



**DESAIN KONFIGURASI LETAK TURBIN PADA LADANG  
ANGIN PANTAI PUGER KABUPATEN JEMBER**

**SKRIPSI**

oleh

**Setia Indra Waloyo  
NIM 111910201014**

**PROGRAM STUDI STRATA SATU (S1)  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS JEMBER  
2015**



**DESAIN KONFIGURASI LETAK TURBIN PADA LADANG  
ANGIN PANTAI PUGER KABUPATEN JEMBER**

**SKRIPSI**

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat  
untuk menyelesaikan Program Studi S1 Teknik Elektro  
dan mencapai gelar Sarjana Teknik

oleh

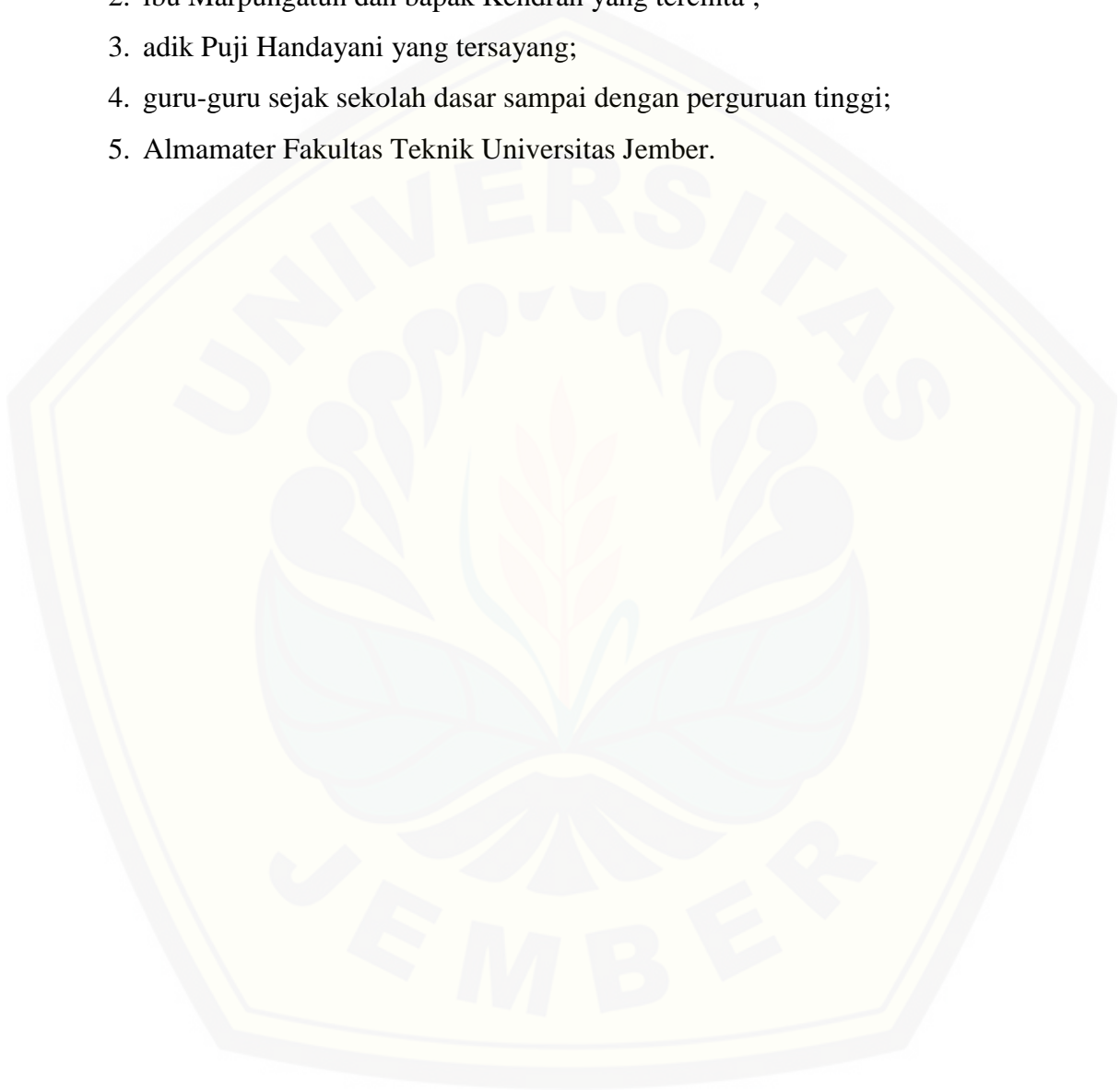
**Setia Indra Waloyo  
NIM 111910201014**

**PROGRAM STUDI STRATA SATU (S1)  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS JEMBER  
2015**

## PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa;
2. ibu Marpungatun dan bapak Kendran yang tercinta ;
3. adik Puji Handayani yang tersayang;
4. guru-guru sejak sekolah dasar sampai dengan perguruan tinggi;
5. Almamater Fakultas Teknik Universitas Jember.

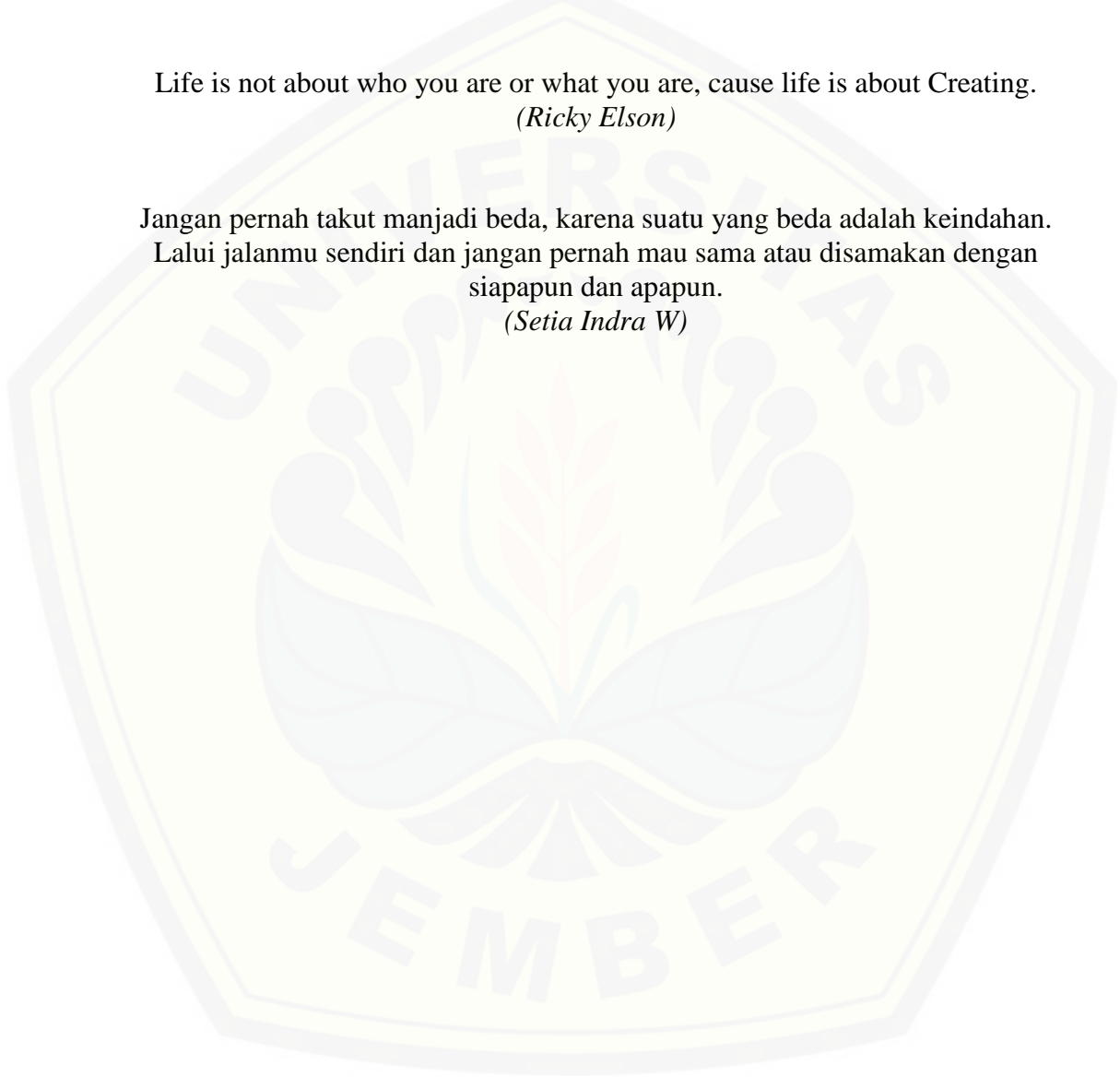


### MOTO

Jika kalian melakukan hal baru pasti akan ada hambatan dan ujian, lalu Anda akan kesal. Maka kikislah waktu tidurmu, kurangi waktu makanmu dan berapa kalipun  
... KITA COBA!!!.  
(*Mr. Honda*)

Life is not about who you are or what you are, cause life is about Creating.  
(*Ricky Elson*)

Jangan pernah takut manjadi beda, karena suatu yang beda adalah keindahan.  
Lalui jalanmu sendiri dan jangan pernah mau sama atau disamakan dengan  
siapapun dan apapun.  
(*Setia Indra W*)



**PERNYATAAN**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

nama : Setia Indra Waloyo

NIM : 111910201014

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul “Desain Konfigurasi Letak Turbin pada Ladang Angin Pantai Puger Kabupaten Jember” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan dalam institusi mana pun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa ada tekanan dan paksaan dari pihak mana pun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 27 November 2015

Yang menyatakan,

Setia Indra Waloyo

NIM 111910201014

**SKRIPSI**

**DESAIN KONFIGURASI LETAK TURBIN PADA LADANG  
ANGIN PANTAI PUGER KABUPATEN JEMBER**

oleh

Setia Indra Waloyo  
NIM 111910201014

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Dr. Triwahju Hardianto, S.T., M.T.

Dosen Pembimbing Anggota : Dr. Azmi Saleh, S.T., M.T.

**PENGESAHAN**

Skripsi berjudul “Desain Konfigurasi Letak Turbin pada Ladang Angin Pantai Puger Kabupaten Jember” telah diuji dan disahkan pada:

hari, tanggal :

tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember.

Tim Penguji:

Pembimbing Utama,

Pembimbing Anggota,

Dr. Triwahju Hardianto, S.T., M.T.

Dr. Azmi Saleh, S.T., M.T.

NIP 197008261997021001

NIP 197106141997021001

Penguji I,

Penguji II,

Ir. Widyono Hadi, M.T.

Dedy Kurnia Setiawan, S.T., M.T.

NIP 196104141989021001

NIP 198006102005011003

Mengesahkan

Dekan Fakultas Teknik,

Ir. Widyono Hadi, M.T.

NIP 196104141989021001

*Desain Konfigurasi Letak Turbin pada Ladang Angin Pantai Puger Kabupaten Jember*

**Setia Indra Waloyo**

*Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember*

**ABSTRAK**

Pantai Puger terletak pada koordinat geografi lintang – bujur  $8^{\circ}22'29,63''$  LS -  $113^{\circ}26'50,56''$  BT yang merupakan daerah pantai yang ada di Kabupaten Jember yang berpotensi untuk pengembangan penelitian pembangkit listrik tenaga angin. Karena hal itu maka dilakukan penelitian untuk mengetahui kecepatan angin dengan menggunakan analisis *weibull*. Dengan menggunakan analisis *weibull* diperoleh nilai parameter bentuk (*k*) sebesar 3.72 dan parameter skala (*c*) sebesar 5.9436 m/s. Setelah diketahui bahwa tempat yang diteliti berpotensi untuk pengembangan pembangkit listrik tenaga angin maka selanjutnya akan dibangun ladang angin di Pantai Puger. Dari ladang angin yang telah dianalisis didapatkan konfigurasi 5Dx9D dengan wake loss paling kecil yaitu 15.03 %. Besarnya potensi daya angin yaitu  $16.59 \text{ kW/m}^2$ , potensi daya listrik sebesar 60.94 kW dan energi listrik yang dihasilkan pada ladang angin sebesar 619.76 kWh.

**Kata kunci:** analisis *weibull*, ladang angin, potensi angin, *wake loss*.



*Design Configuration Layout Turbine on Wind Farm Puger Beach District  
Jember*

**Setia Indra Waloyo**

*Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of  
Jember*

**ABSTRACT**

*Puger beach located in geographic coordinates of latitude - longitude  $8^{\circ} 22'29,63''$  LS -  $113^{\circ} 26'50,56''$  BT is a beach area in Jember potential for the development of wind power research. Because it was then do research to determine wind velocity using weibull analysis. Weibull analysis is obtained by using the value of shape parameter (k) of 3.72 and a scale parameter (c) of 5.9436 m / s. After being known that the place studied potential for the development of the wind power plant will be built further wind farms in Puger Beach. From wind farms that have been analyzed is obtained configuration 5Dx9D with wake loss the smallest is 15:03%. The amount of wind power potential is 16:59 kW / m<sup>2</sup>, the potential of electric power of 60.94 kW and electrical energy produced at wind farms of 619.76 kWh.*

**Key words:** *potential of wind, wake loss, weibull analysis, wind farm.*

## RINGKASAN

**Disain Konfigurasi Letak Turbin Angin pada Ladang Angin Pantai Puger Kabupaten Jember;** Setia Indra Waloyo, 111910201014; 2015; 47 halaman; Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Kebutuhan terhadap energi dari waktu ke waktu terus mengalami peningkatan. Sementara itu sumber energi konvensional terutama minyak bumi dan batu bara terus berkurang, Hal ini yang mendorong penelitian ilmu pengetahuan dan teknologi untuk mencari solusi atas masalah tersebut perlu lebih diprioritaskan. Berbagai teknologi tentang sumber energi yang tak akan habis (energi terbarukan / *renewable energy*) akan terus digali dan dikembangkan. Salah satu teknologi terbarukan adalah konversi energi angin.

Energi angin merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang ada dan masih sedikit pemanfaatannya. Angin dapat terjadi ketika matahari memanaskan udara yang kemudian menyebabkan udara naik membentuk vacuum, kemudian *vacuum* turun ke udara yang lebih dingin dan membentuklah angin. Angin juga terjadi karena pemanasan bumi yang tidak sama oleh matahari. Para ahli mengestimasi bahwa 2% dari energi sinar matahari yang diterima oleh bumi dikonversikan menjadi energi angin (Leahy, 1997). Di Indonesia pemanfaatan energi angin sebagai pembangkit listrik saat ini masih terbatas dan dalam skala kecil. Sistem pemanfaatannya bermacam-macam, salah satunya untuk mengoptimalkan daya keluaran dalam suatu wilayah pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) ini dengan membangun suatu ladang angin (*wind farm*). Ladang angin adalah suatu tempat yang terdiri dari beberapa turbin angin yang disusun sedemikian rupa pada suatu lokasi pembangkit.

Tujuan penelitian ini adalah mendesain suatu konfigurasi letak turbin pada ladang angin di Pantai Puger Kabupaten Jember dengan pengambilan data langsung (data primer) yang dilakukan selama 30 hari. Analisa data angin menggunakan analisis *weibull*. Penelitian dilakukan di 3 tempat yang berbeda yaitu titik A, titik B, dan titik C dengan luasan wilayah seluas 133380 m<sup>2</sup>. Dari penelitian yang telah dilakukan diperoleh kecepatan rata-rata pada titik A sebesar

5.11 m/s, pada titik B sebesar 5.34 m/s, dan pada titik C sebesar 5.4 m/s maka dari itu kecepatan rata-rata untuk daerah yang akan dijadikan ladang angin dapat diketahui yaitu sebesar 5.29 m/s. Untuk jenis turbin yang akan dipakai dipilih dengan spesifikasi dari jenis turbin yang ada, turbin-turbin yang dipakai merupakan turbin keluaran *Anhui Hummer* dengan perbedaan kapasitas yaitu kapasitas 400 W, 500 W, 600 W, 1000 W, dan 2000 W. Dari kelima perbedaan kapasitas ini akan dianalisa mana yang sesuai dengan data angin yang ada dan mampu menghasilkan keluaran yang optimal berdasar kecepatan nominal turbin untuk dapat menghasilkan daya maksimal. Turbin dengan kapasitas 2000 W merupakan jenis turbin yang paling sesuai dan optimal dikarenakan dengan keluaran nominal 2000 W yang dicapai saat kecepatan angin 9 m/s dan mencapai keluaran maksimal sampai 3200 W dengan kecepatan angin diatas 9 m/s. Langkah selanjutnya ialah mendesain konfigurasi untuk ladang angin untuk sumbu vertikal 3 kali sampai 5 kali diameter rotor turbin (3D-5D) dan untuk sumbu horizontal 5 kali sampai 9 kali diameter rotor turbin (5D-9D) [*Danish Wind Industry Association. 2002*]. Dan untuk ladang angin di Pantai Puger Kabupaten Jember konfigurasi yang paling optimal dengan menggunakan turbin angin *Anhui Hummer* 2000 W panjang diameter rotor 3.8 meter yaitu 5Dx9D dengan nilai *wake loss* paling kecil yaitu 14.42% dan jumlah turbin sebanyak 183 buah. Potensi daya angin pada ladang angin Pantai Puger Kabupaten Jember adalah 16.22 kW/m<sup>2</sup>, potensi daya listrik sebesar 59.57 kW, dan energi listrik yang dapat dihasilkan sebesar 619.76 kWh.

## PRAKATA

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Desain Konfigurasi Letak Turbin pada Ladang Angin Pantai Puger Kabupaten Jember”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan saya kesempatan untuk dapat menyelesaikan tanggung jawab ini;
2. ibunda Marpungatun dan ayahanda Kendran yang telah memberikan dukungan lahir dan batin serta cinta kasih yang tak terhingga;
3. adikku tercinta Puji Handayani yang selalu mengingatkan agar selalu ingat padaNya;
4. Dr. Triwahju Hardianto, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Utama dan Dr. Azmi Saleh, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran, dan perhatian dalam penulisan skripsi ini;
5. Ir. Widyono Hadi, M.T. selaku Dosen Penguji I dan Dedy Kurnia Setiawan, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji II yang telah memberikan kritik dan saran yang sangat membangun demi penyempurnaan skripsi ini;
6. Suprihadi Prasetyono, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing selama penulis menjadi mahasiswa;
7. Bambang Supeno, S.T., M.T. selaku Komisi Bimbingan S1 yang telah membantu penulisan skripsi secara administratif;
8. teman-teman UKM Kesenian Universitas Jember yang melarang lulus tepat waktu;
9. sahabat-sahabat Elektro Coret yang selalu menjadi pembeda dan memberi warna dalam 9 periode yang asyik ini;
10. semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Akhirnya penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat.

Jember, 1 Desember 2015

Penulis



DAFTAR ISI

	Halaman
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	ii
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b> .....	iii
<b>HALAMAN MOTO</b> .....	iv
<b>HALAMAN PERNYATAAN</b> .....	v
<b>HALAMAN PEMBIMBINGAN</b> .....	vi
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	vii
<b>ABSTRAK</b> .....	viii
<b>ABSTRACT</b> .....	ix
<b>RINGKASAN</b> .....	x
<b>PRAKATA</b> .....	xii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xiv
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xvi
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xvii
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xviii
<b>BAB 1. PENDAHULUAN</b> .....	1
<b>1.1 Latar Belakang</b> .....	1
<b>1.2 Rumusan Masalah</b> .....	2
<b>1.3 Batasan Masalah</b> .....	2
<b>1.4 Tujuan</b> .....	2
<b>1.5 Manfaat</b> .....	3
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	4
<b>2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Angin</b> .....	4
2.1.1 Jenis-jenis Turbin Angin .....	6
2.1.2 Sistem Pemanfaatan TurbinAngin.....	8
2.1.3 Rugi-rugi Angin Ulakan ( <i>Wake Loss</i> ) .....	11
<b>2.2 Metode Statistik Pengolahan Data Angin</b> .....	13
2.2.1 Metode <i>Rayleigh</i> .....	13

2.2.2 Metode <i>Weibull</i> .....	13
<b>2.3 Distribusi Kecepatan dan Arah Angin</b> .....	15
<b>BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	16
<b>3.1 Jenis Penelitian</b> .....	16
<b>3.2 Tempat dan Waktu Penelitian</b> .....	16
<b>3.3 Alat dan Bahan</b> .....	17
<b>3.4 Prosedur Penelitian</b> .....	17
<b>3.5 Diagram Alir Penelitian</b> .....	19
<b>3.6 Turbin yang Digunakan</b> .....	20
<b>BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	27
<b>4.1 Distribusi <i>Weibull</i></b> .....	22
<b>4.2 Pemilihan Turbin</b> .....	30
<b>4.3 Konfigurasi Turbin Angin</b> .....	31
4.3.1 Konfigurasi Turbin berdasarkan <i>Wake Loss</i> .....	31
4.3.2 Perhitungan Potensi Daya Angin, Potensi Daya Listrik, dan Energi Listrik pada Ladang Angin .....	34
<b>BAB 5. PENUTUP</b> .....	37
<b>5.1 Kesimpulan</b> .....	37
<b>5.2 Saran</b> .....	37
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	38
<b>LAMPIRAN</b> .....	40

**DAFTAR TABEL**

	Halaman
3.1 Jadwal Pelaksanaan Penelitian .....	16
3.2 Turbin Angin <i>Anhui Hummer</i> Kapasitas 400 W sampai 2000 W .....	21
4.1 Kategori Kelas dan Nilai Median Kecepatan Angin.....	26
4.2 Hasil Data Probabilitas.....	28
4.3 Turbin Angin <i>Anhui Hummer</i> Kapasitas 400 W sampai 2000 W .....	30
4.4 Susunan Konfigurasi Ladang Angin .....	31
4.5 Hasil Perhitungan <i>Wake Loss</i> untuk Turbin 2000 W .....	32
4.6 Potensi Daya Angin, Potensi Daya Listrik dan Energi Listrik .....	35

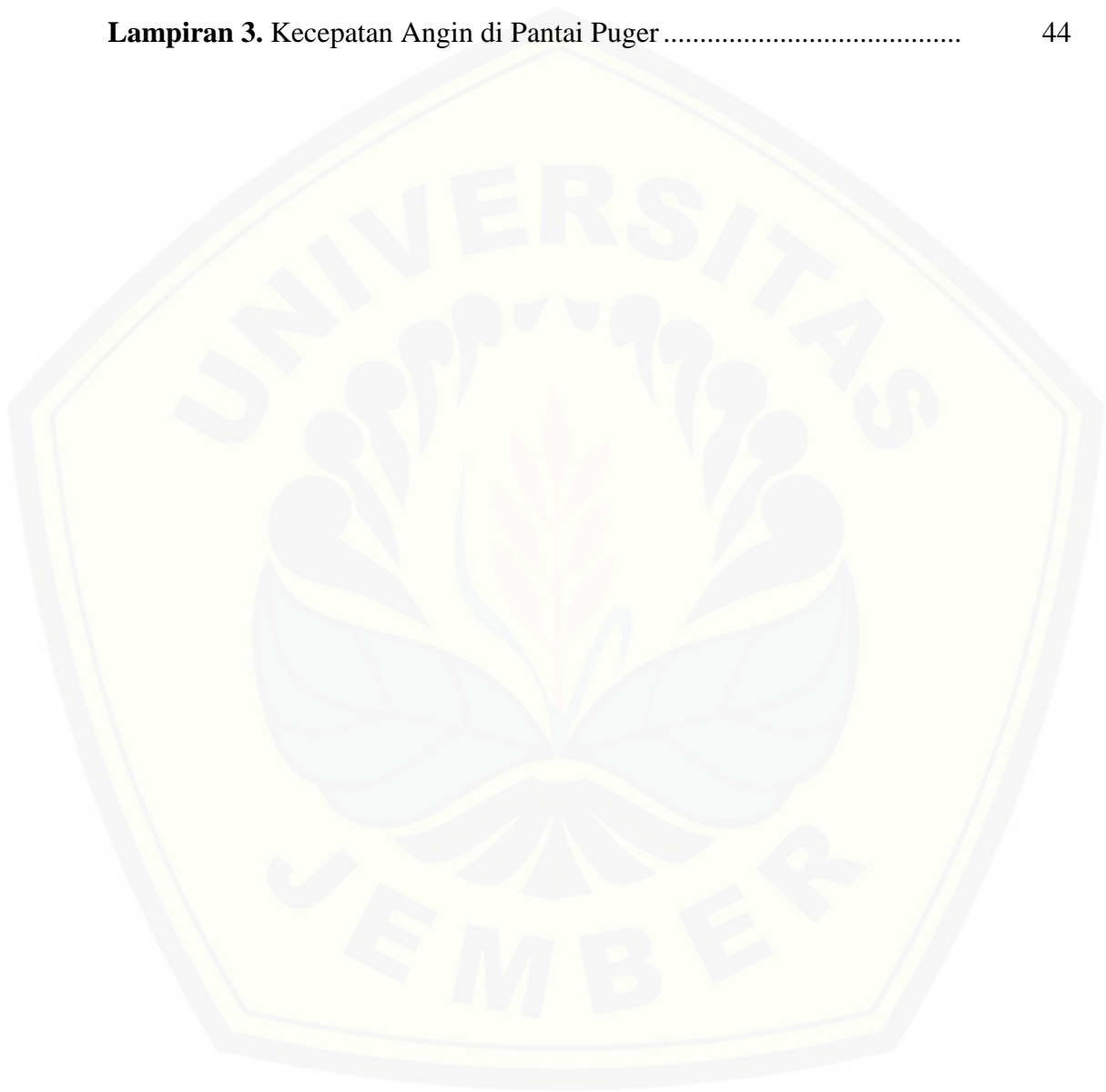


**DAFTAR GAMBAR**

	Halaman
2.1 Turbin Angin merk Enercon 33 (E-33) 330 kW .....	5
2.2 Karakteristik Turbin Angin .....	6
2.3 Konfigurasi Turbin Angin Kecepatan Tetap .....	7
2.4 Konfigurasi Turbin Angin Kecepatan Variabel .....	8
2.5 Turbin Angin <i>Stand Alone</i> .....	8
2.6 Skema Turbin Angin <i>Hibrida</i> .....	9
2.7 Skema Umum <i>Wind Farm</i> .....	9
2.8 Jarak Antar Turbin Angin Secara Vertikal dan Horizontal.....	11
2.9 <i>Wind Rose</i> .....	15
3.1 Pantai Puger .....	16
3.2 Diagaram Alir Penelitian.....	19
4.1 Peta Pantai Puger.....	22
4.2 Kecepatan Angin Terendah, Kecepatan Angin Tertinggi dan Kecepatan Angin Rata-rata Selama 30 Hari di Titik A .....	23
4.3 Kecepatan Angin Terendah, Kecepatan Angin Tertinggi dan Kecepatan Angin Rata-rata Selama 30 Hari di Titik B.....	24
4.4 Kecepatan Angin Terendah, Kecepatan Angin Tertinggi dan Kecepatan Angin Rata-rata Selama 30 Hari di Titik C.....	24
4.5 Kecepatan Angin Titik A, Titik B dan Titik C Berdasarkan Jam .....	25
4.6 Relativitas Kecepatan Angin.....	26
4.7 Grafik Probabilitas <i>Weibull</i> .....	28
4.8 Grafik Probabilitas Kumulatif <i>Weibull</i> .....	29
4.9 Distribusi Arah Angin .....	29
4.10 Perbandingan Nilai <i>Wake Loss</i> terhadap Konfigurasi Ladang Angin.	33

**DAFTAR LAMPIRAN**

	Halaman
<b>Lampiran 1.</b> Ladang Angin Pantai Puger .....	40
<b>Lampiran 2.</b> Koordinat Turbin Angin .....	41
<b>Lampiran 3.</b> Kecepatan Angin di Pantai Puger .....	44



## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Kebutuhan terhadap energi dari waktu ke waktu terus mengalami peningkatan. Sementara itu sumber energi konvensional terutama minyak bumi dan batu bara terus berkurang, Hal ini yang mendorong penelitian ilmu pengetahuan dan teknologi untuk mencari solusi atas masalah tersebut perlu lebih diprioritaskan. Berbagai teknologi tentang sumber energi yang tak akan habis (energi terbarukan / *renewable energy*) akan terus digali dan dikembangkan. Salah satu teknologi terbarukan adalah konversi energi angin.

Energi angin merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang ada dan masih sedikit pemanfaatannya. Pemanfaatan energi angin sebagai sumber energi terbarukan dapat menjadi solusi mengenai permasalahan perubahan lingkungan dan alam karena faktor menipisnya sumber daya alam yang ada.

Angin dapat terjadi ketika matahari memanaskan udara yang kemudian menyebabkan udara naik membentuk vacuum, kemudian *vacuum* turun ke udara yang lebih dingin dan membentuklah angin. Angin juga terjadi karena pemanasan bumi yang tidak sama oleh matahari. Para ahli mengestimasi bahwa 2% dari energi sinar matahari yang diterima oleh bumi dikonversikan menjadi energi angin (Leahy, 1997).

Di Indonesia pemanfaatan energi angin sebagai pembangkit listrik saat ini masih terbatas dan dalam skala kecil. Sistem pemanfaatannya bermacam-macam, salah satunya untuk mengoptimalkan daya keluaran dalam suatu wilayah pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) ini dengan membangun suatu ladang angin (*wind farm*). Laaing angin adalah suatu tempat yang terjadi dari beberapa turbin angin yang disusun sedemikian rupa pada suatu lokasi pembangkit.

Penelitian ini dilakukan untuk melanjutkan penelitian sebelumnya, yaitu penelitian “**Potensi Tenaga Angin dengan Metode Weibull Analisis di Pantai Puger Kabupaten Jember**” yang dilakukan oleh Bhakti Dharmawan. Pada penelitian ini akan membahas mengenai desain ladang angin di Pantai Puger tersebut. Pemilihan Pantai Puger sebagai tempat penelitian selain untuk

melanjutkan dan lebih mengembangkan penelitian yang sudah dilakukan, karena pada Pantai Puger ini memiliki potensi energi angin besar yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber pembangkit listrik tenaga angin serta karena cakupan luasan pantainya yang sangat luas, sehingga cocok apabila dibangun ladang angin di Pantai Puger. Untuk mendesain ladang angin digunakan metode analisis turbin angin dan lokasi ladang angin termasuk letak turbin-turbin angin dilakukan secara matematis berdasarkan data kecepatan rata-rata angin dan arah angin dominan pada daerah tersebut.

### 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, dapat dirumuskan suatu permasalahan yaitu bagaimana mendesain konfigurasi letak turbin angin dalam suatu ladang angin berdasarkan potensi angin agar dapat beroperasi secara optimal.

### 1.3 Batasan Masalah

Pembahasan masalah pada penelitian ini dibatasi oleh beberapa hal, antara lain :

- a. Lokasi yang dijadikan obyek penelitian adalah Pantai Puger Kabupaten Jember
- b. Parameter potensi angin yang digunakan adalah distribusi kecepatan rata-rata angin dan arah angin tanpa mempertimbangkan kontur permukaan dan jenis tutupan lahan.
- c. Turbin Angin yang akan digunakan adalah *Anhui Hummer* dengan kapasitas daya 400 W sampai 2000 W.
- d. Luas area ladang angin ditentukan berdasarkan hasil dari penilaian potensi energi angin pada luas lokasi yang diteliti, yaitu seluas 133380 m<sup>2</sup>.

### 1.4 Tujuan

Tujuan dilakukannya penelitian ini untuk mengetahui potensi energi angin yang ada di Pantai Puger, serta mengetahui letak koordinat dan gambar desain turbin pada suatu ladang angin untuk memperoleh hasil keluaran yang paling optimal.

### 1.5 Manfaat

Manfaat yang diperoleh dari penulisan skripsi ini adalah sebagai berikut:

- a. Mengetahui koordinat dan gambar desain konfigurasi letak turbin dalam ladang angin yang mampu beroperasi secara optimal
- b. Dapat dijadikan referensi untuk pembangunan pembangkit listrik tenaga angin untuk daerah yang sedang diteliti.
- c. Memberikan manfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi khususnya dalam bidang energi terbarukan.
- d. Penelitian ini dapat dijadikan sebagai tolak ukur dan referensi bagi penelitian selanjutnya, serta penerapannya secara langsung untuk bidang energi terbarukan.

## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

Angin merupakan suatu energi yang terjadi ketika matahari memanaskan udara yang kemudian menyebabkan udaranya naik dan membentuk suatu *vacuum*, kemudian *vacuum* turun ke udara yang lebih dingin membentuk angin. Angin juga terjadi karena pemanasan bumi yang tidak sama oleh matahari. Para ahli mengestimasi bahwa 2% dari energi sinar matahari yang diterima oleh bumi di konversi menjadi energi kinetik angin [Leahy,1997].

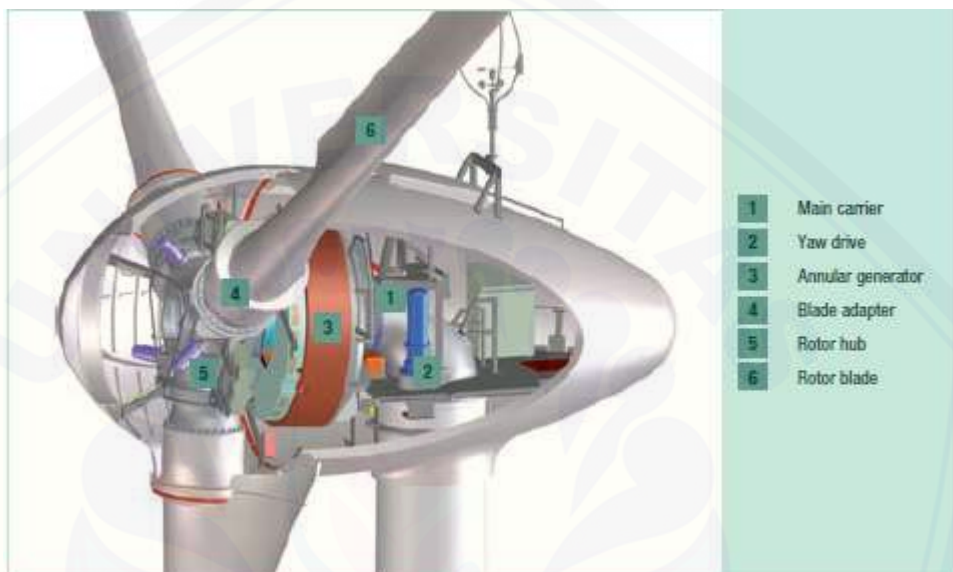
Angin yang dapat digunakan dalam proses konversi energi ini adalah jenis angin permukaan. Angin permukaan ini terjadi pada ketinggian 1-100 meter dari permukaan tanah. Kecepatan angin permukaan dipengaruhi oleh bentuk permukaan, jenis tutupan lahan dan hambatan lainnya, dimana hal tersebut dapat menghambat laju aliran kecepatan angin [Mathew,2006]. Konversi energi ini terjadi pada pembangkit listrik tenaga angin.

### 2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Pembangkit listrik tenaga angin adalah suatu pembangkit listrik yang menggunakan angin sebagai sumber energi yang menghasilkan listrik. Pembangkit ini mengkonversikan energi angin menjadi energi listrik dengan menggunakan generator. Sistem pembangkitan listrik menggunakan angin sebagai sumber energi merupakan sistem *alternative* yang sangat berkembang pesat, mengingat angin merupakan salah satu energi yang tidak terbatas di alam. Turbin angin terbagi dalam dua kelompok, yaitu turbin sumbu horizontal. Turbin angin sumbu horizontal biasanya baik memiliki dua atau tiga modul. Jenis lain yaitu turbin sumbu vertikal. Turbin ini berbilah tiga dioperasikan melawan angin, dengan modul menghadap ke angin. Turbin skala *utility* memiliki berbagai ukuran, dari 100 kilowatt sampai dengan beberapa megawatt. Turbin besar dikelompokkan bersama-sama ke arah angin, yang memberikan kekuatan bersama ke jaringan listrik. Turbin kecil tunggal, di bawah 100 *kilowatt* dan digunakan pada rumah, telekomunikasi, atau pemompaan air. Turbin kecil kadang-kadang digunakan dalam kaitannya dengan generator *diesel*, *batteray* dan sistem *photovoltaik*. Sistem ini disebut sistem angin *hibrid* dan sering digunakan di

lokasi terpencil di luar jaringan, di mana tidak tersedia koneksi ke jaringan utilitas. [Lugi Romadoni, 2013].

Komponen turbin angin terdiri dari rotor dengan sudu sebagai penggerak utama, generator sebagai pengubah energi mekanik menjadi energi listrik, dan sayap/ekor yang berfungsi sebagai pengubah arah dan perangkat sistem control elektrik. Turbin angin terlihat pada gambar 2.1.

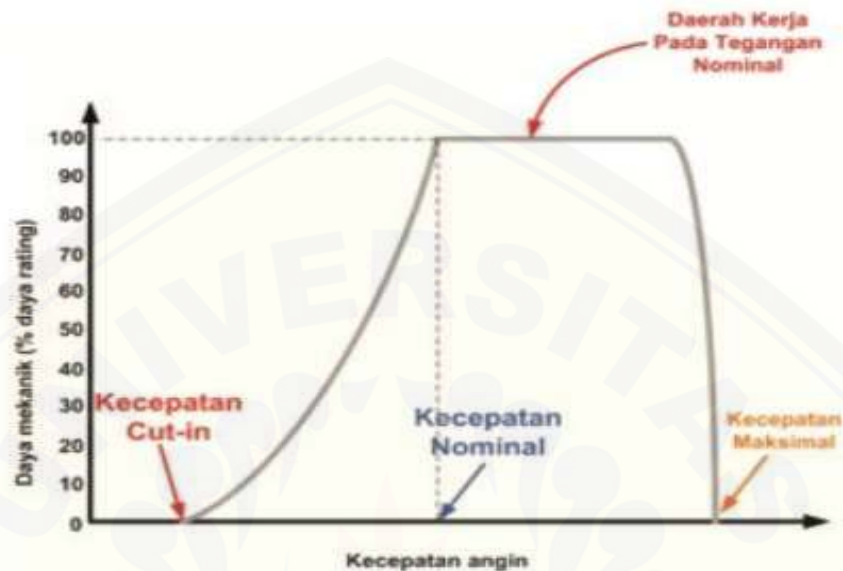


Gambar 2.1. Turbin Angin *Merk Enercon 33 (E-33) 330 kW*

Sumber: *Product overview ENERCON Wind Energy Converters*

Pembangkit listrik dari energi angin merupakan hasil dari penggabungan dari beberapa turbin angin sehingga akhirnya dapat menghasilkan listrik. Cara kerja dari pembangkitan listrik tenaga angin ini yaitu energi angin memutar turbin angin. Kemudian angin akan memutar turbin, lalu diteruskan untuk memutar rotor pada generator di bagian belakang turbin angin. Generator mengubah energi gerak menjadi energi listrik dengan teori medan elektromagnetik, yaitu poros pada generator dipasang dengan material feromagnetik permanen. Setelah itu di sekeliling poros terdapat stator yang bentuk fisisnya adalah kumparan-kumparan kawat yang membentuk *loop*. Ketika poros generator mulai berputar maka akan terjadi perubahan fluks pada stator yang akhirnya karena terjadi perubahan fluks ini akan dihasilkan tegangan dan arus listrik tertentu. Tegangan dan arus listrik yang dihasilkan ini disalurkan melalui kabel jaringan listrik untuk akhirnya

digunakan oleh masyarakat. Tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh generator ini berupa AC (*alternating current*) yang memiliki bentuk gelombang kurang lebih sinusoidal. [Lugi Romadoni, 2013].



Gambar 2.2 Karakteristik Turbin Angin

Sumber: <https://indone5ia.wordpress.com>

Gambar 2.2 menunjukkan pembagian kerja dari turbin angin. Berdasarkan gambar 2.2, daerah kerja angin dapat dibagi menjadi 3, yaitu (a) *cut-in speed* (b) kecepatan kerja angin rata-rata/kecepatan nominal (c) *cut-out speed*. Secara ideal, turbin angin dirancang dengan kecepatan *cut-in* yang seminimal mungkin, kecepatan nominal yang sesuai dengan potensi angin lokal, dan kecepatan *cut-out* yang semaksimal mungkin. Namun secara mekanik kondisi ini sulit diwujudkan karena kompensasi dari perancangan turbin angin dengan nilai kecepatan maksimal ( $V_{cutoff}$ ) yang besar adalah  $V_{cutin}$  dan  $V_{rated}$  yang relatif akan besar pula.

### 2.1.1. Jenis-jenis Turbin Angin

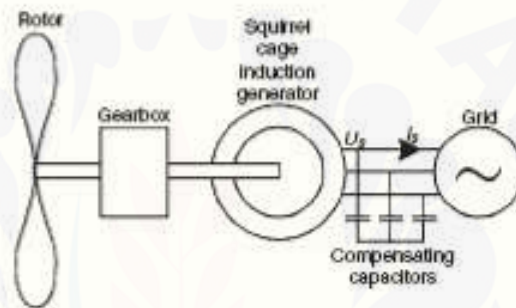
Berdasarkan kecepatan operasionalnya, turbin angin terbagi dalam 2 bagian yaitu:

#### a. Turbin Angin Kecepatan Tetap (*Fix Speed Wind Turbine*)

Turbin angin yang beroperasi pada kecepatan tetap biasanya menggunakan jenis generator induksi sangkar bajing (*squirrel cage induction generator/SCIG*).



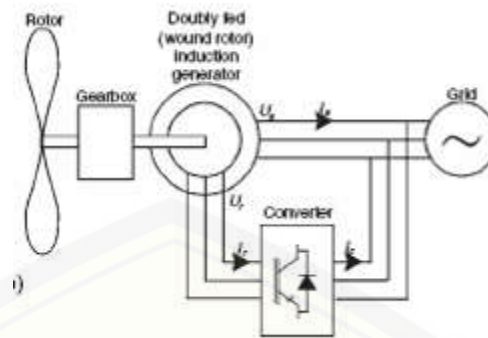
Jenis turbin angin ini mempunyai kelebihan yaitu mudah dibuat dan murah dalam pembuatannya. Penggunaan SCIG biasanya untuk turbin angin yang terhubung ke jaringan (*grid connected*). Kekurangannya dari SCIG membutuhkan daya reaktif yang diambil dari jaringan itu sendiri [Slootweg, J. G., 2001]. Hal ini mengganggu pada saat kondisi jaringan lemah meskipun hal ini dapat diatasi dengan menggunakan kapasitor kompensasi. Selain itu, SCIG tidak dapat digunakan untuk kondisi angin di Indonesia yang relatif berubah-ubah dengan frekuensi perubahannya cukup tinggi. Untuk gambar konfigurasi turbin angin kecepatan tetap dapat dilihat pada gambar 2.3. [Ackermann, Thomas. 2005].



Gambar 2.3. Konfigurasi Turbin Angin Kecepatan Tetap

b. Turbin Angin Kecepatan Variabel (*Variable Speed Wind Turbine*)

Turbin angin yang dapat beroperasi pada kecepatan variabel dapat menggunakan jenis generator induksi *doubly fed* dan generator sinkron (biasanya menggunakan permanent magnet). Karakteristik suatu turbin angin biasanya digambarkan dalam bentuk kurva daya. Data-data lain terkait spesifikasi dari turbin angin yang dibutuhkan adalah tinggi *hub*, diameter rotor, kecepatan angin operasional *V cut-in*, *V rated* dan *V cut-out*, posisi rotor, jenis/tipe generator, tipe kontrol (*stall* atau *pitch*), tegangan output. Perbandingan kurva daya antara turbin angin jenis *variable speed* dan *fix speed* ditunjukkan pada gambar 2.4. [Ackermann, Thomas. 2005].



Gambar 2.4. Konfigurasi Turbin Angin Kecepatan Variabel

### 2.1.2. Sistem Pemanfaatan Turbin Angin

Bentuk pemanfaatan turbin angin di Indonesia secara umum dibagi menjadi 3 kategori, yaitu:

a. *Stand Alone* (berdiri sendiri)

Pada kategori ini, skema yang digunakan biasanya menggunakan baterai sebagai media penyimpan energi. Skemanya dapat dilihat pada gambar 2.5.



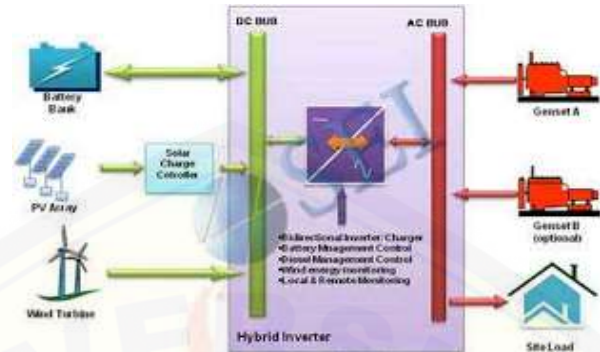
Gambar 2.5. Turbin Angin *Stand Alone*

Sumber: <http://idehijau.com>

b. *Hibrida*

Sistem *hibrida* yaitu sistem menggabungkan beberapa pembangkit listrik dengan sumber energi berbeda, misalnya angin, surya dan *diesel*. Pembangkit listrik tenaga angin dan surya biasanya digunakan untuk membantu pembangkit listrik konvensional (*diesel*) yang bertujuan untuk mengurangi konsumsi pada

bahan bakarnya. Pada gambar 2.6 memperlihatkan skema pembangkit listrik *hibrida*.



Gambar 2.6. Skema Turbin Angin *Hibrida*

Sumber: <http://irawancorporation.blogspot.com>

### c. Ladang Angin (*Wind Farm*)

Pemanfaatan turbin angin sebagai pembangkit listrik tenaga angin untuk menghasilkan daya yang besar, maka membutuhkan area yang luas. Penempatan sejumlah pembangkit listrik tenaga angin pada area yang luas ini biasa disebut dengan ladang angin (*wind farm*). Untuk menentukan besarnya daya yang dihasilkan biasanya tergantung pada spesifikasi turbin angin yang digunakan. Kapasitas turbin angin yang digunakan pada *wind farm* biasanya 500 kW hingga 3 MW dengan jumlah sedikitnya 5 unit [Jain, Pramod. 2011]. Namun hal lain yang harus diperhatikan ialah kondisi angin pada suatu tempat. Karena dengan semakin besarnya kapasitas suatu turbin angin membutuhkan kecepatan angin yang relatif besar juga. Skema umum *wind farm* diperlihatkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Skema Umum *Wind Farm*

Sumber: <http://www.powersystemdesign.com>

Pada suatu ladang angin dapat diketahui besarnya potensi energi angin, potensi energi listrik dan besarnya daya listrik per hari yang dapat dihasilkan dari suatu ladang angin. Besarnya nilai potensi energi angin dapat diketahui dengan persamaan 2.1 di bawah ini.

$$P_V = \frac{1}{2} \rho v^3 \sum T \quad (2.1)$$

dengan,  $P_V$  : Daya angin (watt/m<sup>2</sup>)  
 $\rho$  : Densitas udara (kg/m<sup>2</sup>)  
 $v$  : Kecepatan angin (m/s)  
 $\sum T$  : Jumlah turbin angin

Besarnya potensi energi listrik yang ada pada suatu ladang angin dapat diketahui dengan persamaan 2.2.

$$P_D = \frac{1}{2} C_p \eta_D \eta_G \rho A v^3 \sum T \quad (2.2)$$

dengan  $P_D$  : Daya Listrik (Watt)  
 $C_p$  : Koefisien Daya  
 $\eta_D$  : *drive train* efisiensi dengan nilai 0.9  
 $\eta_G$  : Efisiensi generator  
 $A$  : Luasan rotor (m<sup>2</sup>)  
 $\rho$  : Densitas udara (kg/m<sup>2</sup>)  
 $v$  : Kecepatan angin (m/s)  
 $\sum T$  : Jumlah turbin angin

Dan besarnya energi listrik yang dihasilkan dapat diketahui mengalikan daya listrik dan lamanya waktu turbin dapat berputar (persamaan 2.4). Berapa lama turbin dapat berputar dapat diketahui dengan persamaan 2.3.

$$P(V_1 < V < V_2) = e^{-\left(\frac{V_1}{c}\right)^k} - e^{-\left(\frac{V_2}{c}\right)^k} \quad (2.3)$$

Dari hasil yang didapatkan dari persamaan (2.3) akan didapatkan nilai parameter waktu lamanya turbin menghasilkan energi listrik. Parameter yang dihasilkan dapat digunakan untuk mendapatkan nilai energi listrik yang dihasilkan perhari dapat diketahui dengan persamaan 2.4. Selama kecepatan angin yang

dihasilkan berpotensi, maka hasil untuk perhitungan daya listrik akan semakin besar. Hal ini juga dipengaruhi oleh luasan sapuan rotor untuk menggerakkan generator listrik. Sehingga didapatkan rumus untuk nilai daya listrik sebagai berikut :

$$E = P_v \times P(V_1 < V < V_2) \times \sum T \quad (2.4)$$

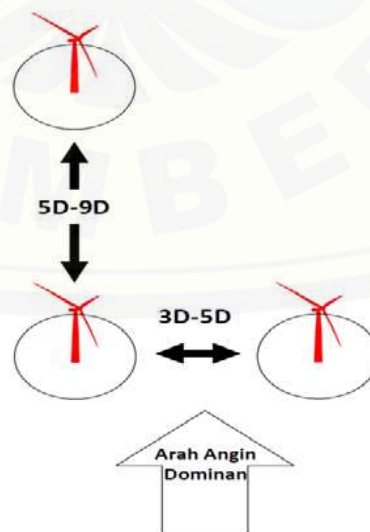
dengan

E	= Energi listrik (Wh)
$P(V_1 < V < V_2)$	= Lamanya turbin bekerja
$\sum T$	= Jumlah turbin angin

### 2.1.3. Rugi-rugi Angin Ulakan (*Wake Loss*)

Angin ulakan adalah keadaan dimana angin mengalami turbulensi. Turbulensi ini terjadi karena angin yang diterima pada turbin angin pertama tidak sama nilai kecepatan anginnya dengan turbin angin kedua dan seterusnya, hal ini terjadi karena akibat pemakaian daya angin oleh rotor turbin yang pertama.

Salah satu hal yang perlu diperhatikan dalam pembuatan ladang angin adalah ketepatan penentuan lokasi masing-masing turbin angin. Susunan penempatan (*array*) turbin angin idealnya berjarak 5-9 kali diameter rotor pada arah angin dominan untuk sumbu horisontal (5D-9D) dan 3-5 kali diameter rotor pada sumbu vertikal (3D-5D) [Danish Wind Industry Association. 2002] atau seperti diperlihatkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8. Jarak Antar Turbin Angin Secara Vertikal dan Horizontal

Banyaknya turbin yang ada pada suatu ladang angin dapat diketahui dengan mencari jumlah turbin yang dapat disusun secara horizontal (persamaan 2.5) dan jumlah turbin yang dapat disusun secara vertikal (persamaan 2.6).

$$\Sigma_{TH} = \frac{\text{Panjang ladang angin}}{\text{Konfigurasi secara Horizontal x Diameter rotor}} \quad (2.5)$$

$$\Sigma_{TV} = \frac{\text{Lebar ladang angin}}{\text{Konfigurasi secara Vertikal x Diameter rotor}} \quad (2.6)$$

Setelah diketahui jumlah turbin secara horizontal maupun vertikal, maka jumlah turbin yang dapat disusun dalam suatu ladang dapat diketahui dengan perkalian jumlah turbin yang disusun secara horizontal dikali dengan jumlah turbin secara vertikal, atau seperti persamaan 2.7.

$$\Sigma T = \Sigma_{TH} \times \Sigma_{TV} \quad (2.7)$$

dengan,  $\Sigma T$  : Jumlah turbin angin  
 $\Sigma_{TH}$  : Jumlah turbin ketika disusun horizontal  
 $\Sigma_{TV}$  : Jumlah turbin ketika disusun vertikal

Angin ulakan dapat menyebabkan turbin angin tidak dapat bekerja secara optimal karena angin yang menerpa rotor turbin yang berada di belakang akan mengalami penurunan nilai kecepatan angin.

Penurunan kecepatan angin secara efektif pada turbin angin dapat dihitung menggunakan persamaan 2.8 [Ibrochim, Malik. 2012].

$$d(V) = U_o - U_x = U_o \frac{(1 - \sqrt{1 - C_t})}{(1 + \frac{2kx}{D})^2} \quad (2.8)$$

dengan;  $U_o$  : Kecepatan angin depan (m/s)  
 $U_x$  : Kecepatan angin ulakan pada jarak  $x$   
 $D$  : Diameter rotor (m)  
 $k$  : Konstanta *wake decay* biasanya bernilai 0,075 untuk *onshore* dan nilai untuk *offshore* 0,04  
 $C_t$  : Koefisien daya dorong

$$C_t = 4a(1-a) \text{ dengan } a < 0.5$$

*Wake loss* adalah rugi-rugi angin yang ditimbulkan oleh turbulensi rotor turbin. *Wake loss* ini akan sangat mempengaruhi terhadap perubahan kecepatan angin yang diterima oleh turbin angin di depan dengan belakangnya.

Secara matematis nilai *wake loss* dapat dicari dengan mengalikan nilai penurunan kecepatan secara horizontal dengan penurunan angin secara vertikal dibagi dengan kecepatan angin depan dikali dengan seratus persen, atau dapat dilihat pada persamaan 2.9.

$$\text{Wake Loss} = \left( \frac{d(v)_{\text{horizontal}} \times d(v)_{\text{vertikal}}}{U_0} \right) \times 100\% \quad (2.9)$$

Semakin kecil *wake loss* maka secara keseluruhan kecepatan angin rata-rata relatif sama dan stabil, hal karena penurunan kecepatan yang terjadi pada turbin di belakang relatif kecil pula. Jadi kecepatan angin yang diterima pada turbin belakang hampir sama dengan turbin angin depan.

## 2.2. Metode Statistik Pengolahan Data Angin

Metode statistik yang biasanya digunakan untuk mengetahui karakteristik angin adalah metode fungsi distribusi *Rayleigh* dan *Weibull*. Kedua metoda statistik tersebut mempunyai parameter yang berbeda. Berikut penjelasan dari metode *Rayleigh* dan *Weibull*.

### 2.2.1. Metode *Rayleigh*

Pada metoda distribusi *Rayleigh* hanya terdapat satu parameter saja, yakni parameter skala  $c$ . Pada metoda *Rayleigh* kita hanya dapat mengetahui besaran atau nilai distribusi saja sedangkan untuk mengetahui durasi kecepatan anginnya kita tidak bisa mengetahui karena nilai parameter bentuk  $k$  pada metoda *Rayleigh* telah ditentukan nilainya yakni  $k = 2$  (biasa disebut distribusi normal).

### 2.2.2. Metode *Weibull*

Pada metoda distribusi *Weibull* terdapat 2 parameter yakni parameter bentuk  $k$  (tanpa dimensi) dan parameter skala  $c$  (m/s). Nilai parameter  $k$  diperoleh dengan

nilai yang berdasarkan data-data kecepatan angin aktual di lapangan sehingga cukup representatif untuk mengetahui distribusi dari sejumlah data kecepatan angin yang bervariasi. Untuk menentukan nilai parameter bentuk  $k$ , jika nilai tengah dan variannya telah diketahui dapat menggunakan persamaan 2.10 (Mathew, Sathyajith. 2006).

$$k = \left( \frac{\sigma_v}{V_m} \right)^{-1.090} \quad (2.10)$$

dengan;  $\sigma_v$  : nilai standar deviasi kecepatan angin  
 $V_m$  : kecepatan angin rata-rata (m/s)

Nilai kecepatan angin rata-rata dan standar deviasi dapat dicari dengan menggunakan persamaan 2.11 dan persamaan 2.12 [Mathew, Sathyajith. 2006].

$$V_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \quad (2.11)$$

$$\sigma_V = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (V_i - V_m)^2}}{n} \quad (2.12)$$

dengan,  $V_i$  : Kecepatan angin pada data  $i$   
 $n$  : banyaknya data

Variasi kecepatan angin sangat dipengaruhi oleh besar kecilnya nilai parameter  $k$  dimana, semakin besar nilai parameter  $k$  maka kecepatan angin bervariasi sedikit dan sebaliknya semakin kecil nilai parameter  $k$  maka semakin besar variasi kecepatan anginnya.

Sedangkan untuk mendapatkan nilai dari parameter skala  $c$  dengan menggunakan persamaan 2.13 [Mathew, Sathyajith. 2006].

$$c = \frac{V_m k^{2.6674}}{0.184 + 0.816 k^{2.73855}} \quad (2.13)$$

Semakin kecil nilai  $c$  maka kurva akan bergeser ke arah kecepatan angin yang lebih rendah demikian juga sebaliknya, jika nilai  $c$  besar maka, kurva akan bergeser ke arah kecepatan angin yang lebih tinggi. Fungsi distribusi dari probabilitas distribusi Weibull  $f(v)$  didefinisikan dengan persamaan (2.14) [Gary, L.Johnson. 2006].

$$f(V) = \frac{k}{c} \left( \frac{V}{c} \right)^{k-1} \exp -\left( \frac{V}{c} \right)^k \quad (2.14)$$



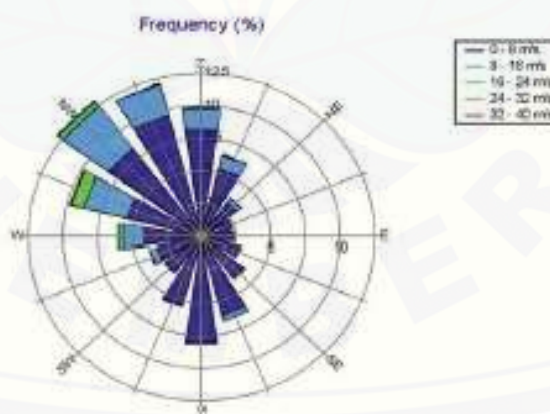
Probabilitas kumulatif menunjukkan lamanya turbin dapat bekerja, atau secara matematis dapat dirumuskan seperti persamaan 2.15.

$$F(V) = 1 - \exp^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} \quad (2.15)$$

### 2.3. Distribusi Kecepatan dan Arah Angin

Distribusi kecepatan angin dapat diketahui dari data kecepatan angin hasil pemantauan langsung yang kemudian dihitung secara statistik. Hasil dari perhitungan tersebut akan menunjukkan dominasi dan variabilitas dari nilai kecepatan angin pada lokasi yang sedang diteliti. Analisa dari distribusi kecepatan angin dapat dicari dengan menggunakan metode *Reyleigh* atau metode *Weibull*. Distribusi kecepatan angin merepresentasikan sebaran kecepatan angin yang ada pada suatu tempat.

Distribusi arah angin atau *wind rose* adalah suatu bentuk grafis yang menunjukkan arah angin pada suatu wilayah. Dari *wind rose* tersebut dapat diketahui arah angin dominan yang ada pada suatu wilayah. Arah angin dominan ini dapat dijadikan acuan untuk pemasangan arah dari rotor turbin angin. Contoh *wind rose* diperlihatkan pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 *Wind Rose* (Jain, Pramod. 2011).

Selain menunjukkan arah angin yang paling dominan, *wind rose* menampilkan pula kelas kecepatan angin yang ada pada arah angin dominan tersebut. Hal ini memudahkan untuk pemilihan jenis turbin yang akan dipasang sesuai dengan kecepatan angin yang pada arah dominan tersebut.

### BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Jenis Penelitian

Penelitian yang dilakukan yaitu analisa data-data angin yang diperoleh berdasarkan pengukuran langsung di Pantai Puger (data primer) selama 30 hari. Hasil analisa ini digunakan sebagai acuan untuk mendesain ladang angin yang optimal di Pantai Puger Kabupaten Jember.

#### 3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di daerah Puger Kulon, tepatnya di pantai Puger Kabupaten Jember. Pantai Puger ini terletak pada koordinat geografi lintang – bujur  $8^{\circ}22'29,63''$  LS -  $113^{\circ}26'50,56''$  BT seperti terlihat pada gambar 3.1



Gambar 3.1 Pantai Puger

Penelitian ini dilakukan mulai bulan Mei 2015 sampai dengan bulan Oktober 2015. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Jadwal Pelaksanaan Penelitian

No	Kegiatan	Bulan					
		Mei	Juni	Juli	Agustus	September	Oktober
1	Persiapan						
2	Studi Literatur						

No	Kegiatan	Bulan					
		Mei	Juni	Juli	Agustus	September	Oktober
3	Pengumpulan Data						
4	Analisa Data						
5	Kesimpulan Saran						
6	Penulisan Laporan Akhir						

### 3.3 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan yaitu:

a. Laptop

Laptop digunakan sebagai pengolah data-data yang diperoleh dari penelitian. Data-data yang diolah antara lain; Kecepatan angin, Arah angin, dan lain-lain.

b. Anemometer

Anemometer digunakan untuk mengukur kecepatan pada daerah penelitian

c. Alat tulis

Alat tulis digunakan untuk mencatat, menganalisis data-data yang akan diolah.

### 3.4 Prosedur Penelitian

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

a. Tahap Persiapan

Tahap persiapan ini berisi tentang pengurusan administrasi mengenai peminjaman alat dan administrasi lainnya, seminar proposal, 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

Pada tahap pengumpulan data akan dilakukan selama 30 hari di 3 titik yang berbeda pada lokasi penelitian. Lamanya waktu 30 hari ini dilakukan sebagai sampel data kecepatan angina agar diketahui kecepatan rata-rata angin yang ada. Hal ini berfungsi untuk pemilihan jenis turbin yang akan dipasang pada penelitian ini. Sedangkan 3 titik yang berbeda tersebut dimaksudkan untuk dapat mengetahui sebaran rata-rata angin yang ada pada lokasi penelitian. Karena tema pada penelitian ini adalah desain ladang angin maka luasan wilayah yang akan dijadikan ladang kemungkinan akan berbeda mengenai kecepatan rata-rata angin yang ada.

#### d. Analisa Data

Analisa data dilakukan setelah semua data yang dibutuhkan untuk analisa telah tersedia, yaitu data tentang kecepatan rata-rata angin selama satu bulan dan arah angin pada daerah tersebut. Kemudian memilih beberapa jenis turbin untuk analisa. Analisa dilakukan berdasarkan luas wilayah yang akan dijadikan ladang dengan memperhatikan angin ulakan (*wake loss*) berdasarkan diameter rotor turbin dengan persamaan 2.6. Sedangkan untuk arah angin diperlukan guna mengatur arah dominan dari turbin.

Analisa yang dilakukan untuk dapat menentukan lokasi turbin pada ladang angin dihitung dengan perhitungan manual untuk berbagai jenis turbin berdasarkan letak posisi ideal dari turbin berdasarkan panjang rotornya. Jarak ideal dari turbin satu ke turbin lainnya yaitu 5-9 kali kali diameter rotor pada arah angin dominan untuk posisi horizontal (5D-9D) dan 3-5 kali diameter rotor pada posisi vertikal (3D-5D).

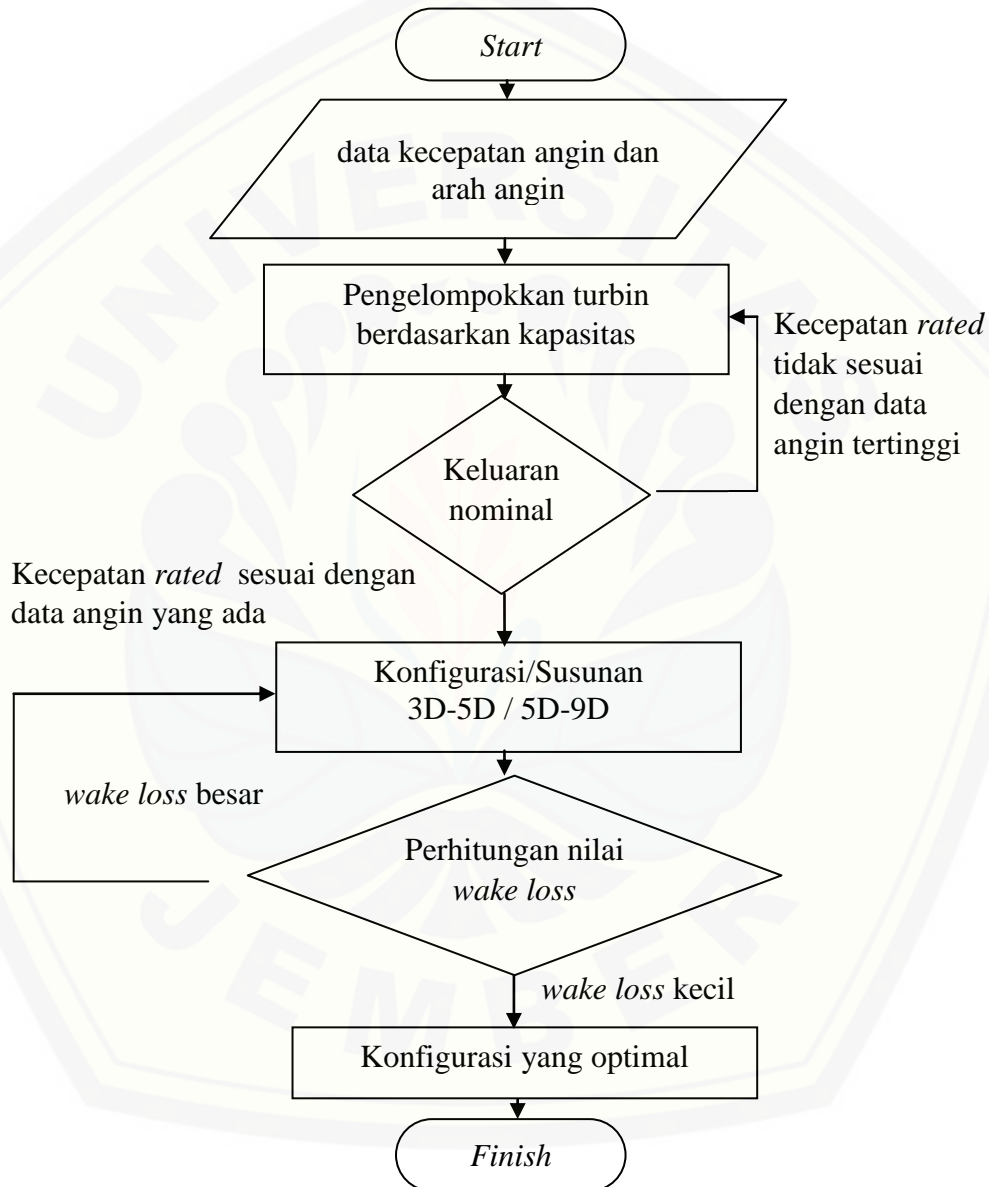
#### e. Pengambilan Kesimpulan dan Saran

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.

### 3.5 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir untuk penelitian desain konfigurasi letak turbin untuk ladang angin Pantai Puger Kabupaten Jember dapat dilihat pada gambar 3.2 di bawah ini.



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian

Dari diagram alir pada gambar 3.2 dapat dijelaskan bahwa penelitian dimulai dengan melakukan penelitian untuk mendapatkan data kecepatan angin

dan data arah angin. Penelitian ini dilakukan selama 30 hari dengan melakukan pengukuran kecepatan angin (data primer) di tempat penelitian. Sedangkan untuk data arah angin diambil dari data sekunder, yaitu dari pengukuran di tempat penelitian yang sama dengan menggunakan anemometer berbasis kecepatan dan arah angin.

Langkah selanjutnya memilih jenis-jenis turbin yang akan dipakai. Pemilihan turbin ini didasarkan pada batasan masalah yang telah ditentukan yaitu berkapasitas 400 W sampai 20000 W dengan turbin *Anhui Hummer*. Dari turbin-turbin yang ada, akan dipilah dan diseleksi berdasarkan nilai kecepatan nominal pada masing-masing turbin. Turbin yang akan digunakan untuk analisa adalah turbin angin yang memiliki nilai kecepatan nominal yang paling tinggi dengan data angin yang sesuai pada tempat penelitian. Setelah turbin angin yang akan digunakan sudah ditentukan, maka langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan untuk semua kemungkinan yang ada untuk konfigurasi-konfigurasi pada ladang angin berdasarkan diameter rotor turbin yang akan digunakan. Konfigurasi-konfigurasinya adalah 3 kali sampai 5 kali diameter rotor turbin untuk sumbu vertikal dan 5 kali sampai 9 kali diameter rotor untuk sumbu horizontal. Kemudian menentukan besarnya nilai *wake loss* untuk masing-masing konfigurasi. Konfigurasi dengan nilai *wake loss* merupakan konfigurasi yang optimal, hal ini karena penurunan kecepatan angin yang diterima oleh turbin angin belakang relatif kecil. Maka dari itu dari segi efisiensi konversi energi angin ke energi listrik yang dilakukan oleh generator turbin lebih optimal. Maka dari itu semakin kecil nilai *wake loss* menunjukkan semakin kecil pula nilai penurunan kecepatan angin yang ada pada turbin kedua.

### **3.6 Turbin yang Digunakan**

Tipe turbin yang akan digunakan mempunyai kapasitas 400 W sampai 2000 W (sesuai batasan masalah pada penelitian ini). Turbin-turbin yang dipilih ini adalah jenis-jenis turbin yang terjual di pasaran sesuai dengan kapasitas yang telah disebutkan sebelumnya. Secara lebih lengkap turbin yang akan digunakan dapat dilihat pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 Turbin Angin *Anhui Hummer* Kapasitas 400 W sampai 2000 W(Sumber: *Anhui Hummer Dynamo CO., LTD*)

	<b>400 W</b>	<b>500 W</b>	<b>600 W</b>	<b>1000 W</b>	<b>2000 W</b>
Rated Power (W)	400	500	600	1000	2000
Max Output Power	600	1000	800	2000	3200
Rotor Diameter	1.25	2.5	1.25	3.1	3.8
Cut-in (m/s)	2.5	3	2.5	3	3
Rated Speed (m/s)	11	7	11	9	9
Cut-out (m/s)	50	50	50	50	50
Cp	0.4	0.48	0.45	0.45	0.45
Efisiensi	0.8	0.78	0.8	0.8	0.8
Drain Train	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9

Turbin-turbin yang ada pada tabel 3.2 adalah turbin angin *Anhui Hummer* dengan kapasitas 400 W sampai 2000 W. Dengan parameter perbedaan kapasitas, maksimum keluaran turbin, diameter rotor turbin, *cut-in*, Cp, dan efisiensi.