

## ESTIMASI ENERGI LISTRIK BERDASARKAN PERBEDAAN KETINGGIAN MENGUNAKAN ANALISIS WEIBULL DAN ANALISIS RAYLEIGH

Surya Ahmadi\*, Moh. Riski Ekocahya Farhandianto, Bayu Setia Pambudi,  
Triwahju Hardianto, Gunawan

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember

Jl. Kalimantan No. 37 Jember 68121

\*E-mail: suryaahmadi1074@gmail.com

### Abstrak

Energi listrik menjadi kebutuhan primer rakyat Indonesia. Sebagian besar energi listrik yang digunakan berasal dari energi fosil seperti, bahan bakar minyak, gas dan batu bara. Bahan bakar fosil sendiri dapat menimbulkan kerusakan lingkungan dan termasuk energi tidak terbarukan sehingga perlu dilakukannya studi mengenai potensi pembangunan pembangkit listrik menggunakan energi alternatif. Salah satunya energi angin. Angin merupakan energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan sebagai energi listrik dengan memanfaatkan suatu Sistem Konversi Energi Angin (SKEA). Penelitian ini untuk mengetahui potensi daya angin, energi angin, daya listrik dan energi listrik yang paling optimal dari tiga ketinggian yang telah ditentukan dengan menggunakan analisis weibull dan analisis rayleigh serta untuk mendapatkan data dan gambaran wind rose pantai puger kabupaten Jember. Pengambilan data dilakukan selama 1 bulan dari tiga ketinggian yang berbeda yakni 7,3 m, 20,6 m dan 43,2 m. Data yang diambil berupa data kecepatan angin, suhu udara dan arah angin. Data tersebut digunakan untuk memperoleh potensi daya angin, energi angin, daya listrik dan energi listrik. Setelah memperoleh data kecepatan angin, suhu udara dan arah angin. Untuk rata rata energi angin yang dihasilkan setiap harinya sebesar 4,321 joule. Energi listrik yang dihasilkan setiap hari sudah melebihi 150 W/h sehingga pantai puger mungkin untuk dibangun sebuah pembangkit energi angin.

**Kata kunci:** Angin, weibull rayleigh, wind rose

## 1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik yang semakin besar mengharuskan dilakukannya studi mengenai potensi pembangunan pembangkit listrik menggunakan energi alternatif, salah satunya energi angin. Angin merupakan energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan sebagai energi listrik dengan memanfaatkan suatu Sistem Konversi Energi Angin (SKEA). Ketinggian juga akan mempengaruhi kecepatan angin yang dihasilkan. Pembangunan pembangkit listrik tenaga angin membutuhkan data kecepatan angin pada ketinggian yang sesuai dengan letak turbin anginnya. Letak turbin yang semakin tinggi akan lebih berpotensi agar kecepatan yang diterima oleh turbin dapat dimanfaatkan untuk menggerakkan generator. Jarak antar turbin juga perlu diperhitungkan agar angin tidak terlalu besar turbulensi angin yang terjadi. Semakin jauh jarak ketinggian turbin angin, maka semakin kecil nilai turbulensi angin yang akan terjadi (Mathew, 2006).

Berdasarkan penelitian Bhakti Dharmawan (2014) Pantai Pancer Puger Kabupaten Jember memiliki kecepatan angin rata-rata 5.399 m/s. Penelitian ini terdapat kekurangan mengenai perbedaan ketinggian kecepatan angin. Ketinggian kecepatan angin yang seharusnya menjadi acuan untuk mendapatkan hasil energi angin, tidak dibahas didalamnya. Pembahasan tentang pengaruh perbedaan tinggi akan mempengaruhi kecepatan angin yang diukur. Semakin tinggi pengukuran yang dilakukan akan membuat angin yang diukur semakin cepat (Mathew, 2006). Sehingga akan didapatkan data potensi energi listrik yang paling optimal sebagai acuan di dirikannya Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTA) dengan ketinggian pengukuran angin yang sesuai pada titik koordinat pengambilan data angin tersebut.

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

Dalam penelitian ini, langkah-langkah atau prosedur penelitian yang akan dilakukan yaitu:

### a. Tahap Persiapan

Tahap persiapan ini berisi tentang pengurusan administrasi, mengenai pembelian alat dan administrasi lainnya, dan membuat garis besar rencana/konsep penelitian.

#### b. Studi Literatur terhadap Obyek dan Penelitian

Studi literatur ini bertujuan untuk menambah sumber dan metode yang akan digunakan. Dalam tahap ini juga menggali jurnal maupun artikel lokal dan atau internasional yang akan dijadikan sumber rujukan untuk menunjang penelitian ini.

#### c. Pengumpulan Data

Dalam tahap ini dilakukan pengambilan data yang dibutuhkan dalam penelitian. Data yang dibutuhkan dalam penelitian ini antara lain data kecepatan angin, suhu udara dan arah angin perdua detik selama satu bulan. Selanjutnya setelah data yang dibutuhkan ada, maka tahapan selanjutnya adalah analisis data.

#### d. Analisis Data

##### 1. Daya Angin

Analisis data dilakukan setelah semua data yang dibutuhkan untuk analisa telah tersedia, yaitu data kecepatan rata-rata angin perhari, suhu udara dan arah angin pada daerah tersebut selama satu bulan. Data kecepatan angin dibutuhkan untuk dapat mengetahui potensi kecepatan rata-rata angin yang ada di Pantai.

##### 1. Energi angin

Data daya angin yang telah diperoleh selama satu bulan selanjutnya digunakan untuk menganalisis nilai potensi energi angin. Energi angin diperoleh dengan cara mengalikan daya angin dikali probabilitas. Berikut tabel data energi angin selama satu bulan :

##### 2. Daya Listrik

Dari data energi angin tersebut selama satu bulan dijadikan data untuk menentukan potensi daya listrik pada masing – masing ketinggian yang telah ditentukan.

##### 3. Energi listrik

Energi listrik diperoleh dari perhitungan potensi daya listrik dikali dengan durasi jam turbin bekerja.

##### 4. Menentukan spesifikasi turbin dan generator

Setelah kita menganalisis potensi energilistrik yang cocok untuk daerah penelitian, selanjutnya kita menentukan spesifikasi turbin dan generator yang pas dan cocok untuk digunakan dalam pembuaan pembangkit listrik tenaga bayu ditempat penelitian tersebut.

#### e. Pengambilan Kesimpulan dan Saran

Pengambilan kesimpulan dan saran merupakan tahap terakhir dari penelitian ini, pengambilan kesimpulan ini didasarkan pada hasil analisa data yang ada. Sementara untuk saran digunakan untuk perbaikan-perbaikan yang mungkin terjadi, atau kemungkinan pengembangan dan aplikasi dengan metode maupun cara yang berbeda.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Metode pengambilan data kecepatan, arah angin dan suhu udara pada Pantai Puger Kabupaten Jember menggunakan anemometer berbasis kecepatan dan arah angin. Anemometer ini menggunakan arduino uno R3 sebagai kontrol. Anemometer dilengkapi dengan data logger sehingga memudahkan dalam pengambilan data kecepatan, arah angin dan suhu udara.

Data kecepatan, arah angin dan suhu udara nantinya diolah untuk mendapatkan nilai karakteristik angin. Data tersebut diolah menggunakan analisis *weibull* dan *rayleigh* untuk memperoleh nilai karakteristik angin didaerah Pantai Puger Kabupaten Jember. Data karakterissik ini kemudian dioalah kembali untuk memperoleh nilai daya angin, daya listrik dan energi listrik didaerah tersebut. Sedangkan arah angin yang berhembus digambarkan menggunakan grafik *wind rose*.

#### 3.1 Analisis Weibull Dan Rayleigh

##### 3.1.1 Kelas Kecepatan Angin Dan Kepadatan Probabilitas.

Nilai probabilitas angin pada lokasi penelitian diperoleh dari pengolahan nilai kecepatan angin pada setiap ketinggian berdasarkan dengan kelas angin yang ada. Probabilitas angin digunakan untuk mengetahui potensi kecepatan angin yang ada pada lokasi tersebut. Potensi itulah yang menjadi parameter untuk menentukan ketinggian mana saja yang dapat digunakan untuk pembangkit listrik secara optimal. Berikut ini tabel kecepatan angin dan frekuensinya sesuai kelas kecepatan angin :

**Tabel 1. Kelas kecepatan angin berdasarkan ketinggian**

Kelas	Median	Frekuensi			Relativitas %		
		7.3 m	20.6 m	43.2 m	7.3 m	20.6 m	43.2 m
0 – 1	0.5	31	21	0	9.09	6.16	0.00
1 – 2	1.5	42	38	0	12.32	11.14	0.00
2 – 3	2.5	75	61	5	21.99	17.89	1.47
3 – 4	3.5	119	91	32	34.90	26.69	9.38
4 – 5	4.5	0	0	0	0.00	0.00	0.00
5 – 6	5.5	72	72	49	21.11	21.11	14.37
6 – 7	6.5	2	47	92	0.59	13.78	26.98
7 – 8	7.5	0	11	59	0.00	3.23	17.30
8 – 9	8.5	0	0	67	0.00	0.00	19.65
9 – 10	9.5	0	0	0	0.00	0.00	0.00
10 – 11	10.5	0	0	37	0.00	0.00	10.85
<b>Jumlah</b>		<b>341</b>	<b>341</b>	<b>341</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Dari data diatas diketahui bahwa frekuensi kecepatan angin pada tiap-tiap ketinggian berbeda. Nilai relativitas tertinggi pada ketinggian 7.3 meter kecepatan angin 3 m/s sampai 4 m/s dengan nilai relativitas tertinggi sebesar 34.90 %. Pada ketinggian 20.6 meter dan 43.2 meter kecepatan angin 6 m/s sampai 7 m/s merupakan relativitas tertinggi masing masing sebesar 26.69 % dan 26.98 %.

Data relativitas tersebut digunakan untuk menentukan nilai parameter skala dengan simbol  $c$  dan nilai parameter bentuk yang disimbolkan  $k$ . Parameter  $c$  dan  $k$  digunakan untuk mendapatkan nilai probabilitas kecepatan angin sesuai dengan analisis *weibull*. Untuk nilai parameter bentuk pada analisis *rayleigh* ditetapkan sebesar 2. Berikut tabel parameter – parameter analisis *weibull* dan *rayleigh* :

**Tabel 2. Parameter analisis weibull**

Median	Parameter k			Parameter c			Kepadatan Probabilitas		
	7.3 m	20.6 m	43.2 m	7.3 m	20.6 m	43.2 m	7.3 m	20.6 m	43.2 m
0.5	2.16	2.13	3.58	4.05	4.24	7.82	0,244	0,196	0,089
1.5	2.16	2.13	3.58	4.05	4.24	7.82	0,217	0,197	0,095
2.5	2.16	2.13	3.58	4.05	4.24	7.82	0,232	0,197	0,120
3.5	2.16	2.13	3.58	4.05	4.24	7.82	0,255	0,196	0,120
4.5	2.16	2.13	3.58	4.05	4.24	7.82	0,225	0,193	0,126
5.5	2.16	2.13	3.58	4.05	4.24	7.82	0,238	0,197	0,133
6.5	2.16	2.13	3.58	4.05	4.24	7.82	0,248	0,197	0,126
7.5	2.16	2.13	3.58	4.05	4.24	7.82	0,225	0,195	0,101
8.5	2.16	2.13	3.58	4.05	4.24	7.82	0,238	0,197	0,139
9.5	2.16	2.13	3.58	4.05	4.24	7.82	0,200	0,176	0,199
10.5	2.16	2.13	3.58	4.05	4.24	7.82	0,225	0,193	0,207

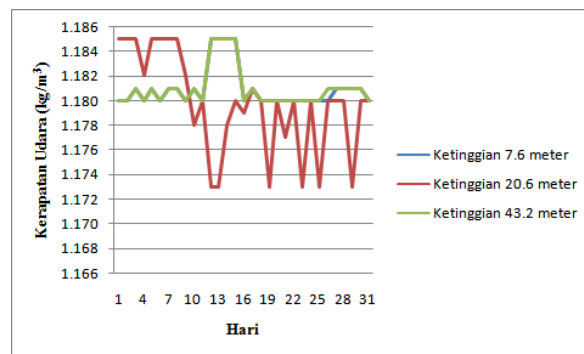
**Tabel 3. Parameter analisis *rayleigh***

Median	Parameter k			Parameter c			Kepadatan Probabilitas		
	7.3 m	20.6 m	43.2 m	7.3 m	20.6 m	43.2 m	7.3 m	20.6 m	43.2 m
0.5	2	2	2	3,52	4,25	7,82	0,224	0,101	0,118
1.5	2	2	2	3,52	4,25	7,82	0,196	0,098	0,121
2.5	2	2	2	3,52	4,25	7,82	0,209	0,100	0,131
3.5	2	2	2	3,52	4,25	7,82	0,251	0,101	0,131
4.5	2	2	2	3,52	4,25	7,82	0,202	0,105	0,133
5.5	2	2	2	3,52	4,25	7,82	0,216	0,098	0,136
6.5	2	2	2	3,52	4,25	7,82	0,232	0,114	0,133
7.5	2	2	2	3,52	4,25	7,82	0,202	0,103	0,123
8.5	2	2	2	3,52	4,25	7,82	0,216	0,098	0,139
9.5	2	2	2	3,52	4,25	7,82	0,185	0,098	0,185
10.5	2	2	2	3,52	4,25	7,82	0,202	0,105	0,202

Dari tabel 3.2 dan tabel 3.3 dapat dijelaskan bahwa pergerakan kecepatan angin yang sering muncul pada ketinggian 7.3 meter yaitu 2.5 m/s dengan nilai probabilitas *weibull* sebesar 0.254 dan probabilitas *rayleigh* sebesar 2.51. Untuk ketinggian 20.6 meter memiliki nilai kepadatan probabilitas *weibull* dan *rayleigh* masing masing tertinggi 0.197 dan 0.114 pada kecepatan 6-7 m/s. Nilai kepadatan probabilitas *weibull* tertinggi Pada ketinggian 43.2 meter sebesar 0.207 dan kepadatan probabilitas *rayleigh* sebesar 0.202 pada kecepatan 10 sampai 11 m/s.

### 3.1.2 Kerapatan Udara

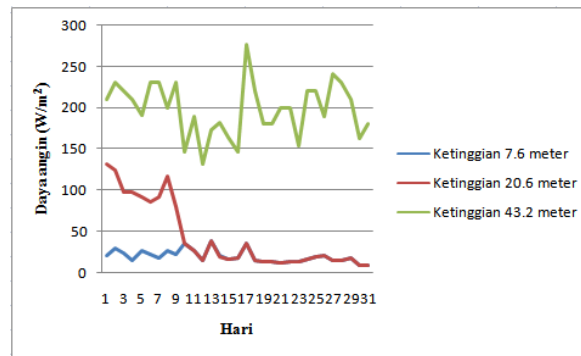
Kerapatan udara diperoleh dari suhu udara yang berhembus disekitar tempat penelitian. Nilai kerapatan udara ini dikombinasikan dengan kecepatan angin rata-rata harian pada tiap ketinggian, kedua nilai ini digunakan untuk menghitung potensi daya angin dengan. Berikut grafik kerapatan udara pada tiap ketinggian :



**Gambar 1. Grafik kerapatan udara pada tiap –tiap ketinggian**

### 3.1.2 Daya angin

Nilai daya angin diperoleh dari perhitungan nilai kerapatan udara dan nilai rata-rata kecepatan angin. Oleh karena itu nilai kerapatan dan kecepatan angin sangat berpengaruh pada nilai daya angin yang dihasilkan. Berikut grafik daya angin pada tiap ketinggian :

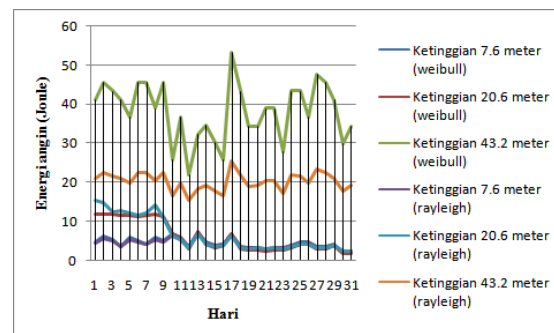


**Gambar 2. Grafik daya angin pada tiap-tiap ketinggian**

Potensi daya angin yang dihasilkan pada tiap-tiap ketinggian berbeda dikarenakan nilai kecepatan angin yang ada pada tiap ketinggian juga berbeda. Semakin besar nilai kecepatan angin maka akan semakin besar pula daya angin yang dihasilkan dan sebaliknya. Daya angin tertinggi pada bulan oktober terjadi tanggal 7 oktober saat kecepatan rata-rata 3,08 m/s pada ketinggian 42,3 m dengan daya angin 230,288 W/m<sup>2</sup>. Daya angin terendah pada bulan oktober terjadi pada tanggal 31 oktober saat kecepatan angin rata-rata 2,397 m/s pada ketinggian 7,3 m sebesar 8,125 W/m<sup>2</sup>.

### 3.1.3 Energi angin

Energi angin per unit rotor terhadap waktu dapat ditentukan dengan mengalikan daya angin dengan nilai probabilitas kecepatan angin sesuai persamaan 2.13 untuk analisis *weibull* dan *rayleigh*. Berikut grafik energi angin berdasarkan kecepatan angin rata-rata harian :



**Gambar 3. Grafik Energi angin pada tiap-tiap ketinggian**

Besar energi angin menggunakan analisis *weibull* dapat dilihat pada gambar 3.2 diketahui energi angin tertinggi pada ketinggian 7,3 meter sebesar 7,175 Joule dan nilai terendah sebesar 2,064 Joule. Pada ketinggian 20,6 meter energi angin tertinggi sebesar 11,838 Joule dan energi angin terendah sebesar 1,588 Joule. Sedangkan pada ketinggian 43,2 meter energi angin tertinggi sebesar 53,132 Joule dan energi angin terendah sebesar 21,864 Joule.

Besar energi angin tertinggi dengan menggunakan analisis *rayleigh* pada ketinggian 7,3 meter adalah sebesar 6,734 Joule dan nilai terendah sebesar 2,427 Joule. Pada ketinggian 20,6 meter didapatkan nilai energi angin tertinggi sebesar 15,469 Joule dan nilai terendah sebesar 2,427 Joule. Pada ketinggian 43,2 meter nilai energi angin tertinggi sebesar 25,502 Joule dan nilai terendah sebesar 15,380 Joule.

### 3.1.4 Daya listrik dan energi listrik.

Energi Listrik didapatkan dari nilai spesifikasi turbin angin yang dipilih. Spesifikasi tersebut meliputi energi listrik maksimal turbin yang dihasilkan, kecepatan *cut in* dan kecepatan *cut off*. Dari hasil nilai *cut in* dan *cut off* yang telah didapatkan dapat diketahui berapa lama turbin angin

akan menghasilkan daya. Berikut ini contoh perhitungan lamanya turbin berputar selama pukul 09.00 sampai 19.00 WIB pada ketinggian 7.3 meter:

$$\begin{aligned}
 P(V_1 < V < V_2) &= e^{-(V_1/c)^k} - e^{-(V_2/c)^k} \\
 &= e^{-(3/3.54)^{2.17}} - e^{-(25/3.54)^{2.17}} \\
 &= e^{-(0.847)^{2.17}} - e^{-(7.062)^{2.17}} \\
 &= e^{-0.697} - e^{-69.53} \\
 &= 0.497 - 6.36 \times 10^{-31} \\
 &= 0.497
 \end{aligned}$$

Untuk mengetahui lamanya waktu turbin selama 10 jam antara pukul 09.00 sampai 19.00 WIB dengan cara mengalikan 10 jam :

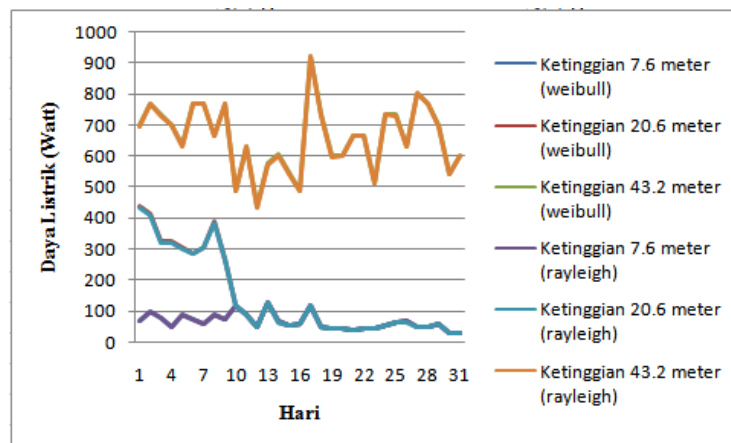
$$= 0.497 \times 10 = 4.97 \text{ jam}$$

Dari hasil perhitungan didapatkan data sebagai berikut :

**Tabel 3.4 Lamanya turbin menghasilkan daya mulai pukul 09.00 – 19.00 WIB**

Nilai parameter k			Nilai parameter c			Durasi (jam)		
7.3 m	20.6 m	43.2 m	7.3 m	20.6 m	43.2 m	7.3 m	20.6 m	43.2 m
2.17	4.26	3.58	3.54	6.23	7.57	4.97	9.57	9.64

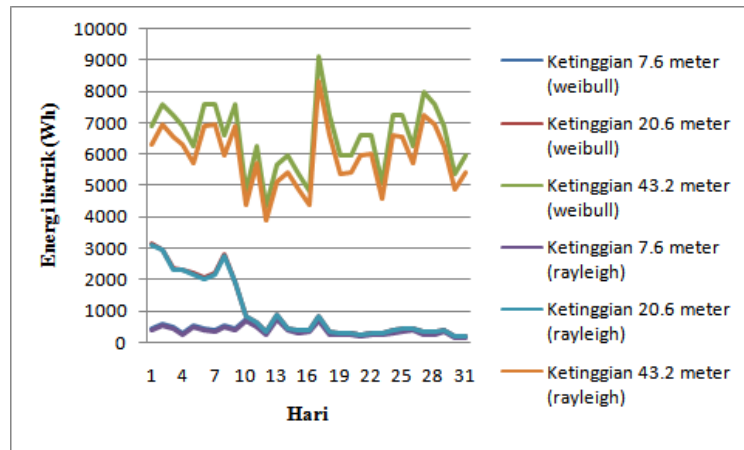
Dari tabel 3.4 dapat diketahui bahwa dari tiap-tiap ketinggian bera lama daya yang dapat dihasilkan selama durasi waktu 10 jam turbin angin berputar. Pada ketinggian 7.3 meter lamanya turbin angin menghasilkan daya listrik adalah 4.97 jam, sedangkan untuk ketinggian 20.6 meter didapatkan daya listrik selama 9.57 jam, pada ketinggian 43.2 meter didapatkan lamanya waktu 9.64 jam. Sedangkan untuk daya listrik yang dihasilkan disesuaikan dengan kecepatan rata-rata pada pukul 09.00 sampai 19.00 WIB ditampilkan pada grafik dibawah ini :



**Gambar 4. Grafik potensi daya listrik pada tiap-tiap ketinggian**

Pada gambar 3.4 dapat diketahui data potensi daya listrik harian yang dihasilkan pada tiap ketinggian selama bulan oktober. Dari data tersebut diketahui bahwa potensi daya listrik paling besar pada ketinggian 43.2 meter sebesar 921.5366 Watt dihitung dengan analisis *weibull* sedangkan potensi daya listrik terendah sebesar 27.0887 pada ketinggian 7.3 dan 20.6 meter. Untuk analisis *rayleigh* daya listrik paling besar yakni pada ketinggian 43.2 meter sebesar 921.8169 Watt sedangkan potensi daya listrik terendah 27.0887 pada ketinggian 7.3 dan 20.6 meter.

Energi listrik diperoleh dari daya listrik dikali durasi waktu turbin dari jam 09.00-19.00 wib sesuai perhitungan pada tabel 3.10. Berikut energi listrik total selama bulan oktober :

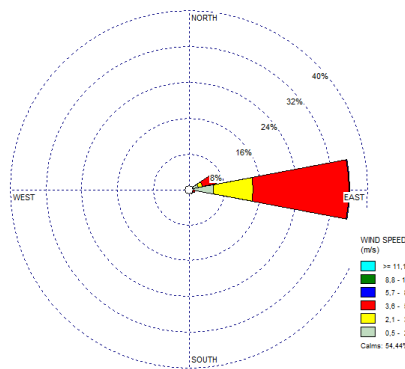


**Gambar 5. Grafik potensi energi listrik pada tiap –tiap ketinggian**

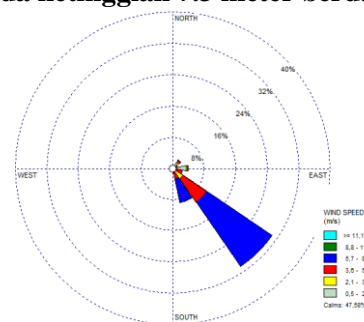
Nilai energi listrik total yang dihasilkan pada tiap-tiap ketinggian berdasarkan dengan durasi lamanya turbin angin menghasilkan daya listrik. Dengan menggunakan analisis *weibull* pada ketinggian 43.2 meter daya angin total yang dihasilkan dalam kurang waktu 30 hari sebesar 202806,1 Wh dan 184460,2 Wh saat dihitung menggunakan analisis *rayleigh*. Energi listrik ketinggian dibawahnya jauh berbeda dibandingkan ketinggian 43.2 meter. Energi listrik total harian pada ketinggian 7.3 meter menggunakan analisis *weibull* dan analisis *rayleigh* masing masing 389,4667 Wh dan 379,0947 Wh. Untuk ketinggian 20.6 meter energi listrik harian dihitung menggunakan analisis *weibull* sebesar 1014,083 Wh dan 987,0603 Wh saat dihitung menggunakan analisis *rayleigh*.

**3.2 Wind rose**

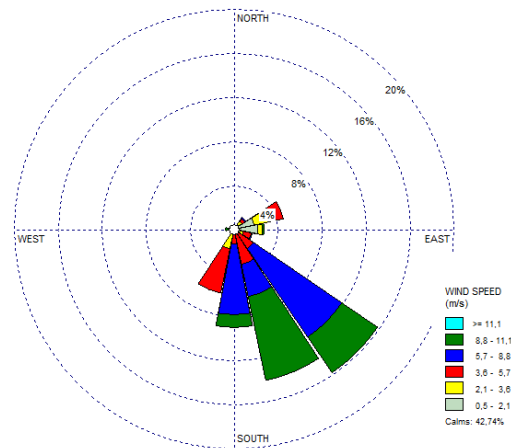
*Wind rose* tiap tiap ketinggian berbeda,hal ini dipengaruhi kecepatan angin tiap tiap ketinggian dan kondisi lingkungan di tempat penelitian. Berikut gambaran arah angin pada tiap tiap ketinggian :



**Gambar 6. Wind rose pada ketinggian 7.3 meter berdasarkan kecepatan angin**



**Gambar 7. Wind rose pada ketinggian 20.6 meter berdasarkan kecepatan angin**



**Gambar 8. Wind rose pada ketinggian 43.2 meter berdasarkan kecepatan angin**

Berdasarkan gambaran dari software lakeenvironment, pada ketinggian 7,3 meter cenderung bergerak ke arah timur dan berbedah dengan kedua ketinggian yang lain yakni ketinggian 20,6 meter dan 43,2 meter yang cenderung bergerak keraha selatan. Pada ketinggian 7,3 meter mengalami pembelokan arrah karena ketinggian anemometer sama dengan atap rumah rumah tiang ada disekeliling mercusuar.

#### 4. KESIMPULAN

1. Analisis *Weibull* menghasilkan energi listrik yang lebih baik setiap harinya jika dibandingkan dengan analisis *Rayleigh*.
2. Dari analisis yang diperoleh bahwa pantai puger sangat berpotensi energi yang cukup baik, ditunjukkan dengan nilai rata rata energi listrik setiap ketinggian lebih dari 300 W/h.
3. Dengan rata rata energi lebih dari 300 W/h tiap bulannya maka daerah pantai puger sangat ideal diaplikasikan on grid dengan pln. Karena sudah melebihi batas minimum on grid yakni 100 W/h.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Terima Kasih kepada kepala navigasi kelas 1 surabaya yang telah memberi ijin menggunakan menara mercusuar yang ada di Pantai Puger Jember sebagai tempat penelitian dan semua pihak yang telah membantu dalam bentuk materi dan non materi sehingga penelitian ini dapat berjalan dengan baik.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Dharmawan, Bhakti. 2014. *Analisa Potensi Tenaga Angin dengan Metode Weibull Analysis di Pantai Puger Kabupaten Jember*. Jember: Universitas Jember  
<http://www.kincirangin.info> (diakses 8 September 2015)
- Mathew, Sathyajith. 2006. *Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. s.l.: Springer, p. 47.