lautan dan atmosfer merupakan faktor utama yang memengaruhi pembentukan kejadian ENSO. Melemahnya angin pasat selama episode El Nino menyebabkan air hangat terkumpul di Pasifik timur, yang mengubah pola cuaca di seluruh dunia. Di sisi lain, angin pasat yang lebih kuat mendorong naiknya air yang lebih dingin di Pasifik timur selama kejadian La Nina, yang memiliki efek iklim yang berbeda (Filaili, 2020).



Gambar 4. Region pengukuran SST
(<https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/enso/sst>)

Efek potensial perubahan iklim pada dinamika ENSO telah diteliti dalam penelitian terkini. Kemajuan dalam modifikasi aktual dan yang diantisipasi dalam beberapa komponen ENSO, termasuk mekanisme yang mendasari perubahan ini, dirangkum dalam sebuah studi yang diterbitkan di *Nature Reviews Earth & Environment*. Kerumitan reaksi ENSO terhadap perubahan iklim disorot oleh studi lain yang diterbitkan di *Nature Communications* yang mengamati bagaimana pergeseran episode El Nino Pasifik Tengah dan Pasifik Timur muncul di bawah pemanasan global (Geng et al., 2022).

Pola cuaca Indonesia sangat bervariasi karena menjadi kepulauan, bukan kontinen tropis atau subtropis. Tidak meratanya energi radiasi matahari menyebabkan variasi pola tekanan di antara pulau. Hal ini menciptakan medan tekanan yang sangat kompleks dan mempengaruhi sirkulasi atmosfer lokal seperti angin darat laut. Selama El Nino dan La Nina, pola curah hujan berubah di wilayah tropis. Seperti fenomena El Nino tahun 2015/2016, yang sangat mempengaruhi musim tanam dan hasil panen petani, *Food and Agriculture Organization* (FAO) melaporkan bahwa hanya 30% dari rata-rata jumlah ladang yang ditanam tepat waktu ketika musim kemarau di Indonesia menjadi sangat kering dan musim hujan dimulai setelah 6 hingga 8 minggu. Kemarau panjang terjadi ketika terjadi anomali pola sirkulasi atmosfer dalam jangka waktu satu bulan atau lebih lama. Jika peristiwa El Nino terjadi bersamaan, intensitas kekeringan meningkat dan curah hujan turun hingga 100 mm per bulan. Jawa Timur dan Nusa Tenggara memiliki wilayah yang paling kering (Filaili, 2018).

Tabel 5. Klasifikasi El Nino dan La Nina (<https://ggweather.com>, 2022).

Anomali SST	Event
<-1.5	La Nina Kuat
-1.5 s.d -1.0	La Nina Sedang
-1.0 s.d -0.5	La Nina Lemah
-0.5 s.d 0.5	Netral
0.5 s.d 1.0	El Nino Lemah
1.0 s.d 1.5	El Nino Sedang
>1.5	El Nino Kuat

1.3.10.1 El Nino

El-Nino berasal dari istilah Spanyol yang berarti "anak Tuhan". Para nelayan di pantai Ekuador dan Peru menggunakannya untuk menunjukkan aliran dan arus panas samudra tertentu yang muncul sekitar Natal dan beberapa bulan berikutnya. El-Nino, juga dikenal sebagai ENSO, adalah fenomena laut dan atmosfer yang terjadi bersamaan di Pasifik tropis. Akibatnya, angin equatorial berhembus ke arah barat membantu konveksi di Pasifik Barat dan subsidensi di Pasifik Timur karena Pasifik Barat tropis lebih hangat dalam kondisi normal (Hartantio, 2021).

Suhu permukaan laut di Samudra Pasifik bagian tengah dan timur ekuator secara berkala meningkat selama El Nino, sebuah fenomena iklim. Akibat terganggunya pola sirkulasi udara normal yang disebabkan oleh pemanasan ini, akan ada dampak besar pada cuaca dan iklim di seluruh dunia. Di Pasifik bagian barat, air permukaan yang hangat terkumpul oleh angin pasat yang kuat yang bergerak dari timur ke barat di sekitar khatulistiwa dalam keadaan normal. Angin pasat ini berkurang selama episode El Nino, yang memungkinkan air hangat bergerak ke arah timur. Banyak keanehan iklim disebabkan oleh perubahan suhu laut ini, yang juga berdampak pada tekanan udara dan pola sirkulasi (Timmermann et al., 2018).

Menurut penelitian terkini, perubahan iklim global mungkin mengubah ciri-ciri episode El Nino. Menurut sebuah penelitian di *Nature*, perubahan glasial sebelumnya mendukung peningkatan kejadian El Nino ekstrem di masa mendatang, yang mengindikasikan kemungkinan kejadian yang lebih sering dan intens. Penilaian berbeda di *Nature Reviews Earth & Environment* merangkum perkembangan dalam proses yang mendasari perubahan yang diamati dan diantisipasi dari beberapa komponen *El Nino–Southern Oscillation* (ENSO) (Cai et al., 2021).

1.3.10.2 El Nina

La Nina adalah situasi yang berlawanan dengan El-Nino. Terjadi saat suhu permukaan laut di pasifik tengah dan timur lebih rendah dari biasanya pada titik tertentu. Awan cumulu nimbus mudah terbentuk di daerah pasifik barat dengan tekanan udara rendah, seperti di Indonesia. Namun, di daerah pasifik barat dengan tekanan udara rendah, awan ini menyebabkan hujan lebat yang disertai petir. Menurut (Hartantio, 2021), sifat udara mengubah tekanan udara tinggi ke tekanan udara rendah, sehingga udara dari pasifik tengah dan timur bergerak ke pasifik barat. Selain itu, awan konvektif dari pasifik tengah dan timur bergerak ke pasifik barat.

Suhu permukaan laut di Samudra Pasifik bagian tengah dan timur diketahui menurun selama La Nina, suatu peristiwa iklim. Fase pendinginan *El Nino–Southern Oscillation* (ENSO) berdampak besar pada tren cuaca dan iklim di seluruh dunia. Perairan permukaan yang hangat didorong ke arah Pasifik barat oleh angin pasat yang biasanya bertiup dari timur ke barat di sekitar khatulistiwa. Angin pasat ini menjadi lebih kuat selama episode La Nina, yang menyebabkan lebih banyak air hangat terkumpul di

Pasifik barat dan lebih banyak air dingin mengalir ke atas di Pasifik timur. Akibatnya, suhu permukaan laut di Pasifik khatulistiwa timur dan tengah lebih rendah dari biasanya (Adamson, 2020).

Di wilayah Pasifik tropis, kondisi La Nina mulai terbentuk pada Desember 2024 dan memiliki peluang 59% untuk berlanjut hingga Februari–April 2025. Suhu permukaan laut yang lebih rendah dari biasanya dan menguatnya sirkulasi Walker merupakan karakteristik dari perkembangan ini. Memperoleh pengetahuan tentang La Nina sangat penting untuk meningkatkan prakiraan iklim dan membuat rencana untuk mengurangi dampaknya terhadap sistem alam dan manusia (C. Liu et al., 2024).

Peristiwa lainnya yang menjadi pasangan El Nino ialah La Nina. Peristiwa alam La Nina ialah satu keadaan dimana nilai abnormalitas suhu permukaan laut bernilai negatif, yang berarti bahwa nilai temperatur muka air laut di Pasifik Tengah dan Timur makin rendah dari nilai dari umumnya. Karena peristiwa inilah pembentukan awan menurun dan titik fokus pergerakan perkembangan awan menuju Pasifik Barat/Indonesia.

1.3.10.3 Netral

"Netral" menggambarkan fase *El Nino–Southern Oscillation* (ENSO) di mana kondisi La Nina maupun El Nino tidak ada. Suhu permukaan laut (SST) di Samudra Pasifik ekuator timur dan tengah mendekati rata-rata jangka panjangnya selama fase netral ini, sementara fenomena atmosfer, seperti presipitasi dan angin pasat, mendekati normal. Tahun-tahun netral ENSO, yang bertindak sebagai periode transisi antara fase hangat (El Nino) dan dingin (La Nina), mencakup sekitar setengah dari semua tahun. Penelitian "*El Nino–Southern Oscillation and Associated Climatic Conditions*" dalam *Journal of Climate* memberikan analisis menyeluruh tentang fase-fase ENSO, termasuk keadaan netral. Ciri-ciri fase aktif ENSO (El Nino dan La Nina) dan tahun-tahun tidak aktif, atau netral, ketika iklim Pasifik khatulistiwa biasanya berkisar di sekitar rata-rata dibahas dalam penelitian ini (Power & Delage, 2018).

1.3.11 Hubungan ENSO dengan Angin

Artikel ilmiah (Sinha & Jana, 2020) meneliti hubungan antara ENSO dan pola angin. Tinggi gelombang signifikan (SWH) diturunkan selama kejadian El Nino karena angin pasat yang lebih lemah. Angin pasat yang lebih kuat selama kejadian La Nina menyebabkan peningkatan aktivitas angin, yang meningkatkan *Significant Wave Height* (SWH). Korelasi ini menunjukkan telekoneksi di mana dinamika gelombang angin secara langsung dipengaruhi oleh kondisi atmosfer yang dikendalikan oleh fase ENSO. Studi ini menyoroti bagaimana musim hujan sangat memengaruhi hubungan ENSO-angin.

Karena suhu permukaan laut yang lebih tinggi di Pasifik khatulistiwa, wilayah tersebut mengalami angin timur yang lebih kencang selama fase El Nino, menurut penelitian (Renggono, 2011). Penurunan curah hujan yang cukup besar sekitar 22% lebih sedikit dari biasanya terjadi sebagai akibat dari perubahan ini, karena angin selatan yang lebih lemah kurang berhasil membawa air ke wilayah tersebut. Pasokan air setempat,

yang sangat penting untuk pertanian dan produksi tenaga hidroelektrik, mungkin sangat terpengaruh oleh penurunan curah hujan ini. Di sisi lain, hal sebaliknya terjadi selama peristiwa La Nina. Angin selatan yang lebih kencang merupakan akibat dari suhu permukaan laut yang lebih rendah dari biasanya. Karena angin ini lebih baik dalam mengangkut air, curah hujan meningkat hampir 50% dari rata-rata. Selain meningkatkan ketersediaan air, kelebihan ini dapat menghasilkan hasil pertanian yang lebih tinggi dan pembangkitan tenaga hidroelektrik.

Suhu permukaan laut dan sistem tekanan atmosfer Samudra Pasifik diubah oleh *El Nino-Southern Oscillation* (ENSO), yang secara signifikan memengaruhi pola angin global, khususnya angin pasat. El Nino menghangatkan Samudra Pasifik bagian tengah dan timur, yang melemahkan atau membalikkan angin pasat, yaitu angin timur yang biasanya bertiup dari timur ke barat dekat dengan ekuator. Pergeseran arah angin ini dapat mengganggu sirkulasi udara normal dan memengaruhi pola cuaca global. El Nino sering kali mengurangi angin pasat, yang menghambat naiknya air dingin di lepas pantai Amerika Selatan dan mengakibatkan cuaca yang lebih kering di wilayah-wilayah seperti Samudra Hindia dan Asia Tenggara (McPhaden & Santoso, 2019).

Di sisi lain, La Nina menyebabkan Pasifik timur dan tengah mendingin, yang membuat angin pasat menguat. Hal ini meningkatkan aliran angin timur-ke-barat yang biasa terjadi di Pasifik dan mengintensifkan Sirkulasi Walker, pola sirkulasi atmosfer berskala besar (Cai & van Rensch, 2021). Angin timur La Nina yang lebih kuat secara signifikan mengubah pola curah hujan tropis, yang sering kali membuat Asia Tenggara dan Australia lebih basah. Tidak ada peningkatan atau pelemahan angin pasat yang terlihat selama fase Netral, dan pola angin biasanya kembali ke arah timur-ke-barat seperti biasanya (L'Heureux & McPhaden, 2020).

1.3.12 ENSO dan Dampaknya terhadap Musim Hujan

Sistem angin musiman berskala besar yang dikenal sebagai monsun di antaranya monsun Asia dan Australia yang paling terkenal membawa hujan lebat ke banyak bagian dunia. Sebagian besar Asia Selatan dan Tenggara, termasuk Bangladesh, India, dan sebagian Tiongkok, terdampak oleh Monsun Asia. Penyebab utamanya adalah perbedaan suhu antara lautan di sekitarnya dan daratan, yang selama musim panas menarik angin sarat uap air dari Samudra Hindia dan membentuk daerah bertekanan rendah (Chen & Zhai, 2019). Dua fase monsun ini adalah Monsun Timur Laut (musim dingin), yang terjadi dari Desember hingga Februari dan membawa cuaca kering ke wilayah tersebut, dan Monsun Barat Daya (musim panas), yang terjadi dari Juni hingga September dan membawa hujan ke Asia Tenggara dan India.

Sebaliknya, Australia bagian utara dipengaruhi oleh Monsun Australia, terutama dari bulan Desember hingga Maret. Seperti Monsun Asia, musim hujan disebabkan oleh perubahan suhu musiman antara daratan dan laut di dekatnya, yang juga menyerap air dari Samudra Pasifik tropis. *Intertropical Convergence Zone* (ITCZ) selama musim panas di wilayah selatan juga berdampak pada monsun ini (Keen & Zeng, 2020).

El Nino-Southern Oscillation (ENSO), yang mengubah pola angin dan suhu permukaan laut di Samudra Pasifik, berdampak signifikan pada kedua musim hujan. El Nino menyebabkan Samudra Pasifik bagian timur dan tengah menghangat, yang melemahkan angin pasat dan menyebabkan kondisi yang lebih kering di Australia dan Asia Tenggara, yang menurunkan curah hujan musim hujan (Tian & Yang, 2021). Sebaliknya, pendinginan Pasifik bagian tengah dan timur selama La Niña mengintensifkan angin pasat, yang mengakibatkan lebih banyak curah hujan dan aktivitas musim hujan yang lebih kuat di seluruh Australia dan Asia Tenggara.

1.3.13 Korelasi Spasial dan Indeks Monsoon

1.3.13.1 Konsep Korelasi Spasial

Konsep korelasi spasial merujuk pada analisis statistik hubungan antara nilai-nilai variabel yang terdistribusi dalam ruang geografis. Dalam konteks korelasi spasial, perhatian utama diberikan pada sejauh mana nilai-nilai suatu variabel berkorelasi atau berhubungan dengan nilai variabel lain di lokasi-lokasi yang berbeda di wilayah geografis. Dengan kata lain, konsep ini memungkinkan kita untuk memahami sejauh mana pola spasial atau geografis dari suatu fenomena atau variabel tertentu.

Analisis korelasi spasial membantu mengidentifikasi apakah ada pola konsentrasi atau dispersi dalam distribusi nilai-nilai variabel di suatu wilayah. Dalam konteks korelasi spasial, kita juga perlu mempertimbangkan konsep autokorelasi spasial, yaitu hubungan antara nilai di suatu lokasi dengan nilai-nilai di sekitarnya. Dengan menggunakan teknik-teknik analisis spasial, seperti indeks korelasi spasial atau metode geostatistik, kita dapat mengukur dan memvisualisasikan sejauh mana ketergantungan spasial antarlokasi.

Dalam konteks hubungan dengan indeks monsun, analisis korelasi spasial dapat digunakan untuk memahami sejauh mana variabilitas spasial dalam indeks monsun, yaitu bagaimana pola monsun berkorelasi dengan distribusi spasial variabel lain, seperti curah hujan atau suhu udara, di wilayah geografis tertentu. Ini memberikan wawasan yang lebih dalam tentang dinamika monsun dan dampaknya dalam konteks spasial, memungkinkan pemahaman yang lebih baik tentang pola iklim regional dan fenomena terkait.

1.3.13.2 Indeks Monsun dan Signifikansinya

Indonesia bukan merupakan daerah monsun, tetapi karena adanya monsun Asia dan monsun Australia, sistem cuaca di Indonesia banyak dikendalikan oleh kedua monsun tersebut sehingga juga mempunyai ciri monsun. Ada tiga pola curah hujan di Indonesia, yaitu:

1. Pola Curah Hujan Monsunal

Pola ini monsun dicirikan oleh tipe curah hujan yang bersifat *unimodial* (satu puncak musim hujan) di mana pada bulan Juni, Juli dan Agustus terjadi bulan kering, sedangkan untuk bulan Desember, Januari dan Februari merupakan bulan basah. Pada saat monsun barat jumlah curah hujan berlimpah, sebaliknya pada saat

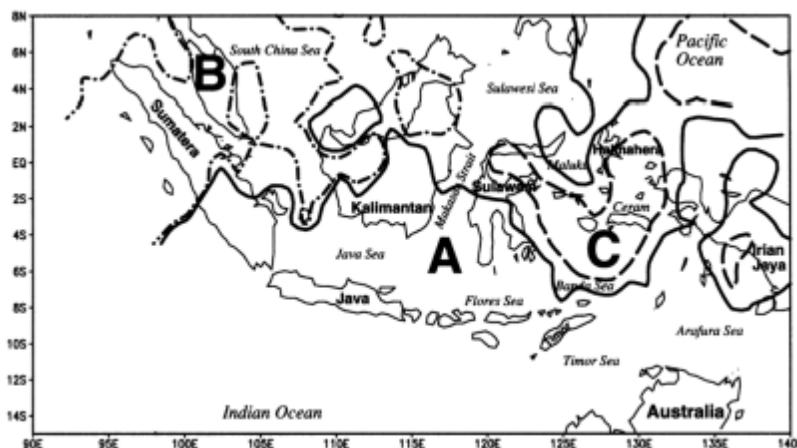
monsun timur jumlah curah hujan sangat sedikit. Wilayah A atau pola monsun yang meliputi Sumatra bagian Selatan, Kalimantan Tengah dan Selatan, Jawa, Bali, Nusa Tenggara dan sebagian Papua.

2. Pola Curah Hujan Ekuatorial

Memiliki ciri pola ekuatorial dicirikan oleh tipe curah hujan dengan bentuk bimodial (dua puncak hujan) yang biasanya terjadi sekitar bulan Maret dan Oktober atau pada saat terjadi ekinoks. Wilayah B atau pola Ekuatorial yang meliputi Sumatra bagian tengah dan Utara serta pulau Kalimantan bagian utara.

3. Pola Curah Hujan Lokal

Memiliki ciri pola hujan unimodial (satu puncak hujan), tetapi bentuknya berlawanan dengan tipe hujan monsun. Wilayah C atau pola lokal meliputi Maluku, Sulawesi dan sebagian Papua.



Gambar 5. Zonasi tiga pola utama curah hujan bulanan Indonesia, A: pola monsun; B: pola ekuatorial; dan C: pola lokal (anti-monsoonal) (Aldrian & Dwi Susanto, 2003))

Indeks monsun adalah parameter yang digunakan untuk mengukur intensitas dan variabilitas sistem monsun di berbagai wilayah. Di Indonesia, dua indeks utama yang sering digunakan adalah *Australian Monsoon Index* (AUSMI) dan *Western North Pacific Monsoon Index* (WNPMI). Kedua indeks ini membantu dalam memantau dan memprediksi pola curah hujan serta perubahan musim yang berdampak signifikan pada sektor pertanian, perikanan, dan aktivitas ekonomi lainnya (Pandia, 2019).

AUSMI didefinisikan sebagai rata-rata angin zonal pada level 850 hPa di wilayah 5°LS–15°LS dan 110°BT–130°BT. Indeks ini mencerminkan variabilitas sirkulasi atmosfer dan curah hujan di wilayah monsun Australia, termasuk sebagian Benua Maritim Indonesia (BMI). Variabilitas interannual dari AUSMI berkorelasi negatif dengan indeks SST Nino3, menunjukkan bahwa monsun Australia yang lemah dikaitkan dengan anomali SST hangat di Pasifik Timur. Dengan demikian, AUSMI dapat mewakili variabilitas interannual dari curah hujan monsun Australia (Pandia, 2019).

WNPMI dihitung berdasarkan rata-rata angin zonal pada level 850 hPa di wilayah 5°LU–15°LU dan 100°BT–130°BT, serta 20°LU–30°LU dan 110°BT–140°BT. Indeks ini

digunakan untuk mengukur intensitas monsun di wilayah Asia, khususnya di Samudra Pasifik bagian barat. Variabilitas WNPMI berpengaruh terhadap pola curah hujan di wilayah Indonesia, terutama selama periode monsun barat (Pandia, 2019).

Pemantauan indeks monsun memiliki beberapa signifikansi penting (Pandia, 2019):

1. **Prediksi Curah Hujan:** Indeks monsun membantu dalam memprediksi pola curah hujan musiman, yang krusial untuk perencanaan pertanian dan pengelolaan sumber daya air.
2. **Mitigasi Bencana:** Dengan memahami intensitas monsun, pemerintah dan masyarakat dapat mempersiapkan diri terhadap potensi bencana seperti banjir atau kekeringan.
3. **Perencanaan Ekonomi:** Informasi mengenai pola monsun dapat digunakan dalam perencanaan kegiatan ekonomi yang bergantung pada kondisi cuaca, seperti perikanan dan transportasi laut.

1.3.14 Analisis Komposit

a. Tujuan

Tujuan utama penelitian ini adalah melakukan kajian klimatologi angin secara menyeluruh untuk menentukan lokasi terbaik bagi pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) di Provinsi Maluku. Dalam rangka mendorong pengembangan sumber daya energi terbarukan yang strategis, penelitian ini berupaya memberikan data yang relevan dengan menganalisis pola, kekuatan, dan konsistensi angin di berbagai wilayah di Provinsi Maluku.

b. Pengumpulan Data

Studi ini meneliti pola angin klimatologis di Provinsi Maluku menggunakan data angin historis yang dikumpulkan selama beberapa 30 tahun. Parameter penting termasuk arah dan kecepatan angin angin dicatat dan diperiksa dengan cermat.

c. Metodologi

Analisis komposit melibatkan langkah-langkah berikut:

- **Agregasi Data:** Mengumpulkan dan menggabungkan data angin dari berbagai sumber untuk memastikan cakupan yang komprehensif di seluruh provinsi.
- **Analisis Statistik:** Menggunakan metode statistik untuk menghitung kecepatan angin rata-rata, arah angin yang dominan, dan variasinya sepanjang tahun.
- **Pemetaan Pola Angin:** Memanfaatkan Sistem Informasi Geografis (SIG) untuk membuat peta pola angin terperinci di seluruh Provinsi Maluku, yang menyoroti wilayah dengan kondisi angin yang paling menguntungkan.
- **Penilaian Variabilitas Musiman:** Menganalisis variasi musiman dalam pola angin untuk menentukan keandalan dan konsistensi kecepatan angin sepanjang waktu yang berbeda dalam setahun.
- **Analisis Kesesuaian Lokasi:** Melakukan analisis kesesuaian lokasi terperinci untuk mengidentifikasi lokasi potensial untuk PLTB berdasarkan data angin dan pertimbangan lingkungan lainnya (misalnya, kedekatan dengan jaringan transmisi, dampak lingkungan).

1.3.15 Metode Tabulasi

a. Tujuan

Untuk menentukan lokasi terbaik bagi pemasangan Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTB) di Provinsi Maluku, data angin harus disusun dan dianalisis secara metodis menggunakan tabulasi.

b. Pengumpulan Data

- Sumber: Data angin yang dikumpulkan dari katalog *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA).
- Variabel yang dicatat: Kecepatan angin, arah angin, frekuensi, dan durasi kecepatan angin di atas ambang batas tertentu.

c. Proses Tabulasi

1. Pembersihan dan Prapemrosesan Data:

- Memastikan kelengkapan dan keakuratan data angin.
- Menghilangkan data yang tidak konsisten atau tidak sesuai dengan data.
- Menstandarkan format data untuk memudahkan analisis.

2. Tabulasi Data Awal:

- Mengorganisasikan data arah dan kecepatan angin ke dalam tabel bulanan dan tahunan.
- Mengelompokkan data berdasarkan lokasi geografis di Provinsi Maluku.

3. Analisis Kecepatan Angin:

- Membuat distribusi frekuensi kecepatan angin untuk mengidentifikasi rentang kecepatan angin yang umum.
- Menghitung indeks variabilitas untuk menilai konsistensi kecepatan angin.

4. Analisis Arah Angin:

- Menabulasikan frekuensi arah angin untuk menentukan arah angin yang dominan.
- Menganalisis variabilitas arah angin untuk menilai keandalan pola angin.

5. Analisis Musiman:

- Memisahkan data angin ke dalam fase ENSO yang berbeda.
- Menabulasi dan membandingkan variasi musiman dalam kecepatan dan arah angin.

6. Penilaian Kesesuaian Lokasi:

Menetapkan skor untuk setiap lokasi berdasarkan data kecepatan dan arah angin yang ditabulasikan.

7. Pemeringkatan dan Pemilihan:

Memilih situs dengan peringkat teratas untuk analisis dan validasi lebih lanjut yang terperinci.

d. Pelaporan

- Laporan Data Tabulasi: Laporan komprehensif yang berisi tabel data angin yang dianalisis, beserta penjelasan tren dan pola yang diamati.
- Peringkat Lokasi: Tabel terperinci yang memberi peringkat lokasi potensial untuk instalasi PLTB berdasarkan data tabulasi.

2.2.2 Bahan

Data yang diolah berupa data sekunder kecepatan angin dan data *El Nino-Southern Oscillation* (ENSO) di wilayah Maluku, Indonesia dari katalog *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA).

1. Data Kecepatan Angin

Data kecepatan angin yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder dari tahun 1991-2020 yang diperoleh dari situs yang disediakan oleh *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). NOAA menyediakan data cuaca, iklim, lautan dan lingkungan berdasarkan dataset dan instansi yang menyediakan data-data tersebut dengan skala global.

<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>

2. Data Arah Angin u-wind dan v-wind

Data sekunder u-wind dan v-wind yang dikumpulkan mewakili komponen angin arah timur-barat (u-wind) dan utara-selatan (v-wind) dari tahun 1991-2020 yang diperoleh dari situs yang disediakan oleh *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). NOAA menyediakan data cuaca, iklim, lautan dan lingkungan berdasarkan dataset dan instansi yang menyediakan data-data tersebut dengan skala global.

<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>

3. Data *El Nino-Southern Oscillation* (ENSO)

Data Nino yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder Nino 3.4 dari tahun 1991-2020 yang diperoleh dari situs yang disediakan oleh *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). NOAA menyediakan data cuaca, iklim, lautan dan lingkungan berdasarkan dataset dan instansi yang menyediakan data-data tersebut dengan skala global.

<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>

2.3 Pengumpulan Data

Data kecepatan angin dan data ENSO yang diperlukan dalam penelitian ini diperoleh dari data sekunder katalog NOAA tahun 1991-2020 wilayah Maluku, Indonesia. Pada tahap pengumpulan data, dimulai dengan mencari dan mengumpulkan informasi yang berhubungan dengan penelitian terkait untuk mendapatkan teori yang relevan dan dapat mendukung penelitian. Sumber yang digunakan dapat berupa jurnal dan buku-buku. Kemudian mengumpulkan data yang digunakan dalam penelitian terkait yang berupa data sekunder.

2.4 Pengolahan Data

2.4.1 Perhitungan Rata-Rata Jangka Panjang Kecepatan Angin

Data kecepatan angin, u-wind dan v-wind diolah menggunakan *software Matlab* untuk menghasilkan rata-rata kecepatan angin selama 30 tahun. Data ini dianalisis berdasarkan waktu, yaitu dalam skala bulanan dan tahunan untuk menggambarkan variasi kecepatan angin musiman pada wilayah penelitian.

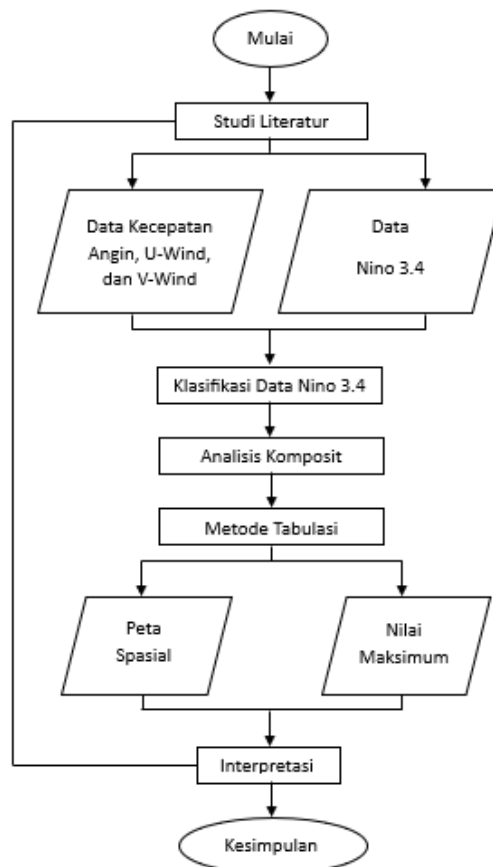
2.4.2 Klasifikasi Data Nino 3.4

Data Nino 3.4 yang telah diperoleh kemudian di klasifikasikan kedalam 3 fase El Nino, fase La Nina, dan fase Netral. Anomali SST di wilayah Nino 3.4 yang mencakup sebagian wilayah Nino 3.4 dari 170°C W hingga 120°C W bujur yang nilainya lebih besar dari 0.5°C ($0,9^{\circ}\text{F}$) menunjukkan fase hangat ENSO (El Nino). Sementara anomali SST di bawah atau sama dengan -0.5°C ($-0,9^{\circ}\text{F}$) menunjukkan fase dingin (La Nina). Fase netral terjadi ketika anomali SST berada dalam rentang $-0,5^{\circ}\text{C}$ ($-0,9^{\circ}\text{F}$) hingga $+0,5^{\circ}\text{C}$ ($+0,9^{\circ}\text{F}$).

2.4.3 Plotting Data

Hasil klasifikasi Data Nino 3.4 kemudian diolah pada *software Matlab*. Tahap ini dilakukan untuk melihat peta distribusi kecepatan angin rata-rata selama 30 tahun dalam 3 fase Enso (El Nino, La Nina, dan Netral). Menganalisis pola temporal dan spasial angin, yang merupakan dasar untuk menentukan lokasi potensial pembangunan PLTB pada wilayah penelitian.

2.5 Bagan Alir Penelitian



Gambar 7. Bagan alir