

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Peningkatan kebutuhan energi listrik dalam kehidupan manusia terus meningkat sejalan dengan pertambahan tingkat populasi manusia, serta meningkatnya penggunaan peralatan-peralatan elektronik yang menggunakan energi listrik sebagai sumber energinya. Kebutuhan energi listrik menjadi vital, sebab pesatnya perkembangan teknologi yang menghadirkan peralatan-peralatan elektronik yang kini menjadi bagian tak terpisahkan dari kehidupan manusia, membutuhkan energi listrik sebagai sumber daya utama penggerakannya. Dalam data Statistik Ketenagalistrikan Tahun 2022 yang diterbitkan oleh Kementerian ESDM Dirjen Ketenagalistrikan, total daya terpasang Nasional terus meningkat setiap tahunnya, dan pada tahun 2022 total daya tersambung sebesar 161.861,54 MVA. Peningkatan kebutuhan energi dalam bentuk daya listrik ini, perlu diimbangi dengan adanya pembangkit tenaga listrik yang memiliki kapasitas mencukupi, sehingga dapat memberikan kesetimbangan antara daya listrik yang dibutuhkan dengan daya listrik yang disediakan. Lebih lanjut dalam data Statistik Ketenagalistrikan tahun 2022, per tahun 2022, besarnya total kapasitas terpasang pembangkit tenaga listrik Nasional adalah sebesar 83.813,09 MW.

Sumber-sumber pembangkit tenaga listrik yang tersedia pada saat ini berasal dari pembangkit tenaga listrik konvensional dan pembangkit tenaga listrik energi terbarukan. Lebih lanjut, dalam data Statistik ketenagalistrikan tahun 2022, pada tahun 2022 besarnya persentase bauran pembangkit tenaga listrik masih didominasi oleh pembangkit tenaga listrik konvensional, yaitu oleh PLTU dengan Daya Mampu pembangkit sebesar 51,62 % dari total 76.130,85 MW kapasitas daya mampu atau sebesar sekitar 39.301,46 MW sementara untuk total kapasitas daya mampu pembangkit energi terbarukan adalah sebesar 15,56% atau sekitar 11.419,63 MW.

Pada umumnya pembangkitan tenaga listrik yang berasal dari pembangkit konvensional memanfaatkan bahan baku fosil sebagai bahan baku utama penggerakannya, yaitu batu bara, minyak bumi dan gas bumi. Menurut Letcher, (2023) dalam *Wind Energy Engineering*, pemanfaatan bahan baku fosil dunia mencapai 79%, yaitu batu bara 25%, Minyak bumi 31% dan Gas 23%. Bahan baku ini tidak memiliki tingkat ketersediaan yang tinggi, yang jika terus digunakan, pada satu saat akan habis ketersediaannya. Disisi lain, pemanfaatan pembangkit tenaga listrik konvensional secara terus menerus akan memberikan dampak terhadap lingkungan yaitu menghasilkan polusi yang dihasilkan dari gas buangan atau emisi bahan bakar minyak. Polusi yang dihasilkan adalah dalam bentuk emisi gas rumah kaca berupa karbon dioksida dari pembakaran minyak bumi (Adam dkk., 2019); (Rozak dkk., 2023).

Untuk dapat mengendalikan dampak terhadap kondisi pemanasan global dan perubahan iklim dunia akibat efek polusi tersebut, kebutuhan untuk pemanfaatan sumber energi yang bebas dari polusi karbon dioksida menjadi vital dalam pengembangan industri kelistrikan dengan harapan tingkat emisi karbon dioksida di udara dapat ditekan. Pemanfaatan Pembangkit Listrik Energi Terbarukan, seperti PLTA, PLTM, PLTMH, PLTS, PLT Bio-gas PLTP dan PLTB yang memanfaatkan energi dari alam yang melimpah ketersediaannya, menjadi solusi untuk menggantikan pemanfaatan pembangkit Listrik konvensional. Pemanfaatan Pembangkit Tenaga Listrik Energi Terbarukan yang ramah lingkungan diharapkan menggantikan peranan Pembangkit Konvensional secara perlahan, dan dapat mengurangi emisi gas rumah kaca, yang dihasilkan oleh hasil pembakaran Pembangkit Konvensional. Dalam Peraturan Pemerintah No. 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional, ditargetkan peran Energi Baru dan Energi terbarukan mencapai paling sedikit 23% (dua puluh tiga persen) dan pada tahun 2050 paling sedikit 31% (tiga puluh satu persen). Dalam peraturan tersebut pun, ditargetkan untuk dapat mengurangi ekspor energi fosil, yaitu gas dan batu bara, serta meminimalkan penggunaan minyak bumi serta memaksimalkan penggunaan energi terbarukan.

Salah satu jenis pembangkit EBT yang memiliki tingkat ketersediaan bahan baku penggerak yang berkelanjutan dan melimpah ketersediaannya adalah Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Menurut Burton et al., (2001) dalam *Wind Energy Handbook* pemanfaatan energi angin dalam bentuk kincir angin telah digunakan sejak sekitar 3000 tahun lalu. Energi angin digunakan untuk penggilingan gandum, memompa air dan juga digunakan sebagai tenaga penggerak kapal layar. Pemanfaatan kincir angin dengan sumbu horizontal telah digunakan sejak abad ke 13 dan menjadi salah satu bagian tak terpisahkan yang menopang perekonomian pedesaan. Seiring dengan berkembangnya pemanfaatan bahan bakar fosil yang murah, yang dimanfaatkan sebagai penghasil energi listrik, pemanfaatan energi angin sebagai kincir angin kemudian perlahan di tinggalkan. Peningkatan pemanfaatan energi angin secara signifikan kembali meningkat sejak tahun 1973, yang disebabkan oleh naiknya harga bahan baku minyak, dan mulai berkembangnya perhatian atas tingkat ketersediaan bahan bakar fosil yang terbatas, yang terus berlanjut hingga saat ini. Saat ini pemanfaatan energi angin digunakan untuk dapat meningkatkan produksi energi listrik yang ramah lingkungan dengan buangan emisi CO₂ yang sangat rendah, selain itu, energi angin diharapkan menjadi salah satu potensi solusi untuk dapat menghambat efek perubahan iklim.

PLTB, dalam pemanfaatannya, menggunakan energi kinetik dari pergerakan angin untuk dimanfaatkan menjadi energi mekanik untuk memutar turbin, putaran turbin kemudian dikonversikan menjadi energi listrik melalui putaran generator yang rotornya terhubung ke turbin angin melalui poros penggerak dan *gearbox* (Muhajir dan Sinaga, 2021). Energi kinetik angin dihasilkan melalui pergerakan udara akibat adanya perbedaan suhu yang menyebabkan terjadinya udara bersuhu rendah akan bergerak menuju area bersuhu tinggi dan sebaliknya. Tingkat perbedaan suhu ini, akan mempengaruhi kecepatan pergerakan perpindahan udara. Variasi kecepatan angin sangat berpengaruh dalam menggerakkan turbin angin agar dapat menghasilkan energi listrik. Rendahnya kecepatan pergerakan angin akan berpotensi pada turunnya daya yang dihasilkan, dan bahkan tidak dapat menggerakkan turbin angin. Kecepatan angin minimal yang diperlukan agar turbin angin dapat mulai berputar disebut sebagai "*cut-in wind speed*". Turbin

angin pada umumnya tidak dapat menghasilkan daya yang signifikan pada kecepatan angin di bawah nilai *cut-in wind speed*. Sebaliknya, ketika kecepatan angin mencapai atau melebihi nilai *cut-in*, turbin angin dapat mulai berputar dan menghasilkan daya yang dapat dimanfaatkan. Kecepatan angin yang berada di bawah nilai *cut-in wind speed* tidak mampu menghasilkan daya yang dapat mengimbangi rugi-rugi mekanis yang terjadi selama operasi rotasi turbin, sebaliknya, kecepatan angin yang melebihi nilai *cut-out wind speed* dapat menimbulkan risiko kerusakan pada komponen mekanis dan sistem elektrik turbin angin (Syafaruddin, et al., 2016).

Menurut Burton et al., (2001) dalam *Wind Energy Handbook*, dijelaskan bahwa peningkatan output daya secara signifikan dari PLTB dapat diperoleh dengan memperbesar *swept area* atau luasan area putaran dari turbin angin, atau dengan membangun PLTB pada daerah yang memiliki potensi kecepatan angin yang tinggi. Samosir dan Riszal (2021) menyebutkan dalam percobaan yang berfokus pada desain dan analisis turbin angin berkecepatan rendah dengan variasi kecepatan angin menggunakan perangkat lunak Qblade, dengan menggunakan konsep *Tip Speed Ratio* untuk mengukur efisiensi turbin angin, didapatkan hasil bahwa luasan daya turbin angin sangat dipengaruhi oleh kecepatan angin, dengan meningkatnya daya luasan saat kecepatan angin meningkat. Dalam penelitian ini, dikemukakan bahwa kecepatan angin berbanding lurus dengan kecepatan rotasi turbin yang dihasilkan, yang menghasilkan energi yang lebih besar sesuai dengan peningkatan rotasi turbin. Nilai Kecepatan *Tip Speed Ratio* maksimum, yang dipengaruhi oleh kecepatan angin dan rotasi, terjadi pada kecepatan angin yang lebih tinggi. Namun, karena dalam percobaan ini, turbin angin yang didesain adalah turbin angin berkecepatan rendah, maka ketika kecepatan angin melewati nilai tertentu, maka efisiensi turbin menjadi berkurang. Serupa dengan penelitian tersebut, menurut Utomo dkk. (2022), dalam percobaan uji prototipe PLTB, didapatkan hasil bahwa stabilitas kecepatan angin memiliki dampak yang signifikan terhadap putaran generator. Tingkat kecepatan angin yang rendah dan tidak stabil membuat kinerja turbin yang tidak optimal, sehingga untuk dapat menghasilkan daya listrik yang maksimal, diperlukan tingkat kecepatan angin

yang konsisten dan mencukupi. Selain itu, faktor ketinggian dimana turbin ditempatkan mempengaruhi putaran generator, dimana semakin rendah posisi turbin atau semakin mendekati permukaan tanah, maka kecepatan angin yang didapatkan akan semakin rendah. Dalam penelitian ini disimpulkan bahwa untuk dapat meningkatkan efisiensi dari turbin angin, maka perlu dipertimbangkan kecepatan angin yang stabil, tinggi penempatan turbin yang optimal, penggunaan material dan desain turbin yang tepat agar dapat mengoptimalkan pemanfaatan energi angin menjadi energi listrik.

Menurut Said dkk (2019) dan Hesty dkk., (2022) wilayah Indonesia sebagai negara tropis memiliki potensi yang besar dalam pengembangan pemanfaatan energi angin, sebagai penggerak utama PLTB. Melalui simulasi menggunakan model *Weather Research and Forecast – Four Dimension Data Assimilation* (WRF-FDDA) untuk mendapatkan gambaran sebaran energi angin di daratan dan lepas pantai di Indonesia pada ketinggian 50 meter di atas permukaan laut, didapatkan hasil potensi energi angin yang tinggi, yaitu sekitar 6-8 m/s, pada wilayah *onshore*, dan sekitar lebih dari 8m/s pada wilayah *offshore*.

Menurut Hesty dkk (2022); Martosaputro dan Murti (2014), Pemanfaatan energi angin sebagai sumber energi baru dan terbarukan masih belum dapat dimanfaatkan secara maksimal, salah satu penyebab utama mengapa pemanfaatan energi angin di Indonesia belum maksimal adalah karena masih kurangnya ketersediaan data terkait variasi kecepatan angin yang akurat yang dijadikan sebagai langkah awal dalam mengidentifikasi dan merencanakan pemanfaatan PLTB sebagai sumber energi listrik. Dalam pra penelitian yang dilakukan peneliti, BMKG melalui website BMKG, memiliki keterbatasan ketersediaan data terkait variasi kecepatan angin, dimana kecepatan angin yang tersedia hanya terdapat pada beberapa titik, dan pada ketinggian sekitar 10 meter diatas permukaan. Terdapat beberapa website yang menyediakan data reanalisis, namun kendala yang ada adalah:

1. website tersebut memerlukan permintaan akses resmi yang hanya dapat diakses oleh badan meteorologi nasional,

2. Keterbatasan stasiun pengukuran, dimana titik pengukuran belum tersebar secara luas dan merata, sehingga menjadi keterbatasan dalam pemilihan lokasi yang akan ditinjau,
3. Keterbatasan tingkat ketinggian pengukuran. Pada umumnya website reanalisis memiliki tingkat ketinggian pada $h = 10$ meter.

Keterbatasan stasiun pengukuran kecepatan angin yang dapat memberikan data terkait kecepatan angin pada lokasi potensial yang memiliki topografi yang mendukung untuk pemanfaatan PLTB dan keterbatasan data pengukuran yang hanya terbatas pada ketinggian sekitar 10 meter diatas permukaan tanah menjadi faktor-faktor yang menyebabkan terhambatnya perencanaan awal untuk pengembangan PLTB di Indonesia. Menurut Letcher, (2023) dalam *Wind Energy Engineering*, faktor-faktor yang menyebabkan kurangnya ketersediaan pengukuran profil kecepatan angin di seluruh dunia, adalah besarnya biaya untuk instrumen dan infrastruktur pengukuran kecepatan angin, serta beberapa masalah logistik lainnya. Pemanfaatan data analisis berupa model atmosfer yang memiliki resolusi tinggi, yang dapat menggambarkan secara rinci terkait fenomena atmosfer di berbagai skala spasial dan temporal, dapat digunakan untuk mendapatkan data sekunder untuk kecepatan angin. Dalam pemanfaatan model ini masih dibutuhkan pengembangan dalam peningkatan akurasi dan keandalan data simulasi kecepatan angin. Untuk dapat mengolah suatu referensi data kecepatan angin, terdapat beberapa persamaan matematis yang dapat digunakan untuk mengestimasi perubahan kecepatan angin secara vertikal di daerah dengan karakteristik permukaan seperti permukaan datar seperti ladang, padang gurun, atau padang rumput.

Menurut Rehman and Al-Abbadi, (2008) dan Okorie et al., (2017) Untuk dapat melakukan menghitung nilai yang akurat terhadap potensi energi angin di suatu lokasi, diperlukan pengetahuan yang tepat mengenai kecepatan angin pada berbagai ketinggian. Hal ini dapat dicapai baik dengan mengukur kecepatan angin pada tinggi *hub* yang diinginkan atau dengan melakukan estimasi menggunakan prinsip *Power Law* $1/7$. Menurut Gualtieri and Secci, (2011) menyatakan bahwa

dengan semakin tingginya konstruksi turbin-turbin angin modern, maka informasi terkait *wind shear* menjadi sebuah kebutuhan dalam memprediksi produksi daya dari sebuah turbin angin. Namun, pengukuran terhadap angin, pada umumnya berada pada ketinggian dibawah *hub* turbin, yaitu sekitar 10-20 meter diatas permukaan tanah, sementara *hub* turbin angin berada pada ketinggian 50-100 meter. Maka digunakan persamaan $1/7$ *wind power law*, untuk dapat mengekstrapolasi kecepatan angin. Serupa dengan itu, Werapun et al., (2017) menyatakan bahwa konstruksi turbin angin modern yang pada umumnya memiliki ketinggian *hub* yang sangat tinggi, tidak diimbangi dengan kemampuan pengukuran anemometer milik badan meteorologi pada negara-negara berkembang, yang pada umumnya hanya dapat mengukur pada ketinggian maksimal 50 meter diatas permukaan tanah. *Wind shear* atau perubahan angin adalah kondisi dimana terjadi perubahan pada kecepatan dan/atau arah angin dalam suatu rentang ketinggian.

Oleh karena itu, untuk dapat menghitung kecepatan angin pada ketinggian diatas itu, dibutuhkan suatu koefisien *wind shear*. Koefisien ini bergantung pada data kecepatan angin pada 2 ketinggian, kestabilan atmosfer dan bentuk permukaan.

Dalam beberapa jurnal yang menjadi referensi, terdapat persamaan-persamaan yang dapat digunakan untuk menjadi pendekatan dalam menghitung kecepatan angin pada suatu ketinggian tertentu, yaitu:

1. Persamaan *Power Law* yang memanfaatkan *coefficient Hellmann* atau *Wind Shear Coefficient* (α)
2. Persamaan *Logarithmic Law* yang menggunakan *roughness length* / tingkat kekasaran permukaan (Z_0) suatu wilayah.

Penelitian terdahulu yang telah membahas mengenai penggunaan Persamaan *Power Law* dan Persamaan *Logarithmic Law* untuk dapat menghitung nilai kecepatan angin, yaitu:

Rehman (2008) yang melakukan penelitian potensi energi angin pada daerah Dhulom di Arab Saudi dengan menggunakan persamaan *Power Law* dengan menghitung nilai *Wind Shear Coefficient* (α), menyatakan bahwa nilai α bergantung pada kondisi musim, sehingga untuk menghitung nilai kecepatan angin yang akurat, perlu menggunakan nilai rata-rata α bulanan.

Dalam percobaan untuk mengevaluasi nilai α dan kekasaran permukaan pada daerah selatan Namibia, nilai α dan Z_0 , sangat berhubungan dengan kondisi pemanasan pada siang hari dan pendinginan permukaan pada malam hari. (Okorie, et al., 2017). Sementara menurut Werapun (2017) terdapat perbedaan sebesar 35% antara penghitungan data produksi energi angin tahunan dengan menggunakan metode ekstrapolasi dibandingkan dengan data hasil pengukuran. Dan nilai α sangat bergantung pada kestabilan atmosfer, kekasaran permukaan dan beberapa faktor lokal yang jika diabaikan maka dapat menghasilkan error yang besar terhadap pengukuran produksi energi angin tahunan.

Dengan memahami pengaruh permukaan dan topografi terhadap variasi kecepatan angin, kemudian memanfaatkan data jenis permukaan dan data awal referensi kecepatan angin pada ketinggian tertentu, maka dapat dilakukan perhitungan untuk mendapatkan data kecepatan angin, dengan menggunakan pendekatan *coefficient Hellmann* dan jenis *roughness length* yang diharapkan dapat menjadi solusi atas keterbatasan data pengukuran kecepatan angin. Oleh karena itu tujuan dari penelitian ini adalah dapat menentukan nilai kecepatan angin pada ketinggian tertentu dengan memanfaatkan *coefficient Hellmann* dan pengaruh jenis kekasaran permukaan (*roughness length*), untuk dijadikan sebagai acuan awal dalam perencanaan pembangunan PLTB, penentuan lokasi PLTB, penentuan estimasi potensi energi yang dapat dihasilkan dan mengefisienkan turbin angin.

1.2. Rumusan Permasalahan

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka rumusan permasalahan yang dikaji dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana solusi mengatasi terbatasnya ketersediaan data terkait variasi kecepatan angin, untuk perencanaan dan pengembangan PLTB di Sulselrabar?
2. Bagaimana pengaruh faktor permukaan dan topografi menjadi salah satu variabel penting terkait variasi kecepatan angin, yang dapat diperhitungkan untuk menentukan kecepatan angin pada ketinggian yang diinginkan?
3. Bagaimana pengaruh penambahan PLTB pada lokasi tersebar, dengan pola kecepatan angin pada masing-masing lokasi, dapat mengkompensasi PLTB eksisting pada periode tertentu dengan kecepatan angin rendah?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah dapat memberikan suatu metode untuk dapat menghitung nilai variasi kecepatan angin pada suatu ketinggian yang diinginkan dengan memanfaatkan data terkait nilai kecepatan angin pada ketinggian referensi dengan menggunakan *coefficient Hellmann* dan berdasarkan tingkat kekasaran permukaan (*roughness length*). Selain dari itu tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan nilai pendekatan untuk *Coefficient Hellmann* dan *Roughness length* yang dapat mewakili kondisi pergerakan angin di Indonesia sebagai daerah tropis, khususnya di wilayah Sulawesi Selatan.

1.4. Manfaat Penelitian

Dengan memanfaatkan nilai *coefficient Hellmann* dan tingkat kekasaran permukaan (*roughness length*) yang sesuai dengan wilayah Sulawesi Selatan, dapat dilakukan pendekatan untuk menghitung variasi nilai kecepatan angin pada ketinggian yang diinginkan, yang dapat dijadikan sebagai acuan awal dalam perencanaan pembangunan PLTB yaitu penentuan lokasi PLTB, penentuan estimasi potensi energi yang dapat dihasilkan dan perencanaan turbin angin yang efisien sesuai dengan kondisi potensi energi angin pada suatu wilayah.

1.5. Ruang Lingkup

Ruang Lingkup penelitian ini adalah terbatas pada penentuan nilai kecepatan angin pada suatu ketinggian tertentu yang diinginkan. Hasil dari penelitian ini

tidak dapat digunakan untuk menjadi penentuan kelayakan perencanaan PLTB, namun hasil penelitian ini hanya dapat menjadi acuan awal untuk dapat menentukan potensi kecepatan angin untuk PLTB.

1.6. *State of the Art.*

Berikut ini merupakan penelitian terdahulu yang telah membahas mengenai penggunaan Persamaan *Power Law* dan Persamaan *Logarithmic Law* untuk dapat menghitung nilai kecepatan angin, yang dijelaskan dalam tabel 1. *State of The Art*

Tabel 1. *State-of -The-Art*

No.	Judul Penelitian	Tahun	Peneliti	Tujuan	Metode	Hasil	Ref.
1.	<i>Wind shear coefficient, turbulence intensity and wind power potential assessment for Dhulom, Saudi Arabia</i>	2008	Rehman, S., Al-Abbadi, N. M.	Melakukan suatu pengukuran untuk dapat menentukan besarnya nilai <i>Wind Shear Coefficient</i> (α), intensitas turbulensi dan besarnya Potensi energi angin pada daerah Dhulom di Arab Saudi.	1. Menggunakan data kecepatan angin pada ketinggian 20, 30, dan 40m diatas permukaan tanah pada periode 01 November 1998 hingga 12 Oktober 2022, untuk dapat menghitung nilai α pada ketinggian 20 dan 30 meter, 40 dan 30 meter, 40 dan 20 meter, 2. Menggunakan data kecepatan angin rata-rata diatas 4m/s untuk dapat menghitung nilai Intensitas turbulensi pada ketinggian yang berbeda. 3. Menghitung potensi energi angin	1. Penelitian ini memberikan suatu pendekatan nilai α sebesar 0,255 yang didapatkan dari perbandingan beberapa ketinggian. 2. Hasil penelitian ini juga menyatakan bahwa nilai α bergantung pada kondisi musim, sehingga untuk menghitung nilai kecepatan angin yang akurat, perlu menggunakan nilai rata-rata α bulanan. 3. Perhitungan energi tahunan yang lebih tinggi didapatkan dengan penempatan <i>Hub</i> pada ketinggian 50m, dengan nilai α sebesar 0,255 4. Didapatkan rata-rata intensitas turbulensi bulanan pada kecepatan	

No.	Judul Penelitian	Tahun	Peneliti	Tujuan	Metode	Hasil	Ref.
					tahunan dengan menggunakan data kecepatan angin yang didapatkan dengan perhitungan nilai α	angin yang lebih tinggi dari 4.0m/s, lebih kecil dari 25% sehingga dapat dinyatakan bahwa turbin angin dapat bertahan pada kondisi angin ini.	
2	<i>Wind shear coefficients, roughness length and energy yield over coastal locations in Southern Italy</i>	2011	Gualtieri, G., and Secci, S.,	Menganalisis <i>Wind Shear Coefficient, Surface Roughness</i> , kepadatan udara, serta potensi energi angin pada daerah Brindisi, Portoscuso dan Termini Imerese di Selatan Italia.	Melakukan analisis profil angin dengan menggunakan data kecepatan angin pada periode 1 Januari 1997 - 31 Desember 2002 pada 2 sensor dengan ketinggian 10m dan 50 meter diatas permukaan tanah, untuk menghitung α , <i>Roughness Length</i> , dan Potensi Energi angin.	1. Penelitian ini menunjukkan bahwa nilai α tertinggi terjadi pada musim salju, yaitu pada saat kondisi stabil, sementara nilai α yang rendah terjadi pada saat bulan-bulan pada musim panas, yaitu pada kondisi tidak stabil sering terjadi. 2. Variasi diurnal α sangat bergantung pada kondisi pemanasan / pendinginan udara diatas permukaan tanah. dimana nilai α menjadi lebih tinggi pada malam hari saat terjadi kondisi stabil. 3. Nilai Z_0 menjadi lebih	

No.	Judul Penelitian	Tahun	Peneliti	Tujuan	Metode	Hasil	Ref.
						besar pada saat musim salju dan lebih rendah pada musim dingin 4. Nilai Z_0 diurnal menunjukkan nilai lebih rendah pada saat malam hari pada kondisi stabil, dan lebih tinggi pada siang hari pada kondisi tidak stabil.	
3	<i>Methods to extrapolate wind resource to the turbine hub height based on power law: A 1-h wind speed vs. Weibull distribution extrapolation comparison.</i>	2012	Gualtieri, G., and Secci, S.,	Melakukan suatu perbandingan antara perhitungan ekstrapolasi kecepatan angin 1 jam dengan menggunakan pendekatan <i>Power Law</i> , dengan ekstrapolasi distribusi Weibull. Perbandingan dilakukan dari segi kemampuan perhitungan Produksi energi, kemudahan dan ketepatan penggunaan.	Menggunakan data kecepatan angin dari sebuah dataset selama periode 1997-2001 dengan interval 1 jam. Dengan melakukan pengamatan kecepatan angin pada 10 m, dilakukan perhitungan sumber daya angin yang diekstrapolasi hingga 100 m, distribusi Weibull, dan hasil energi.	1. <i>Wind Shear Coefficients</i> (α) sangat bergantung pada kondisi stabilitas atmosfer, yang ditunjukkan dengan peningkatan nilai dari kondisi tidak stabil hingga kondisi stabil dengan nilai masing-masing 0.165, 0.255, dan 0.335 untuk kondisi tidak stabil, netral, dan stabil. 2. Penggunaan Pendekatan Panofsky and Dutton dan SmedmaneHögström and Högström, menunjukkan	

No.	Judul Penelitian	Tahun	Peneliti	Tujuan	Metode	Hasil	Ref.
						performa lebih baik dibandingkan pendekatan Justus dan Mikhail, dalam menentukan nilai α dengan menggunakan data angin, meskipun keakuratan penggunaannya semakin menurun untuk kondisi stabil di daratan. 3. Pendekatan Justus and Mikhail dalam menentukan nilai α, tidak bergantung pada nilai Z_0, sehingga dapat digunakan ketika tidak terdapat data yang akurat terhadap nilai Z_0	
4	<i>Evaluation of Wind Shear Coefficients, Surface Roughness and Energy Yields over Inland Locations in</i>	2017	Okorie, M. E., Inambao, F., and Chiguvare, Z.,	Melakukan suatu evaluasi terhadap nilai α dan kekasaran permukaan pada suatu daerah di Selatan Namibia	Menggunakan Data kecepatan angin pada ketinggian dibawah 60 meter pada daerah Korabib dan Warmbad di Namibia, untuk menghitung nilai α , <i>Roughness Length</i> dan	1. α dan Z_0, sangat berhubungan dengan kondisi pemanasan pada siang hari dan pendinginan permukaan pada malam hari 2. Semakin besar nilai α maka data kecepatan angin	

No.	Judul Penelitian	Tahun	Peneliti	Tujuan	Metode	Hasil	Ref.
	<i>Namibia</i>				Produksi Energi	yang dihitung akan semakin tinggi 3. Melalui evaluasi nilai α pada <i>Annual Energy Yield</i> (AEY) dengan menggunakan turbin EWT DW54-500 didapatkan bahwa dengan menggunakan <i>power law</i> didapatkan nilai yang lebih besar untuk AEY dan CF sebesar 10,73 dan 31,54% pada KB,	
5	<i>Wind Shear Coefficients and their Effect on Energy Production</i>	2017	Werapun, W., Tirawanichakul, Y., and Waewsak, J.,	Menilai pengaruh <i>Wind Shear</i> terhadap produksi energi tahunan, dengan menggunakan data kecepatan angin pada Pulau Phangan di Thailand.	Menggunakan data kecepatan angin pada ketinggian 65 m dan 120 meter diatas permukaan tanah pada periode Desember 2011 hingga November 2012, untuk dapat menghitung variasi nilai α tahunan, bulanan dan harian.dan menggunakan kurva daya turbin untuk dapat	1. Penelitian ini memberikan hasil bahwa terdapat perbedaan sebesar 35% antara penghitungan data produksi energi angin tahunan dengan menggunakan metode ekstrapolasi dibandingkan dengan data hasil pengukuran. 2. α sangat bergantung pada kestabilan atmosfer, kekasaran permukaan dan	

No.	Judul Penelitian	Tahun	Peneliti	Tujuan	Metode	Hasil	Ref.
					menghitung produksi energi tahunan.	beberapa faktor lokal yang jika diabaikan maka dapat menghasilkan error yang besar terhadap pengukuran produksi energi angin tahunan.	
6	<i>Reliability of ERA5 Reanalysis Data for Wind Resource Assessment: A Comparison against Tall Towers</i>	2021	Gualtieri, G.	1. Mengukur keakuratan ERA5 dalam memprediksi kecepatan angin pada berbagai lokasi secara global. 2. Membandingkan kinerja ERA5 dengan pengukuran dari turbin angin di seluruh dunia. 3. Menganalisis keandalan ERA5 terhadap hasil yang diberikan untuk studi kelayakan pengembangan PLTB.	Melakukan perbandingan antara data reanalisis dari ERA5 dinilai dengan data hasil pengukuran dari 6 lokasi turbin angin untuk mengevaluasi sumber daya angin dan produksi energi. Data pengukuran adalah data selama periode 2 tahun.	1. Dalam penelitian ini, dijelaskan bahwa data pengukuran kecepatan angin dari ERA5 dapat digunakan untuk dalam memprediksi energi angin di lokasi lepas pantai. 2. Penggunaan ERA5 tidak disarankan untuk lokasi dengan topografi dan variasi lahan yang beragam.	

No.	Judul Penelitian	Tahun	Peneliti	Tujuan	Metode	Hasil	Ref.
7	<i>Spatiotemporal variation of power law exponent on the use of wind energy</i>	2024	Yang, X., Jiang, X., Liang, S., Qin, Y., Ye, F., Ye, B., Xu, J., He, X., Wu, J., Dong, T., Cai, X., Xu, R., and Zeng, Z.,	Menggunakan data pengukuran dari delapan titik turbin angin untuk mengukur keakuratan persamaan <i>Power Law</i> dan penggunaan <i>Power Law</i> .	Menganalisis nilai α per jam selama periode 1980 – 2022, dengan menggunakan data kecepatan angin pada ketinggian 10 meter dan 100 meter, yang berasal dari ERA5 dan kemudian melakukan perbandingan keakuratan data melalui data hasil pengukuran anemometer yang terdapat pada turbin angin, yang disediakan oleh <i>Mingyang Smart Energy Company</i>	1. Penelitian ini menjelaskan bahwa <i>Power Law</i> dapat digunakan dan berlaku secara global dengan variasi spasiotemporal dalam pengukuran kecepatan angin. 2. Terdapat variasi nilai α berdasarkan faktor geografis, musim, siklus diurnal, garis lintang, daratan, dan lautan.	

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Angin

Angin adalah udara yang bergerak. Angin dapat terasa lembut dan halus, angin juga dapat terasa kuat dan merusak bergantung pada kecepatan pergerakan udara yang terjadi. Kecepatan pergerakan udara sangat menentukan tingkat kekuatan angin, dan berpengaruh pada besarnya energi mekanik atau energi penggerak angin. Kekuatan ini disebut sebagai energi kinetik. Semakin tinggi kecepatan angin, maka semakin besar energi kinetiknya. Oleh karena itu kecepatan angin menjadi indikator utama untuk menentukan kekuatan dari hembusan angin.

Pemanfaatan energi kinetik yang berasal dari pergerakan angin dengan memanfaatkannya menjadi bentuk energi lain telah berlangsung selama berabad-abad. Diestimasikan, kincir angin pertama diciptakan sekitar 2000 tahun lalu oleh bangsa Persia, dan juga oleh bangsa China, Energi kinetik angin digunakan dalam beberapa bentuk pengaplikasian, antara lain, untuk menggiling jagung, memompa air dan lainnya. Pada abad ke sembilan belas, pemanfaatan energi angin semakin mengarah pada produksi energi listrik, dimana terjadi pengembangan terhadap turbin angin kecil yang dapat memproduksi daya sebesar 0,2 – 3 kW, dengan tegangan sebesar 32 Volt dalam bentuk tegangan searah (DC) pada daerah pedesaan di Amerika. Pemanfaatan energi angin, menjadi pembangkit listrik dengan menggunakan turbin angin awalnya dimulai sekitar tahun 1970 di Amerika Serikat. Pemanfaatan energi angin ini dengan tujuan untuk dapat memanfaatkan sumber energi terbarukan untuk dapat menggantikan penggunaan energi yang berasal dari bahan baku fosil.

Energi angin adalah salah satu bentuk energi sekunder yang berasal dari tingkat pemanasan matahari yang tidak merata pada permukaan bumi, yang kemudian menciptakan perbedaan suhu yang menghasilkan perbedaan kepadatan

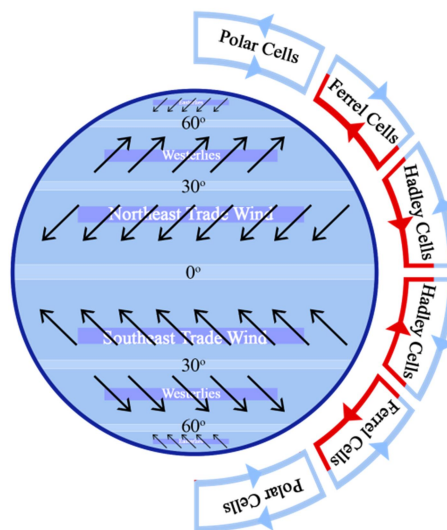
dan tekanan dalam udara. Perbedaan tingkat pemanasan ini terjadi lebih kuat pada daerah tropis, dibanding pada daerah kutub, dimana pada daerah tropis, permukaan bumi menerima pemanasan langsung dari matahari, sementara pada daerah kutub hanya menerima pemanasan sebagian dari matahari, sehingga menghasilkan tingkat pemanasan permukaan bumi yang lebih tinggi pada garis khatulistiwa, dibanding dengan pada bagian kutub bumi. Faktor lain yang menyebabkan terjadi perbedaan tingkat pemanasan atau ketidakseimbangan tingkat pemanasan yang berbeda pada umumnya disebabkan oleh tingkat penyerapan panas dari suatu material yang berbeda dari material lainnya, yaitu seperti tanah dan air.

Menurut Manwell, et al., dalam *Wind Energy Explained* (2009), Pergerakan rotasi bumi menyebabkan terjadinya perbedaan pemanasan yang tidak merata, yang akan mempengaruhi arah pergerakan angin. Perbedaan tingkat pemanasan ini mengakibatkan terjadinya variasi tekanan atmosfer yang diakibatkan oleh pergerakan antara udara panas dan udara dingin. Pada daerah khatulistiwa terjadi pemanasan langsung oleh paparan sinar matahari yang menyebabkan udara pada daerah tersebut menjadi panas. Udara yang mendapat pemanasan akan menyebabkan molekulnya melebar sehingga kepadatan udara menurun dan menyebabkan udara panas untuk bergerak ke atmosfer untuk di dinginkan, kondisi ini menyebabkan udara terbentuknya area bertekanan rendah (*low pressure area*). Udara dingin dengan kepadatan tertentu yang berada di atmosfer, akan bergerak menuju ke permukaan bumi dan menekan udara pada permukaan tersebut dan menyebabkan terbentuknya area bertekanan tinggi (*high pressure area*). Secara global, akibat pemanasan yang tidak merata antara daerah khatulistiwa dengan daerah kutub menyebabkan angin pada umumnya bergerak dari daerah kutub (udara dingin) menuju ke daerah khatulistiwa (daerah panas). Namun karena adanya pergerakan rotasi bumi menyebabkan terjadinya *Coriolis Effect*. Efek Coriolis mengakibatkan udara yang bergerak dari kutub utara menuju ke arah garis khatulistiwa menjadi terdefleksi ke arah kanan, sedangkan udara yang bergerak dari kutub selatan menuju ke arah garis khatulistiwa akan terdefleksi ke

arah kiri. Akibat dari Coriolis Efek ini, maka terbentuk 3 (tiga) jenis siklus angin, yaitu:

- 1) Sirkulasi Hadley (*Hadley Cells*), yang terletak antara khatulistiwa dan garis lintang 30° (daerah subtropis) di kedua belahan bumi. Sirkulasi Hadley merupakan sirkulasi udara dari garis lintang 30° menuju ke garis khatulistiwa. Pada daerah garis khatulistiwa, terjadi pemanasan udara oleh matahari yang menyebabkan udara panas menjadi panas, dan naik ke atmosfer. Udara panas ini menciptakan daerah bertekanan rendah di khatulistiwa. Udara dingin dari garis lintang 30° akan bergerak menuju ke daerah panas di khatulistiwa. Pergerakan angin dari arah kutub utara dinamakan Angin pasat timur laut (*Northeast trade wind*), sedangkan pergerakan angin dari arah kutub selatan menuju ke daerah khatulistiwa dinamakan angin pasat Tenggara (*Southeast trade wind*)
- 2) Sirkulasi Ferrel (*Ferrel Cells*): yang terletak antara garis lintang 30° dan 60° di kedua belahan bumi. Sirkulasi Ferrel merupakan aliran udara dari garis lintang 30° ke garis lintang 60° . Udara dingin dari Sirkulasi Hadley bertemu dengan udara panas dari sirkulasi Polar, menciptakan zona konvergensi di garis lintang 60° . Pergerakan angin dalam Sirkulasi ini dinamakan “angin barat” yang bergerak dari Barat ke Timur di sepanjang garis lintang 30° hingga 60° .
- 3) Sirkulasi Polar (*Polar Cells*): yang terletak pada kutub, antara garis lintang 60° dan kutub. Sirkulasi polar merupakan pergerakan udara dingin dari kutub ke garis lintang 60° . Udara dingin ini turun ke permukaan dan menciptakan tekanan tinggi di daerah polar. Pergerakan angin dalam sirkulasi ini dinamakan “Angin timur” yang bertiup dari Timur ke Barat di sepanjang garis lintang 60° .

Pola pergerakan angin ini dinamakan Pola Angin Global, Gambar 1. merupakan model sederhana sirkulasi pergerakan angin dalam skala global



Gambar 1. Pola Angin Global

2.2. Potensi Energi Angin

PLTB yang memanfaatkan variasi pergerakan angin sebagai penggerak utama dari turbinnya, pada saat ini menjadi salah satu pembangkit listrik yang memiliki potensi pengembangan yang besar, khususnya di Indonesia. Pemanfaatan PLTB di Indonesia saat ini baru mencapai kapasitas terpasang sebesar 154,31 MW, yang berasal dari PLTB Wilayah Bali sebesar 1,38MW, PLTB Wilayah Sulawesi Utara sebesar 0,08 MW, dan PLTB Wilayah Sulawesi Selatan sebesar 152,85 MW, dari target kapasitas sebesar 255 MW pada tahun 2025 (Peraturan Pemerintah no. 79 tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional). Energi pergerakan angin yang dinamis dan tersedia secara melimpah dapat dimanfaatkan sebagai penggerak utama turbin angin PLTB. Dalam Peraturan Pemerintah No 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional untuk pemanfaatan energi angin, yaitu pengembangan energi angin untuk tenaga listrik, dimana potensi energi angin dengan kecepatan lebih dari 4m/s ditargetkan mencapai 60.647,0 MW dengan lokasi pemasangan PLTB tersebar pada wilayah Indonesia. Sejalan dengan itu mengenai target bauran EBT, diproyeksikan bauran PLTB sebesar 1,8GW pada tahun 2025 dan 28,0 GW pada tahun 2050 atau 46% dari potensi bayu sebesar 60,6 GW.