

Desain Turbin Angin Untuk Pemanfaatan Energi Angin

(Studi Kasus pada *Grid 3 Nusa Di Pulau Nusa Penida*)

1st Rizqi Aulia Syihab
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

rizqiauliasyihab@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Sudarmono Sasmono
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

ssasmono@telkomuniversity.ac.id

3rd Wahmisari Priharti
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

wpriharti@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Pulau Nusa Penida merupakan salah satu destinasi pariwisata di Kecamatan Nusa Penida, Kabupaten Klungkung, Bali. Kelistrikan Pulau Nusa Penida dialiri dari PLTD Kutampi kapasitas 11,9 MW dengan kapasitas bersih 9,2 MW. Tahun 2007 dibangun PLTB kapasitas 80kW hanya beroperasi 1 tahun karena kegagalan proyek. Solusi untuk menurunkan biaya kelistrikan di Pulau Nusa Penida melalui pemanfaatan energi angin dengan perancangan model PLTB. Model PLTB akan didapatkan melalui metode pemodelan menggunakan perangkat lunak QBlade dan HOMER. Hasil simulasi perangkat lunak QBlade yaitu desain bilah turbin angin untuk kapasitas 50kW dengan airfoil NACA 4412. Pada simulasi HOMER dilakukan perbandingan hasil nilai LCOE dari jenis turbin angin WES34/100 100kW, MG-H100 100kW, MGH-50 50kW, dan Blade-Custom 50kW. Hasil dan optimasi HOMER didapatkan PLTB dengan kapasitas 100kW, dan jumlah peletakan 40 PLTB dari model WES34/100 dengan nilai LCOE terendah yaitu 0,162 USD.

Kata kunci — airfoil, bilah, energi angin, kapasitas, pembangkit listrik tenaga bayu.

I. PENDAHULUAN

Pulau Nusa Penida merupakan pulau yang terletak sebelah tenggara Bali dengan luas 202,84 km² di Kecamatan Nusa Penida, Kabupaten Klungkung. Pulau Nusa Penida dengan pulau kecil lainnya yaitu Pulau Lembongan dan Pulau Ceningan memiliki julukan spesial yaitu kawasan 3 Nusa yang terpisah dari Bali karena adanya Selat Badung. Pulau ini memiliki potensi energi angin yang cukup untuk mengembangkan pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) skala kecil dan menengah dengan memiliki potensi angin rata-rata antara 3 sampai 5 m/s[1].

Pada dasarnya kelistrikan Nusa Penida dipasok dari Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) Kutampi sebesar 11,9 MW dengan beban *peak* sebesar 10,8375 MW yang berada di Nusa Penida Kabupaten Klungkung, Bali. Setidaknya PLTD Kutampi membutuhkan dua belas ribu liter bahan bakar solar untuk menjalankan pembangkit listrik diesel tersebut. PLTD Kutampi menggunakan bahan bakar solar berjenis MFO (*Marine Fuel Oil*) dengan harga 1,32 USD atau sama dengan 19.600 IDR per liter[2].

Adanya potensi energi terbarukan di Pulau Nusa Penida sudah tidak menjadi rahasia umum. Hal ini dibuktikan adanya pembangunan PLTB dan PLTS sejak Desember 2005, serta diresmikan 9 unit pembangkit listrik tenaga bayu dan 1 unit pembangkit listrik tenaga surya pada 13 November 2007 oleh Presiden Susilo Bambang Yudhoyono. Pada tahun 2008 proyek ini memiliki kegagalan pada biaya pemeliharaan, tidak adanya suku cadang, dan ketidakcocokan turbin angin.

Tujuan dari penelitian ini adalah membuat pemodelan dan pengoptimalan pemanfaatan energi angin di *Grid 3 Nusa* sebagai salah satu potensi energi terbarukan. Penelitian ini menghasilkan pilihan model pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) sebagai pengembangan energi terbarukan untuk lebih dioptimalkan dan direalisasikan secara maksimal di Pulau Nusa Penida, khususnya disektor pembangkit listrik. Serta pada penelitian ini dilakukan pengembangan EBT yang ada di Pulau Nusa Penida untuk pemanfaatan pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) sebagai opsi menurunkan biaya listrik.

II. KAJIAN TEORI

A. Energi Angin

Energi angin merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi untuk lebih dikembangkan sebagai bahan bakar alternatif yang dapat menggantikan bahan bakar fosil. Energi angin bermula dari energi matahari yang tidak langsung karena angin dipengaruhi oleh pemanasan yang dilakukan matahari secara tidak merata mengakibatkan perbedaan tekanan udara pada atmosfer. Energi angin juga merupakan energi kinetik pada PLTB yang berguna untuk memutar turbin angin sehingga generator dapat mengkonversi energi kinetik menjadi energi listrik. Pada Persamaan 1 merupakan persamaan energi kinetik yang memiliki massa m dan kecepatan angin v [3][4].

$$E = \frac{1}{2} x mv^2 \quad (1)$$

Massa udara m jika dimisalkan adanya blok udara oleh penampang seluas A (m^2), maka memiliki Persamaan 2.

$$m = A \cdot v \cdot \rho \quad (2)$$

Rho (ρ) merupakan Kerapatan udara (kg/m^3), dan A luas penampang (m^2). Maka daya angin yang dihasilkan ditunjukkan oleh Persamaan 3.

$$P_A = \frac{1}{2} \times \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (3)$$

Dengan A merupakan luas penampang (m^2) yang ditunjukkan pada Persamaan 4.

$$A = \pi \cdot r^2 \quad (4)$$

r merupakan jari-jari bilah atau panjang bilah.

B. Analisis Data Angin

1) *Distribusi Weibull*: Distribusi probabilitas lanjutan untuk menganalisis data langsung, analisis rawatan (maintainability), dan persoalan keandalan (reliability). Distribusi Weibull dapat juga digunakan untuk memodelkan distribusi kecepatan angin di suatu tempat tertentu. Dalam distribusi Weibull variasi kecepatan angin dapat dilihat dari nilai PDF dan CDF[3][5][6].

- *The probability density function (PDF)*

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp \left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (5)$$

- *The cumulative distribution function (CDF)*

$$F(V) = 1 - \exp \left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (6)$$

Pada Persamaan 5 dan 6, V merupakan kecepatan angin, k merupakan parameter bentuk Weibull, dan c merupakan parameter skala Weibull.

2) *Distribusi Rayleigh*: Keandalan distribusi Weibull dalam menganalisis data angin tergantung pada ketepatan nilai k dan c . terkadang nilai k dan c sangat sulit didapat dikarenakan data yang ada tidak memadai. Sedangkan biasanya data yang tersedia berupa kecepatan angin rata-rata selama periode waktu tertentu (misalnya kecepatan angin rata-rata harian, bulanan atau tahunan). Dalam kasus seperti ini maka didapat pendekatan yaitu model distribusi Weibull dengan k mendekati nilai 2 ($k=2$). Maka akan didapat persamaan Rayleigh seperti Persamaan 7 dan Persamaan 8.

- *The probability density function (PDF)*

$$f(V) = \frac{\pi}{2} \frac{V}{v_m^2} \exp \left[-\frac{\pi}{4} \times \left(\frac{V}{v_m}\right)^2\right] \quad (7)$$

Dimana,

V = Kecepatan angin

$$\pi = 3,14 \text{ atau } \frac{22}{7}$$

v_m = Kecepatan angin rata-rata

- *The cumulative distribution function (CDF)*

$$F(V) = 1 - \exp \left[-\left(\frac{\pi}{4} \times \left(\frac{V}{v_m}\right)^2\right)\right] \quad (8)$$

Dimana,

V = Kecepatan angin

$$\pi = 3,14 \text{ atau } \frac{22}{7}$$

v_m = Kecepatan angin rata-rata

3) *Metode Grafik*: Metode grafik diterapkan dengan cara mengubah fungsi distribusi kumulatif ke dalam bentuk linier, mengadopsi skala logaritmik. Maka parameter k dan c dapat dihitung dengan persamaan plot hubungan logaritma ganda[3].

$$1 - F(v) = e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} \quad (9)$$

Menjadi

$$\ln\{-\ln[1 - F(v)]\} = k \ln(V_i) - k \ln c \quad (10)$$

Sumbu X

$$\ln(V_i) \quad (11)$$

Keterangan:

V_i = Interval jarak kecepatan angin

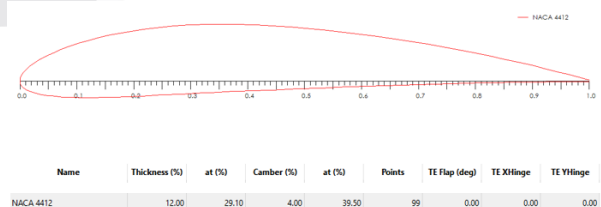
Sumbu Y

$$\ln\{-\ln[1 - F(v)]\} \quad (12)$$

Keterangan:

$F(v)$ = Distribusi kumulatif frekuensi

C. Airfoil



GAMBAR 2. 1 NACA 4412

Pada perancangan bilah menggunakan NACA 4412 yang memiliki karakteristik *airfoil* yaitu NACA seri 4 dengan bentuk lengkung atau *camber* 4% yang berada

pada 39,50% *camber line* atau lengkungan tengah dari *airfoil*, dan memiliki ketebalan 12% dari pangkal atau ujung awal *airfoil* yaitu pada 29,10%. Seri 4412 umum digunakan untuk pembuatan bilah turbin angin dari lembaga NACA *airfoil* (*National Advisory Committee of Aerounatics*).

D. Perancangan Bilah

1) *Panjang Bilah*: Jari-jari bilah atau dapat disebut dengan Panjang bilah (R) merupakan panjang setengah dari diameter luas sapuan rotor. Daya yang dihasilkan oleh pembangkit dapat dipengaruhi oleh jari-jari bilah dan juga kecepatan angin yang beroperasi. Jika diketahui daya yang dapat dihasilkan oleh rotor maka rumus Panjang bilah (R) pada Persamaan 13.

$$R = \left[\frac{2 \cdot PD}{C_{PD} \cdot \eta_d \cdot \eta_g \cdot \rho_a \cdot \pi \cdot VD^3} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

Dimana,

R = Jari-jari bilah atau Panjang bilah

PD = Daya rotor (W)

C_{PD} = Koefisien daya desain

η_d = Efisiensi desain

η_g = Efisiensi generator

ρ_a = Kerapatan udara

$\pi = 3,14$ atau $\frac{22}{7}$

VD = Kecepatan angin desain (m/s)

2) *Jari-jari Parsial*: Pada bilah terdapat panjang bilah (R), setiap panjang bilah (R) memiliki beberapa elemen atau segmen, dan juga sering disebut sebagai jari-jari parsial bilah (r). Panjang bilah (R) terdiri dari beberapa bagian jari-jari parsial bilah (r) berupa elemen yang dibagi sesuai dengan keinginan manufaktur. Untuk menentukan jari-jari parsial bilah (r) dapat ditentukan melalui persamaan berikut:

$$r = root + \left[\left(\frac{R-root}{n} \right) \times \text{elemen ke } n \right] \quad (14)$$

Keterangan:

r = Jari-jari parsial bilah (r)

R = Panjang bilah/Jari-jari bilah (R)

$root$ = Pangkal jarak antara bilah ke pusat rotor (m)

n = Jumlah elemen atau segmen

3) *Tip Speed Ratio*: Tip Speed Ratio atau dapat di singkat menjadi TSR adalah rasio kecepatan ujung rotor terhadap kecepatan angin yang ada. TSR yang lebih tinggi dapat mengurangi lebar chord pada bilah mengakibatkan chord menjadi lebih kecil. Hal ini dapat mengurangi biaya produksi pada bilah menjadi lebih kecil. Pada sebuah bilah mempunyai juga TSR Parsial (λr). TSR parsial (λr) merupakan perbandingan kecepatan linear elemen atau segmen bilah rotor terhadap kecepatan angin pada setiap

elemen atau segmen. Persamaan untuk TSR parsial (λr) sebagai berikut:

$$\lambda r = \frac{r}{R} \lambda R \quad (15)$$

Dimana,

λR = Tip Speed Ratio bilah

R = Jari-jari bilah (m)

r = Jari-jari partial bilah pada elemen atau segmen yang ingin dicari (m)

λr = Tip Speed Ratio partial pada elemen atau segmen yang ingin dicari

4) *Flow angle (ϕ)*: Daerah sudut serang dari angin yaitu memiliki persamaan untuk masing masing elemen sebagai berikut:

$$\phi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda r} \quad (16)$$

Dengan ketentuan:

ϕ = Flow angle (ϕ) atau daerah sudut serang

λr = Tip Speed Ratio partial

5) *Twist Angle (β)*: Daerah sudut putar memiliki persamaan untuk setiap elemen bilah sebagai berikut:

$$\beta = \phi - \alpha \quad (17)$$

Ketentuan:

β = Twist Angle (β) atau daerah sudut putar

ϕ = Flow angle (ϕ) atau daerah sudut serang

α = angle of attack

6) *Chord (Cr)*: Lebar bilah merupakan ukuran dari bilah dari elemen awal ke elemen akhir. Menentukan chord (Cr) atau lebar bilah menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$Cr = \frac{16\pi \cdot R \cdot \left(\frac{R}{r}\right)}{9\lambda R^2 \cdot B \cdot Cl} \quad (18)$$

Dimana,

Cr = Chord atau lebar bilah

$\pi = 3,14$ atau $\frac{22}{7}$

R = Jari-jari bilah atau Panjang bilah (m)

r = Jari-jari partial bilah (m)

λR = Tip Speed Ratio bilah

B = Jumlah sudu atau jumlah bilah yang digunakan

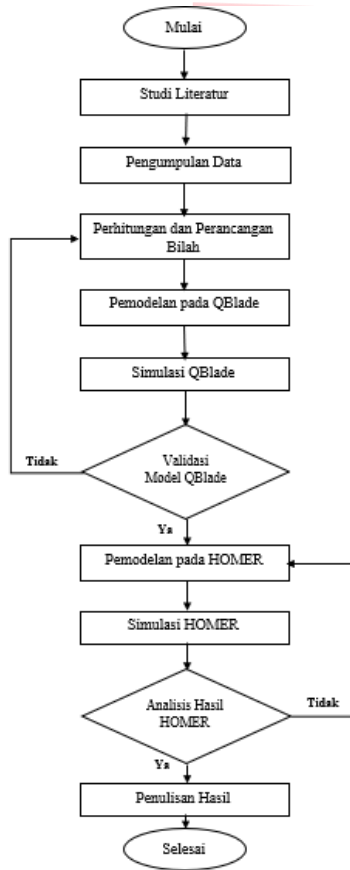
Cl = koefisien lift

III. METODE

Pada penelitian menghasilkan pemodelan pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) dari *input* kecepatan angin yang kemudian dilakukan proses pemodelan menghasilkan *output* model pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) di Pulau Nusa Penida. Penelitian ini memiliki langkah-langkah yaitu dari studi literatur,

pengumpulan data kecepatan angin, pengolahan data kecepatan angin, lalu melakukan desain pembangkit dengan data kecepatan angin, pemodelan pembangkit listrik, simulasi model pembangkit listrik, memvalidasi simulasi pembangkit listrik, menganalisis simulasi pembangkit listrik, dan memperoleh model optimal untuk pemanfaatan energi angin dalam bentuk model PLTB.

Pada penelitian ini dilakukan pendekatan model deterministik melalui simulasi berupa perancangan kapasitas turbin angin melalui perangkat lunak QBlade dan model pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) yang optimal melalui perangkat lunak HOMER dengan melihat nilai *Levelized cost of energy* (LCOE) terendah.



GAMBAR 3. 1 Diagram Alir Penelitian

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Probabilitas Kecepatan Angin

Perhitungan kecepatan angin merupakan probabilitas kecepatan angin dalam rentang waktu satu tahun. Data kecepatan angin yang digunakan merupakan data sekunder dari situs web Nasa Power dengan rentang pengambilan data dari Januari 2019 sampai dengan Januari 2020 di Pulau Nusa Penida. Data kecepatan angin diperoleh dengan format satu jam satu kali pengukuran sesuai dengan jumlah jam per tahun yaitu 8.760 jam, maka didapat data kecepatan angin sebanyak 8.760 data dengan rata-rata kecepatan angin 3,55 m/s, kecepatan angin

minimum 0,03 m/s, kecepatan angin maksimum 11,1 m/s dengan menggunakan perhitungan dari perangkat lunak Microsoft Excel. Dikarenakan data kecepatan angin berjumlah 8.760 maka pada perhitungan dan perancangan hanya akan ditampilkan data rata-rata kecepatan angin per bulan. Dari hasil data kecepatan angin per jam dalam satu tahun yang berjumlah 8.760 didapat kecepatan angin rata-rata setiap bulan sebagai berikut:

TABEL 4. 1 Kecepatan Angin Rata-rata Per Bulan

Rata-rata Kecepatan Angin	
Bulan	m/s
1	3,17
2	2,16
3	2,69
4	2,88
5	4,47
6	4,55
7	4,56
8	4,62
9	4,37
10	3,71
11	3,52
12	1,89

TABEL 4. 2 Perhitungan Distribusi Frekuensi

No	Interval Kecepatan Angin (Vi)		Frekuensi Data Awal	Frekuensi Data per 8760	Distribusi Kumulatif Frekuensi (DKF / F(v))	Distribusi Kumulatif Frekuensi (DKF / F(v)) (%)
1	-	0	0	0	0	0%
2	1	2	1528	0,1744	0,1744	17,44%
3	3	4	3593	0,4102	0,5846	58,46%
4	5	6	3298	0,3765	0,9611	96,11%
5	7	8	322	0,0368	0,9978	99,78%
6	9	10	17	0,0019	0,9998	99,98%

7	11	12	2	0,0002	1,0000	100,00 %
8	13	14	0	0,000	1,0000	100,00 %
9	15	16	0	0,000	1,0000	100,00 %
10	17	18	0	0,000	1,0000	100,00 %
11	19	20	0	0,000	1,0000	100,00 %
12	21	22	0	0,000	1,0000	100,00 %
13	23	24	0	0,000	1,0000	100,00 %
14	25	26	0	0,000	1,0000	100,00 %
Jumlah			8760	1		

Parameter k dan c untuk mencari distribusi weibull didapat dengan cara menggunakan metode grafik. Metode grafik akan dihitung melalui Microsoft Excel dengan persamaan 11 untuk nilai Sumbu X dan persamaan 12 untuk nilai Sumbu Y. Dari persamaan 12 dibutuhkan nilai distribusi kumulatif frekuensi untuk mendapatkan nilai Sumbu Y. Pada Microsoft Excel digunakan perhitungan data analysis berupa regression statistics untuk mengetahui parameter k dan c. Tabel 4.3 merupakan hasil dari perhitungan metode grafik di Microsoft Excel.

TABEL 4. 3 Hasil Metode Grafik

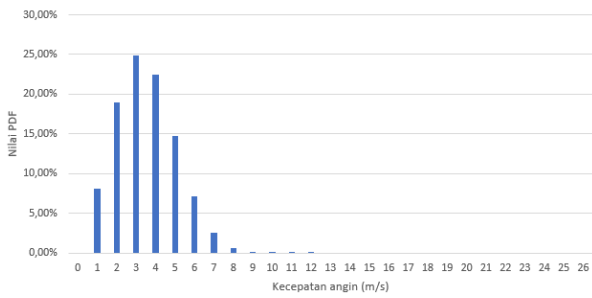
Graphical Method	
Sumbu X $\ln(V_i)$	Sumbu Y $\ln\{-\ln[1 - DKF]\}$
0,6931	-1,6519
1,3863	-0,1295
1,7917	1,1774
2,0794	1,8138
2,3025	2,1264

Dari nilai metode grafik didapat nilai parameter k sebesar 2,4427 dan c sebesar 3,9649 dengan menggunakan perhitungan data analysis berupa regression statistics pada Microsoft Excel. Pada regression statistics terdapat 2 koefisien yaitu intercept, dan X Variable 1. X Variable 1 merupakan parameter k, sedangkan untuk mencari nilai parameter c yaitu exponen dari negatif intercept dibagi

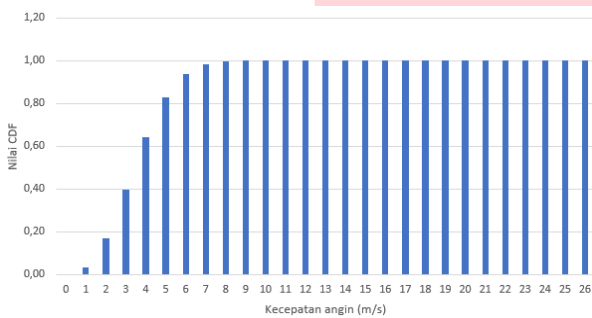
dengan X Variable 1 karena c merupakan intercept dari nilai k.

TABEL 4. 4 Hasil Distribusi Weibull

Metode Weibull			
Kecepatan Angin (m/s)	Weibull PDF	Weibull CDF	Kemunculan dalam Jam per Tahun
0	0%	0	0
1	8,16%	0,03	715
2	19,02%	0,17	1666
3	24,84%	0,40	2176
4	22,46%	0,64	1968
5	14,78%	0,83	1295
6	7,15%	0,94	627
7	2,54%	0,98	22
8	0,66%	1,00	57
9	0,12%	1,00	11
10	0,02%	1,00	1
11	0%	1,00	0
12	0%	1,00	0
13	0%	1,00	0
14	0%	1,00	0
15	0%	1,00	0
16	0%	1,00	0
17	0%	1,00	0
18	0%	1,00	0
19	0%	1,00	0
20	0%	1,00	0
21	0%	1,00	0
22	0%	1,00	0
23	0%	1,00	0
24	0%	1,00	0
25	0%	1,00	0
26	0%	1,00	0
Jumlah			
	99,75%		8738



GAMBAR 4. 1 Hasil Weibull probability density function (PDF)



GAMBAR 4. 2 Hasil Weibull cumulative distribution function (CDF)

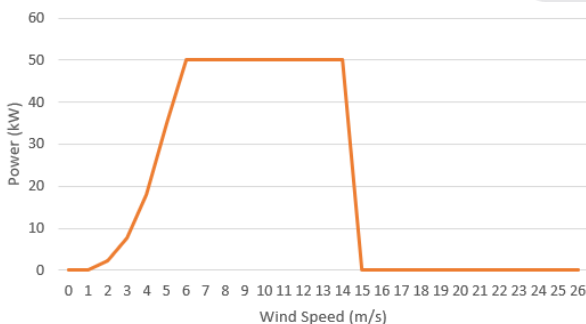
Penentuan batas kecepatan angin untuk mendapatkan kurva daya dilakukan dengan mencari nilai frekuensi probabilitas data kecepatan angin pada nilai probabilitas weibull PDF. Frekuensi probabilitas dapat dihitung dengan cara menjumlahkan nilai probabilitas weibull PDF sesuai kecepatan angin dengan nilai probabilitas weibull PDF setelahnya sampai akhir. Perhitungan frekuensi probabilitas dilakukan dari awal nilai weibull PDF hingga nilai terakhir weibull PDF. Hasil dari perhitungan frekuensi probabilitas ditunjukkan pada Tabel 4.5.

TABEL 4. 5 Hasil Perhitungan Frekuensi Probabilitas

Kecepatan Angin (m/s)	Frekuensi Probabilitas
0	99,75%
1	99,75%
2	91,59%
3	72,57%
4	47,73%
5	25,27%
6	10,49%
7	3,34%
8	0,80%
9	0,14%
10	0,02%
11	0,00%
12	0,00%
13	0,00%
14	0,00%
15	0,00%
16	0,00%
17	0,00%
18	0,00%
19	0,00%
20	0,00%
21	0,00%
22	0,00%
23	0,00%
24	0,00%
25	0,00%
26	0,00%

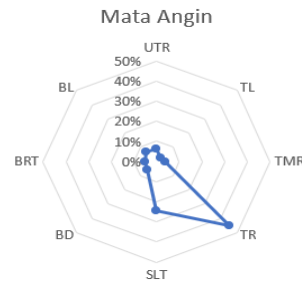
TABEL 4. 6 Penentuan Kurva Daya

Kurva Daya		
Kecepatan Angin (m/s)	Daya Turbin Angin (kW)	Parameter Batas Kecepatan Angin
0	0	
1	0	
2	2,24	V-Cut in
3	7,57	
4	17,96	
5	35,07	
6	50	V-Rated
7	50	
8	50	
9	50	
10	50	
11	50	
12	50	
13	50	
14	50	
15	0	V-Cut out
16	0	
17	0	
18	0	
19	0	
20	0	
21	0	
22	0	
23	0	
24	0	
25	0	
26	0	



Gambar 4. 3 Hasil Kurva Daya Turbin Angin 50kW

B. Arah Angin



Gambar 4. 4 Hasil Arah Mata Angin

Hasil dari perhitungan frekuensi arah angin menunjukkan mata angin Tenggara (TR) dengan frekuensi 45% sebagai frekuensi arah angin terbesar di Pulau Nusa Penida. Sedangkan frekuensi arah mata angin terkecil yaitu Timur Laut (TL) sebesar 3%. Dibawah ini merupakan *wind rose* dari perhitungan arah angin dengan data situs web Nasa Power dan tabel perbandingan perhitungan arah angin dengan hasil situs web Global Wind Atlas. Gambar 4.7 merupakan *wind rose* dari perhitungan arah mata angin.

TABEL 4. 7 Perbandingan Mata Angin

No.	Nama	Mata Angin	%
1	Global Wind Atlas	Tenggara	30%
2	Perhitungan Data Sekunder (Nasa Power)	Tenggara	45%

C. Jari-Jari Bilah

$$R = \left[\frac{2 \cdot PD}{CPD \cdot \eta d \cdot \eta g \cdot \rho a \cdot \pi \cdot VD^3} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$R_{Cpmin} = \left[\frac{2 \cdot 50 \text{ kW}}{0,40 \cdot 0,90 \cdot 1,225 \cdot 3,14 \cdot 6^3} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$R_{Cpmin} = 18,28$$

$$R_{Cpmax} = \left[\frac{2 \cdot 50 \text{ kW}}{0,45 \cdot 0,90 \cdot 1,225 \cdot 3,14 \cdot 6^3} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$R_{Cpmax} = 17,05$$

$$R_{tengah} = \frac{RC_{pmin} + RC_{pmax}}{2}$$

$$R_{tengah} = \frac{18,28 + 17,05}{2} = 17,66 \approx 18$$

D. Geometri Bilah

TABEL 4. 8 Hasil Perhitungan Geometri Bilah

Elemen/Segmen	Jari-jari parsial bilah /r	TSR parsial /λr	Flow angle/ φ (Derajat)	Twist angle/ β (Derajat)	Chord/ Cr (m)
0	3	0,75	35,42	29,42	8,83
1	4,5	1,125	27,76	21,76	5,88
2	6	1,500	22,46	16,46	4,41
3	7,5	1,875	18,71	12,71	3,53
4	9	2,250	15,97	9,97	2,94
5	10,5	2,625	13,90	7,90	2,52
6	12	3,000	12,29	6,29	2,21
7	13,5	3,375	11,00	5,00	1,96
8	15	3,750	9,95	3,95	1,77
9	16,5	4,125	9,08	3,08	1,60
10	18	4,500	8,35	2,35	1,47

TABEL 4. 9 Karakteristik Turbin Angin Blade-Custom

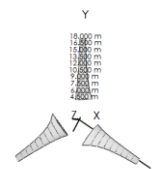
Karakteristik Turbin Angin	
Panjang Bilah	18 meter
Jumlah Bilah	3
Kapasitas	50kW
Cut in Wind Speed	2 m/s
Rated Wind Speed (Kecepatan Desain)	6 m/s
Cut out Wind Speed	15 m/s
TSR	4,5

TABEL 4. 10 Karakteristik Turbin Angin Untuk Simulasi

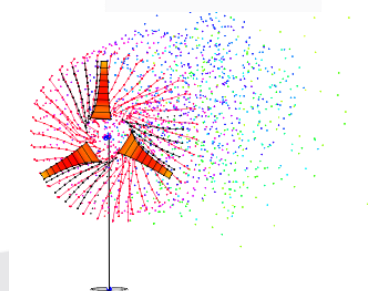
Karakteristik Turbin Angin			
Karakteristik Turbin Angin	WES 34/100 100kW	MG-H100 100kW	MGH-50 50kW
Panjang Bilah	17 Meter	9 Meter	7,5 Meter
Jumlah Bilah	2	3	3
Kapasitas	100kW	100kW	50kW
Cut in Wind Speed	2 m/s	4 m/s	3 m/s
Rated Wind Speed (Kecepatan Desain)	8 m/s	12 m/s	10 m/s
Cut out Wind Speed	16 m/s	25 m/s	25 m/s

E. Simulasi Pada Qblade

Pos (m)	Chord (m)	Twist	Foil	Pole
4.5	5.88	21.76	NACA 4412	T1_R41.000
6	4.41	16.46	NACA 4412	T1_R41.000
7.5	3.53	12.71	NACA 4412	T1_R41.000
9	2.94	9.97	NACA 4412	T1_R41.000
10.5	2.52	7.9	NACA 4412	T1_R41.000
12	2.21	6.29	NACA 4412	T1_R41.000
13.5	1.96	5	NACA 4412	T1_R41.000
15	1.77	3.95	NACA 4412	T1_R41.000
16.5	1.6	3.08	NACA 4412	T1_R41.000
18	1.47	2.35	NACA 4412	T1_R41.000



GAMBAR 4. 5 Proses Input Nilai Hasil Perancangan Bilah

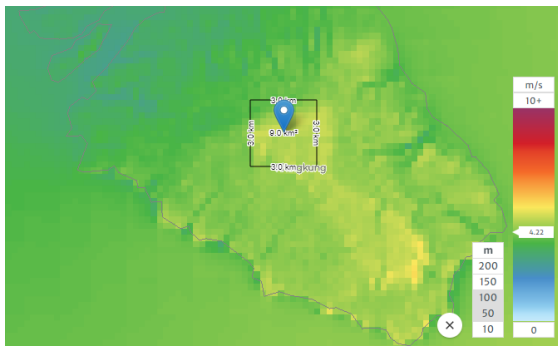


Power: 63.1834 kW
Cp: 0.46919
V_in @ hub: 6 m/s

GAMBAR 4. 6 Hasil Simulasi QBlade

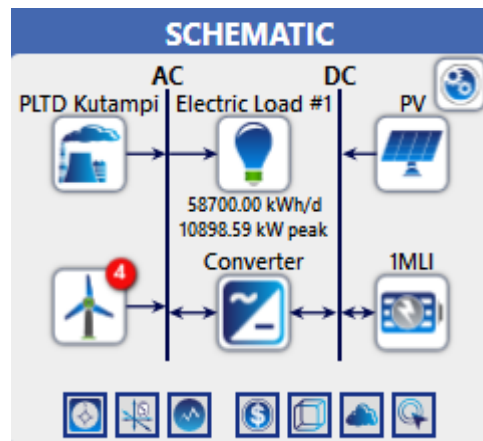
Pada simulasi turbin model menghasilkan nilai kapasitas turbin angin sebesar 63kW dengan kecepatan angin desain 6 m/s. Simulasi turbin model menunjukkan bahwa dengan menggunakan parameter nilai perancangan bilah didapatkan nilai kapasitas turbin angin lebih dari nilai minimum 50kW.

F. Perkiraan Peletakan PLTB



GAMBAR 4. 7 Peta Kecepatan Angin

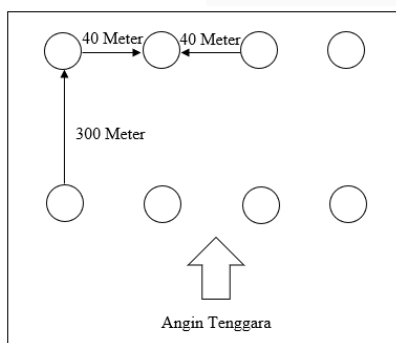
(Sumber: Situs Web Global Wind Atlas)



GAMBAR 4. 10 Skematik Perancangan Pada HOMER



GAMBAR 4. 8 Letak Lokasi Penempatan



GAMBAR 4. 9 Skema Peletakan Turbin Angin

Dari hasil analisis dan pengukuran menggunakan Google Earth, peletakan pada Puncak Mundi luas 1,55 km² dan Pura Paseh Calik luas 1,65 km² diperkirakan dapat diletakan 40 turbin angin dengan perkiraan penempatan jarak turbin antara 40-50 meter untuk turbin diameter 36 meter dan jarak baris kebelakang turbin angin 300 meter.

G. Simulasi Pada Homer

TABEL 4. 11 Hasil Simulasi Pada HOMER

Model PLTB	Jumlah Turbin Angin	LCOE (\$)	Skenario
WES34/100 100kW	40	0,162	I-A
MG-H100 100kW		0,251	I-B
MGH-50 50kW		0,265	II-A
Blade-Custom 50kW		0,194	II-B

Dari hasil simulasi HOMER menunjukan bahwa LCOE terendah pada skenario I dengan kapasitas turbin angin 100kW sebesar 0,162 USD dari model turbin angin WES34/100 100kW. Sedangkan untuk skenario II dengan kapasitas turbin angin 50kW LCOE terendah sebesar 0,194 USD dari model turbin angin Blade-Custom 50kW. Hasil ini menunjukan adanya penurunan LCOE dari 0,19 USD pada tahun 2018 menjadi 0,162 USD dengan turbin angin terpilih model WES34/100 100kW.

V. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian desain turbin angin untuk pemanfaatan energi angin pada grid 3 nusa di Pulau Nusa Penida didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

A. Hasil metode weibull dari data kecepatan angin di Pulau Nusa Penida didapat probabilitas tertinggi sebesar 24,84% dikecepatan angin 3 m/s dengan jumlah 2.176 jam pertahunnya.

B. Perancangan turbin angin dari frekuensi probabilitas angin didapat batasan kecepatan angin pada turbin angin yaitu v-cut in pada 2 m/s, v-rated 6 m/s, v-cut out 15 m/s.

C. Perancangan bilah yang disimulasikan mendapatkan nilai kapasitas yang lebih besar dari nilai minimum 50kW sebesar 63kW dengan jenis airfoil NACA 4412 dan panjang bilah 18 meter.

D. Pada simulasi HOMER dilakukan perbandingan skenario I dan skenario II untuk mendapatkan nilai LCOE dengan jumlah turbin angin sebanyak 40 turbin. PLTB dengan nilai LCOE terendah terdapat pada skenario I-A model turbin WES34/100 dengan kapasitas turbin angin 100kW sebesar 0,163 USD. Nilai LCOE terbesar pada skenario II-A model turbin MGH-50 kapasitas 50kW sebesar 0,266 USD. Sedangkan nilai LCOE pada Blade-Custom skenario II-B kapasitas 50kW memiliki peringkat ke 2 terendah dan tertinggi pada kapasitas 50kW yaitu 0,194 USD.

REFERENSI

- [1] E. D. Meilandari, R. S. Hartati, and I. W. Sukerayasa, "Analisa Aliran Daya Optimal Pada Sistem Kelistrikan Bali," *Maj. Ilm. Teknol. Elektro*, vol. 11, no. 1, 2013, doi: 10.24843/10.24843/MITE.
- [2] N. Hamzah, M. Saini, and M. Makbul, "Penggunaan Bahan Bakar High Speed Diesel dan Marine Fuel Oil Terhadap Biaya Operasi PLTD," *J. Tek. Mesin Sinergi*, vol. 18, no. 1, p. 8, 2020, doi: 10.31963/sinergi.v18i1.2232.
- [3] S. Mathew, *Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics*, vol. 15, no. 2. 2010.
- [4] A. Kalmikov and K. Dykes, "Wind Power Fundamentals," pp. 1–7, 2010.
- [5] M. Muliadi and T. M. Asyadi, "Penentuan Parameter Weibull untuk Mendapatkan Densitas Daya Angin di Kawasan Blang Bintang Aceh Besar," *Jambura J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 3, no. 2, pp. 51–55, 2021, doi: 10.37905/jjee.v3i2.10385.
- [6] L. G. Otaya, "Distribusi Probabilitas Weibull Dan Aplikasinya," *J. Manaj. Pendidik. Islam*, vol. 4, no. 2, pp. 44–66, 2016.