

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perubahan iklim global yang semakin nyata, ditandai oleh kenaikan suhu rata-rata bumi dan cuaca ekstrem yang lebih sering, telah mendorong negara-negara di seluruh dunia untuk mempercepat transisi ke energi terbarukan. Penggunaan bahan bakar fosil yang dominan sebagai sumber energi utama menjadi penyebab utama peningkatan emisi gas rumah kaca. Oleh karena itu, fokus pada energi bersih, seperti energi angin, menjadi krusial untuk mencapai keberlanjutan lingkungan dan mitigasi dampak perubahan iklim. Energi angin, yang berasal dari pergerakan udara atmosfer, tidak hanya ramah lingkungan tetapi juga tersedia secara melimpah dan berkelanjutan jika dimanfaatkan dengan benar.

Indonesia, sebagai negara kepulauan dengan garis pantai yang sangat panjang dan topografi yang beragam, memiliki potensi besar untuk mengembangkan energi angin sebagai bagian dari bauran energi terbarukan nasional. Namun, hingga saat ini, pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) masih sangat terbatas. Salah satu PLTB terbesar yang telah beroperasi adalah PLTB Sidrap di Sulawesi Selatan, yang membuktikan bahwa energi angin dapat berkontribusi signifikan dalam memenuhi kebutuhan energi nasional. Meski demikian, konsentrasi pengembangan PLTB di Sulawesi Selatan menunjukkan bahwa potensi energi angin di wilayah lain, seperti Nusa Tenggara Timur (NTT), masih belum dimanfaatkan secara optimal.

Provinsi NTT memiliki keunggulan geografis dan klimatologis yang unik. Wilayah ini terdiri dari lebih dari 500 pulau dengan tiga pulau utama, yaitu Flores, Sumba, dan Timor, yang didominasi oleh perbukitan, pegunungan, serta dataran tinggi. Topografi ini berpadu dengan pola iklim tropis kering dan sistem monsun yang menciptakan potensi angin yang kuat dan konsisten sepanjang tahun. Fase El Nino, yang sering terjadi di wilayah ini, memperkuat kecepatan angin hingga mencapai rata-rata 5,5 hingga 6,5 m/s di beberapa daerah. Selain itu, kombinasi antara perbedaan suhu daratan dan lautan menciptakan angin lokal yang stabil, menjadikan NTT salah satu wilayah dengan potensi energi angin terbesar di Indonesia.

Namun, penelitian tentang potensi energi angin di NTT masih relatif terbatas dibandingkan dengan wilayah lain. Penelitian sebelumnya cenderung berfokus pada wilayah-wilayah dengan infrastruktur yang lebih siap, seperti Sulawesi Selatan, atau hanya pada potensi angin tanpa mempertimbangkan analisis klimatologis yang mendalam. Kajian ini bertujuan untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan melakukan analisis klimatologis terintegrasi untuk menentukan lokasi yang paling optimal bagi pembangunan PLTB di NTT.

Pengembangan PLTB di NTT sangat penting tidak hanya untuk mendukung target energi terbarukan nasional yang ditetapkan pemerintah—yakni 23% dari

bauran energi nasional pada tahun 2025—tetapi juga untuk memberikan dampak positif bagi masyarakat lokal. Pengembangan energi terbarukan di wilayah ini dapat meningkatkan akses listrik ke daerah-daerah terpencil, menciptakan lapangan kerja baru, dan mendorong pembangunan ekonomi berkelanjutan. Melalui pendekatan ilmiah berbasis data klimatologis dan pengambilan keputusan yang berbasis bukti, diharapkan kajian ini dapat memberikan rekomendasi yang relevan dan strategis bagi pengembangan PLTB di Provinsi Nusa Tenggara Timur.

1.2 Tujuan dan Manfaat

1.2.1 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui potensi energi angin di Provinsi Nusa Tenggara Timur (NTT)
2. Untuk mengetahui karakteristik klimatologis angin dalam menentukan lokasi yang optimal untuk pembangunan PLTB di Provinsi Nusa Tenggara Timur (NTT)

1.2.2 Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat dalam mengidentifikasi karakteristik potensi angin di Provinsi Nusa Tenggara Timur (NTT) 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, yang sebagian besar disebabkan oleh variasi tekanan atmosfer akibat perubahan suhu. Angin dengan kecepatan berbeda dihasilkan ketika udara bergerak dari daerah bertekanan tinggi ke daerah bertekanan rendah. Efek *Coriolis* menyebabkan pembelokkan gerakan ini pada bumi yang berotasi, sehingga mengubah arah angin. Rotasi Bumi dan perbedaan suhu antara ekuator dan kutub memengaruhi pola angin berskala besar secara global. Gesekan di permukaan memperlambat angin dan membuatnya bergerak lebih jauh ke dalam ke daerah bertekanan rendah.

Dalam fisika atmosfer, konsep angin geostropik, di mana gaya *Coriolis* dan gaya gradien tekanan berada dalam keseimbangan, sangat penting. Dalam memahami pola angin di luar daerah tropis, pendekatan awal yang digunakan adalah angin yang mengalir sejajar dengan isobar sebagai hasil dari keseimbangan ini. Namun, angin sebenarnya menyimpang dari keseimbangan geostropik ini di dekat permukaan Bumi akibat gaya gesekan (Holton & Hakim, 2013).

Lapisan atmosfer yang secara langsung dipengaruhi oleh kontak dengan permukaan Bumi dikenal sebagai lapisan batas planet (*Planetary Boundary*

Layer/PBL). Dalam PBL, turbulensi berperan penting dalam pencampuran vertikal momentum, panas, dan kelembapan, sementara hambatan gesek memperlambat angin. Akibatnya, profil kecepatan angin bervariasi sesuai dengan ketinggian, di mana kecepatan angin umumnya lebih rendah di dekat permukaan dan meningkat seiring ketinggian menuju atmosfer bebas, tempat keseimbangan geostropik berlaku (Meng et al., 2024).

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

Batasan fisik dalam ekstraksi energi angin telah diteliti lebih lanjut dalam penelitian terkini. Kleidon (2020) mempelajari pendekatan termodinamika untuk menentukan jumlah energi angin yang dapat dihasilkan atmosfer serta persentase yang dapat diubah menjadi energi terbarukan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa potensi sumber daya rata-rata sekitar $0,5 \text{ W/m}^2$ per luas permukaan dapat diperoleh dengan mengonversi hanya sebagian kecil energi kinetik menjadi energi terbarukan.

Kemajuan dalam aerodinamika turbin angin telah menghasilkan model baru untuk memperkirakan pembangkitan daya, gaya dorong, dan dinamika bangun rotor dalam berbagai kondisi. Liew et al. (2024) mempresentasikan model momentum terpadu yang secara efektif memperkirakan parameter-parameter ini di berbagai rezim operasi tanpa memerlukan koreksi empiris. Model ini bertujuan untuk meningkatkan desain, pemodelan, dan alat kontrol turbin angin sejak tahap awal.

1.3.2 Kepulauan Nusa Tenggara Timur (NTT)

Provinsi Nusa Tenggara Timur (NTT) adalah wilayah kepulauan yang terdiri dari lebih dari 500 pulau, dengan tiga pulau utama, yaitu Flores, Sumba, dan Timor. Topografi NTT didominasi oleh perbukitan, pegunungan, dan dataran tinggi yang bercampur dengan dataran rendah pesisir. Pegunungan di Flores, seperti Gunung Inerie dan Kelimutu, serta perbukitan terbuka di Sumba dan Timor, membentuk karakteristik geografis wilayah ini. Pola iklim NTT beriklim tropis kering dengan pengaruh besar dari sistem monsun. Monsun Australia membawa angin kering dari arah tenggara pada musim kemarau (Mei sampai September), sementara Monsun Asia membawa angin lembap dari arah barat laut pada musim hujan (Oktober sampai April). Karakteristik ini menjadikan wilayah NTT sering mengalami musim kemarau yang panjang dengan curah hujan terbatas, terutama di wilayah selatan seperti Sumba dan Timor.

Angin yang kuat dan konsisten di wilayah NTT, khususnya pada fase El Nino, memberikan potensi besar untuk energi terbarukan seperti Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Data historis menunjukkan kecepatan angin rata-rata di beberapa wilayah NTT mencapai 5,5 hingga 6,5 m/s. Faktor iklim lokal, seperti posisi geografis yang dikelilingi lautan, menyebabkan perbedaan suhu darat dan laut

yang signifikan, memicu angin lokal dengan pola yang konsisten. Selain itu, perbukitan terbuka memperkuat intensitas angin, menjadikannya lokasi ideal untuk turbin angin. Pengembangan PLTB di wilayah ini tidak hanya relevan dengan kebutuhan energi terbarukan, tetapi juga berpotensi meningkatkan akses listrik ke daerah terpencil, menciptakan lapangan kerja baru, dan mendorong pembangunan ekonomi berkelanjutan.

Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik (BPS) Provinsi Nusa Tenggara Timur (NTT), jumlah penduduk NTT pada tahun 2022 adalah 5.466.285 jiwa. Pusat-pusat perkotaan utama di Nusa Tenggara Timur (NTT) tersebar di beberapa pulau utama, dengan Kota Kupang sebagai pusat administrasi dan ekonomi terbesar.

Evaluasi kebutuhan energi di Provinsi Nusa Tenggara Timur (NTT) sangat penting untuk memenuhi permintaan yang terus meningkat seiring pertumbuhan populasi dan peluang ekonomi. Setiap kabupaten/kota memiliki kebutuhan energi yang berbeda, tergantung pada variabel seperti kepadatan penduduk, aktivitas ekonomi, dan ketersediaan infrastruktur.

1. Perhitungan Permintaan Energi:

Menurut data Badan Pusat Statistik (BPS) NTT, jumlah penduduk provinsi ini pada tahun 2022 mencapai 5.466.284 jiwa. Dengan asumsi konsumsi listrik per kapita sebagai berikut:

- a. Daerah Perkotaan: 1.000 kWh per tahun
- b. Daerah Pedesaan: 600 kWh per tahun

Perkiraan kebutuhan energi listrik dapat dihitung pada tabel sebagai berikut:

Tabel 1. Perkiraan Kebutuhan Energi Listrik di setiap Kabupaten/Kota NTT

No	Kabupaten/Kota	Populasi (2022)	Konsumsi Listrik Per Kapita (kWh/tahun)	Perkiraan Kebutuhan Energi (GWh/tahun)
1	Alor	211.872	600	127,1
2	Belu	218.881	600	131,3
3	Ende	270.763	600	162,5
4	Flores Timur	276.896	600	166,1
5	Kab. Kupang	411.097	600	246,7
6	Kota Kupang	470.171	1000	470,2
7	Lembata	135.93	600	81,6
8	Malaka	194.39	600	116,6
9	Manggarai	322.052	600	193,2
10	Manggarai Barat	265.715	600	159,4

No	Kabupaten/Kota	Populasi (2022)	Konsumsi Listrik Per Kapita (kWh/tahun)	Perkiraan Kebutuhan Energi (GWh/tahun)
11	Manggarai Timur	253.045	600	151,8
12	Nagekeo	160.156	600	96,1
13	Ngada	165.254	600	99,2
14	Rote Ndao	162.756	600	97,7
15	Sabu Raijua	92.95	600	55,8
16	Sikka	321.953	600	193,2
17	Sumba Barat	149.351	600	89,6
18	Sumba Barat Daya	336.146	600	201,7
19	Sumba Tengah	82.359	600	49,4
20	Sumba Timur	249.607	600	149,8
21	Timor Tengah Selatan	466.685	600	280,0
22	Timor Tengah Utara	259.829	600	155,9

2. Potensi Energi Terbarukan:

NTT memiliki potensi yang signifikan untuk pengembangan energi terbarukan karena karakteristik geografis dan iklimnya (Nugraha, 2022):

- Energi Surya:** Dengan intensitas radiasi matahari yang tinggi sepanjang tahun, NTT cocok untuk pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS).
- Energi Angin:** Beberapa wilayah di NTT memiliki potensi angin yang baik untuk pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB).

Untuk memenuhi total permintaan energi sebesar 3.468 GWh per tahun, kombinasi sumber energi terbarukan dapat digunakan di seluruh NTT. 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 1.500 GWh, diperlukan kapasitas tenaga surya sekitar 1.000 MW.
- Tenaga Angin:** Rata-rata, turbin angin berkapasitas 1 MW dapat menghasilkan sekitar 2,5–3 GWh/tahun. Untuk memenuhi permintaan yang tersisa (1.968 GWh), sekitar 656 MW kapasitas angin dapat digunakan, tergantung pada kondisi angin setempat.

Pengembangan potensi energi terbarukan ini tidak hanya akan memenuhi kebutuhan energi lokal tetapi juga mendukung transisi energi nasional menuju sumber yang lebih bersih dan berkelanjutan.

1.3.3 Parameter Angin

Pemahaman tentang karakteristik angin sangat penting untuk berbagai keperluan, seperti produksi energi angin, perencanaan kota, dan penilaian lingkungan. Untuk memaksimalkan kinerja turbin angin serta menjamin integritas strukturalnya, faktor-faktor seperti kecepatan, arah, dan turbulensi angin harus diukur dan dianalisis secara akurat. Sebuah studi menekankan pentingnya memahami karakteristik hembusan angin di medan yang kompleks guna meningkatkan teknik rekayasa angin (Hu et al., 2018).

Dalam analisis data kecepatan angin, distribusi Weibull sering digunakan karena sifatnya yang serbaguna. Studi terbaru menunjukkan bahwa di antara berbagai teknik estimasi parameter distribusi Weibull, metode Estimasi Kemungkinan Maksimum (Maximum Likelihood Estimation/MLE) merupakan pendekatan paling efektif untuk aplikasi energi angin (Abou El-Ela et al., 2023).

Selain itu, pemodelan spasial karakteristik angin menjadi aspek krusial dalam mendukung pembangunan berkelanjutan di lingkungan perkotaan. Teknik pemodelan canggih diperlukan untuk menggambarkan aliran angin di kota dengan lebih akurat, terutama dalam menghadapi tantangan akibat urbanisasi yang meningkat dan perubahan iklim (Y. S. Liu et al., 2024). Faktor-faktor seperti kecepatan rotor, desain bilah, dan kondisi iklim juga sangat memengaruhi kinerja serta desain turbin angin. Studi lain meneliti berbagai faktor utama yang berperan dalam performa turbin angin serta dampaknya terhadap lingkungan guna mengoptimalkan desain turbin untuk peningkatan efisiensi (Bashir, 2022).

Kemajuan dalam teknik pengukuran, seperti penggunaan anemometer sonik 3D, telah menghasilkan karakterisasi parameter angin yang lebih baik, yang pada gilirannya meningkatkan akurasi prakiraan angin dan efektivitas sistem energi angin. Dengan pemahaman yang lebih menyeluruh tentang parameter angin serta penerapan alat pemodelan dan pengukuran yang sesuai, optimalisasi sistem energi angin dan mitigasi dampak lingkungan akibat dinamika angin dapat dilakukan secara lebih efektif (Hu et al., 2018).

1.3.4 Klimatologi 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 dalam menghasilkan

listrik, sangat penting untuk memahami pola, kecepatan, dan frekuensi angin (Doktor Manajemen Sumberdaya Pantai, 2011).

Pemanfaatan energi angin sebagai sumber energi alternatif, memerlukan 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 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Konsep klimatologi angin menyatakan bahwa pola angin, kecepatan, dan konsistensi sepanjang tahun memiliki dampak yang signifikan terhadap produksi energi angin. Perlu diingat bahwa pembangkit listrik tenaga angin tidak sepenuhnya bergantung pada angin, karena turbin angin modern telah dilengkapi dengan sistem yang memungkinkan operasionalnya pada kecepatan angin rendah (umumnya antara 3 hingga 4 m/s). Namun, turbin ini juga dapat beroperasi hingga kecepatan 25 m/s sebelum secara otomatis dimatikan untuk mencegah kerusakan. Jika tidak ada angin, turbin angin akan berhenti menghasilkan listrik. Namun, sistem jaringan yang menggunakan sumber energi cadangan atau memiliki fasilitas penyimpanan energi dapat mengatasi masalah ini (Borthwick et al., 2020). Selain itu, beberapa generator angin ditempatkan di daerah pesisir, di mana pola angin regional—seperti angin laut—dapat memengaruhi ketersediaan angin, bahkan selama periode tenang di wilayah pedalaman.

Fenomena pasang surut laut di wilayah NTT memiliki pengaruh signifikan terhadap pola angin lokal, terutama di wilayah pesisir. Perbedaan suhu antara daratan dan lautan menyebabkan terbentuknya angin laut pada siang hari dan angin darat pada malam hari. Pada siang hari, daratan yang lebih cepat panas menciptakan area bertekanan rendah, sehingga udara dari laut yang lebih sejuk bergerak menuju daratan. Sebaliknya, pada malam hari, daratan yang mendingin lebih cepat menyebabkan udara bergerak dari daratan ke laut. Pola angin ini dapat dimanfaatkan untuk pembangkit listrik tenaga angin di daerah pesisir, seperti di Pulau Sumba dan Pulau Timor, yang memiliki potensi angin yang cukup signifikan (Ramadhan et al., 2023). Penelitian mengenai potensi energi arus laut di Selat Larantuka, antara Pulau Flores dan Pulau Adonara, menunjukkan bahwa kecepatan arus di wilayah tersebut mencapai hingga 3,68 m/s pada kondisi tertentu. Tipe pasang surut di daerah ini adalah *semi-diurnal*, dengan dua kali pasang dan dua kali surut dalam 24 jam (Yuningsih & Masduki, 2011). Selain itu, penelitian lain menunjukkan bahwa arah angin pada musim timur di perairan Sumba, berasal dari arah tenggara yang bertiup ke arah barat laut dan barat, dengan kecepatan angin rata-rata sekitar 6,05 m/s. Meskipun arah arus cenderung berlawanan dengan arah angin, kondisi ini tetap menunjukkan adanya potensi pemanfaatan energi angin di wilayah tersebut (Ramadhan et al., 2023).

1.3.5 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).

1.3.5.1 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 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 yaitu:

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

Pada tahun 2017, jalur transmisi HVDC (*High Voltage Direct Current*) 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).

1.3.5.2 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.

Proyek Hornsea Wind Farm ini dibagi menjadi beberapa fase perkembangan (Smith & Brown, 2020):

1. 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.

2. 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.
3. Hornsea Three dan Four: 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.

1.3.6 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 (Bachtiar & 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).

1.3.6.1 PLTB Sidrap

PLTB Sidrap, atau Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Sidrap, adalah pembangkit listrik tenaga angin skala komersial pertama di Indonesia. Terletak di Pegunungan Pabbareessang, 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 dari PLTB Sidrap yaitu:

- a. Jumlah Turbin: 30 unit
- b. Kapasitas per Turbin: 2,5 MW
- c. Tinggi Menara Turbin: 80 m
- d. 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).

1.3.6.2 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 dari PLTB Tolo 1 yaitu:

- a. Jumlah Turbin: 20 unit
- b. Kapasitas per Turbin: 3,6 MW
- c. Tinggi Menara Turbin: 133 m
- d. Panjang Baling-Baling: 63 m

Dengan kecepatan angin rata-rata 6 m/s, PLTB Tolo 1 diperkirakan dapat menghasilkan listrik sebesar 198,6 gigawatt jam (GWh) per tahun. PLTB Tolo 1 diharapkan mampu mengaliri listrik 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).

1.3.7 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 2.** berikut.

Tabel 2. Perbandingan PLTB Dunia dan PLTB 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

Aspek	Gansu Wind Farm (Tiongkok)	Hornsea Wind Farm (Inggris)	PLTB Sidrap (Indonesia)	PLTB Tolo 1 (Indonesia)
Tipe	<i>Onshore</i> (Darat)	<i>Offshore</i> (Lepas Pantai)	<i>Onshore</i> (Darat)	<i>Onshore</i> (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	Bervasriasi	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

1.3.8 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)

PLTB (Pembangkit Listrik Tenaga Bayu) adalah sistem pembangkit listrik yang menggunakan energi angin untuk menghasilkan listrik. Energi angin menggerakkan turbin angin yang mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik, yang kemudian dikonversi menjadi listrik melalui generator. Di berbagai negara, PLTB telah berkembang pesat sebagai sumber energi terbarukan yang andal. Namun, di Indonesia, pengembangannya masih menghadapi beberapa tantangan utama, antara lain:

1. Variabilitas Kecepatan Angin – Kecepatan angin yang tidak selalu stabil dapat mempengaruhi efisiensi produksi listrik di beberapa lokasi.
2. Investasi dan Biaya – Investasi awal dalam pembangunan PLTB masih cukup besar, yang dapat menghambat pengembangan lebih lanjut.

3. Infrastruktur dan Teknologi – Keterbatasan infrastruktur dan teknologi pendukung membuat operasi dan pemeliharaan PLTB lebih menantang dibandingkan di negara-negara yang sudah lebih maju dalam sektor ini.

Untuk mengatasi tantangan tersebut, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) telah menetapkan target peningkatan porsi energi terbarukan, termasuk energi angin, menjadi 23% dari bauran energi nasional pada tahun 2025. Selain itu, berbagai kebijakan dan insentif telah diterapkan guna mendorong investasi dan pengembangan PLTB di berbagai daerah (Sianipar et al., 2024).

Selain kebijakan nasional, pengembangan PLTB di Indonesia juga perlu mempertimbangkan kondisi geografis dan potensi daerah tertentu. Salah satu wilayah dengan potensi energi angin yang signifikan adalah Nusa Tenggara Timur (NTT), terutama di wilayah pesisir dan pulau-pulau seperti Sumba dan Sabu Raijua. Studi pra-kelayakan oleh P3TKEBTKE (Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Ketenagalistrikan, Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi) pada tahun 2020 menunjukkan bahwa kecepatan angin rata-rata di Pulau Sabu Raijua pada ketinggian 50 meter mencapai 5,82 m/s, dengan arah angin dominan dari tenggara. Selain itu, penelitian tahun 2022 mengusulkan optimasi desain turbin angin tanpa baling-baling (*bladeless wind turbine*) yang disesuaikan dengan kecepatan angin rendah di NTT, yang rata-rata mencapai 2,3 m/s. Teknologi ini berpotensi meningkatkan efisiensi pembangkitan listrik di daerah dengan angin berkecepatan rendah (Ramadhany et al., 2022).

Selain inovasi teknologi, pendekatan berbasis komunitas juga berperan penting dalam memastikan keberlanjutan proyek PLTB di NTT. Salah satu pendekatan yang dapat diterapkan adalah koperasi energi berbasis masyarakat, yang tidak hanya meningkatkan akses listrik tetapi juga mendorong partisipasi lokal dalam pengelolaan energi terbarukan. Pemasangan turbin angin di wilayah pesisir atau pedesaan NTT dapat mengurangi ketergantungan pada infrastruktur energi terpusat serta memberikan akses langsung ke listrik bersih bagi penduduk setempat. Dengan rasio elektrifikasi yang masih rendah, PLTB berpotensi menjadi solusi dalam menyediakan listrik yang andal di daerah terpencil. Model koperasi energi yang telah sukses diterapkan di Denmark dan Jerman juga dapat diadaptasi di NTT untuk meningkatkan aksesibilitas energi, mendorong pertumbuhan ekonomi lokal, serta memperkuat kemandirian energi masyarakat (Wibowo et al., 2020).

Secara keseluruhan, pengembangan PLTB di Indonesia mendukung inisiatif nasional untuk mencapai target energi terbarukan. Inisiatif ini sejalan dengan gerakan global untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan ketergantungan pada bahan bakar fosil. Berdasarkan perkiraan International Energy Agency (IEA), cadangan bahan bakar fosil global, terutama batu bara, minyak bumi, dan gas alam, diperkirakan akan mengalami penurunan signifikan dalam beberapa dekade mendatang. Dengan potensi energi angin yang besar, pengembangan teknologi yang tepat, serta dukungan kebijakan yang memadai, Indonesia dapat memanfaatkan

PLTB secara lebih optimal dalam transisi menuju energi yang lebih berkelanjutan (IEA, 2020).

1.3.8.1 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 disebarakan 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*)

Turbin angin sumbu horizontal ini menggunakan poros rotor utama dan generator listrik di puncak menara.



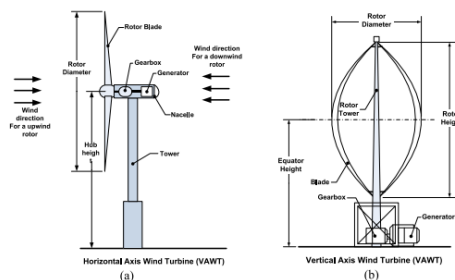
Gambar 1. Turbin angin sumbu horizontal (Bachtiar & Hayyatul, 2018)

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

Turbin angin sumbu vertikal/tegak memiliki poros rotor yang tegak lurus dan berfungsi untuk menangkap angin dari berbagai arah.



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



Gambar 3. Komponen turbin angin (a) HAWT dan (b) 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 3**.

Tabel 3. Kelas Turbin Angin (SNI 3851-1-2018)

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

Berikut merupakan pengelompokan turbin angin yaitu skala kecil dan skala besar.

a. 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 4** berikut menunjukkan prototipe turbin angin skala kecil yang telah dikembangkan di Indonesia.

Tabel 4. Turbin Angin Skala Kecil (Dokumen LAPAN)

Kapasitas	Diameter rotor (m)	Jumlah Sudu	Tegangan Keluaran
50 W	1,0	6	12 VDC
1000 W	1,7	3	12/24 VDC
1500 W	3,0	3	12/24 VDC
2500 W	3,0	2	12/24 VDC
10 kW	7,0	3	230 VAC, 50 Hz
3,5 kW	4,5	6	230 C, 50 Hz

b. 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 5**. 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 5. 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

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

1. Kelebihan 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, adalah kemampuannya untuk hidup berdampingan dengan ladang angin saat bercocok tanam atau merumput (Zhu et al., 2020).

2. Kekurangan PLTB

a. Intermitensi dan Variabilitas

Salah satu tantangan utama dalam pengoperasian PLTB adalah sifat intermitennya, yang berarti bahwa pembangkit listrik tenaga bayu tidak

dapat menghasilkan listrik secara terus-menerus dengan output yang stabil. Selain itu, variabilitas kecepatan angin dapat menyebabkan fluktuasi dalam produksi energi, sehingga mempengaruhi stabilitas jaringan listrik. 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

Pergerakan bilah turbin angin menghasilkan suara yang dapat mengganggu penduduk di sekitarnya (Möller 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

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. Kelebihan 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

PLTS sangat bergantung pada sinar matahari, sehingga pada 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

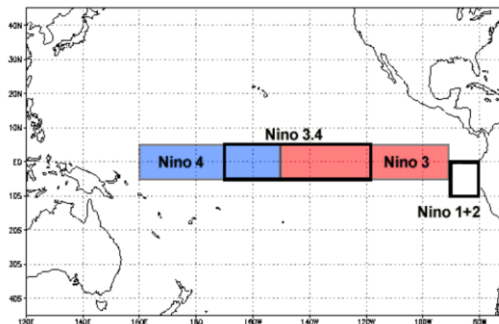
Perangkat penyimpanan energi, seperti baterai, sering kali dibutuhkan untuk menyimpan energi ekstra untuk penggunaan selanjutnya karena PLTS hanya menghasilkan listrik saat matahari bersinar. Namun, kendala utama terhadap penggunaan listrik tenaga surya secara luas adalah tingginya biaya sistem penyimpanan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

1.3.10 El Niño 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 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 periode 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 terhadap dinamika ENSO telah dikaji dalam penelitian terbaru. Kemajuan dalam modifikasi aktual maupun yang diperkirakan pada beberapa komponen ENSO, termasuk mekanisme yang mendasari perubahan tersebut, dirangkum dalam sebuah studi yang diterbitkan di *Nature Reviews Earth & Environment*. Kompleksitas respons ENSO terhadap perubahan iklim disorot oleh studi lain yang diterbitkan di *Nature Communications*, yang mengamati bagaimana pergeseran periode El Nino di Pasifik Tengah dan Pasifik Timur muncul akibat pemanasan global (Geng et al., 2022).

Pola cuaca di Indonesia sangat bervariasi karena wilayahnya berbentuk kepulauan, bukan daratan tropis atau subtropis. Ketidakseimbangan energi radiasi matahari menyebabkan variasi pola tekanan antar pulau, menciptakan medan tekanan yang kompleks dan memengaruhi sirkulasi atmosfer lokal, seperti angin darat dan angin laut. Selama fenomena El Nino dan La Nina, pola curah hujan di wilayah tropis mengalami perubahan. Misalnya, El Nino tahun 2015/2016 berdampak signifikan terhadap musim tanam dan hasil panen petani. FAO (Food and Agriculture Organization) melaporkan bahwa hanya 30% dari total lahan pertanian yang dapat ditanami tepat waktu akibat musim kemarau yang sangat kering, dengan musim hujan yang baru dimulai setelah 6 hingga 8 minggu. Kemarau panjang terjadi ketika terdapat anomali pola sirkulasi atmosfer dalam jangka waktu satu bulan atau lebih. Jika peristiwa El Nino terjadi secara bersamaan, intensitas kekeringan meningkat, dan curah hujan dapat berkurang hingga 100 mm per bulan. Jawa Timur dan Nusa Tenggara merupakan wilayah yang paling terdampak kekeringan (Filaili, 2018).

Tabel 6. 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

Anomali SST	Event
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, yang dikenal juga 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 fenomena El Nino. Pemanasan ini mengganggu pola sirkulasi udara normal, sehingga berdampak besar pada cuaca dan iklim di seluruh dunia. Dalam kondisi normal, angin pasat yang bertiup dari timur ke barat di sekitar khatulistiwa mendorong air permukaan yang hangat berkumpul di Pasifik bagian barat. Namun, selama periode El Nino, angin pasat melemah, sehingga memungkinkan air hangat bergerak ke arah timur. Perubahan suhu laut ini menyebabkan berbagai anomali iklim yang turut memengaruhi tekanan udara serta pola sirkulasi atmosfer (Timmermann et al., 2018).

Menurut penelitian terkini, perubahan iklim global mungkin mengubah ciri-ciri periode 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 La 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 cumulonimbus 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 Hartanto (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 periode 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. 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).

1.3.10.3 Netral

Netral menggambarkan fase *El Nino–Southern Oscillation* (ENSO) ketika kondisi La Nina maupun El Nino tidak terjadi. Selama fase netral ini, suhu permukaan laut (SST) di Samudra Pasifik bagian timur dan tengah mendekati rata-rata jangka panjangnya, sementara fenomena atmosfer, seperti presipitasi dan angin pasat, berada dalam kondisi mendekati normal. Tahun-tahun netral ENSO, yang berfungsi sebagai periode transisi antara fase hangat (El Nino) dan fase dingin (La Nina), mencakup sekitar setengah dari seluruh tahun. Penelitian berjudul *El Nino–Southern Oscillation and Associated Climatic Conditions* dalam *Journal of Climate* memberikan analisis menyeluruh mengenai fase-fase ENSO, termasuk keadaan netral. Studi ini membahas karakteristik fase aktif ENSO (El Nino dan La Nina) serta tahun-tahun tidak aktif atau netral, di mana iklim di wilayah Pasifik ekuator umumnya berada di sekitar kondisi rata-rata (Power & Delage, 2018).

1.3.11 Hubungan ENSO dengan Angin

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

Menurut penelitian Renggono (2011), suhu permukaan laut yang lebih tinggi di Pasifik ekuator menyebabkan angin timur yang lebih kencang selama fase El Nino. Penurunan curah hujan yang signifikan, sekitar 22% lebih sedikit dari biasanya, terjadi akibat perubahan ini, karena angin selatan yang lebih lemah kurang efektif dalam membawa kelembapan ke wilayah tersebut. Pasokan air setempat, yang sangat penting untuk pertanian dan pembangkit tenaga hidroelektrik, mungkin akan

sangat terpengaruh oleh penurunan curah hujan ini. Di sisi lain, hal sebaliknya terjadi selama peristiwa La Nina. Angin selatan yang lebih kencang disebabkan oleh suhu permukaan laut yang lebih rendah dari biasanya. Karena angin ini lebih efektif dalam mengangkut air, curah hujan meningkat hampir 50% di atas rata-rata. Selain meningkatkan ketersediaan air, kelebihan ini dapat menghasilkan hasil pertanian yang lebih tinggi dan pembangkit tenaga hidroelektrik yang lebih efisien.

1.3.12 Korelasi Spasial dan Indeks *Monsoon*

Korelasi spasial dan indeks monsun memiliki keterkaitan erat dalam analisis pola iklim di berbagai wilayah geografis. Korelasi spasial memungkinkan kita untuk memahami distribusi dan hubungan variabel iklim dalam ruang, termasuk pola curah hujan dan pergerakan angin monsun. Dengan menerapkan analisis ini, kita dapat mengidentifikasi bagaimana variabilitas monsun berkorelasi dengan kondisi atmosfer di berbagai lokasi. Indeks monsun, sebagai parameter yang digunakan untuk mengukur intensitas dan variabilitas sistem monsun, memberikan wawasan lebih lanjut mengenai dampaknya terhadap pola curah hujan regional. Dengan memahami korelasi spasial dan indeks monsun secara bersamaan, kita dapat memperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai dinamika iklim di suatu wilayah, termasuk prediksi perubahan musim dan potensi dampaknya terhadap sektor-sektor penting seperti pertanian, perikanan, dan sumber daya air.

1.3.12.1 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 *monsoon*, analisis korelasi spasial dapat digunakan untuk memahami sejauh mana variabilitas spasial dalam indeks *monsoon*, 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.

1.3.12.2 Indeks *Monsoon* 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 monsunial. Ada tiga pola curah hujan di Indonesia, yaitu:

1. Pola curah hujan monsunial

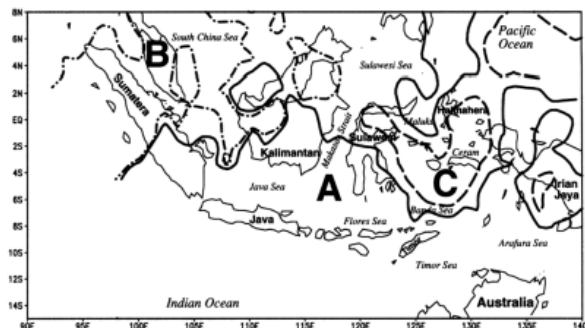
Pola ini monsun dicirikan oleh tipe curah hujan yang bersifat *unimodial* (satu puncak musim hujan) di mana pada bulan Juni, Juli dan Agustus terjadi bulan kering, sedangkan untuk bulan Desember, Januari dan Februari merupakan bulan basah. Pada saat monsun barat jumlah curah hujan berlimpah, sebaliknya pada saat monsun timur jumlah curah hujan sangat sedikit. Wilayah A atau pola monsunial 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 monsunial; B: pola Ekuatorial; dan C: pola lokal (anti-monsounal) (Sumber: (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.

1.3.12.3 Penerapan Indeks *Monsoon* di Pulau NTT

Penerapan Indeks Monsun di Provinsi Nusa Tenggara Timur (NTT) sangat penting dalam memahami pola curah hujan dan kekeringan di wilayah tersebut. Penelitian oleh M. Iqbal Faishal et al. (2017) dalam "Analisis Pola Curah Hujan Wilayah dan Indeks Kekeringan Berbasis *Geographic Information System* (GIS) di Provinsi Nusa Tenggara Timur (NTT)" menunjukkan bahwa pola curah hujan di NTT mengikuti pola hujan monsun yang dipengaruhi oleh pergerakan angin monsun serta fenomena La Niña dan El Nino. Studi ini juga mengindikasikan bahwa indeks kekeringan di NTT pada periode 2008 hingga 2015 termasuk dalam kategori kekeringan sedang, dengan klasifikasi iklim zona D4 menurut metode Oldeman, yang berarti sistem bercocok tanam 1 kali padi dan 1 kali palawija.

Selain itu, penelitian oleh Raka Gusti Wahyu Pratama et al. (2022) dalam "Analisis Indeks Kekeringan Provinsi Nusa Tenggara Timur (NTT)" menggunakan

metode Standardized Precipitation Index (SPI) untuk menganalisis data curah hujan historis dan proyeksi. Hasilnya menunjukkan bahwa meskipun kondisi kekeringan di NTT masih relatif normal berdasarkan data historis, beberapa daerah seperti Kabupaten Belu memiliki risiko kekeringan yang cukup tinggi. Proyeksi ke depan mengindikasikan kondisi yang lebih kering dibandingkan dengan data historis, menekankan pentingnya pemantauan dan manajemen sumber daya air yang lebih baik di masa mendatang.

1.3.13 Analisis Komposit

1. Tujuan

Tujuan utama penelitian ini adalah melakukan kajian klimatologi angin secara menyeluruh untuk menentukan lokasi terbaik bagi pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTB) di Provinsi NTT. 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 NTT.

2. Pengumpulan Data

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

3. Metodologi

- a. Agregasi Data: Mengumpulkan dan menggabungkan data angin dari berbagai sumber untuk memastikan cakupan yang komprehensif di seluruh provinsi.
- b. Analisis Statistik: Menggunakan metode statistik untuk menghitung kecepatan angin rata-rata, arah angin yang dominan, dan variasinya sepanjang tahun.
- c. Pemetaan Pola Angin: Memanfaatkan Sistem Informasi Geografis (SIG) untuk membuat peta pola angin terperinci di seluruh Provinsi NTT, yang menyoroti wilayah dengan kondisi angin yang paling menguntungkan.
- d. Penilaian Variabilitas Musiman: Menganalisis variasi musiman dalam pola angin untuk menentukan keandalan dan konsistensi kecepatan angin sepanjang waktu yang berbeda dalam setahun.
- e. 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).

1.3.14 Metode Tabulasi

1. Tujuan

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

2. Pengumpulan Data

- a. Sumber: Data angin yang dikumpulkan dari stasiun meteorologi setempat, data penginderaan jarak jauh, dan pengamatan satelit.
- b. Variabel yang dicatat: Kecepatan angin, arah angin, frekuensi, dan durasi kecepatan angin di atas ambang batas tertentu.

3. Proses Tabulasi

- a. Pembersihan dan Prapemrosesan Data:
 - 1) Memastikan kelengkapan dan keakuratan data angin.
 - 2) Menghilangkan data yang tidak konsisten atau tidak sesuai dengan data.
 - 3) Menstandarkan format data untuk memudahkan analisis.
- b. Tabulasi Data Awal:
 - 1) Mengorganisasikan data arah dan kecepatan angin ke dalam tabel bulanan dan tahunan.
 - 2) Mengelompokkan data berdasarkan lokasi geografis di Provinsi NTT.
- c. Analisis Kecepatan Angin:
 - 1) Membuat distribusi frekuensi kecepatan angin untuk mengidentifikasi rentang kecepatan angin yang umum.
 - 2) Menghitung indeks variabilitas untuk menilai konsistensi kecepatan angin.
- d. Analisis Arah Angin:
 - 1) Menabulasikan frekuensi arah angin untuk menentukan arah angin yang dominan.
 - 2) Menganalisis variabilitas arah angin untuk menilai keandalan pola angin.
- e. Analisis Musiman:
 - 1) Memisahkan data angin ke dalam fase ENSO yang berbeda.
 - 2) Menabulasi dan membandingkan variasi musiman dalam kecepatan dan arah angin.
- f. Penilaian Kesesuaian Lokasi:

Menetapkan skor untuk setiap lokasi berdasarkan data kecepatan dan arah angin yang ditabulasikan.
- g. Peningkatan dan Pemilihan:

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

4. Pelaporan

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

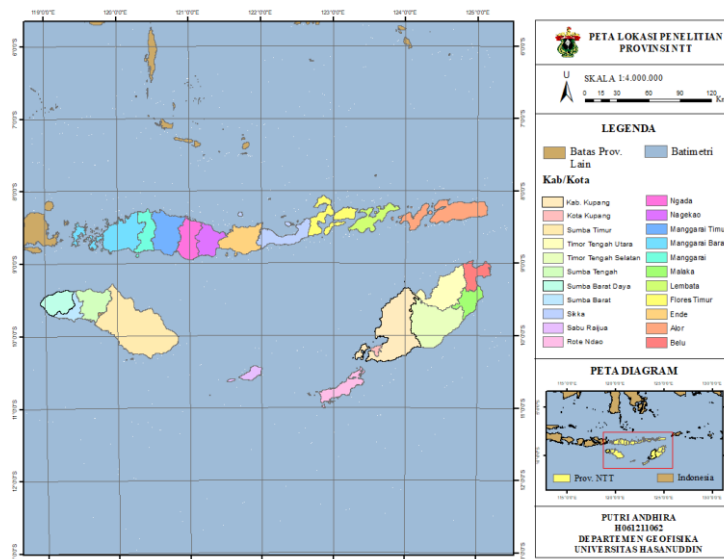
BAB II

METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Provinsi Nusa Tenggara Timur (NTT) terletak di kawasan timur Indonesia dan merupakan wilayah strategis yang berada di antara dua benua, yaitu Asia dan Australia, serta dua samudra, yakni Samudra Hindia dan Laut Flores yang menjadi bagian dari Samudra Pasifik. Secara geografis, NTT berbatasan di bagian utara dengan Laut Flores, di bagian timur berbatasan dengan negara Timor Leste dan Laut Timor, di bagian selatan berbatasan dengan Samudra Hindia, dan di bagian barat berbatasan dengan Provinsi Nusa Tenggara Barat.

Provinsi NTT berada di koordinat 8° hingga 12° Lintang Selatan dan 118° hingga 125° Bujur Timur. Wilayah ini terdiri dari lebih dari 500 pulau, termasuk tiga pulau utama yaitu Flores, Sumba, dan Timor. Posisi geografis ini menjadikan NTT sebagai wilayah dengan berbagai potensi sumber daya alam, khususnya dalam sektor perikanan, pariwisata, serta energi terbarukan seperti energi angin yang dihasilkan oleh pola angin yang konsisten sepanjang tahun.



Gambar 6. Peta Lokasi Penelitian

2.2 Alat dan Bahan

2.2.1 Alat

Alat yang digunakan pada penelitian Tugas Akhir ini yaitu:

1. Perangkat keras terdiri dari:
 - a. 1 buah *laptop*

- b. 1 buah *printer*
- 2. Perangkat lunak terdiri dari:
 - a. *Software Matlab 2021a*
 - b. *Software Notepad*
 - c. *Software Microsoft Excel 2019*
 - d. *Software ArcGIS 10.8*

2.2.2 Bahan

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

1. Data Kecepatan Angin Total
Data kecepatan angin total 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 berbagai jenis data atmosfer, daratan dan laut yang dirancang untuk aplikasi cuaca dan iklim.
<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html>
2. Data *u-wind* dan *v-wind*
Data *u-wind* dan *v-wind* 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). Data *u-wind* dan *v-wind* ini digunakan untuk menganalisis pola distribusi dan arah angin di wilayah Pulau Jawa, yang dapat dikaitkan dengan fenomena ENSO. Dataset ini memberikan gambaran sistematis tentang kondisi atmosfer untuk berbagai aplikasi cuaca dan iklim.
<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html>
3. Data *El Nino-Southern Oscillation* (ENSO)
Data Nino 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.reanalysis2.html>

2.3 Pengumpulan Data

Data kecepatan angin, *u-wind*, *v-wind* dan data ENSO yang diperlukan dalam penelitian ini dikumpulkan dari data sekunder katalog NOAA tahun 1991-2020 wilayah Indonesia akan tetapi pengolahannya peneliti mengkhususkan hanya untuk wilayah Provinsi NTT. Pada tahap ini, tahap persiapan dimulai dengan mencari dan mengumpulkan informasi-informasi yang berhubungan dengan penelitian terkait dan mendapatkan teori yang dapat mendukung penelitian. Sumbernya dapat berupa

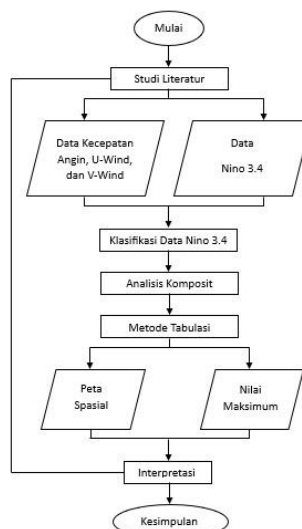
jurnal dan buku-buku. Kemudian, mengumpulkan data yang digunakan dalam penelitian terkait yang berupa data sekunder.

2.4 Pengolahan Data

Untuk tahap pengolahan data dalam penelitian ini, dilakukan dengan mempersiapkan data dan *software* pengolahan data.

1. Mengolah data kecepatan angin, *u-wind*, dan *v-wind* pada *Software Matlab* untuk menghasilkan peta spasial rata-rata kecepatan angin di Provinsi NTT selama periode 1991-2020.
2. Mengklasifikasikan data Nino 3.4 dalam 3 fase yaitu fase *El Nino*, fase netral, dan fase *La Nina*. Data Nino 3.4 yang bernilai lebih dari 0.5 diklasifikasikan menjadi fase *El Nino*, data yang bernilai -0.5 sampai 0.5 dikelompokkan menjadi fase netral, dan data yang bernilai kurang dari -0.5 dikelompokkan menjadi fase *La Nina*. Setelah seluruh data telah dikelompokkan, hasil pengelompokkan tersebut dimasukkan ke dalam *Software Matlab*.
3. Mengolah data kecepatan angin untuk peta spasial dalam 3 fase yaitu fase *El Nino*, fase netral, dan fase *La Nina* dengan menggunakan metode composite. Pada tahap pengolahan data ini digunakan data Nino 3.4 yang telah diklasifikasikan sebelumnya.
4. Menentukan nilai maksimum kecepatan angin pada setiap daerah kabupaten/kota yang ada di Provinsi NTT dengan melihat pada nilai yang terdapat pada *colorbar* dari peta spasial rata-rata.
5. Melakukan tabulasi data berupa penyediaan nilai minimum tutupan awan dalam bentuk tabel.

2.5 Bagan Alir Penelitian



Gambar 7. Bagan Alir Penelitian