

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan rahmat dan berkat-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik yang berjudul "Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Angin di PT Ajinomoto Kota Mojokerto". Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik dari Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan, bimbingan serta dorongan dari semua pihak, penyelesaian skripsi ini tidak mungkin bisa terwujud. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Sholeh Hadi Pramono, MS selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
2. Bapak M. Azis Muslim, ST., MT., Ph.D selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
3. Bapak Mochammad Rif'an S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro.
4. Bapak Wijono, Ir. MT Ph.D. selaku KKDK konsentrasi energi elektrik Teknik Elektro.
5. Bapak Unggul Wibawa, Ir., M.Sc. dan Bapak Teguh Utomo, Ir., MT. selaku dosen pembimbing skripsi yang telah banyak memberikan pengarahan dan bimbingan dalam penyelesaian skripsi ini serta atas segala bentuk bantuan dan saran yang membangun.
6. Dosen dan karyawan Teknik Elektro Universitas Brawijaya, keluarga besar mahasiswa Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
7. Rekan-rekan mahasiswa Teknik Elektro angkatan *CORE* 2007, yang telah menemani saya selama 4 tahun kuliah di elektro, *thank for all your friendship*.
8. Indra, Vandra, Maul, Yuli, Puput, Eres, Rian, Galih, Brian, Ferdi, Gosong, Tombud dan seluruh teman-teman di kepengurusan HME 10/11, terlalu banyak kenangan yang kita ukir bersama sehingga sulit rasanya diri ini melupakan kalian semua, *we are the best*.
9. Rekan-rekan seperjuangan di Laboratorium Mesin Elektrik, Kimpul, Yoris, dan Wisnu serta mas-mas dan adik-adik yang tanpa kenal lelah memberikan ilmu kepada para praktikan.

10. Anggota-anggota saya di Departemen Eksternal, Rr, Ayu, Arga, Togar, Faiz, Dwi Indra, Dieny, Averus, Bayu, Dan Ardent, terima kasih atas masa jabatan yang menyenangkan.
11. Seseorang yang selalu menginspirasi saya sehingga saya semangat dalam pengerjaan skripsi ini.
12. PT Ajinomoto yang telah bersedia menjadi lokasi penelitian dari skripsi saya ini, semoga dapat menjadi hal yang berguna bagi semuanya.
13. Adik saya, Gayatri Putri MK yang selalu ada untuk menghibur kaka tercintanya ini, raihlah cita-citamu setinggi langit.
14. Bapak dan Ibu, Drs Gatot M dan Dr.Ir Tri Dewanti W, Mkes, orang tua penulis yang sudah berjuang sekuat tenaga untuk membiayai kuliah penulis, memberi dorongan semangat, dan memberikan kepercayaan yang sungguh kepada penulis serta atas segala bentuk dukungan moral dan panjatan doa yang tidak terputus. Skripsi ini untuk Bapak dan Ibu.
15. Semua pihak yang telah memberikan bantuan serta dukungan baik yang tidak dapat disebutkan satu persatu secara langsung maupun tidak langsung atas penyusunan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini belumlah sempurna, karena keterbatasan ilmu dan kendala-kendala lain yang terjadi selama pengerjaan skripsi ini. Oleh karena itu saran dan kritik mengenai penelitian ini diharapkan oleh penulis. Saran dan kritik ditujukan agar penelitian ini dapat menjadi karya tulis yang lebih baik dan lebih berguna. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat dan dapat digunakan untuk pengembangan lebih lanjut.

Malang, November 2011

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI.....	iii
DAFTAR TABEL.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR LAMPIRAN.....	x
ABSTRAK	xi
ABSTRACT	xii
BAB I	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II	5
2.1. Energi	5
2.2. Konversi Energi	5
2.3. Angin Sebagai Sumber Energi	6
2.4. Konversi Energi Listrik dari Tenaga Angin.....	6
2.5. Pembangkit Listrik Tenaga Angin	8
2.6. Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Angin	9
2.7. Jenis-Jenis Pembangkit Listrik Tenaga Angin.....	11
2.7.1 Turbin Angin Sumbu Horizontal.....	11
2.7.2 Turbin Angin Sumbu Vertikal.....	12
2.8. Prinsip Aerodinamika.....	14

2.9.	Daya Angin (power).....	15
2.10.	Daya turbin Angin.....	15
2.11.	Betz Law	16
2.12.	Sudu kincir angin	16
2.12.1	Bentuk sudu kincir angin.....	16
2.12.2	Karakteristik Sudu tipe <i>Airfoil</i> NACA 4412	17
2.12.3	Luas daerah sapuan angin.....	18
2.12.4	Dynamic Pressure	19
2.12.5	Pressure/tekanan pada sudu	19
2.12.6	Torsi.....	20
2.12.7	Kecepatan Sudut (ω)	20
2.12.8	Putaran Turbin Angin	21
2.12.9	Tip Speed Ratio	21
2.12.10	Soliditas	21
2.13.	Generator.....	22
2.13.1	Klasifikasi Generator	22
2.13.2	Prinsip Kerja Generator Magnet Permanen.....	22
2.14.	Konversi Energi Elektromekanik.....	24
2.15.	Sistem Kelistrikan Pembangkit Listrik Tenaga Angin.....	24
BAB III	26
3.1	Kerangka Umum	26
3.2	Studi Literatur	27
3.3	Survey Dan Pengambilan Data Yang Diperlukan.....	27
3.4	Perancangan	28
3.5	Analisis Data yang Telah Dirancang.....	28
3.6	Kesimpulan dan Saran.....	29

BAB IV	30
4.1 Identifikasi Lokasi.....	30
4.2 Potensi Energi Angin yang Terdapat pada PT Ajinomoto.....	30
4.3 Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Angin.....	37
4.3.1 Perancangan Sudu Kincir Angin	38
4.3.1.1 <i>Tip Speed Ratio</i>	39
4.3.1.2 Jumlah Sudu	39
4.3.1.3 Jenis sudu.....	39
4.3.1.4 Dimensi Sudu	40
4.3.1.5 Bahan Sudu.....	43
4.3.1.6 Luas daerah sapuan angin.....	43
4.3.1.7 Soliditas	44
4.3.1.8 Kerapatan Udara (ρ)	45
4.3.1.9 <i>Dynamic Pressure</i>	45
4.3.1.10 Lift Pressure (pL) dan Drag Pressure (pD).....	46
4.3.1.11 Kecepatan putaran turbin angin.....	47
4.3.1.12 Perhitungan Daya	49
4.3.2 Perancangan Sistem <i>Mechanical Electric Turbin</i>	51
4.3.2.1 Pemilihan Generator yang Sesuai.....	51
4.3.2.2 Perancangan Jenis Generator.....	52
4.3.2.3 Pengkopelan Antara Generator dengan Sudu.....	53
4.3.2.4 Daya Total yang Dibangkitkan.....	54
4.3.2.5 Torsi Turbin Angin.....	55
4.3.3 Perancangan Tower	56
4.3.3.1 Ketinggian Tower.....	56
4.3.3.2 Bahan Tower	57
4.3.4 Desain Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Angin	58

4.3.5	<i>Finishing</i>	59
4.4	Potensi Energi Tahunan	63
4.5	Pengujian dengan Menggunakan <i>Software</i> Blade Designer	64
4.6	Pengujian dengan Pembangkit Listrik Tenaga Angin di Pasaran	68
4.6.1	AIR-X	69
4.6.2	City Swallow 400 Watt	71
BAB V	73
5.1	Kesimpulan	73
5.2	Saran.....	73
DAFTAR PUSTAKA	74

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tingkat Kecepatan Angin	7
Table 2.2 Kondisi Kecepatan Angin.....	8
Tabel 2.3 Tabel Jenis Sudu Angin	17
Tabel 2.4 Sudut Penempatan Untuk 5 Station Sudu	17
Tabel 2.5 Ketebalan Sudu Dalam Porsen Diameter Untuk 5 Station	18
Tabel 4.1 Hasil Perhitungan <i>Dynamic Pressure</i>	46
Tabel 4.2 Hasil Perhitungan Lift dan Drag Force.....	47
Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Kecepatan Sudut	48
Tabel 4.4 Hasil Perhitungan Putaran Rotor	48
Tabel 4.5 Hasil Perhitungan Daya yang Dihasilkan Angin	49
Tabel 4.6 Hasil Perhitungan Daya yang Dapat Diambil dari Angin	50
Tabel 4.7 Hasil Perhitungan Daya dengan C_p 0,4.....	51
Tabel 4.8 Hasil Perhitungan Daya Total.....	55
Tabel 4.9 Hasil Perhitungan Torsi	56
Tabel 4.10 Hasil Perhitungan Potensi Energi Tahunan	63
Tabel 4.11 Hasil Perhitungan Harga untuk Potensi Energi Angin per Tahun.....	63
Tabel 4.12 Hasil Perbandingan putaran rotor teoritis dan <i>software</i>	68
Tabel 4.13 Hasil Perbandingan daya teoritis dan <i>software</i>	68
Tabel 4.14 Hasil Perbandingan daya turbin yang dirancang dengan AIR-X.....	70
Tabel 4.15 Hasil Perbandingan daya turbin dengan City Swallow 400 Watt.....	72

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Turbin Angin Sumbu Horizontal	11
Gambar 2.2 Turbin Angin Sumbu Vertikal	12
Gambar 2.3 Luas Daerah Sapuan Angin	18
Gambar 2.4 Tekanan pada Sudu Turbin Angin	19
Gambar 2.5 Penampang Permanent Magnet Generator.....	23
Gambar 2.6 Generator Pembangkit Listrik Tenaga Angin	23
Gambar 2.7 Sistem Konversi Energi pada Turbin Angin	24
Gambar 3.1 Kerangka Umum Metode Pengerjaan Penelitian	26
Gambar 4.1 Area pabrik PT Ajinomoto.....	30
Gambar 4.2 Lokasi Pengukuran (Atap PT Ajinex).....	31
Gambar 4.3 Anemometer AZ 8904	32
Gambar 4.4 Hasil Pengukuran di Titik x_2	33
Gambar 4.5 Hasil Pengukuran di Titik x_4	33
Gambar 4.6 Lokasi Pengukuran Blower (Atap PT Ajinex).....	35
Gambar 4.7 Hasil Pengukuran pada Blower.....	36
Gambar 4.8 Bentuk Turbin Angin	38
Gambar 4.9 Bentuk Airfoil NACA 4412 (tampak depan).....	40
Gambar 4.10 Bentuk Sudu Turbin Angin	41
Gambar 4.11 Bentuk Sudu Turbin Angin 5 Station dengan TSR 6	41
Gambar 4.12 Posisi Penempatan Sudu	42
Gambar 4.13 Lebar Sudu atau Chord Line	42
Gambar 4.14 Luas Daerah Sapuan Angin	44
Gambar 4.15 Permanent Magnet Generator	52
Gambar 4.16 Letak Generator	53
Gambar 4.17 Panjang dan Diameter Tower.....	57

Gambar 4.18 Desain Pembangkit Listrik Tenaga Angin	58
Gambar 4.19 Desain Pembangkit Listrik Tenaga Angin untuk Setiap Jarak Ukur	59
Gambar 4.20 Sistem Kelistrikan dari Turbin Angin.....	60
Gambar 4.21 Charge Controller	60
Gambar 4.22 Dump Load	61
Gambar 4.23 Battery Bank	61
Gambar 4.24 Inverter.....	62
Gambar 4.25 Tampilan Software Blade Designer Sebelum Diberi Input	64
Gambar 4.26 Tampilan Software Blade Designer Setelah Diberi Input.....	66
Gambar 4.27 Tampilan Software Blade Designer Setelah Program Dijalankan	67
Gambar 4.28 Turbin Angin Tipe Airx	69
Gambar 4.29 Power Curve Turbin Angin Tipe Airx	69
Gambar 4.30 Turbin Angin Tipe City Swallow 400 Watt.....	71
Gambar 4.31 Power Curve Turbin Angin Tipe City Swallow 400 Watt.....	71

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1: Data dan grafik pemakaian listrik di Indonesia.....	76
Lampiran 2: Hasil Pengukuran Aliran Angin Di Pt Ajinomoto	77
Lampiran 3 : Hasil Perhitungan Daya Yang Dihasilkan Angin Dengan Diameter Sudu 0,5-0,8 Untuk Kecepatan Angin 10 M/S	80
Lampiran 4: Data Perhitungan Estimasi Daya Di Pt Ajinomoto	82
Lampiran 5: Grafik Estimasi Daya Di Pt Ajinomoto	87
Lampiran 6: Data Perhitungan Parameter-Parameter Angin	91
Lampiran 7: Data Spesifikasi Pembangkit Listrik	102
Lampiran 8: Tabel Data Tarif Listrik PLN	108
Lampiran 9: Top 5 Wind Turbine In The World	110

ABSTRAK

RIZKY RAMADHAN MK, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Desember 2011, *Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Angin Di PT Ajinomoto Kota Mojokerto*, Dosen Pembimbing : Unggul Wibawa, Ir.,M.Sc. dan Teguh Utomo,Ir.,MT.

Kondisi kebutuhan listrik di Indonesia yang setiap tahun semakin meningkat mengakibatkan jumlah sumber energi yang dibutuhkan juga meningkat, hal ini menjadi sebuah masalah karena sumber utama pembangkit listrik berasal dari energy dari *fossil* yang *unrenewable*, oleh karena itu perlu diupayakan sumber alternative energi lain yang dapat diperbarui (*renewable*) agar tidak terjadi kekurangan sumber energi.

Skripsi ini bertujuan untuk merancang pembangkit listrik tenaga angin di PT Ajinomoto Kota Mojokerto dengan menggunakan sumber angin yang berasal dari PT Ajinomoto Kota Mojokerto Jawa Timur.

Pada penelitian ini awalnya dilakukan survey lokasi terlebih dahulu, setelah survey dilakukan maka dapat ditentukan batasan-batasan perancangannya. PT Ajinomoto Kota Mojokerto memiliki 2 sumber angin yang dapat dimanfaatkan yaitu angin alam dan blower pabrik, tetapi setelah dilakukan survey maka hanya sumber dari blower yang dijadikan parameter dalam perancangan. Berdasarkan survey yang dilakukan maka dapat ditentukan bahwa pembangkit listrik tenaga angin memiliki maksimal ketinggian 0,8 meter dan terdapat 4 titik pengukuran kecepatan angin pada jarak 2,5 meter, 5,5 meter, 9,5 meter, dan 13,5 meter, sedangkan kecepatan angin yang dihasilkan secara berurutan adalah 4,63 m/s, 10 m/s, 11,44 m/s, 20,87 m/s. Pada perncangan pembangkit listrik tenaga angin ini dilakukan perancangan terhadap dimensi sudu, jenis generator, dan ukuran tower. Perancangan ini juga menampilkan jumlah harga yang dapat dihemat dengan menggunakan pembangkit listrik tenaga angin dengan listrik per Kwh yang harus dibayarkan bila memakai sumber dari PLN.

Setelah perancangan pembangkit listrik ini selesai maka dapat dibandingkan nilai daya yang dibangkitkan dan putaran rotornya dengan beberapa pembangkit listrik yang beredar di pasaran, sehingga dapat diketahui selisih daya yang dapat dihasilkan dengan kondisi empirisnya yaitu sebesar 23 watt, 230 watt, 305 watt, dan 1854 watt dengan putaran 442 rpm, 955,4 rpm, 1093 rpm, 1994 rpm. Prosentase perbandingan yang dihasilkan sangat tinggi hal ini menunjukkan dengan kondisi fisik yang hampir sama maka pembangkit listrik tenaga angin ini mampu menghasilkan daya dan putaran mendekati kondisi sebenarnya.

Kata kunci: angin, kecepatan angin, pembangkit listrik.

ABSTRACT

RIZKY RAMADHAN MK, Electrical Engineering Department, Engineering Faculty Brawijaya University, December 2011, *Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Angin Di PT Ajinomoto Kota Mojokerto*, Supervisor: Unggul Wibawa, Ir.,M.Sc. dan Teguh Utomo,Ir.,MT.

The Conditions of electricity demand in Indonesia is increasing every year resulting in the amount of energy required resources also increases, it becomes a problem because the main source of electricity generation comes from fossil energy (unrenewable), therefore it should be finding other energy alternatives that can be updated (renewable) so thereis no shortage of energy sources.

This thesis aims to design wind turbine at PT Ajinomoto Mojokerto using wind resources derived from Ajinomoto Mojokerto of East Java.

In this study originally done in advance the location survey, conducted after the survey can then be determined the design boundaries. Ajinomoto Mojokerto has two wind resource that can be utilized is the natural wind and the blower factory, but after the survey the only source of the blower which is used as parameters in the design. Based on the survey conducted, it can be determined that wind power has a maximum height of 0.8 meters and there are 4 point wind speed measurements at a distance of 2.5 meters, 5.5 meters, 9.5 meters and 13.5 meters, while wind speeds resulting in a sequence is 4.63 m / s, 10 m / s, 11.44 m / s, 20.87 m / s. In this design wind power is done to the dimensions of the blade design, generator type, and size of the tower. The design also featured a number of prices that can be saved by using wind power turbine with electricity per kilowatt-hour to be paidwhen using a PLN source. .

After power plant design is completed it can be compared to the value and rotor round with several power plants on the market, so that can know the difference in power can be generated by the empirical condition that is equal to 23 watts, 230 watts, 305 watts and 1854 watts with a round of 442 rpm, 955.4 rpm, 1093 rpm, 1994 rpm. Percentage comparison of the resulting very high this suggests a similar physical condition of the wind power is capable of generating power and closer round the actualconditions.

Key words: wind, wind speed, the power plant.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan akan energi listrik di Indonesia sangatlah besar hal ini karena jumlah penduduk Indonesia lebih dari 200 juta jiwa yang tersebar menempati sekitar 6000 pulau baik besar maupun kecil. Kebutuhan energi listrik semakin meningkat seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduk yang begitu pesat dan pertumbuhan ekonomi negara yang semakin membaik. Pertumbuhan ekonomi yang semakin baik mendorong berdirinya industri-industri baik industri rumah tangga, industri kecil maupun industri besar yang juga sangat membutuhkan pasokan energi listrik sehingga mempengaruhi peningkatan pemanfaatan energi khususnya energi listrik. Sayangnya, peningkatan pemanfaatan energi listrik tersebut belum sepenuhnya diimbangi dengan peningkatan penyediaan energi listrik oleh PLN.

Selama ini, penyediaan energi listrik mayoritas dipenuhi dengan memanfaatkan sumber energi tak terbarukan (*unrenewable*) seperti minyak bumi, gas alam dan batu bara, Sedangkan pemanfaatan sumber energi terbarukan (*renewable*) yang dapat dimanfaatkan antara lain matahari, air, angin, geotermal, biomassa, dan biogas masih sangat minim, sehingga perlu ditingkatkan pemanfaatan sumber energi tersebut mengingat potensi yang ada di negara Indonesia.

Dewasa ini setelah diketahui bahwa cadangan energi *fossil* menipis banyak perusahaan mulai mencari alternatif energi pengganti karena harga energi yang ditawarkan oleh PLN masih terlalu tinggi karena sumber pembangkitnya masih banyak menggunakan energi *fossil*. Dampak dari hal tersebut adalah banyak perusahaan yang mulai melirik potensi dari lingkungan tempat perusahaan tersebut berada untuk membuat pembangkit-pembangkit listrik yang bersumber dari energi yang terbarukan, perusahaan tersebut adalah PT Ajinomoto Mojokerto yang melihat potensi energi angin di atap gedung produksi untuk dijadikan pembangkit listrik.

Hal ini tentunya merupakan sebuah terobosan yang sangat baik dikarenakan angin yang sebelumnya tidak digunakan dapat dijadikan sarana untuk menghasilkan listrik yang dapat menekan cost pengeluaran listrik dari PLN dan membuktikan bahwa PT Ajinomoto merupakan sebuah perusahaan yang peduli dengan lingkungan.

Kondisi kelistrikan yang ada di PT Ajinomoto sebetulnya sudah sangat memadai untuk operasional sehari-hari, akan tetapi sumber energi yang digunakan masih membeli dari PLN, sehingga masih sangat tergantung dari stabilitas dan keandalan dari PLN. Sebagai salah satu perusahaan besar di Indonesia tentunya banyak sekali potensi yang bisa dimanfaatkan oleh PT Ajinomoto untuk mengganti sumber energinya, walaupun sebagai energi sampingan atau energi cadangan karena sesuai dengan himbuan pemerintah untuk konversi energi sebagai bentuk penghematan.

Perancangan pembangkit listrik tenaga angin merupakan solusi yang sangat baik dikarenakan PT Ajinomoto yang memiliki gedung tinggi yang berarea cukup luas sehingga pembangkit tenaga angin dapat terpasang dan menghasilkan energi listrik. Kondisi lain yang harus diperhatikan adalah di atap salah satu gedung produksi PT Ajinomoto terdapat blower pembuangan angin dari hasil produksi pabrik yang memiliki kecepatan angin yang sangat potensial untuk dijadikan pembangkit listrik. Melihat semua potensi yang ada pasti akan sangat menunjang terwujudnya pembangkit listrik tenaga angin yang baik dan ramah lingkungan.

Tujuan penelitian ini adalah memanfaatkan sumber energi angin yang harapannya dapat bermanfaat untuk semua golongan yang membutuhkan. Perancangan ini adalah perancangan sistem pembangkitkannya yang dilihat dari segi teknis dan ekonomis.

1.2 Rumusan Masalah

Sesuai yang dikaji di dalam penelitian maka permasalahan adalah sebagai berikut:

1. Seberapa besar potensi energi yang terdapat pada aliran angin di PT Ajinomoto kota Mojokerto yang bersumber dari angin alam dan blower buangan pabrik.
2. Bagaimana merancang kincir angin pada pembangkit listrik tenaga angin di PT Ajinomoto secara teknis paling sesuai dengan kondisi yang ada.
3. Berapa besar daya yang dapat dibangkitkan oleh pembangkit listrik tenaga angin di PT Ajinomoto Mojokerto.

1.3 Batasan Masalah

Di dalam penelitian ini terdapat beberapa hal yang dijadikan sebagai batasan masalah, yaitu :

1. Perancangan ini membahas dari segi teknis saja.
2. Tidak membahas bangunan sipil.
3. Tidak membahas masalah peralatan keamanan sistem.
4. Tidak membahas tentang pengontrolan sistem.
5. Tidak membahas energy balik yang ditimbulkan akibat putaran kincir.
6. Tidak membahas fluktuasi terhadap waktu.
7. Perancangan dispesifikasikan pada dimensi sudu, jenis generator, dan ukuran tower.

1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian adalah:

1. Menghitung potensi energi yang terdapat pada aliran angin di PT Ajinomoto kota Mojokerto yang bersumber dari angin alam dan blower buangan pabrik.
2. Merancang kincir angin pada pembangkit listrik tenaga angin di PT Ajinomoto secara teknis paling sesuai dengan kondisi yang ada.
3. Menghitung besar daya yang dapat dibangkitkan oleh pembangkit listrik tenaga angin di PT Ajinomoto Mojokerto.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

Manfaat bagi sains teknologi adalah sebagai terobosan baru tentang turbin angin sehingga pemanfaatannya dapat digunakan secara luas dikarenakan pembangkit listrik menggunakan angin yang merupakan potensi energi terbaharukan sehingga tidak akan kehabisan. Hal ini kedepannya akan membantu dunia teknologi, khususnya yang berhubungan dengan pembangkit listrik tenaga angin dapat berkembang pesat dan angin bukan hanya sebagai alternatif energi tetapi juga dimanfaatkan sebagai energi utama di masa mendatang.

1.6 Sistematika Penulisan

Penelitian ini disusun dengan urutan sebagai berikut:

BAB I : Pendahuluan

Berisi latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, ruang lingkup, tujuan dan sistematika penulisan

BAB II : Tinjauan Pustaka

Berisi dasar teori yang digunakan untuk dasar penelitian yang dilakukan dan untuk mendukung permasalahan yang diungkapkan.

BAB III : Metodologi Penelitian

Berisi metode penelitian yang akan dilakukan yang meliputi studi literatur, tempat penelitian, waktu penelitian, peralatan yang digunakan untuk penelitian, model rangkaian penelitian, langkah penelitian dan teknik pengumpulan data.

BAB IV : Data dan Analisis Hasil Penelitian

Berisi analisa serta pembahasan terhadap masalah yang diajukan dalam skripsi

BAB V : Kesimpulan dan Saran

Berisi kesimpulan dari tujuan penelitian yang akan dibuat serta saran dari penulis.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Energi

Energi berarti kemampuan untuk melakukan usaha/kerja. Pada saat energi digunakan untuk melakukan usaha, energi hanya berubah bentuk, karena pada dasarnya energi ini tidak dapat diciptakan maupun dimusnahkan, melainkan hanya dapat diubah dari bentuk energi yang satu ke bentuk energi lainnya.

Sumber daya energi primer pada dasarnya semua berasal dari proses alamiah yang terjadi sebagai akibat dari pancaran radiasi energi dari matahari. Sumber daya energi primer dapat diklasifikasikan menjadi 2 (dua) jenis energi, yaitu: [Wibawa, 2001]

- a. Energi Tak Terbarukan (*unrenewable energy*), yang dikenal pula dengan istilah energi fosil, adalah jenis sumber daya energi primer yang habis dipakai, dan tidak dapat diperbaharui lagi, baik secara alamiah maupun dengan bantuan teknologi. Termasuk disini antara lain: minyak bumi, batubara, dan gas alam.
- b. Energi Terbarukan (*renewable energy*), yang dikenal pula dengan istilah energi regeneratif, adalah jenis sumber daya energi primer yang tidak habis dipakai, dalam artian dapat diperbaharui lagi, baik secara alamiah maupun dengan bantuan teknologi (regenerasi). Termasuk disini antara lain: matahari, air, angin, *geothermal*, biomassa, dan biogas.

Manusia selalu berupaya mengembangkan ilmu pengetahuan dan teknologi untuk dapat memanfaatkan sumber daya energi secara optimal melalui proses konversi dari sumber daya energi primer menjadi energi sekunder dan energi guna.

2.2. Konversi Energi

Konversi energi dipahami sebagai proses perubahan energi dari bentuk yang satu ke bentuk lainnya, misalnya dari energi primer berubah menjadi energi sekunder. Bentuk energi primer seperti: batu bara, minyak bumi, gas alam, matahari, angin, air, biomassa, sampai dengan biogas akan diubah menjadi bentuk energi sekunder, agar

lebih dapat dimanfaatkan atau lebih mudah diangkut/dibawa, misalnya: bensin dari minyak bumi, atau elektrik dari batubara.

Bentuk energi sekunder yang paling sering ditemui dan dimanfaatkan oleh manusia adalah: energi panas, energi mekanik dan energi elektrik. Energi primer juga dapat langsung dimanfaatkan, sebagai energi guna, untuk memenuhi kebutuhan manusia, misalnya: energi gerak, panas dan cahaya.

2.3. Angin Sebagai Sumber Energi

Karena matahari memanaskan permukaan bumi secara tidak merata, maka terbentuklah angin. Manfaat angin adalah:

- a. Angin untuk menggerakkan perahu layar menelusuri nusantara, bahkan untuk menembus batas lintas negara, misalnya seperti Orang Buton.
- b. Angin sebagai pengganti bahan bakar diesel atau batubara, di negara Australia angin digunakan sebagai tenaga listrik pengganti bahan bakar diesel atau batubara.
- c. Angin untuk perjalanan para nelayan pulang dan pergi.
- d. Angin berfungsi sebagai instrument untuk membantu take-off atau landing pesawat di landasan pacu bandara.
- e. Angin juga bermanfaat untuk menghilangkan panas dan gerah, seperti pada alat kipas angin.

2.4. Konversi Energi Listrik dari Tenaga Angin

Turbin angin adalah kincir angin yang digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik. Turbin angin ini pada awalnya dibuat untuk mengakomodasi kebutuhan para petani dalam melakukan penggilingan padi, keperluan irigasi, dll. Turbin angin terdahulu banyak dibangun di Denmark, Belanda, dan negara-negara Eropa lainnya dan lebih dikenal dengan *Windmill*.

Kini turbin angin lebih banyak digunakan untuk mencukupi kebutuhan listrik masyarakat, dengan menggunakan prinsip konversi energi dan menggunakan sumber daya alam yang dapat diperbaharui yaitu angin. Walaupun sampai saat ini pembangunan turbin angin masih belum dapat menyaingi pembangkit listrik konvensional (PLTD, PLTU, dll), turbin angin masih lebih dikembangkan oleh para ilmuwan karena dalam waktu dekat manusia akan dihadapkan dengan masalah kekurangan sumber daya

alam tak terbaharui (batubara, minyak bumi) sebagai bahan dasar untuk membangkitkan listrik.

Perhitungan daya yang dapat dihasilkan oleh sebuah turbin angin dengan luas daerah sapuan angin A adalah:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \dots\dots\dots (2-1)$$

Dengan :

ρ : kerapatan angin pada waktu tertentu ($1,2 \text{ kg/m}^3$)

v : kecepatan angin pada waktu tertentu. (m/s)

Umumnya daya efektif yang dapat dihasilkan oleh sebuah turbin angin hanya sebesar 20%-30%, jadi rumus diatas dapat dikalikan dengan 0,2 atau 0,3 untuk mendapatkan hasil yang akurat.

Syarat – syarat dan kondisi angin yang dapat digunakan untuk menghasilkan energi listrik dapat dilihat pada tabel 2.1

Tabel 2.1 Tingkat Kecepatan Angin

kelas angin	kecepatan angin m/d	kecepatan angin km/jam	Kecepatan angin knot/jam
1	0.3~1.5	1 ~ 5.4	0.58 ~ 2.92
2	1.6~3.3	5.5~11.9	3.11 ~ 6.42
3	3.4~5.4	12.0 ~ 19.5	6.61 ~ 10.5
4	5.5~7.9	19.6 ~ 28.5	10.7 ~ 15.4
5	8.0~10.7	28.6 ~ 38.5	15.6 ~ 20.8
6	10.8~13.8	38.6 ~ 49.7	21 ~ 26.8
7	13.9~17.1	49.8 ~ 61.5	27 ~ 33.3
8	17.2~20.7	61.6 ~ 74.5	33.5 ~ 40.3
9	20.8~24.4	74.6 ~ 87.9	40.5 ~ 47.5
10	24.5~28.4	88.0 ~ 102.3	47.7 ~ 55.3
11	28.5~32.6	102.4~117.0	55.4 ~ 63.4
12	>32.6	>118	63.4

(Sumber : <http://adielektro.multiply.com/journal>)

Table 2.2 Kondisi Kecepatan Angin

Kelas Angin	Kecepatan Angin m/d	Kondisi Alam di Daratan
1	0.00 ~ 0.02	
2	0.3 ~ 1.5	angin tenang, Asap lurus ke atas.
3	1.6 ~ 3.3	asap bergerak mengikuti arah angin
4	3.4 ~ 5.4	wajah terasa ada angin, daun2 bergoyang pelan, petunjuk arah angin bergerak
5	5.5 ~ 7.9	debu jalan, kertas beterbangan, ranting pohon bergoyang.
6	8.0 ~ 10.7	ranting pohon bergoyang, bendera berkibar.
7	10.8 ~ 13.8	ranting pohon besar bergoyang, air plumpang berombak kecil
8	13.9 ~ 17.1	Ujung pohon melengkung, hembusan angin terasa di telinga
9	17.2 ~ 20.7	dpt mamatahkan ranting pohon, jalan berat melawan arah angin
10	20.8 ~ 24.4	dpt mematahkan ranting pohon, rumah rubuh
11	24.5 ~ 28.4	dpt merubuhkan pohon, menimbulkan kerusakan
12	28.5 ~ 32.6	menimbulkan kerusakan parah
13	32.7 ~ 36.9	tornado

(Sumber : <http://adielektro.multiply.com/journal>)

Angin kelas 3 adalah batas minimum dan angin kelas 8 adalah batas maksimum energi angin yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik.

2.5. Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Pembangkit Listrik Tenaga Angin (*Wind Power*), adalah pembangkit yang memanfaatkan hembusan angin sebagai sumber penghasil listrik. Pembangkit ini lebih efisien dari pada pembangkit listrik tenaga surya didalam menghasilkan listriknya.

Pemasangan Pembangkit ini tidak sembarang karena harus ditempatkan pada lingkungan yang memiliki hembusan/kecepatan angin yang tinggi dan stabil. Untuk menggerakkan blade/baling-baling agar bisa berputar saja harus memiliki kecepatan angin 2 meter/detik dan untuk menghasilkan listrik yang stabil sesuai kapasitas generatornya rata-rata 6 s/d 10 meter/detik. Pembangkit ini bisa digunakan untuk skala kecil, menengah dan besar karena arus yang dihasilkan dalam 1 jam lebih besar serta membutuhkan investasi yang lebih murah ketimbang PLTS. Daerah yang cocok digunakan pembangkit ini adalah daerah pantai, pesisir, pegunungan. Bayangkan bila tiap rumah, kantor, tempat ibadah, tempat umum di seluruh pulau jawa beberapa peralatan lampu penerangan dan beberapa peralatan elektroniknya diganti / dikombinasi dengan sistem Wind Power, maka penghematan dalam listrik PLN akan terwujud secara nyata.

2.6. Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya, sumber daya energi anign juga dapat diubah menjadi energi elektrik, dengan memanfaatkan energi mekanik yang dihasilkan oleh turbin angin. Energi mekanik tersebut akan diubah menjadi energi elektrik oleh perangkat generator elektrik yaitu:

- ***Gearbox***

Alat ini berfungsi untuk mengubah putaran rendah pada kincir menjadi putaran tinggi.

- ***Brake System***

Digunakan untuk menjaga putaran pada poros setelah *gearbox* agar bekerja pada titik aman saat terdapat angin yang besar. Alat ini perlu dipasang karena generator memiliki titik kerja aman dalam pengoperasiannya. Generator ini akan menghasilkan energi listrik maksimal pada saat bekerja pada titik kerja yang telah ditentukan. Kehadiran angin diluar diguaan akan menyebabkan putaran yang cukup cepat pada poros generator, sehingga jika tidak diatasi maka putaran ini dapat merusak generator. Dampak dari kerusakan akibat putaran berlebih diantaranya: *overheat*, *rotor breakdown*, dan kawat pada generator putus karena tidak dapat menahan arus yang cukup besar.

- ***Generator***

Ini adalah salah satu komponen terpenting dalam pembuatan sistem turbin angin. Generator ini dapat mengubah energi gerak menjadi energi listrik. Prinsip kerjanya dapat dipelajari dengan menggunakan teori medan elektromagnetik. Singkatnya, (mengacu pada salah satu cara kerja generator) poros pada generator dipasang dengan material ferromagnetik permanen. Setelah itu disekeliling 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*) maupun DC (*Direct Current*).

- **Penyimpan energi**

Karena keterbatasan ketersediaan akan energi angin (tidak sepanjang hari angin akan selalu tersedia) maka ketersediaan listrik pun tidak menentu. Oleh karena itu digunakan alat penyimpan energi yang berfungsi sebagai back-up energi listrik. Ketika beban penggunaan daya listrik masyarakat meningkat atau ketika kecepatan angin suatu daerah sedang menurun, maka kebutuhan permintaan akan daya listrik tidak dapat terpenuhi. Oleh karena itu kita perlu menyimpan sebagian energi yang dihasilkan ketika terjadi kelebihan daya pada saat turbin angin berputar kencang atau saat penggunaan daya pada masyarakat menurun. Penyimpanan energi ini diakomodasi dengan menggunakan alat penyimpan energi. Contoh sederhana yang dapat dijadikan referensi sebagai alat penyimpan energi listrik adalah aki mobil. Aki mobil memiliki kapasitas penyimpanan energi yang cukup besar. Aki 12 volt, 65 Ah dapat dipakai untuk mencatu rumah tangga (kurang lebih) selama 0.5 jam pada daya 780 watt. Kendala dalam menggunakan alat ini adalah alat ini memerlukan catu daya DC (*Direct Current*) untuk meng-charge/mengisi energi, sedangkan dari generator dihasilkan catu daya AC (*Alternating Current*). Oleh karena itu diperlukan rectifier-inverter untuk mengakomodasi keperluan ini.

- ***Rectifier-inverter***

Rectifier berarti penyearah. Rectifier dapat menyearahkan gelombang sinusoidal (AC) yang dihasilkan oleh generator menjadi gelombang DC. Inverter berarti pembalik. Ketika dibutuhkan daya dari penyimpan energy (aki/lainnya) maka catu yang dihasilkan oleh aki akan berbentuk gelombang DC. Karena kebanyakan kebutuhan rumah tangga menggunakan catu daya AC, maka diperlukan inverter untuk mengubah gelombang DC yang dikeluarkan oleh aki menjadi gelombang AC, agar dapat digunakan oleh rumah tangga.

2.7. Jenis-Jenis Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Turbin angin dapat digolongkan menjadi beberapa jenis, untuk penggolongan berdasarkan bentuk kincirnya turbin angin digolongkan menjadi 2 jenis yaitu:

2.7.1 Turbin Angin Sumbu Horizontal



Gambar 2.1 Turbin Angin Sumbu Horizontal

Sumber: Eric Hau 2005: WIND TURBINE fundamental, technology, application, economics 2nd

Turbin angin sumbu horizontal (TASH) memiliki poros rotor utama dan generator listrik di puncak menara. Turbin berukuran kecil diarahkan oleh sebuah baling-baling angin (baling-baling cuaca) yang sederhana, sedangkan turbin berukuran besar pada umumnya menggunakan sebuah sensor angin yang digandengkan ke sebuah servo motor. Sebagian besar memiliki sebuah gearbox yang mengubah perputaran kincir yang pelan menjadi lebih cepat berputar.

Karena sebuah menara menghasilkan turbulensi di belakangnya, turbin biasanya diarahkan melawan arah anginnya menara. Bilah-bilah turbin dibuat kaku agar mereka tidak terdorong menuju menara oleh angin berkecepatan tinggi. Sebagai tambahan, bilah-bilah itu diletakkan di depan menara pada jarak tertentu dan sedikit dimiringkan.

Karena turbulensi menyebabkan kerusakan struktur menara, dan realibilitas begitu penting, sebagian besar TASH merupakan mesin upwind (melawan arah angin). Meski memiliki permasalahan turbulensi, mesin downwind (menurut jurusan angin) dibuat karena tidak memerlukan mekanisme tambahan agar mereka tetap sejalan dengan angin, dan karena di saat angin berhembus sangat kencang, bilah-bilahnya bisa ditebuk

sehingga mengurangi wilayah tiupan mereka dan dengan demikian juga mengurangi resintensi angin dari bilah-bilah itu.

- Kelebihan TASH

Dasar menara yang tinggi membolehkan akses ke angin yang lebih kuat di tempat-tempat yang memiliki geseran angin (perbedaan antara laju dan arah angin antara dua titik yang jaraknya relatif dekat di dalam atmosfer bumi. Di sejumlah lokasi geseran angin, setiap sepuluh meter ke atas, kecepatan angin meningkat sebesar 20%.

- Kelemahan TASH

1. TASH yang tinggi sulit dipasang, membutuhkan derek yang sangat tinggi dan mahal serta para operator yangampil.
2. Konstruksi menara yang besar dibutuhkan untuk menyangga bilah-bilah yang berat, gearbox, dan generator.
3. TASH yang tinggi bisa mempengaruhi radar airport.
4. Ukurannya yang tinggi merintangi jangkauan pandangan dan mengganggu penampilan lansekap.
5. TASH membutuhkan mekanisme kontrol *yaw* tambahan untuk membelokkan kincir ke arah angin.

2.7.2 Turbin Angin Sumbu Vertikal



Gambar 2.2 Turbin Angin Sumbu Vertikal

Sumber: Eric Hau 2005: WIND TURBINE fundamental, technology, application, economics 2nd

Turbin angin sumbu vertikal/tegak (atau TASV) memiliki poros/sumbu rotor utama yang disusun tegak lurus. Kelebihan utama susunan ini adalah turbin tidak harus diarahkan ke angin agar menjadi efektif. Kelebihan ini sangat berguna di tempat-tempat yang arah anginnya sangat bervariasi. VAWT mampu mendayagunakan angin dari berbagai arah.

Menggunakan sumbu vertikal, generator serta *gearbox* bisa ditempatkan di dekat tanah, jadi menara tidak perlu menyokongnya dan lebih mudah diakses untuk keperluan perawatan. Tapi ini menyebabkan sejumlah desain menghasilkan tenaga putaran yang berdenyut. *Drag* (gaya yang menahan pergerakan sebuah benda padat melalui fluida (zat cair atau gas) bisa saja tercipta saat kincir berputar.

Permasalahan karena sulit dipasang di atas menara, turbin sumbu tegak sering dipasang lebih dekat ke dasar tempat ia diletakkan, seperti tanah atau puncak atap sebuah bangunan. Kecepatan angin lebih pelan pada ketinggian yang rendah, sehingga yang tersedia adalah energi angin yang sedikit. Aliran udara di dekat tanah dan obyek yang lain mampu menciptakan aliran yang bergolak, yang bisa menyebabkan berbagai permasalahan yang berkaitan dengan getaran, diantaranya kebisingan dan *bearing wear* yang akan meningkatkan biaya pemeliharaan atau mempersingkat umur turbin angin. Jika tinggi puncak atap yang dipasangi menara turbin kira-kira 50% dari tinggi bangunan, ini merupakan titik optimal bagi energi angin yang maksimal dan turbulensi angin yang minimal.

- Kelebihan TASV

1. Tidak membutuhkan struktur menara yang besar.
2. Karena bilah-bilah rotornya vertikal, tidak dibutuhkan mekanisme yaw.
3. Sebuah TASV bisa diletakkan lebih dekat ke tanah, membuat pemeliharaan bagian-bagiannya yang bergerak jadi lebih mudah.
4. TASV memiliki sudut airfoil (bentuk bilah sebuah baling-baling yang terlihat secara melintang) yang lebih tinggi, memberikan keaerodinamisan yang tinggi sembari mengurangi *drag* pada tekanan yang rendah dan tinggi.
5. Desain TASV berbilah lurus dengan potongan melintang berbentuk kotak atau empat persegi panjang memiliki wilayah tiupan yang lebih besar untuk diameter tertentu daripada wilayah tiupan berbentuk lingkarannya TASH.
6. TASV memiliki kecepatan awal angin yang lebih rendah daripada TASH. Biasanya TASV mulai menghasilkan listrik pada 10km/jam (6 m.p.h.)

7. TASV bisa didirikan pada lokasi-lokasi dimana struktur yang lebih tinggi dilarang dibangun.
8. TASV tidak harus diubah posisinya jika arah angin berubah.

- Kekurangan TASV

1. Kebanyakan TASV memproduksi energi hanya 50% dari efisiensi TASH karena drag tambahan yang dimilikinya saat kincir berputar.
2. TASV tidak mengambil keuntungan dari angin yang melaju lebih kencang di elevasi yang lebih tinggi.
3. Kebanyakan TASV mempunyai torsi awal yang rendah, dan membutuhkan energi untuk mulai berputar.
4. Sebuah TASV yang menggunakan kabel untuk menyanggahnya memberi tekanan pada bantalan dasar karena semua berat rotor dibebankan pada bantalan. Kabel yang dikaitkan ke puncak bantalan meningkatkan daya dorong ke bawah saat angin bertiup.

2.8. Prinsip Aerodinamika

Pada dasarnya energy dari angin merupakan energy yang terjadi akibat hembusan angin yang memutar kincir sehingga terjadi sebuah gerakan, oleh karena itu perhitungannya dapat diketahui dengan menggunakan rumus : (Aldo v da rossa,2008)

1. $P_w = \frac{1}{2} \rho v^3$ (2-2)

Daya di angin adalah jumlah energy yang melewati satuan luas dalam suatu waktu

2. $P_A = \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho v^3$ (2-3)

Daya yang dapat dimanfaatkan adalah jumlah maksimum yang bisa didapatkan dari angina

3. $P_D = \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho v^3 A \eta$ (2-4)

Daya yang di transfer adalah daya yg ditransferkan pada beban.

2.9. Daya Angin (power)

Daya angin adalah daya (watt) yang dibangkitkan oleh angin tiap lusan, sehingga daya angin dapat digolongkan sebagai energi potensial. Pada dasarnya daya angin merupakan angin yang bergerak per satuan waktu sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut: (Tony Burton, 2001)

$$\text{Daya} = \text{kerja/waktu} \dots\dots\dots (2-5)$$

$$= \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 / t$$

$$= \frac{1}{2} \cdot (\rho \cdot A \cdot d) \cdot V^2 / t$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 \cdot \left(\frac{d}{t}\right) \rightarrow \frac{d}{t} = V$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$$

2.10. Daya turbin Angin

Daya turbin angin adalah daya yang dibangkitkan oleh rotor turbin angin akibat mendapatkan daya dari hembusan angin. Daya turbin angin tidak sama dengan daya angin dikarenakan daya turbin angin terpengaruh oleh koefisien daya.

Koefisien daya adalah prosentase daya yang terdapat pada angin yang dirubah ke dalam bentuk energy mekanik (Tony Burton, 2001)

$$P = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \dots\dots\dots (2-6)$$

Di dalam rangkaian turbin angin yang berputar selain terdapat bilangan C_p yang mempengaruhi, terdapat pula koefisien C_d yang mempengaruhi sudu dalam menghasilkan daya. Coefficient of drag (C_d) adalah koefisien dari gaya tarik (drag). C_d pada dasarnya adalah kecenderungan suatu benda untuk mempertahankan diri pada kondisi yang ada dari gaya geser atau gaya tekan yang timbul.

C_d dapat berupa benda bergerak ke arah atau di dalam arah aliran fluida yang dapat berupa gas atau cair. Setiap benda mempunyai angka koefisien yang berbeda-beda. Semakin halus dan bundar suatu benda maka C_d akan semakin kecil. Besarnya koefisien

C_d tidak dipengaruhi oleh ukuran benda namun dari sudut posisi laju benda terhadap fluida.

Untuk keperluan estimasi sementara dan sangat kasar, yaitu dimana kondisi diameter sapuan turbin belum diketahui maka dapat digunakan rumus sebagai berikut :

(Asan Damanik,2011)

$$P = 0,1v^3 \dots\dots\dots(2-7)$$

Dimana :

P =daya per satuan luas (W/m^2)

v =kecepatan angin (m/detik)

2.11. Betz Law

Menurut Betz, seorang insinyur Jerman, besarnya energi maksimum yang dapat diserap dari angin adalah hanya 0,59259 atau 16/27 dari energi yang tersedia.

2.12. Sudu kincir angin

Sudu/blade merupakan bagian dari turbin angin yang menerima angin secara langsung, sehingga dimensi dari sudu sangat berpengaruh terhadap daya yang dihasilkan oleh turbin angin. Pada perancangannya diperlukan faktor-faktor yang mendukung agar sudu dapat menerima angin secara maksimal sehingga daya yang dibangkitkan maksimal. Dimensi, bahan, dan letak sudu merupakan faktor penting untuk perancangan sudu.

2.12.1 Bentuk sudu kincir angin

Jenis-jenis sudu angin yang ada sekarang sangat banyak, tetapi pada dasarnya dimensi untuk sudu angin dapat dibagi menjadi beberapa jenis yaitu flat plate, curved plate, curved plate with tube concave side, curved plate with tube convex side, dan NACA Airfoili. Setiap dimensi memiliki karakteristik masing-masing sehingga memiliki kemampuan untuk menangkap angin yang berbeda pula, untuk lebih jelas dapat dilihat pada gambar 2.3

Tabel 2.3 Tabel Jenis Sudu Angin

Section		Drag/ Lift Ratio	Angle α	Lift Coefficient C/L
Flat plate		0.1	5°	0.8
Curved plate (10% curvature)		0.02	3°	1.25
Curved plate with tube concave side		0.03	4°	1.1
Curved plate with tube convex side		0.2	14°	1.25
Airfoil NACA 4412		0.01	4°	0.8

Sumber: wind power workshop, hugh piggot, 2001

2.12.2 Karakteristik Sudu tipe Airfoil NACA 4412

Sudu tipe Airfoil NACA 4412 merupakan jenis sudu yang memiliki chord yang tidak horizontal, sehingga sedikit melengkung, hal ini membuat sudu tipe ini memiliki koefisien (C_L/C_D) yang besar. Koefisien (C_L/C_D) yang besar mengakibatkan gaya angkat sudu jauh lebih besar daripada gaya tarik sudu, sehingga sudu dapat berputar lebih cepat. Karakteristik sudu tipe NACA 4412 dapat dilihat pada gambar 2.4 dan 2.5

Tabel 2.4 Sudut Penempatan Untuk 5 Station Sudu

Station	Setting angles (degrees) for tip speed ratio			
	4	6	8	10
1	36	25	19	14
2	19	11	8	5
3	11	6	4	2
4	8	4	2	1
5	5	2	1	0

(Sumber : wind power workshop, hugh piggot, 2001)

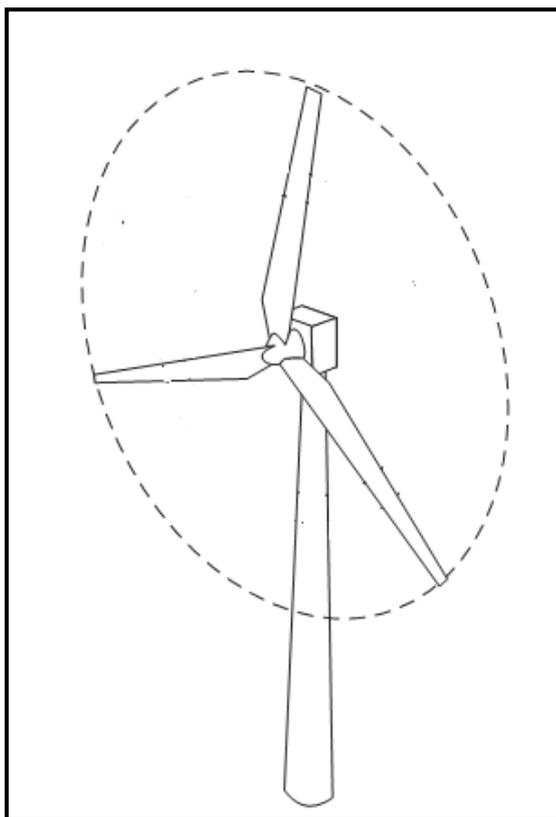
Tabel 2.5 Ketebalan Sudu Dalam Persen Diameter Untuk 5 Station

Tip Speed Ratio:	4	6	8	10
Number of blades:	3	3	2	2
Station 1	21.4	12.3	11.6	7.8
2	15.4	7.5	6.5	4.2
3	11.2	5.2	4.4	2.9
4	8.7	4.0	3.4	2.2
5	7.1	3.2	2.7	1.7

(Sumber : wind power workshop, hugh piggot, 2001)

2.12.3 Luas daerah sapuan angin

Saat sudu berputar maka putarannya akan membentuk sebuah lingkaran yang merupakan area hasil dari putaran sudu tersebut. Luas dari area yang ditimbulkan oleh putaran sudu itu disebut luas daerah sapuan angin.



Gambar 2.3 Luas Daerah Sapuan Angin

Sumber: Tony Burtton dkk, 2001, Wind Energy Handbook

Rumus luas daerah sapuan angin :

$$A = \pi R^2 \dots\dots\dots(2-8)$$

Dengan :

A : luas daerah sapuan angin (m^2)

π : 3,14

R : radius sudu (m/s)

2.12.4 Dynamic Pressure

Saat $1m^3$ dari gas yang mengandung n molekul dan setiap molekul membawa $\frac{1}{2}mv^2$ joule karena pergerakan energi dalam jumlah besar disebut total energy per unit volume atau juga disebut gaya per unit area. (Tony Burtton dkk, 2001)

$$W_d = \frac{1}{2}nmv^2 = \frac{1}{2}\rho v^2 \dots\dots\dots(2-9)$$

Dengan :

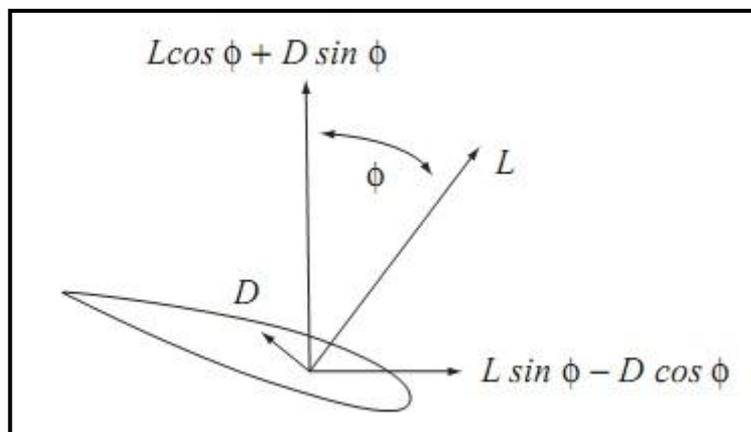
W_d : dyanamic pressure (J/m^3 atau N/m^2)

ρ : kerapatan udara (kg/m^3)

v : kecepatan angin (m/s)

2.12.5 Pressure/tekanan pada sudu

Tekanan pada sudu dapat berupa pD maupun pL. pD merupakan tekanan yang timbul karena adanya gaya geser yang timbul pada saat angin menggerakkan sudu, sedangkan pL merupakan tekanan yang timbul karena gaya angkat yang terjadi saat angin menggerakkan sudu.



Gambar 2.4 Tekanan pada Sudu Turbin Angin

Sumber: Tony Burtton dkk, 2001, Wind Energy Handbook

Rumus mencari pL dan pD

$$pL = \frac{1}{2} \rho v^2 C_L \dots\dots\dots (2-10)$$

$$pD = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D \dots\dots\dots (2-11)$$

C_L dan C_D merupakan koefisien angkat dan koefisien geser yang nilainya bergantung dari bentuk sudu.

2.12.6 Torsi

Pada perancangan pembangkit listrik tenaga angin ini perlu diketahui nilai torsi yang mempengaruhi putaran dari turbin angin untuk turbin angin yang difungsikan sebagai pembangkit listrik nilai torsi dibuat kecil agar putaran kincir cepat.

Rumus mencari torsi :

$$T = F \cdot R \dots\dots\dots (2-12)$$

Dengan :

T : torsi (Nm)

F : gaya tangensial (kgm)

R : radius sudu (meter)

2.12.7 Kecepatan Sudut (ω)

Kecepatan sudut merupakan perbandingan nilai antara daya dengan torsi yang mempengaruhi putaran turbin angin.

Rumus mencari kecepatan sudut:

$$\omega = \frac{P}{nT} \dots\dots\dots (2-13)$$

Dengan:

ω = kecepatan sudut (rad/s)

P = daya (watt)

n = jumlah sudu

T = torsi (Nm)

2.12.8 Putaran Turbin Angin

Putaran turbin angin ini yang nantinya dikopel dengan generator sehingga dapat memutar generator dan menghasilkan daya listrik, semakin cepat putaran turbin angin maka daya yang dihasilkan akan semakin besar karena nilai daya yang dihasilkan berbanding lurus dengan putaran rotor turbin angin.

Rumus mencari putaran turbin angin:

$$N = \frac{60\omega}{2\pi} \dots\dots\dots(2-14)$$

Dengan:

N = putaran rotor (rpm)

ω = kecepatan sudut (rad/s)

π = 3,14

2.12.9 Tip Speed Ratio

Tip speed ratio adalah perbandingan nilai kecepatan sudu dengan kecepatan angin, yang mempengaruhi nilai rugi-rugi daya pada turbin angin. *Rangennya* adalah antara 1-10, semakin besar nilai tip speed ratio maka rugi-rugi starting akan semakin kecil. (Aldo v da rossa,2008)

Rumus mencari nilai tip speed ratio:

$$\lambda = \frac{\omega R}{v_1} \dots\dots\dots(2-15)$$

Dengan :

λ = tip speed ratio

ω = kecepatan sudut (rad/s)

R = radius sudu (meter)

v_1 = kecepatan angin (m/s)

2.12.10 Soliditas

Merupakan rasio antara luas dari sudu turbin angin dengan luas sapuan area turbin angin. (Aldo v da rossa,2008)

$$S = \frac{n \times L}{A} \dots\dots\dots(2-16)$$

Dimana :

S=Solidity

n=jumlah sudu

L=luas tiap sudu (m^2)

A=luas sapuan area turbbin angin (m^2)

Terdapat dua kemungkinan soliditas yaitu:

Soliditas rendah ($0.1 < x < 0.8$) =kecepatan tinggi,momen puntir rendah

Soliditas tinggi (>0.8) =kecepatan rendah,momen puntir tinggi

2.13. Generator

Generator berfungsi untuk mengubah energi mekanis dari turbin menjadi energi listrik. Komponen utama dari generator adalah rotor dan stator. Rotor adalah bagian yang berputar, yang dikopel dengan poros turbin sebagai tenaga pemutarnya. Dengan memberi penguatan atau magnetisasi kepada rotor tersebut, tegangan akan ditimbulkan ke bagian generator yang tidak bergerak, yang disebut stator.

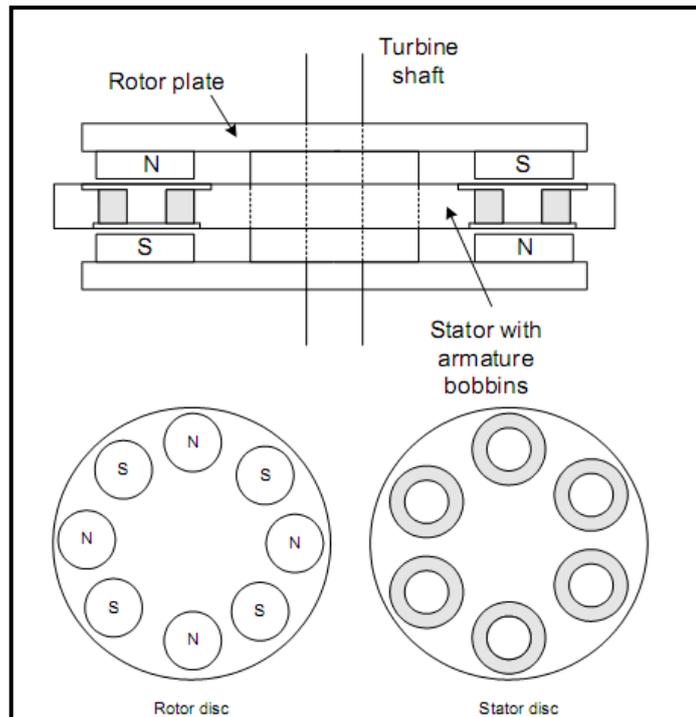
2.13.1 Klasifikasi Generator

Secara garis besar generator diklasifikasikan menjadi dua, yaitu generator arus searah dan generator arus bolak-balik. Untuk pembangkit listrik tenaga angin menggunakan generator arus bolak-balik, yakni generator sinkron (alternator). Generator sinkron merupakan suatu mesin pembangkit tenaga listrik, dimana besar frekuensi tegangan yang dihasilkan berbanding langsung dengan kecepatan putaran rotornya.

Pembangkit listrik tenaga angin biasanya dioperasikan dengan menggunakan generator sinkron yang memiliki magnet induksi listrik maupun magnet permanent. Pada pembangkit listrik secara kecil yang digunakan adalah magnet permanent sehingga dimensi dari generator tidak terlalu besar.

2.13.2 Prinsip Kerja Generator Magnet Permanen

Generator Magnet Permanen memiliki 2 buah rotor yang diberi magnet permanent dan 1 stator tanpa manet yang berada diantara 2 rotor. Diantara magnet permanent dan stator harus memiliki celah yang berfungsi sebagai tempat aliran fluksi saat rotor berputar, sehingga terjadi induksi magnetik. Pemasangan magnet pada rotor dibuat melingkar dengan kutub yang berpasangan seperti terlihat pada gambar



Gambar 2.5 Penampang Permanent Magnet Generator

Sumber: J. R. Bumby dkk, 2002, A Permanent Magnet Generator for Small Scale Wind Turbines

Pada gambar stator dililitkan dengan kumparan untuk menghasilkan listrik yang terjadi dari akibat induksi putaran rotor, sehingga saat rotor berputar akan timbul fluksi yang memotong kumparan pada stator sehingga mengakibatkan timbulnya arus induksi sehingga timbul tegangan yang digunakan sebagai output dari generator.

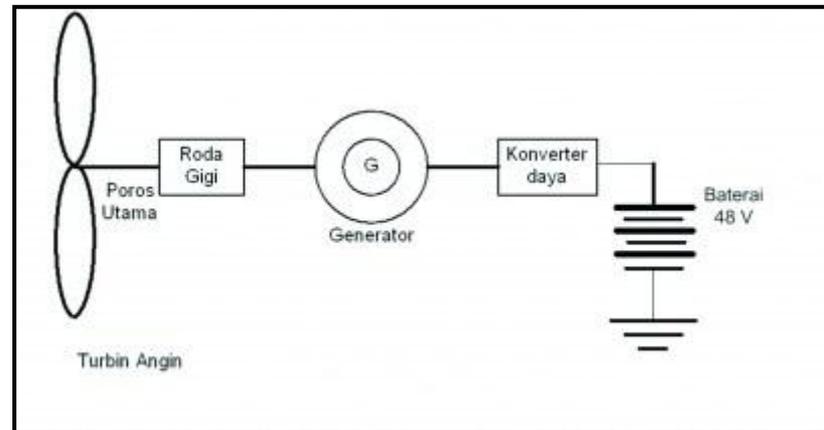


Gambar 2.6 Generator Pembangkit Listrik Tenaga Angin

(Sumber : <http://www.aliexpress.com/product-fm/>)

2.14. Konversi Energi Elektromekanik

Konversi energi baik dari energi listrik menjadi energi mekanik (motor) maupun sebaliknya dari energi mekanik menjadi energi listrik (generator) berlangsung melalui medium medan magnet. [Zuhal, 1991:56]



Gambar 2.7 Sistem Konversi Energi pada Turbin Angin

(sumber : <http://konversi.wordpress.com/>)

Energi yang akan diubah dari satu ke lain sistem, sementara akan tersimpan pada medium medan magnet untuk kemudian dilepaskan menjadi energi sistem lainnya. Dengan demikian medan magnet di sini selain berfungsi sebagai tempat penyimpanan energi juga sekaligus sebagai medium untuk mengkopel proses perubahan energi.

Pada perancangan ini konversi energi terjadi dikarenakan putaran dari sudu yang dikopel dengan generator sehingga mengakibatkan generator berputar. Pada mesin konvensional generator harus diputar mencapai putaran nominal, kondisi yang terjadi bila tidak diputar mencapai putaran nominal adalah tegangan generator akan lebih kecil dari tegangan beban sehingga tidak terjadi aliran daya.

2.15. Sistem Kelistrikan Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Pada pembangkit listrik tenaga angin dibutuhkan sistem untuk menyalurkan energi dari turbin angin ke peralatan yang ditujukan agar dapat bekerja sesuai dengan kebutuhan. Sistem kelistrikan meliputi pengontrolan dan keamanan, tapi pada perancangan ini tidak dilakukan studi untuk penentuannya sehingga hanya perlu diketahui jenis-jenis peralatan sistem kelistrikannya yaitu:

1. Charge Controller

Merupakan pengaman agar battery bank tidak mengalami *overcharging* sehingga tidak mengalami kerusakan. *Charge Controller* dilengkapi dengan *rectifier* sehingga tegangan AC dari PMA dijadikan tegangan DC yang sesuai dengan battery.

2. Dump Load

Merupakan beban yang digunakan sebagai pengaman apabila *battery* maupun jaringan listrik tidak dapat menerima energi yang dihasilkan. Dump Load sudah termasuk dalam *charge controller*.

3. Battery Bank

Battery yang digunakan dapat berbagai jenis mulai 12, 24, 48, 60 volt

4. System Meter

System meter berfungsi sebagai penunjuk nilai energi pada battery, sehingga dapat dilakukan pengecekan apabila terjadi kerusakan pada battery.

5. Main DC Disconnect

Berfungsi sebagai pengaman antara battery dengan inverter sehingga akan terputus otomatis saat terjadi short-circuit.

6. Inverter

Berfungsi sebagai converter DC-AC sehingga dapat difungsikan untuk peralatan AC. Inverter yang digunakan adalah tipe PI-500GWAL.

7. AC Breaker Panel

Biasa disebut *fuse box* sebagai terminal kabel-kabel yang akan dihubungkan dengan pembangkit listrik tenaga angin, sehingga menjadi pengaman bila terjadi short-circuit.

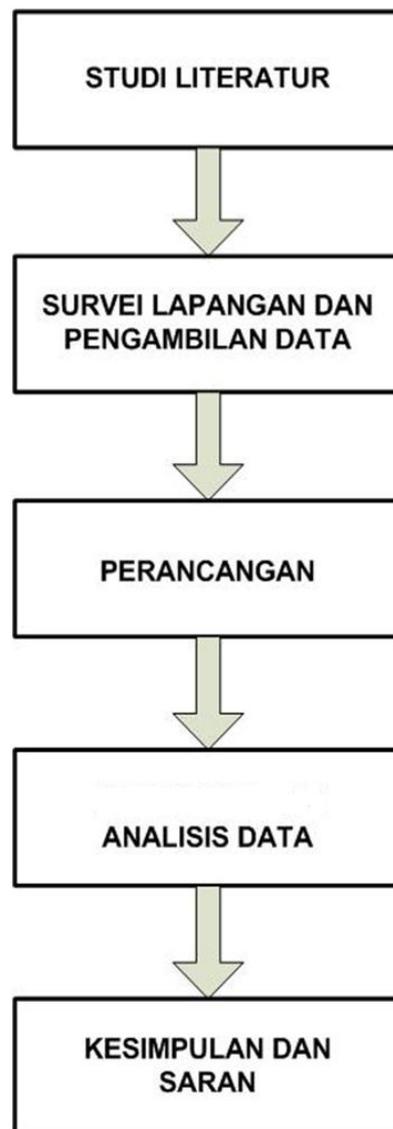
8. kWh Meter

Penunjuk konsumsi listrik yang digunakan dari pembangkit listrik tenaga angin.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Kerangka Umum

Kerangka umum metodologi pengerjaan skripsi ini adalah sebagai berikut:



Gambar 3.1 Kerangka Umum Metode Pengerjaan Penelitian

Dari blok diagram dapat dilihat bahwa secara umum tahapan kegiatan penelitian ini terdiri atas:

3.2 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mempelajari buku-buku dan literatur yang menunjang dalam penelitian ini, antara lain:

1. Mempelajari teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Angin.
2. Mempelajari konversi energi pada Pembangkit Listrik Tenaga Angin.
3. Mempelajari komponen-komponen Pembangkit Listrik Tenaga Angin.
4. Mempelajari sistem konstruksi kincir angin.
5. Mempelajari teknik perancangan pada kincir angin.
6. Mempelajari spesifikasi pebandingan daya dan kecepatan Pembangkit Listrik Tenaga angin yang ada di pasaran.

3.3 Survey Dan Pengambilan Data Yang Diperlukan

Pengambilan data yang dilakukan untuk memudahkan proses pengerjaan skripsi ini. Dilakukan langsung mengukur kekuatan potensi angin dari blower di pabrik PT Ajinomoto kota Mojokerto. Data-data yang diambil merupakan data-data tentang kecepatan angin, luas sapuan angin dari blower, tinggi blower, kontinuitas angin dari blower, dan data-data lain yang menunjang untuk pembuatan skripsi ini. Data-data yang telah didapatkan berfungsi untuk menentukan jenis maupun bentuk konstruksi dari pembangkit listrik tenaga angin tersebut, sehingga dapat ditentukan jenis maupun bentuk konstruksi yang sesuai dari segi teknis maupun ekonomis. Jenis data yang digunakan ada 2 yaitu:

1. Data Primer

Data primer adalah data yang langsung diambil pada lokasi atau lapangan (dari sumbernya), atau data yang masih asli dan masih memerlukan analisis lebih lanjut. Dalam hal ini, data yang dihimpun adalah:

a. Potensi angin

Data ini didapat melalui pengukuran menggunakan alat ukur dengan metode yang telah dirancang sedemikian rupa untuk mengetahui potensi angin yang ada di PT Ajinomoto Mojokerto.

b. **Kondisi Fisik**

Data ini didapatkan melalui proses interview, observasi dan dokumentasi perusahaan yang berhubungan dengan data tersebut dan data-data lain yang ada kaitannya dengan penelitian.

2. **Data Sekunder**

Data sekunder adalah data yang diperoleh dari atau berasal dari bahan perpustakaan dan peneliti secara tidak langsung melalui mediator. Sedangkan data sekunder yang digunakan adalah:

1. Jenis-jenis pembangkit listrik tenaga angin yang sesuai, dengan spesifikasi teknis, harga, grafik
2. rumus-rumus yang digunakan untuk menghitung atau mengolah data primer yg telah didapatkan
3. software yang akan digunakan untuk membandingkan hasil dengan perhitungan manual.

Sedangkan untuk sumber data pada penelitian ini, yaitu:

1. Informan adalah orang yang dimanfaatkan untuk memberikan informasi tentang situasi dan kondisi latar penelitian.
2. Dokumen yang ada kaitannya dengan penelitian, yaitu data yang berupa arsip, jurnal, artikel yang berhubungan dengan proses perancangan pembangkit listrik tenaga angin.

3.4 **Perancangan**

Perancangan dilakukan setelah semua data yang diperlukan terkumpul. Untuk perancangan meliputi dimensi sudu, spesifikasi generator, dan ukuran tower. Perancangan dilakukan dengan menggunakan software autocad, sehingga dapat diperoleh gambar rancangannya.

3.5 **Analisis Data yang Telah Dirancang**

Dalam tahap ini Setelah dimensi dan daya diketahui maka dianalisis untuk mengetahui hasil yang mendekati sebenarnya dilakukan melalui metode manual

maupun dengan software. Dapat ditentukan pula harga listrik yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga angin tersebut dengan PLN, dan perbandingan daya dan kecepatan antara pembangkit listrik tenaga angin yang dirancang dengan pembangkit listrik tenaga angin lainnya yang sudah beredar di pasaran.

3.6 Kesimpulan dan Saran

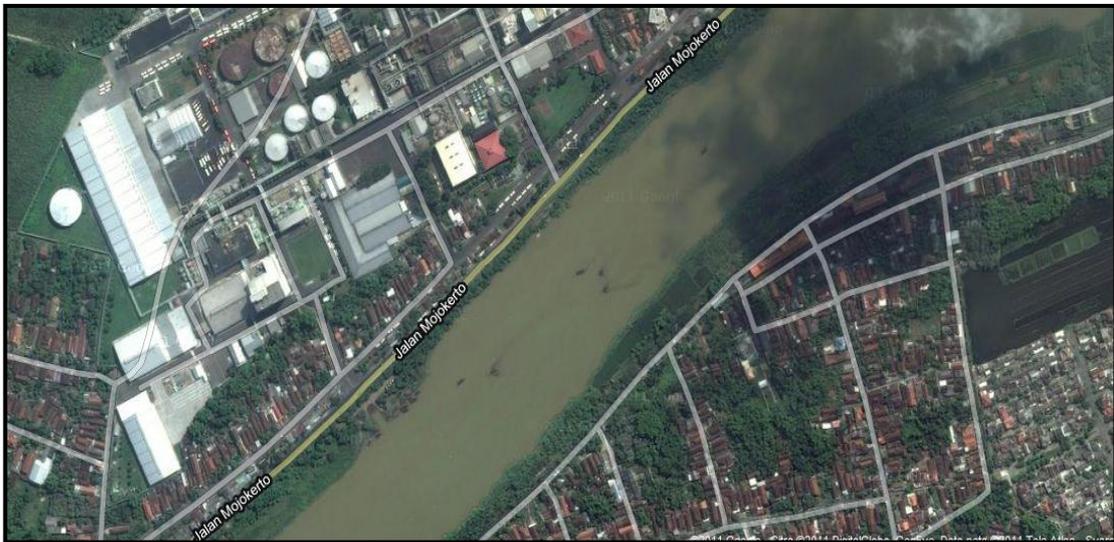
Sebagai akhir dari kegiatan penelitian ini disusunlah suatu kesimpulan dari semua proses analisis yang telah dilakukan, serta saran agar kedepannya hasil yang diperoleh dalam perancangan pembangkit listrik tenaga angin ini dapat lebih baik lagi.

BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Identifikasi Lokasi

Survey potensi untuk pembangkit listrik tenaga angin dilakukan di PT Ajinomoto kota Mojokerto provinsi Jawa Timur. Lokasi ini terletak di atas atap gedung produksi ajinex dengan ketinggian 30 meter, untuk sumber angin adalah memanfaatkan blower pabrik yang berada di atas gedung dan angin alam. Pada gambar dapat terlihat jelas lokasi PT Ajinomoto yang berada di samping sungai berantas.



Gambar 4.1 Area pabrik PT Ajinomoto
Sumber : Google Map

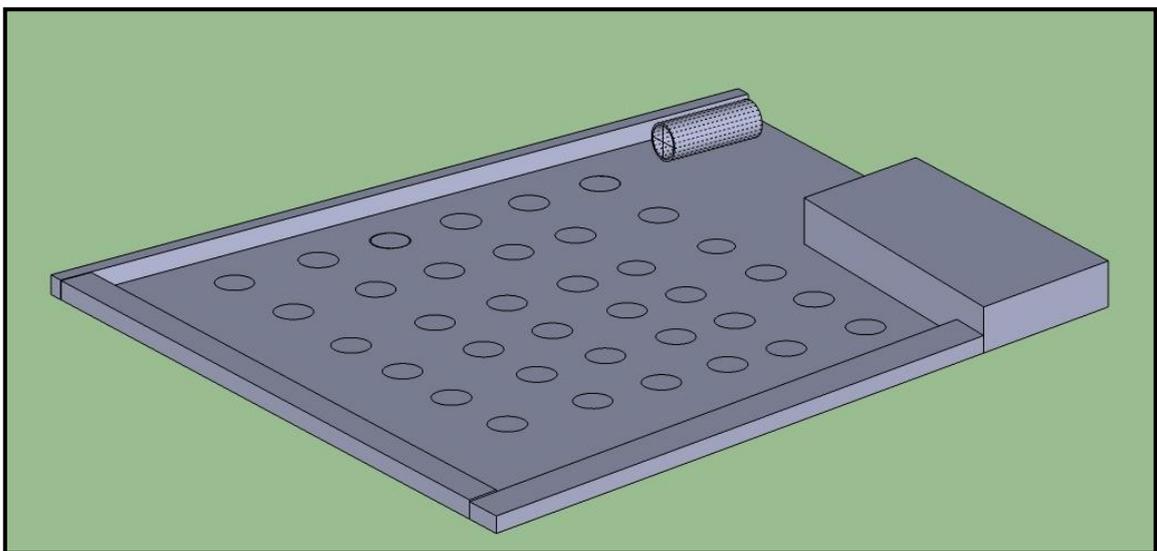
4.2 Potensi Energi Angin yang Terdapat pada PT Ajinomoto

Untuk merancang sebuah pembangkit listrik tenaga angin atau selanjutnya dapat disebut turbin angin perlu diketahui beberapa parameter sebagai berikut, antara lain:

- a. Kecepatan angin sebagai sumber utama turbin angin dalam m/s, (diperoleh dengan melalui pengukuran menggunakan anemometer).
- b. Maksimal daya yang dapat dibangkitkan oleh turbin angin, (diperoleh dengan perhitungan).
- c. Letak sumber angin, (diperoleh melalui pengukuran yang mencakup panjang, tinggi, lebar area).

Beberapa parameter diatas dapat digunakan untuk menentukan dimensi dari turbin angin yang akan dirancang, sehingga dapat digunakan pada kondisi sebenarnya.

Untuk memperoleh parameter-parameter yang diperlukan pada perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Angin sebelumnya akan dilakukan pengambilan data yang dilakukan di PT Ajinomoto dan berlokasi di atap gedung produksi Ajinex, karena atap gedung produksi ajinex memiliki sumber angin dari blower dan tempatnya cukup luas untuk dijadikan pembangkit listrik tenaga angin. Pengukuran dilakukan dengan cara membagi atap gedung produksi Ajinex menjadi beberapa titik yang terlihat pada gambar.



Gambar 4.2 Lokasi Pengukuran (Atap PT Ajinex)

(Sumber : penulis)

Dengan area panjang 9 meter, lebar 9 meter, dan luas $81 m^2$ maka lokasi tersebut dapat dibagi menjadi 36 lingkaran pengukuran dengan jarak setiap lingkaran adalah 1,5 meter. Lingkaran-lingkaran pengukuran tersebut ditandai oleh lambang x dan z, sehingga pada hasil pengukuran nanti akan menjadi koordinat.

Pengukuran dilakukan dengan menggunakan metode kuantitatif, sehingga data diambil berdasarkan pengukuran dengan menggunakan alat ukur, alat ukur yang digunakan adalah alat pengukur kecepatan angin atau anemometer dan anemometer yang digunakan adalah tipe AZ 8904.



Gambar 4.3 Anemometer AZ 8904

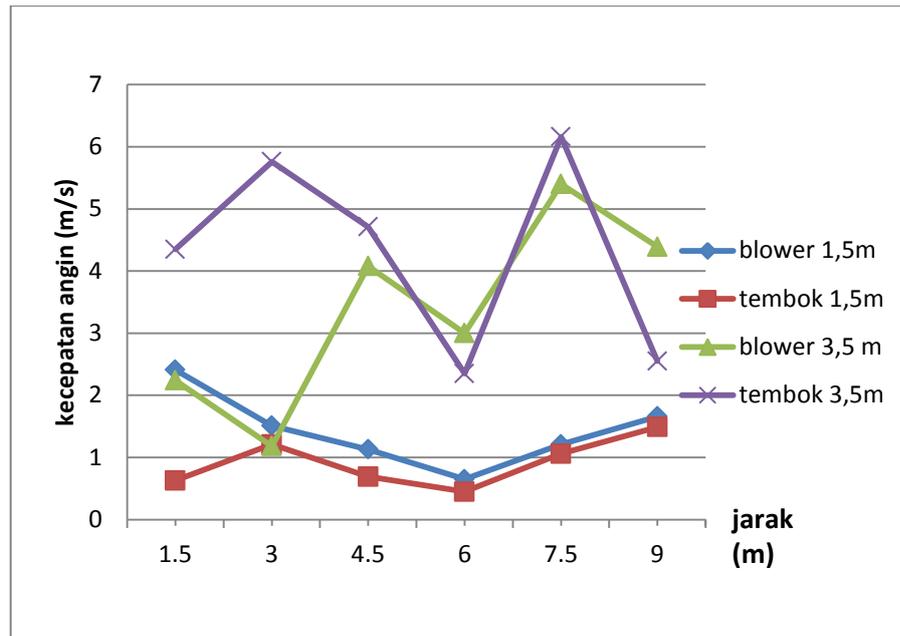
(Sumber : <http://www.aliexpress.com/product-fm>)

Secara umum cara penggunaan dari anemometer ini adalah dengan mengarahkan anemometer ini ke sumber angin, maka baling-baling anemometer akan berputar dan pada display akan terlihat kecepatan angin.

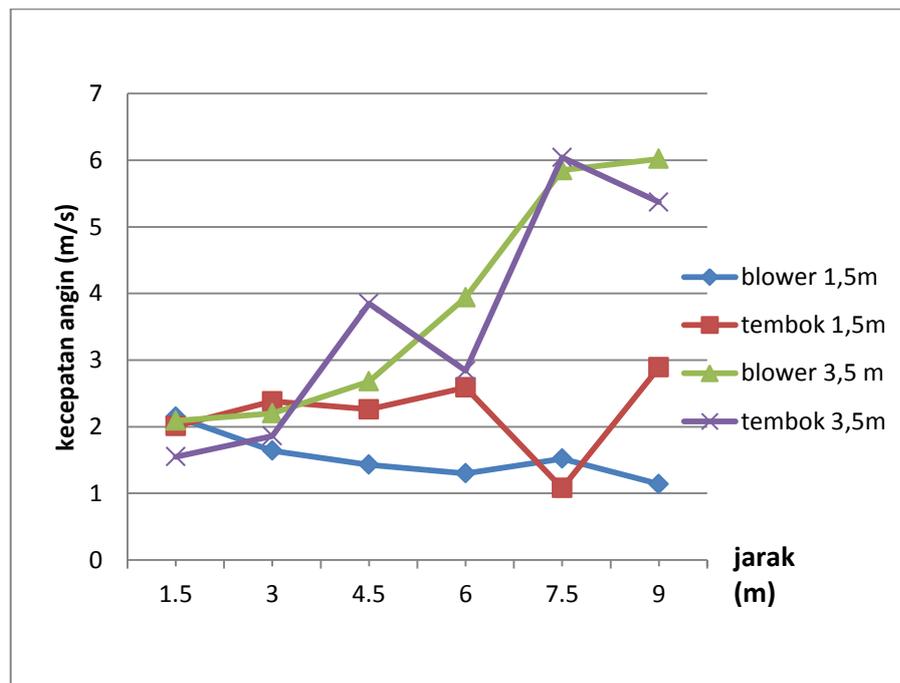
Pengukuran ini dilakukan di koordinat-koordinat yang ditetapkan, karena keterbatasan sarana maka hanya dapat dilakukan 2 pengukuran ketinggian yaitu pada ketinggian 1,5 meter dari lantai atap dan 3,5 meter dari lantai atap. Melihat posisi blower yang menghadap ke tembok sehingga terjadi pantulan angin maka pengukuran dilakukan dengan 2 kondisi yaitu menghadap ke tembok dan menghadap ke arah blower.

Setelah di ukur maka didapatkan potensi sumber angin yg telah diukur, data untuk potensi dapat dilihat **di lampiran**.

Data yang diperoleh ditampilkan dalam bentuk grafik, diambil contoh pada koordinat x_2 dan koordinat x_4



Gambar 4.4 Hasil Pengukuran di Titik x_2



Gambar 4.5 Hasil Pengukuran di Titik x_4

Pada grafik pertama yaitu pada koordinat x_2 kecepatan angin untuk 3 kondisi yaitu tembok 1,5 meter, blower 1,5 meter, dan blower 3,5 meter bernilai sama yaitu antara 1-1,5 m/s, hal ini berlawanan dengan angin pada kondisi tembok 3,5 meter yang memiliki kecepatan 5,76 meter. Grafik kedua yaitu pada koordinat x_4 pada jarak 1,5 meter untuk 3 kondisi yaitu tembok 1,5 meter, blower 1,5 meter, dan blower 3,5 meter memiliki kecepatan angin yang relatif sama yaitu 2 m/s.

Dari data yang telah diambil maka dapat dihitung potensi energi yang dapat dibangkitkan oleh pembangkit listrik yang ingin dirancang dengan menggunakan rumus estimasi sementara yaitu: persamaan (2-7) (asan damanik,2011)

$$P = 0,1v^3$$

Dengan:

P: daya per satuan luas (W/m^2)

v: kecepatan angin (meter/detik)

Apabila diambil contoh kecepatan angin maksimal yang didapatkan pada titik x_4, z_5 maka:

$$\begin{aligned} P &= 0,1v^3 \\ &= 0,1 \cdot 6,04^3 \\ &= 22,03 \text{ Watt} \end{aligned}$$

Untuk hasil lengkap potensi energi yang dapat dibangkitkan di PT Ajinomoto dapat dilihat di **lampiran**.

Untuk merancang pembangkit listrik tenaga angin, ada beberapa kondisi yang harus dipenuhi yaitu:

- Angin kelas 3- kelas 8 yaitu kecepatan angin antara 3,4 m/s-20,7 m/s.
- Betz law yaitu maksimum energi angin yang dapat digunakan yaitu $\frac{16}{27} = 0,593 = 59,3\%$.
- Rata –rata cut-in wind speed atau minimal kecepatan angin untuk membangkitkan daya adalah 2,5 m/s-3 m/s.

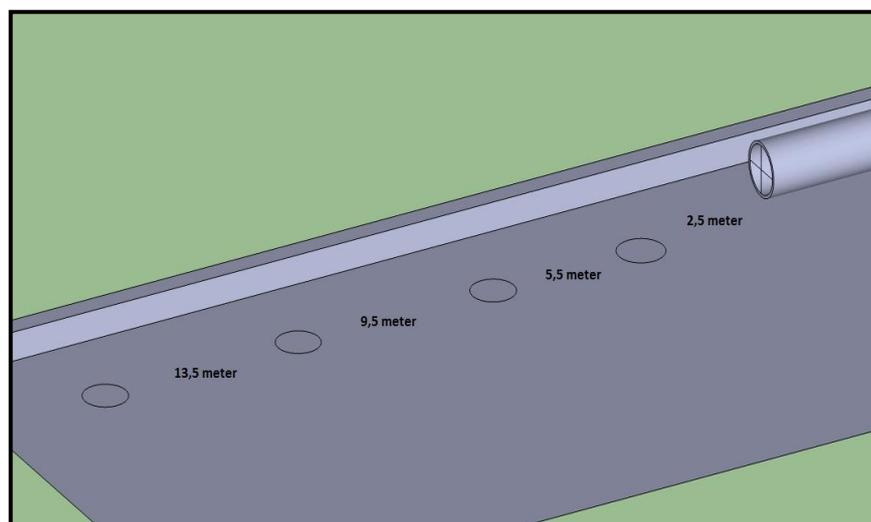
Dari data yang didapatkan dari hasil pengukuran profil angin yang bersumber dari angin alam ini memiliki kemampuan untuk membangkitkan angin yang sangat kurang dikarenakan tidak memenuhi kondisi yang dibutuhkan antara lain:

- Kecepatan angin yang terukur tidak memenuhi standart kelas angin ideal yang dibutuhkan untuk membangkitkan listrik pada ketinggian 1,5 meter dari lantai atap gedung (rata-rata angin adalah 1,4 m/s untuk blower dan 1,6 m/s untuk tembok).

- b. Berdasarkan beberapa parameter diatas, dengan menggunakan perhitungan estimasi awal daya yang dapat dibangkitkan bernilai sangat rendah (rata-rata daya angin yang dibangkitkan adalah 5 Watt).
- c. Angin yang diukur pada ketinggian 1,5 m rata-rata memiliki *cut in speed* (minimal kecepatan angin untuk menggerakkan sudu) yang sangat kurang (dibawah 2,5 – 3 m/s).

Membandingkan dengan hasil yang didapatkan perancangan pembangkit listrik tenaga angin dengan menggunakan angin alam tidak dapat dilakukan karena tidak memenuhi kondisi yang dibutuhkan dan pada perancangan pembangkit angin dengan menggunakan angin yang bersumber dari alam, permasalahan utama adalah angin yang didapatkan merupakan angin yang tidak konstan dikarenakan mengambil angin dari alam sehingga potensi anginnya tidak tetap. Untuk benar-benar mendapatkan hasil potensi angin yang mendekati pasti, perlu dilakukan studi minimal data kecepatan angin selama 1 tahun terakhir.

Pengukuran selanjutnya adalah sumber angin yang berasal dari blower. Pengukuran dilakukan dengan cara mengukur kecepatan angin yang menghadap ke blower dengan jarak yang berbeda beda sesuai dengan gambar



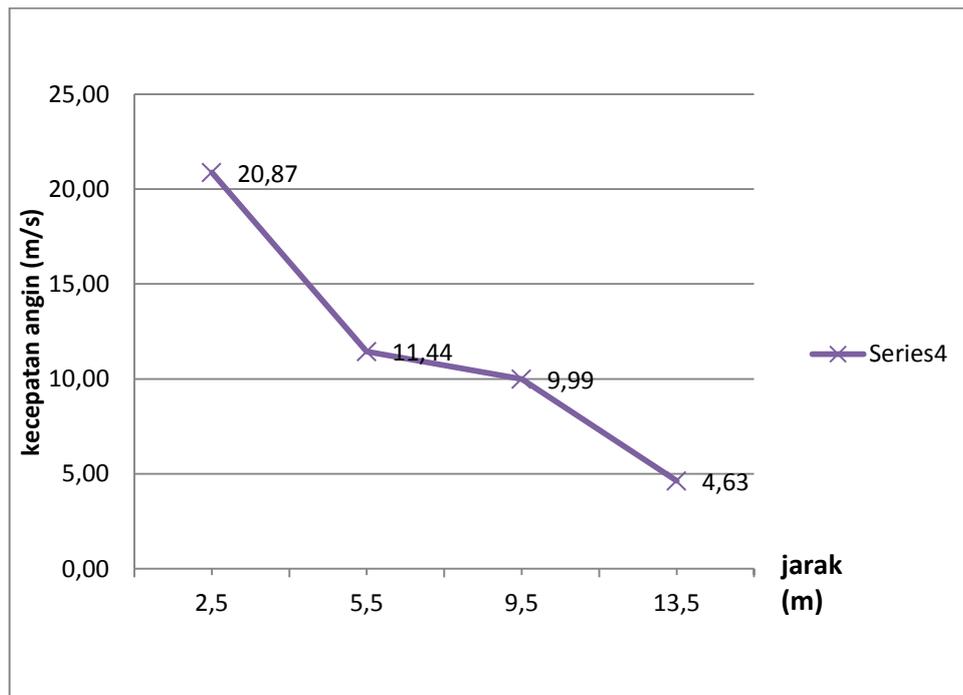
Gambar 4.6 Lokasi Pengukuran Blower (Atap PT Ajinex)

Pada gambar terlihat bahwa area yang diberi lingkaran adalah posisi tempat pengukuran yang akan dijadikan tempat pembangkit listrik tenaga angin. Pembangkit listrik yang akan dirancang menghadap ke arah blower sehingga mendapatkan angin bertipe laminer karena angin tidak memantul objek apapun tetapi langsung mengarah ke

turbin. Jarak yang diambil pada pengukuran adalah 2,5 meter, 5,5 meter, 9,5 meter, 13,5 meter, dan ketinggian 0,8 meter dari permukaan atap.

Tata cara pengukuran yang dilakukan sama dengan pengukuran sebelumnya yaitu tetap menggunakan anemometer sebagai alat ukur. Kontinuitas dari angin keluaran blower ini adalah konstan sehingga kecepatan angin yang dihasilkan akan selalu sama.

Hasil dari pengukuran untuk sumber dari blower buangan adalah



Gambar 4.7 Hasil Pengukuran pada Blower

Dari hasil tersebut dapat diperoleh estimasi daya sementara dengan memasukkan ke persamaan (2-7) (asan damanik,2011)

$$P = 0,1 v^3$$

Dengan:

P : daya per satuan luas (W/m^2)

v : kecepatan angin (meter/detik)

Melihat dari data yang diperoleh maka diketahui bahwa angin yang bersumber dari blower memenuhi kondisi yang dibutuhkan untuk merrancang pembangkit listrik yaitu:

- a. Kecepatan angin yang terukur memenuhi standart kelas angin ideal yang dibutuhkan untuk membangkitkan listrik (>4 m/s)
- b. Berdasarkan beberapa parameter diatas, dengan menggunakan perhitungan estimasi awal daya yang dapat dibangkitkan sangat tinggi (mencapai 900 Watt)
- c. angin yang diukur memiliki cut in speed (minimal kecepatan angin untuk menggerakkan sudu) yang sangat baik (didas 2,5 – 3 m/s)

Sehingga dalam perancangan ini digunakan angin yang berasal dari blower pabrik sebagai sumbernya dikarenakan memenuhi kondisi yang dibutuhkan untuk dijadikan pembangkit listrik.

Untuk hasil data lengkap potensi angin dari sumber blower buangan dapat dilihat pada **lampiran**.

4.3 Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Perancangan pembangkit listrik tenaga angin atau turbin angin ini dilakukan dengan mengacu pada parameter-parameter yang telah didapatkan sebelumnya dengan melihat aspek lingkungan yang ada.

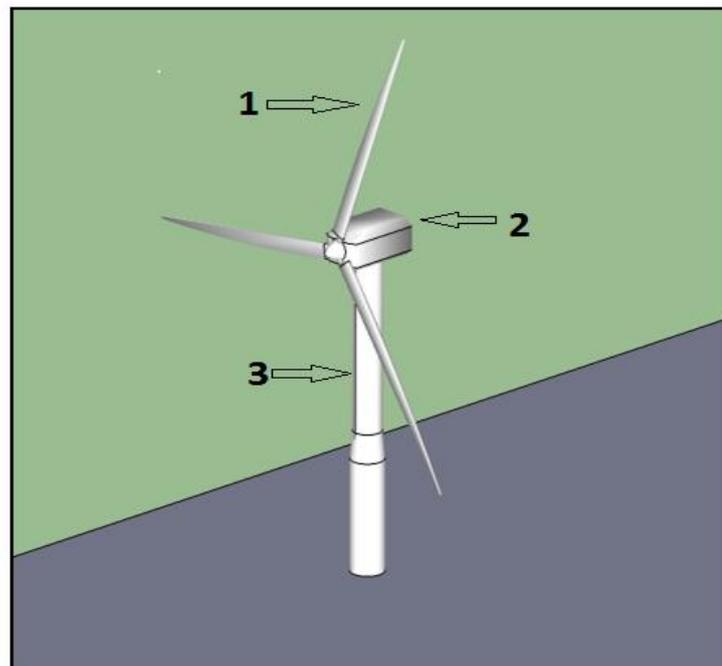
Ketinggian pengukuran adalah 0,8 meter dari permukaan atap gedung, sehingga ukuran rotor dari turbin angin seharusnya tidak melebihi 0,8 meter karena dapat mengenai lantai atap gedung. Melihat kondisi sudu yang tidak bias melebihi 0,8 meter maka harus dirancang sebuah turbin angin yang berskala kecil yaitu kurang dari 1 MW karena diatas 1 MW dimensi yang butuhkan akan melebihi 0,8 meter.

Kecepatan angin yang diukur memiliki kecepatan maksimal 20,87 m/s, sehingga turbin angin yang dirancang pun harus memiliki ketahanan untuk berputar pada angin kecepatan 20,87 m/s, untuk keamanan system dibulatkan menjadi 25 m/s. Apabila pembangkit ini digunakan sebagai sumber untuk peralatan listrik maka frekwensi harus 50 Hz dengan tegangan 220 volt, kondisi ini dapat disamakan dengan turbin anginnya menghasil kantegangan DC kemudian dijadikan AC dengan menggunakan inverter, sehingga batasan yang digunakan untuk memilih turbin angin yang ada di pasaran adalah:

- a. Rotor diameter tidak boleh melebihi 1,6 meter (0,8 x 2)
- b. Survival wind speed minimal 25 m/s
- c. Memiliki frekwensi 50 Hz

Melihat batasan yang ada dapat dilakukan perancangan pembangkit listrik tenaga angin yang meliputi:

1. Perancangan sudu kincir
2. Generator
3. Tower penyangga



Gambar 4.8 Bentuk Turbin Angin

Gambar 4.5 dan 4.6 merupakan pembangkit listrik tipe HAWT memiliki 3 sudu dengan 1 buah tower penyangga, untuk perhitungan mendetailnya akan ditampilkan pada perhitungan selanjutnya.

4.3.1 Perancangan Sudu Kincir Angin

Perancangan sudu kincir angin meliputi beberapa aspek yang perlu diketahui yaitu:

1. Tip Speed Ratio
2. Jumlah sudu yang digunakan
3. Jenis sudu yang digunakan
4. Dimensi sudu

4.3.1.1 Tip Speed Ratio

Untuk mengetahui nilai putaran *rotor* turbin angin perlu diketahui nilai *tip speed ration*nya dahulu. *Tip speed ratio* Merupakan perbandingan nilai antara kecepatan sudu angin dengan kecepatan angin. Nilai TSR biasanya antara 1-10, semakin besar nilainya maka kecepatan turbin juga akan semakin besar. Pada perancangan ini ditentukan bahwa TSR yang digunakan bernilai 6, dikarenakan turbin yang dirancang difungsikan sebagai pembangkit listrik (range untuk TSR 5-8).

4.3.1.2 Jumlah Sudu

Dalam menentukan jumlah sudu, dilakukan dengan melihat tujuan perancangan turbin angin. Sudu yang digunakan sebagai mesin giling memiliki jumlah sudu yang banyak, sedangkan untuk turbin yang difungsikan sebagai pembangkit listrik memiliki sudu yang sedikit, pada prinsipnya untuk pembangkit listrik semakin sedikit sudu semakin baik.

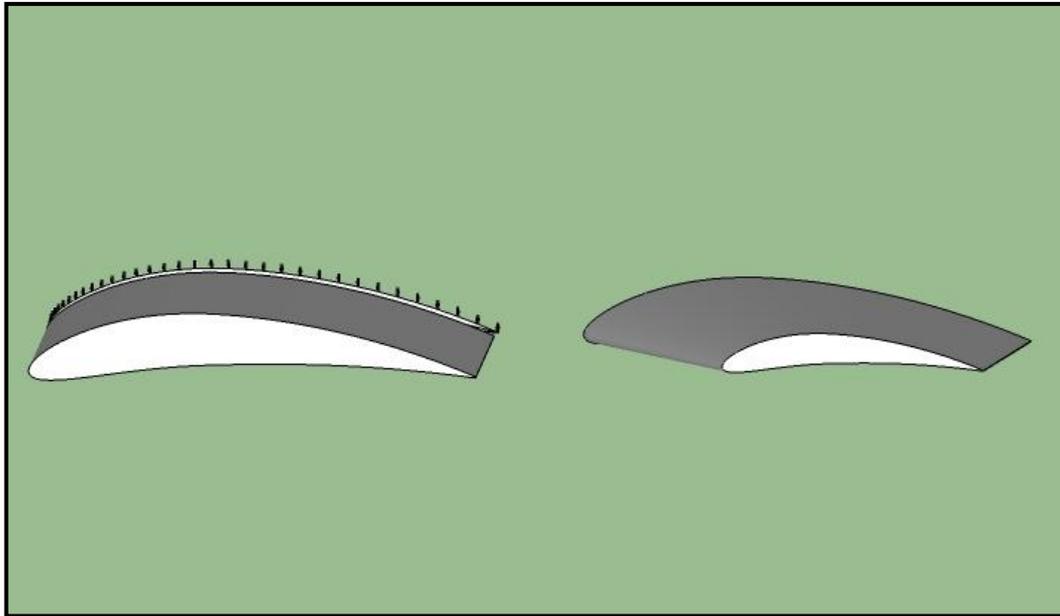
Pada perancangan ini ditentukan jumlah sudu yang dipilih berjumlah tiga, dikarenakan untuk sudu yang lebih sedikit yaitu 2 sudu dan 1 sudu memiliki kekurangan, jumlah sudu 1 mengakibatkan sudu susah untuk berputar, dan jumlah sudu 2 memiliki kekurangan yaitu kebisingan, starting yang susah, tidak seimbang dll.

4.3.1.3 Jenis sudu

Sudu turbin angin memiliki berbagai macam jenis, penggunaannya ditentukan oleh fungsi turbin angin tersebut. Dalam memilih jenis sudu hal yang perlu diperhatikan adalah koefisien tarik (C_D) dan koefisien angkat (C_L), nilai dari 2 koefisien tersebut mempengaruhi gaya tarik (F_D) dan gaya angkat (F_L) dari sudu. Pada pemilihan sudu yang baik dicari sudu yang memiliki nilai C_D yang kecil dan C_L yang besar, untuk perancangan ini ditentukan bahwa sudu yang digunakan yaitu jenis NACA 4412. Spesifikasi NACA 4412 adalah:

- $C_L = 0,8$
- $C_D = 0,008$
- $C_L/C_D = 100$
- *Angel of attack* / sudut serang = 4^0

Nilai C_L/C_D yang besar dapat membuat sudu beputar lebih cepat dikarenakan koefisien angkatnya tinggi sehingga cocok digunakan untuk pembangkit listrik tenaga angin.



Gambar 4.9 Bentuk Airfoil NACA 4412 (tampak depan)

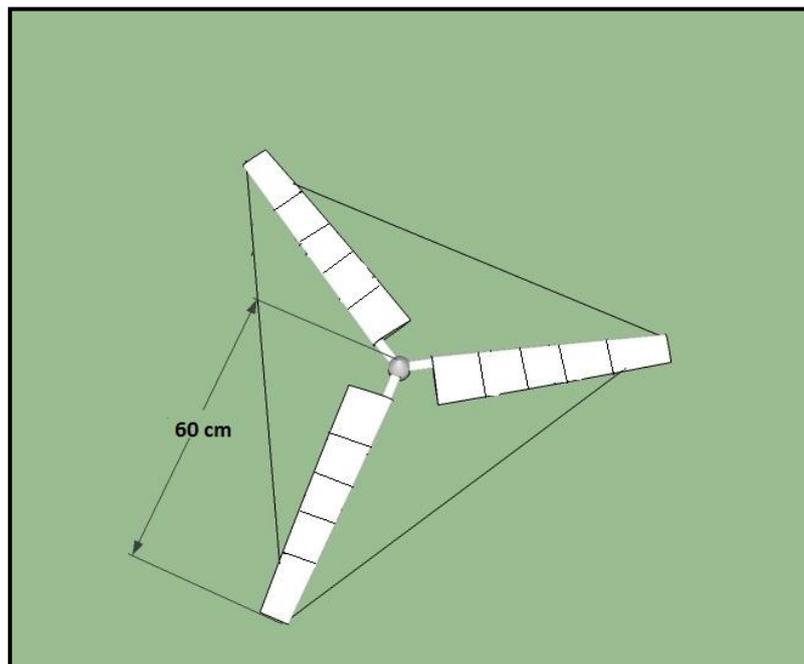
4.3.1.4 Dimensi Sudu

Dimensi sudu melingkupi beberapa nilai yaitu:

- a. Diameter Sudu
 - b. Sudut penempatan
 - c. Lebar sudu
 - d. Ketebalan sudu
- c. **Diameter Sudu**

Diameter sudu merupakan faktor penting dalam menentukan daya yang dapat dibangkitkan oleh turbin angin, melihat kondisi lingkungan yaitu ketinggian maksimal tidak dapat melebihi 0,8 meter maka panjang sudu harus dibawah dari 0,8 meter, untuk pembangkit tenaga angin yang banyak digunakan sekarang, nilai radius yang digunakan tidak krang dari 0,5 meter, karena pertimbangan semakin besar sudu maka daya yang dihasilkan juga semakin besar, sehingga radius sudu yang dapat digunakan adalah dalam kisaran 0,5-0,8 meter. Perhitungan selengkapnya untuk perkiraan daya yang dibangkitkan dapat dilihat pada **lampiran**. Setelah dihitung dan dianalisa ditentukan

bahwa radius sudu adalah 0,6 meter atau diameter 1,2 meter, dengan asumsi bahwa pembangkit listrik ukuran mini yang paling sering digunakan adalah tipe Air-X dengan diameter sudu 1,17 meter, sehingga diameter 1,2 meter dianggap mendekati kondisi pembangkit yang paling sering digunakan dan dapat berputar tanpa harus mengenai lantai atap gedung.



Gambar 4.10 Bentuk Sudu Turbin Angin

d. **Jumlah station**

Bentuk permukaan sudu angin yang dirancang memiliki dua ujung yaitu ujung atas atau disebut “*tip*” dan ujung bawah yang disebut “*base*”, ukuran antara *tip* dengan *base* tidak sama dikarenakan kemampuan untuk menangkap anginnya pun berbeda. Bagian *tip* memiliki kemampuan untuk menangkap angin yang lebih baik daripada *base* karena cakupan areanya lebih luas, sehingga dalam perancangan ini sudu dibagi menjadi 5 *station* yang memiliki lebar berbeda.

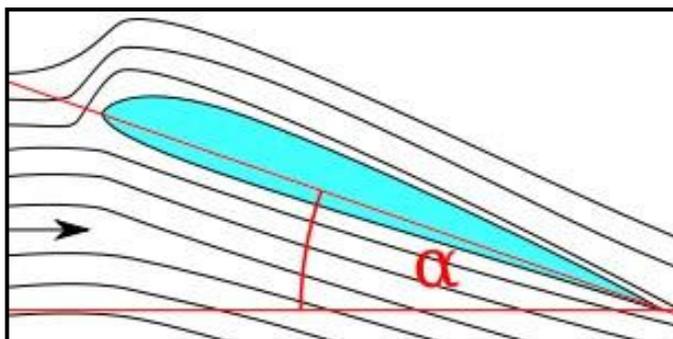


Gambar 4.11 Bentuk Sudu Turbin Angin 5 Station dengan TSR 6

Sumber : wind power workshop, hugh piggot, 2001

e. **Sudut Serang**

Sudut penempatan merupakan sudut antara *chord line* dan *plane rotation* dari turbin angin, nilai dari sudut ini mempengaruhi kemampuan sudu untuk menangkap angin. Sudu jenis NACA 4412 memiliki *angle of attack* atau sudut serang yaitu sudut antara *chord line* dengan permukaan sudu senilai 4° , sehingga dengan jumlah station 5 dan *tip speed ratio* 6 maka nilai sudut penempatannya dapat dilihat pada tabel

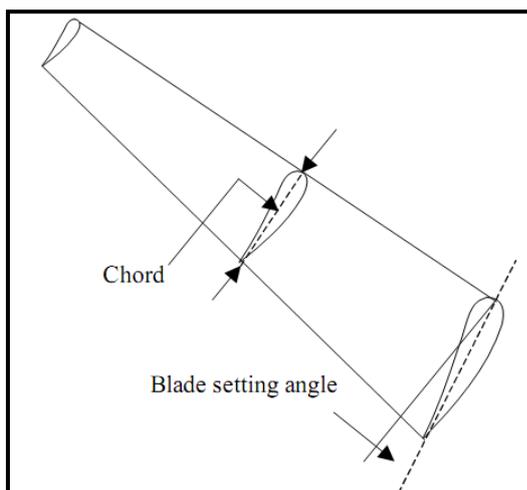


Gambar 4.12 Posisi Penempatan Sudu

Sumber : http://jedismedicine.blogspot.com/2010_01_01_archive.html

Nilai dari sudut serang dapat diubah-ubah sesuai dengan kebutuhan karena dengan merubah sudut serang maka kemampuan untuk menangkap angin juga berubah.

f. **Lebar Sudu**



Gambar 4.13 Lebar Sudu atau Chord Line

(Sumber : wind power workshop, hugh piggot, 2001)

Setelah diameter, jumlah sudu, jumlah *station* dan *tip speed ratio* sudah diketahui maka lebar sudu dapat diketahui dengan melihat tabel 2.6.2.2 , sehingga lebar setiap *station* dapat dihitung dengan:

$$\text{Station 1: } 1,2 \times 0,123 = 0,074 \text{ meter} = 14,8 \text{ cm}$$

$$\text{Station 2: } 1,2 \times 0,075 = 0,045 \text{ meter} = 9,00 \text{ cm}$$

$$\text{Station 3: } 1,2 \times 0,052 = 0,031 \text{ meter} = 6,20 \text{ cm}$$

$$\text{Station 4: } 1,2 \times 0,040 = 0,024 \text{ meter} = 4,80 \text{ cm}$$

$$\text{Station 5: } 1,2 \times 0,032 = 0,019 \text{ meter} = 3,80 \text{ cm}$$

dari perhitungan lebar sudu atau *chord line* tersebut dapat terlihat bahwa semakin ke ujung/*tip* ukuran dari sudu semakin kecil.

g. **Luas Sudu**

Setelah parameter panjang dan lebar sudu diketahui, maka luas sudu dapat dihitung dengan rumus:

$$\begin{aligned} L &= \frac{l \text{ base} + l \text{ tip}}{2} \cdot p \\ &= \frac{0,148 + 0,038}{2} \cdot 0,6 \\ &= \frac{0,186}{2} \cdot 0,6 \\ &= 0,056 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

4.3.1.5 Bahan Sudu

Bahan yang digunakan untuk membuat sudu dapat bermacam-macam biasanya yang digunakan adalah kayu, logam (selain besi), besi, plastic. Setiap bahan memiliki keunggulan masing-masing. Perancangan ini ditentukan menggunakan plastic sebagai bahan pembuatannya karena ringan, tahan terhadap berbagai cuaca, dan paling banyak diproduksi.

4.3.1.6 Luas daerah sapuan angin

Melihat bahwa sudu ditentukan memiliki panjang 0,6 meter maka dapat dihitung luas daerah sapuan anginnya dengan menggunakan persamaan (2-8)

$$A = \pi r^2$$

$$= 3,14 \cdot 0,36$$

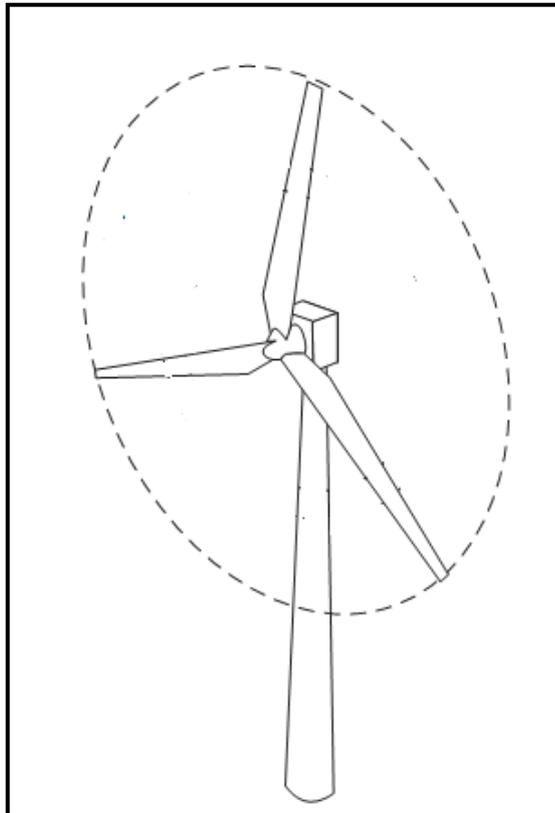
$$= 1,13 \text{ m}^2$$

Dengan:

$$\pi = 3,14$$

r = Jari-Jari Sudu (m)

A = Luas Sapuan Area Turbin Angin (m^2)



Gambar 4.14 Luas Daerah Sapuan Angin

Sumber: Tony Burtton dkk, 2001, Wind Energy Handbook

4.3.1.7 Soliditas

Setelah diketahui luas dari sudu dan luas daerah sapuan angin maka dapat diketahui nilai soliditasnya dengan dimasukkan ke persamaan (2-16), sehingga:

$$S = \frac{nxl}{A}$$

$$= \frac{3 \times 0,56}{1,13}$$

$$= 0,15$$

Dimana:

S = Solidity

n = Jumlah Sudu

l = Luas Tiap Sudu (m^2)

A = Luas Sapuan Area Turbin Angin (m^2)

Nilai soliditas yang didapatkan termasuk dalam kategori soliditas rendah sehingga memiliki torsi kecil dan kecepatan tinggi, sehingga cocok untuk pembangkit listrik.

4.3.1.8 Kerapatan Udara (ρ)

Kerapatan udara merupakan faktor yang berpengaruh pada kecepatan angin sehingga mempengaruhi hasil daya yang dikeluarkan, nilainya adalah $1,2 \text{ kg/m}^3$

4.3.1.9 *Dynamic Pressure*

Setelah kerapatan udara diketahui maka dapat dicari *Dynamic Pressure*-nya dengan memasukkan ke persamaan (2-9). (Tony Burton dkk, 2001)

- Untuk kecepatan angin $v = 10 \text{ m/s}$

$$\begin{aligned} W_d &= \frac{1}{2} \rho v^2 \\ &= \frac{1}{2} 1,2 \cdot 10^2 \\ &= 60 \text{ N/m}^2 = 6,12 \text{ kg} \end{aligned}$$

Dengan:

W_d : *Dyanamic Pressure* $(\text{kg atau } N/m^2)$

ρ : Kerapatan Udara (kg/m^3)

v : Kecepatan Angin (m/s)

Hasil selengkapnya dapat dilihat pada tabel 4.1

Tabel 4.1 Hasil Perhitungan *Dynamic Pressure*

No	Jarak (meter)	Kecepatan Angin (m/s)	<i>Dynamic Pressure</i>	
			(N/m ²)	kg
1	2,50	20,87	13,00	1,33
2	5,50	11,44	60,00	6,12
3	9,50	10,00	78,50	8,00
4	13,50	4,63	261,00	26,00

4.3.1.10 Lift Pressure (p_L) dan Drag Pressure (p_D)

Nilai *Lift Pressure* dan *Drag Pressure* sangat dipengaruhi oleh koefisien angkat dan koefisien gesernya, semakin besar *Lift Pressure* maka putaran turbin juga akan semakin cepat, sebaliknya jika *Drag Pressure* besar maka akan memperlambat putaran turbin. *Lift Pressure* dan *Drag Pressure* dapat diketahui dengan memasukkan ke persamaan 2.6.5 sehingga:

- Kecepatan angin $v = 10 \text{ m/s}$

$$\begin{aligned}
 p_L &= \frac{1}{2} \rho v^2 C_L \\
 &= \frac{1}{2} 1,2 \cdot 10^2 0,8 \\
 &= 48 \text{ N/m}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 p_D &= \frac{1}{2} \rho v^2 C_D \\
 &= \frac{1}{2} 1,2 \cdot 10^2 0,008 \\
 &= 0,48 \text{ N/m}^2
 \end{aligned}$$

Dengan:

$$p_L = \text{Lift Pressure} \quad (\text{N/m}^2)$$

$$p_D = \text{Drag Pressure} \quad (\text{N/m}^2)$$

$$\rho = \text{Kecepatan Sudut} \quad (\text{kg/m}^3)$$

$$C_L = \text{Koeffisien Lift}$$

C_D = Koeffisien Drag

v = Kecepatan Angin (m/s)

Hasil perhitungan selengkapnya dapat dilihat pada tabel 4.2

Tabel 4.2 Hasil Perhitungan Lift dan Drag Force

No	Jarak (meter)	Kecepatan Angin (m/s)	Lift Pressure (N/m ²)	Drag Pressure (N/m ²)
1	2,50	20,87	10,40	0,10
2	5,50	11,44	48,00	0,48
3	9,50	10,00	62,80	0,63
4	13,50	4,63	209,07	2,09

4.3.1.11 Kecepatan putaran turbin angin

Setelah ditentukan nilai *Tip speed rationya* maka dapat diketahui kecepatan sudut turbin angin dengan memasukkan ke persamaan (2-13)

- Kecepatan angin $v = 10\text{m/s}$

$$\lambda = \frac{\omega R}{v_1}$$

$$\omega = \frac{\lambda v_1}{R}$$

$$= \frac{6 \cdot 10}{0,6}$$

$$= 100 \text{ rad/s}$$

Dengan:

λ = Tip Speed Ratio

ω = Kecepatan Sudut (rad/s)

R = Radius Sudu (meter)

v_1 = Kecepatan Angin (m/s)

Hasil perhitungan selengkapnya dapat dilihat pada tabel 4.3

Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Kecepatan Sudut

No	Jarak (meter)	Kecepatan Angin (m/s)	Kecepatan Sudut (rad/s)
1	2,50	20,87	208,70
2	5,50	11,44	114,40
3	9,50	10,00	100,00
4	13,50	4,63	46,30

Setelah kecepatan sudut diketahui maka dapat diketahui putaran dari rotor turbin angin dengan memasukkan ke persamaan (2-14) yaitu:

- **Kecepatan angin $v = 10 \text{ m/s}$**

$$\begin{aligned}
 N &= \frac{60\omega}{2\pi} \\
 &= \frac{60 \cdot 100}{2 \cdot 3,14} \\
 &= 955,4 \text{ rpm}
 \end{aligned}$$

Dengan :

N = Putaran Rotor (rpm)

ω = Kecepatan Sudut (rad/s)

$\pi = 3,14$

Hasil perhitungan selengkapnya dapat dilihat pada tabel 4.4

Tabel 4.4 Hasil Perhitungan Putaran Rotor

No	Jarak (meter)	Kecepatan Angin (m/s)	Putaran Rotor (rpm)
1	2,50	20,87	1994,00
2	5,50	11,44	1093,00
3	9,50	10,00	955,40
4	13,50	4,63	442,36

Setelah diketahui nilai putarannya dan dibandingkan dengan soliditas turbin angin, maka terbukti bahwa turbin angin memiliki putaran yang sangat cepat. Permasalahan yang timbul adalah mengacu pada soliditas turbin angin semakin cepat putarannya maka torsinya akan semakin kecil karena putaran berbanding terbalik dengan torsi, maka pada pemilihan generator harus diupayakan generator yang memiliki torsi kecil sehingga tidak membutuhkan minimum torsi.

4.3.1.12 Perhitungan Daya

Menurut prinsip aerodinamika, daya yang dihasilkan oleh angin didapat kan dengan memasukkan ke persamaan (2-2) adalah:

- Kecepatan angin $v = 10 \text{ m/s}$

$$\begin{aligned}
 P_w &= \frac{1}{2} \rho A v^3 \\
 &= \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 1,13 \cdot 10^3 \\
 &= 678 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

Hasil perhitungan selengkapnya dapat dilihat pada tabel 4.5

Tabel 4.5 Hasil Perhitungan Daya yang Dihasilkan Angin

No	Jarak (meter)	Kecepatan Angin (m/s)	Daya yang Dihasilkan Angin (watt)
1	2,50	20,87	6163,00
2	5,50	11,44	1051,10
3	9,50	10,00	678,00
4	13,50	4,63	67,30

Dari nilai daya yang ditimbulkan oleh kecepatan angin sangat terlihat bahwa kecepatan angin berpengaruh sangat besar untuk mendapatkan daya, tetapi pada kondisi nyatanya daya yang dapat dibangkitkan atau *available power* oleh sebuah pembangkit listrik tenaga angin hanya dapat mencapai maksimal 59% dari daya yang ditimbulkan angin, koefisien inilah yang disebut *Betz Law*. Nilai daya yang dapat diambil oleh pembangkit

listrik tenaga angin(P_A) dapat dihitung dengan menggunakan betz law pada persamaan (2-3) adalah:

- **Kecepatan angin $v = 10$ m/s**

$$\begin{aligned} P_A &= \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho A v^3 \\ &= \frac{16}{27} \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 1,13 \cdot 10^3 \\ &= 400 \text{ Watt} \end{aligned}$$

Hasil perhitungan selengkapnya dapat dilihat pada tabel 4.6

Tabel 4.6 Hasil Perhitungan Daya yang Dapat Diambil dari Angin

No	Jarak (meter)	Kecepatan Angin (m/s)	Daya yang Dapat Diambil dari Angin(watt)
1	2,50	20,87	3636,00
2	5,50	11,44	600,00
3	9,50	10,00	400,00
4	13,50	4,63	40,00

Berdasarkan sumber, perancangan pembangkit listrik tenaga angin biasanya memiliki koefisien daya yang dibawah nilai *betz law*, dikarenakan adanya rugi-rugi seperti rugi tembaga, rugi besi, rugi bearing, dll (Peter Gevorkian,2010). Nilai koefisien pembangkit listrik tenaga angin yang baik yang dapat ditemukan memiliki range antara 0,3-0,5, sehingga pada perancangan ini ditentukan bahwa koefisien daya untuk pembangkit listrik tenaga angin adalah 0,4. Nilai daya yang dapat dibangkitkan dengan koefisien 0,4, dengan memasukkan ke persamaan (2-4) adalah:

- **Kecepatan angin $v = 10$ m/s**

$$\begin{aligned} P_D &= \frac{1}{2} \rho v^3 A \cdot Cp \\ &= \frac{1}{2} 1,2 \cdot 10 \cdot 1,13 \cdot 0,4 \\ &= 271 \text{ Watt} \end{aligned}$$

Hasil perhitungan selengkapnya dapat dilihat pada tabel 4.7

Tabel 4.7 Hasil Perhitungan Daya dengan C_p 0,4

No	Jarak (meter)	Kecepatan Angin (m/s)	Daya dengan koefisien 0,4 (watt)
1	2,50	20,87	27,00
2	5,50	11,44	271,00
3	9,50	10,00	406,00
4	13,50	4,63	2465,00

Perhitungan daya berdasarkan prinsip aerodinamika merupakan jumlah daya maksimal yang dapat dibangkitkan oleh turbin angin, akan tetapi nilai daya yang dibangkitkan tersebut juga dipengaruhi oleh kemampuan sistem mekanis dan kemampuan generator, sehingga nilainya dapat berubah.

4.3.2 Perancangan Sistem *Mechanical Electric Turbin*

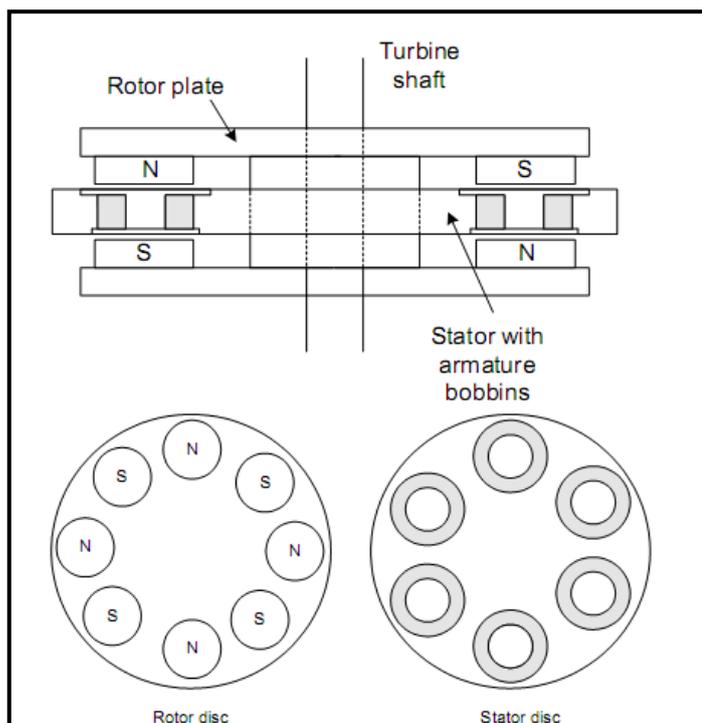
Turbin angin yang dirancang memiliki kecepatan yang bervariasi tergantung dengan tujuannya. Turbin angin yang digunakan sebagai pembangkit listrik memiliki kecepatan putar yang tinggi, oleh karena itu perancangan ini ditentukan untuk merancang pembangkit listrik dengan kecepatan tinggi.

4.3.2.1 Pemilihan Generator yang Sesuai

Generator yang digunakan untuk turbin angin dapat berbagai jenis, menurut Hugh Piggot untuk perancangan turbin angin ukuran kecil diantaranya adalah :

- a. PMG (*Permanent Magnet Generator*)
- b. Alternator Mobil
- c. *Dynamo*
- d. Motor induksi
- e. *Permanent Magnet DC Generator*

Pada perancangan ini dipilih *Permanent Magnet Generator*, karena harga yang relatif murah tapi memiliki efisiensi tinggi, karena *output* dari PMG adalah AC maka harus diberi rangkaian penyearah atau *rectifier*.



Gambar 4.15 Permanent Magnet Generator

Sumber A Permanent Magnet Generator for Small Scale Wind Turbines, J. R. Bumby, N. Stannard and R. Martin

4.3.2.2 Perancangan Jenis Generator

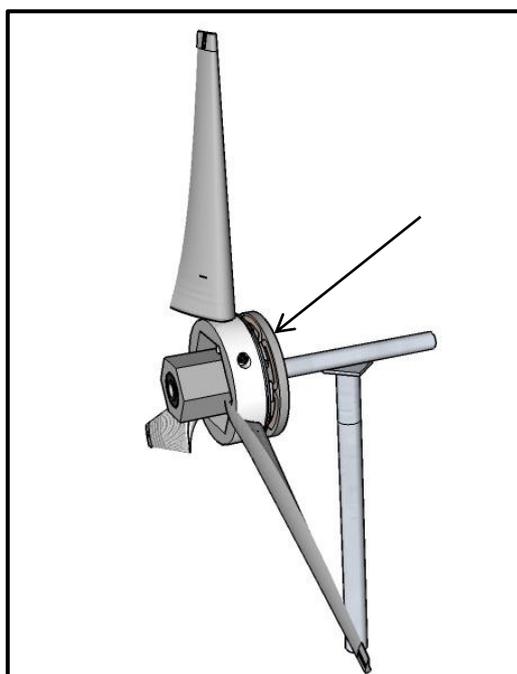
Menurut Hugh Piggot untuk perancangan generator umumnya dipakai acuan kecepatan angin 10m/s, sehingga dapat berfungsi baik pada kecepatan angin yang lain. Data yang diperoleh dari kecepatan angin 10m/s adalah:

- $W_d = 60 \text{ N/m}^2$
- $\omega = 100 \text{ rad/s}$
- $N = 955,4 \text{ rpm}$
- $P_w = 678 \text{ Watt}$
- $P_A = 400 \text{ Watt}$
- $P_D = 271 \text{ Watt}$

Data yang diperoleh tersebut digunakan untuk menentukan spesifikasi dari generator yang dibutuhkan, sehingga dapat ditentukan spesifikasi generator yang dibutuhkan adalah:

Rated power : 300 Watt
Max power : 400 Watt
Rated speed : 1000 rpm
Efisiensi : 0,85
Output : 220 VAC

Karena Generator pada pembangkit listrik tenaga angin umumnya digunakan untuk mencharge battery yang nantinya akan disimpan sehingga dapat digunakan sewaktu-waktu, maka *output* dari generator harus juga berupa sumber DC.



Gambar 4.16 Letak Generator

4.3.2.3 Pengkopelan Antara Generator dengan Sudu

Umumnya pembangkit listrik tenaga angin dengan kapasitas besar membutuhkan sistem mekanik atau *gearbox* untuk mensinkronkan putaran sudu dengan putaran generator, karena putaran sudu yang jauh lebih lambat dari putaran generator, sehingga daya yang dibangkitkan tidak sesuai dengan yang direncanakan.

Pada pembangkit listrik tenaga angin dengan skala kecil sistem mekanik/*gearbox* dapat diabaikan, karena perancangan pembangkit listrik tenaga angin skala kecil memiliki kecepatan yang sangat tinggi, sehingga permasalahan yang timbul adalah penentuan generator yang sesuai dengan perancangan sudu.

Setelah diketahui spesifikasi sudu dan spesifikasi generator, yang harus dilakukan adalah pengkopelan sehingga dapat menghasilkan tenaga listrik yang sesuai. Cara yang dilakukan adalah:

- a. *Shaft* dari generator harus bergabung dengan sudu-sudu dengan menggunakan *hub*.
- b. Ukuran *shaft* generator harus sesuai dengan *hub* sehingga dapat terkopel dengan benar.
- c. Bentuk *hub* harus sesuai dengan jumlah dan ukuran sudu yang direncanakan.

Setelah sudu dan generator terpasang maka secara teoritis apabila sudu digerakkan maka generator sudah dapat menghasilkan listrik.

Pengkopelan dengan sistem seperti ini memiliki keuntungan yaitu karena tidak membutuhkan *gearbox*, maka rugi-rugi mekanik yang ditimbulkan *gearbox* tidak berlaku, perlu diingat bahwa sistem mekanik dengan cara ini tidak memiliki torsi yang tinggi, sehingga pada pemilihan generator harus menggunakan generator yang memiliki torsi rendah.

4.3.2.4 Daya Total yang Dibangkitkan

Setelah efisiensi dari generator didapatkan maka dapat dihitung daya total yang dapat dibangkitkan oleh turbin angin dengan memasukkan ke rumus

- Kecepatan angin $v = 10 \text{ m/s}$

$$\begin{aligned}
 P_T &= \frac{1}{2} \rho v^3 A C_p \eta_g \\
 &= \frac{1}{2} 1,2 \cdot 10^3 \cdot 1,13 \cdot 0,4 \cdot 0,85 \\
 &= 230 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

Hasil perhitungan selengkapnya dapat dilihat pada tabel 4.2

Tabel 4.8 Hasil Perhitungan Daya Total

No	Jarak (meter)	Kecepatan Angin (m/s)	Daya Total (watt)
1	2,50	20,87	1854,00
2	5,50	11,44	305,00
3	9,50	10,00	230,00
4	13,50	4,63	23,00

Pada kecepatan angin 20,87 m/s daya yang dibangkitkan mencapai 1854 Watt, hal ini tidak dapat tercapai pada keadaan di lapangan, karena generator yang didesain memiliki kemampuan maksimal membangkitkan daya 400 Watt, sehingga daya yang dapat dibangkitkan pada kecepatan angin tersebut tetap 400 Watt.

4.3.2.5 Torsi Turbin Angin

Nilai dari torsi sangat berpengaruh pada kemampuan dari turbin untuk menggerakkan generator, apabila torsi dari turbin lebih kecil dari generator lebih kecil dari torsi dari generator maka generator tidak dapat berputar dan menghasilkan daya listrik. Nilai torsi dapat diketahui dengan memasukkan ke persamaan (2-12) sehingga:

- **Kecepatan angin $v = 10$ m/s**

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{P}{\omega} \\
 &= \frac{230}{100} \\
 &= 2,3 \text{ Nm}
 \end{aligned}$$

Dengan:

T = torsi (Nm)

P = daya (Watt)

ω = kecepatan sudut (rad/s)

Hasil perhitungan selengkapnya dapat dilihat pada tabel 4.9

Tabel 4.9 Hasil Perhitungan Torsi

No	Jarak (meter)	Kecepatan Angin (m/s)	Torsi (Nm)
1	2,50	20,87	8,90
2	5,50	11,44	2,67
3	9,50	10,00	2,30
4	13,50	4,63	0,50

4.3.3 Perancangan Tower

Tower merupakan penyangga dari turbin angin, sehingga turbin angin dapat diposisikan sesuai dengan letak sumber angin yang digunakan. Perancangan dimensi tower meliputi:

1. Tinggi Tower
2. Ketebalan Tower
3. Jenis Tower

Pada perancangan ini batasan yang harus diperhatikan pada saat penentuan dimensi tower adalah:

- a. Ketinggian lantai atap dengan sumber yaitu 0,8 meter
- b. Kecepatan angin yang mencapai 21m/s
- c. Ukuran dan beban dari sudu dan generator

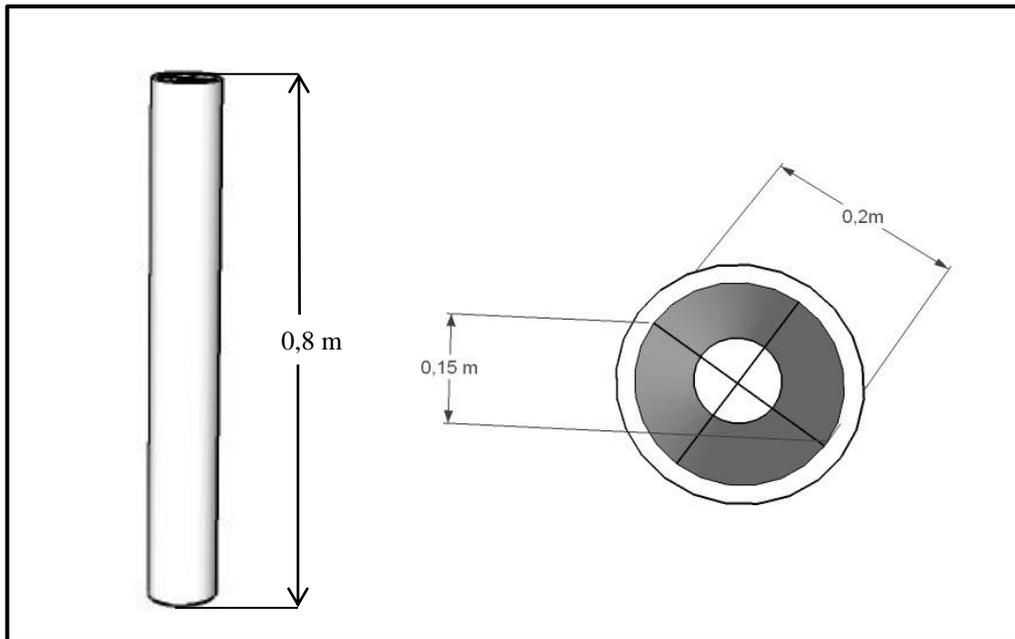
4.3.3.1 Ketinggian Tower

Penentuan ketinggian tower sebenarnya di fungsikan untuk mendapatkan angin yang kencang dan *laminer*, tapi karena sumber ini berasal dari blower yang tingginya adalah 0,8 meter dari permukaan lantai, maka ketinggian tower juga tidak boleh lebih tinggi dari 0,8 meter.

Pada perancangan sudu yang telah dilakukan, radius dari sudu adalah 0,6 meter sehinggalan ketinggian tower tidak boleh lebih dari 0,6 meter. Mengetahui dari semua batasan tersebut maka dapat disimpulkan bahwa ketinggian tower berada pada panjang 0,6-0,8 meter.

4.3.3.2 Bahan Tower

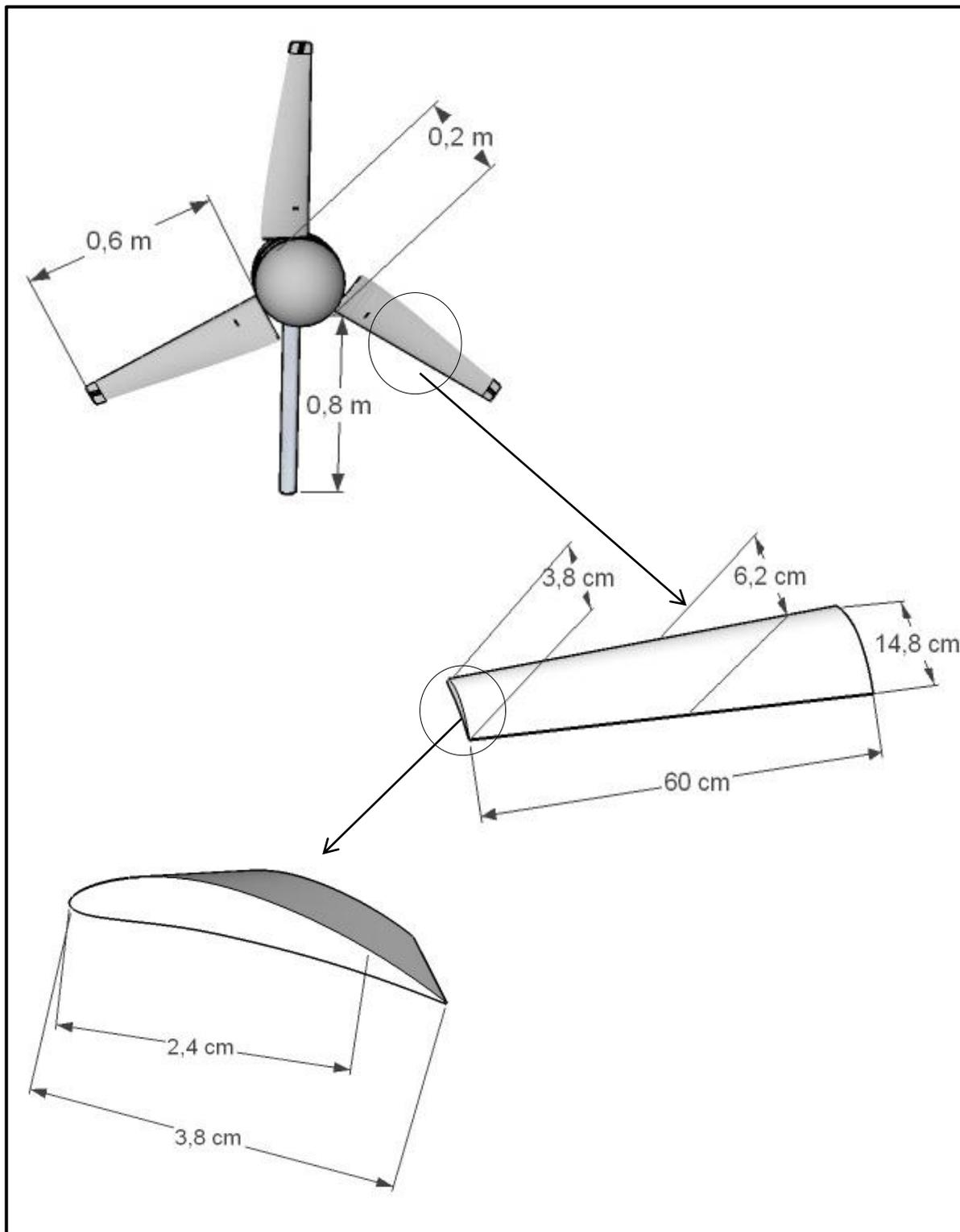
Bahan yang digunakan sebagai tower dapat berupa kayu, beton, besi, dan plastik. Pada perancangan ini bahan yang dipilih adalah besi, karena selain kuat dan dapat tahan lama. Perlu diperhatikan bahwa besi tersebut sudah dilapisi dengan stainless steel sehingga tahan terhadap karat.



Gambar 4.17 Panjang dan Diameter Tower

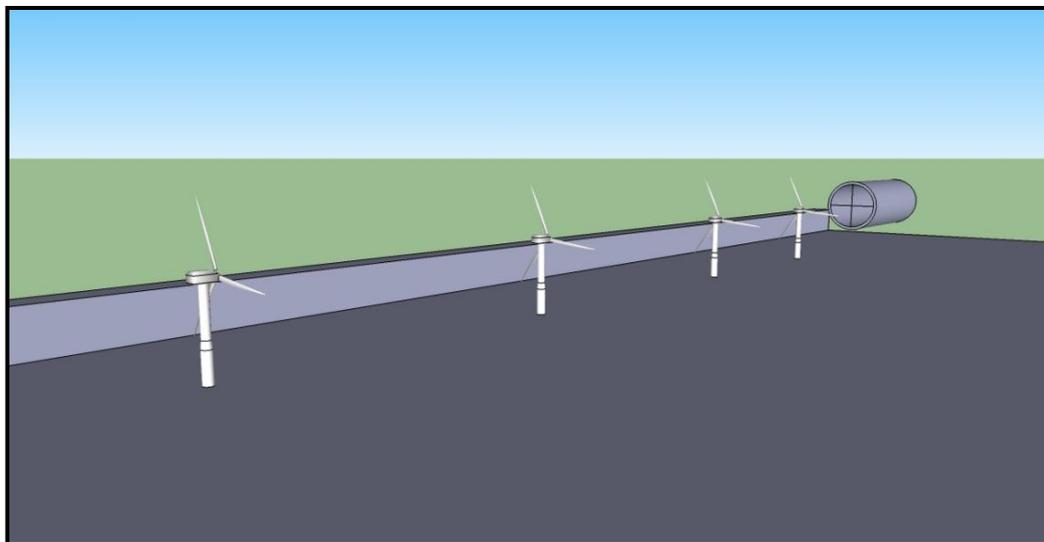
4.3.4 Desain Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Pembangkit listrik yang telah dirancang pada saat pemasangan secara garis besar memiliki bentuk seperti:



Gambar 4.18 Desain Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Desain tersebut merupakan pembangkit listrik yang langsung menghadap ke sumber angin yaitu blower, apabila diambil posisi pembangkit listrik pada setiap jarak yang diukur maka desainnya adalah:

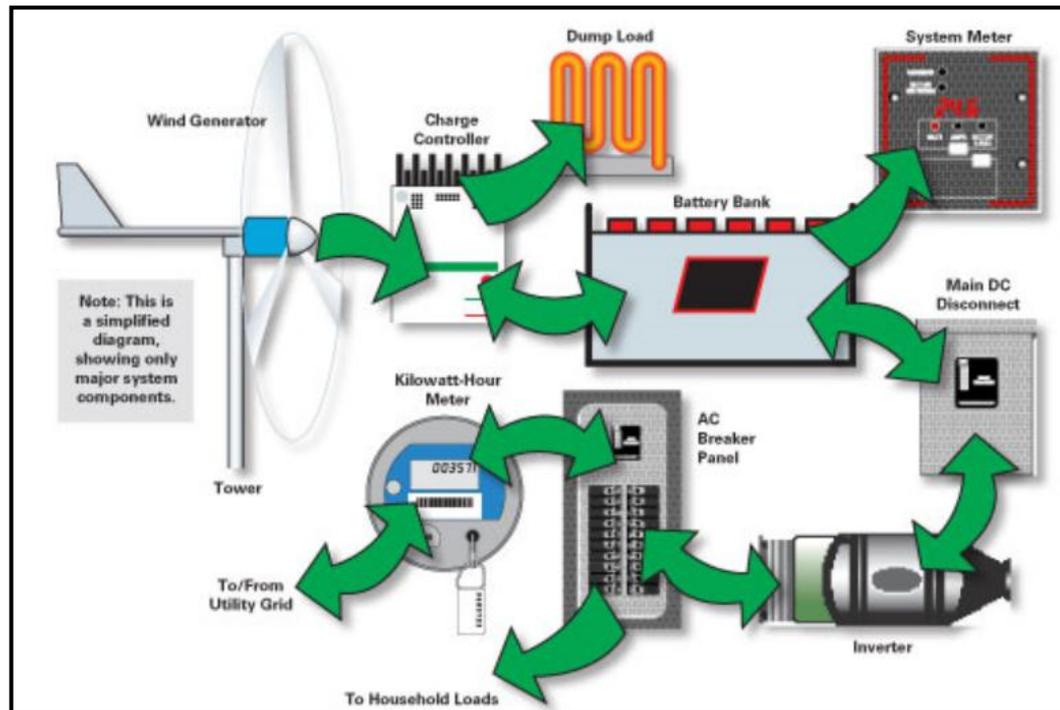


Gambar 4.19 Desain Pembangkit Listrik Tenaga Angin untuk Setiap Jarak Ukur

Permasalahan pada setiap jarak yang diukur apabila dibuat pembangkit listrik adalah nilai kecepatan angin akan berbeda dengan data karena angin mendapatkan penghalang yaitu pembangkit di depannya, sehingga perlu dilakukan pengkajian kedepannya apabila ingin dilakukan pemasangan pembangkit listrik tenaga angin seperti pada gambar 4.15.

4.3.5 Finishing

Tahapan ini merupakan proses saat pembangkit tenaga angin yang sudah jadi dapat terhubung dengan sistem kelistrikan pabrik, yang perlu diperhatikan adalah tegangan yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga angin adalah DC sehingga perlu diberi inverter untuk merubah ke AC, setelah dirubah menjadi tegangan AC maka pembangkit listrik tenaga angin tersebut sudah dapat difungsikan sebagai sumber listrik. Pada Penelitian ini tidak ditentukan jenis dari setiap komponennya tetapi dapat dijadikan bahan refrensi untuk pembuatan sistem kelistrikannya.



Gambar 4.20 Sistem Kelistrikan dari Turbin Angin

(Sumber : <http://homepower.com/basics/wind/>)

Adapun peralatan yang digunakan untuk pemasangan pada sistem kelistrikan adalah:

1. *Charge Controller*

Merupakan pengaman agar *battery* bank tidak mengalami *overcharging* sehingga tidak mengalami kerusakan. *Charge Controller* dilengkapi dengan *rectifier* sehingga tegangan AC dari PMA dijadikan tegangan DC yang sesuai dengan *battery*.



Gambar 4.21 Charge Controller

(Sumber : <http://www.shopmania.com/industrial-gear/>)

2. *Dump Load*

Merupakan beban yang digunakan sebagai pengaman apabila *battery* maupun jaringan listrik tidak dapat menerima energi yang dihasilkan. *Dump load* ini nilainya adalah 20% lebih besar dari max daya yang dibangkitkan, sehingga pada perancangan ini nilai dump loadnya adalah $400\text{ W} + (400 \times 20\%) = 480\text{ W}$ dengan sistem 24 volt maka berlaku rumus $i^2 R$ sehingga nilai resistansinya adalah:

$$i = V/R = 480/24 = 20\text{ A}$$

$$i^2 R = 480 = 400R$$

$$R = 480/400$$

$$= 1,2\text{ ohm}$$



Gambar 4.22 Dump Load

Sumber: <http://www.windynation.com/manuals/300-watt-dump-load-24-volt-technical-specifications>

3. *Battery Bank*

Battery yang digunakan dapat berbagai jenis mulai 12, 24, 48, 60 volt. Pemilihan kapasitas *battery* bergantung pada jumlah beban dan pemakaian, pada perancangan ini yang digunakan sebagai simulasi adalah *battery* kapasitas 24 volt.



Gambar 4.23 Battery Bank

Sumber : <http://www.alibaba.com/product-gs/1>

4. *System Meter*

System meter berfungsi sebagai penunjuk nilai energi pada *battery*, sehingga dapat dilakukan pengecekan apabila terjadi kerusakan pada *battery*.

5. *Main DC Disconnect*

Berfungsi sebagai pengaman antara *battrey* dengan *inverter* sehingga akan terputus otomatis saat terjadi *short-circuit*.

6. *Inverter*

Berfungsi sebagai *converter* DC-AC sehingga dapat difungsikan untuk peralatan AC. Pada perancangan ini inverter yang digunakan adalah untuk merubah tegangan DC 24 volt menjadi AC 220 volt.



Gambar 4.24 Inverter

Sumber : <http://www.aliexpress.com/fm-store/202998>

7. *AC Breaker Panel*

Biasa disebut *fuse box* sebagai terminal kabel-kabel yang akan dihubungkan dengan pembangkit listrik tenaga angin, sehingga menjadi pengaman bila terjadi *short-circuit*.

8. *kWh Meter*

Berfungsi sebagai penunjuk konsumsi listrik yang digunakan dari pembangkit listrik tenaga angin.

4.4 Potensi Energi Tahunan

Setelah pembangkit listrik tenaga angin selesai dirancang maka dapat dihitung estimasi energi tahunannya, sehingga dapat dibandingkan dengan harga yang harus dibayarkan apabila memakai sumber dari PLN.

Estimasi daya tahunan yang dapat digunakan dengan asumsi bahwa pembangkit tidak di *off*-kan selama 1 tahun penuh adalah:

- Pada kecepatan angin 10 m/s

Daya pembangkit = 230 Watt

Waktu (jam) = 24 x 365 = 8760

$230 \times 8760 = 2.014.800$ Watt

= 2014,8 kWh

Hasil perhitungan potensi energi tahunan dapat dilihat pada tabel 4.10

Tabel 4.10 Hasil Perhitungan Potensi Energi Tahunan

No	Jarak (meter)	Kecepatan Angin (m/s)	Potensi Energi Tahunan (kWh)
1	2,50	20,87	16.241,00
2	5,50	11,44	2671,80
3	9,50	10,00	2014,80
4	13,50	4,63	201,48

Hasil dari potensi energi tahunan tersebut dapat dibandingkan terhadap harga yang harus dibayar pihak ajinomoto apabila mengambil daya dari PLN. Harga listrik untuk setiap kWh dari PLN adalah +/- Rp 800 sehingga biaya untuk listrik per tahunnya adalah

Tabel 4.11 Hasil Perhitungan Harga untuk Potensi Energi Angin per Tahun

No	Kecepatan Angin (m/s)	Potensi Energi Tahunan (kWh)	Tarif Listrik PLN per Tahun (Rupiah)
1	20,87	16.241,00	12.992.800
2	11,44	2671,80	2.137.440
3	10,00	2014,80	1.611.840
4	4,63	201,48	161.184

Dari nilai rupiah yang dibayarkan apabila memakai jasa listrik dari PLN, dengan pembangkit tenaga angin sendiri maka setiap tahun untuk pembangkit angin menghemat +/- Rp 2.000.000, tetapi harga yang dibutuhkan untuk membuat pembangkit angin pun tidaklah murah, setiap pembangkit angin memiliki rentan harga antara 15 juta- 30 juta, sehingga pembangkit listrik tenaga angin ini minimal harus dapat beroperasi selama 10 tahun.

4.5 Pengujian dengan Menggunakan *Software Blade Designer*

Pengujian ini ditujukan untuk membandingkan hasil perhitungan secara teoritis dengan *software* yang digunakan oleh Ed Lenz, seorang perancang pembangkit listrik tenaga angin untuk mengetahui tingkat ketelitian pembangkit listrik ini. *Software* ini memiliki kelemahan yaitu tidak dapat digunakan pada kecepatan angin lebih dari 12,5 m/s dan kurang dari 4,4 m/s sehingga untuk kecepatan angin 20,87 m/s tidak dapat diuji.

The screenshot shows the 'Blade designer' software interface. It features a left sidebar with input fields for Rotor diameter (meters), Tip Speed Ratio, Number of Blades, Angle of attack (deg), Lift coefficient, Number of stations, and Overall efficiency. Below these are buttons for Calculate, Clear chart, Print Form, and Print Chart. The main area is divided into three columns: 'Rotor diameter (meters)', 'Estimated Prop performance', and 'Calculated Generator performance'. The 'Estimated Prop performance' column contains a table with wind speed (mph) and tip speed ratio (ms) values. The 'Calculated Generator performance' column contains a table with Amps, Open V, Rpm, Ratio, and Watts at Rec Ratio. There are also input fields for 'INPUT: wind velocity in m/s to calculate rotor thrust', 'Rotor thrust in pounds', 'Rotor offset in inches', and 'Tail Size in square feet'. The bottom right section has radio buttons for 'Recommended Ratio' and 'User Ratio', and input fields for 'Open Voltage', 'Measured Rpm', 'Measured Ohms', and 'Regulated Voltage'.

Gambar 4.25 Tampilan Software Blade Designer Sebelum Diberi Input
(Sumber : *Blade Designer*)

Langkah-langkah yang dilakukan adalah:

1. Huruf yang dicetak tebal adalah nilai parameter yang dimasukkan.
2. *Rotor diameter* adalah 2 kali jari-jari sudu, nilainya 1,2 meter
3. *Tip speed rationya* adalah 6
4. *Number of blade* adalah jumlah blade yang dirancang, jumlahnya ada 3.
5. *Angle of attack*, sesuai dengan data sheet dari NACA 4210 nilainya 4°
6. *Lift coefficient* adalah nilai koefisien angkat sesuai dengan *datasheet* NACA 4210 yaitu 0,8
7. *Number of station* adalah jumlah *station* pada sudu yang dirancang yaitu 5
8. *Overall efficiency* adalah total efisiensi pembangkit listrik tenaga angin nilainya 0,34

Nilai diatas merupakan parameter pokok yang dimasukkan sehingga akan mempengaruhi semua kolom-kolom kosong tersebut, adapun parameter tambahan yang harus dimasukkan karena akan mempengaruhi sebagian dari kolom tersebut, yaitu:

1. *Input wind velocity* in m/s adalah memasukkan nilai kecepatan angin yang akan mempengaruhi nilai tekanan (dalam pound), ukuran minimal ekor (dalam *square feet*), dan *rotor offset* (dalam inci), nilai kecepatan angin yang dimasukkan adalah 10m/s.
2. *Reccomended ratio* dan *user ratio* adalah rasio *gearbox* yang digunakan untuk mensinkronkan putaran sudu dengan putaran generator, karena pada pembangkit ini menggunakan sistem direct shaft maka tidak menggunakan gearbox sehingga dapat dianggap *user rationya* adalah 1.
3. *Open voltage* adalah tegangan terbuka pada generator yang dirancang nilainya adalah 38,8
4. *Measured rpm* adalah rata-rata putaran pada generator yang dibutuhkan nilainya adalah 1000 rpm
5. *Measured ohm* adalah nilai tahanan yang diijinkan, nilainya adalah 1 ohm
6. *Regulated voltage* adalah tegangan beban nilainya adalah 14,8 volt

Setelah semua parameter yang dibutuhkan diisi maka bentuk tampilannya akan seperti ini:

The screenshot shows the 'Blade designer' software interface. It is divided into several sections:

- Input Fields:**
 - Rotor diameter (meters): 1.2
 - Tip Speed Ratio: 6
 - Number of Blades: 3
 - Angle of attack (deg): 4
 - Lift coefficient: 0.8
 - Number of stations: 5
 - Overall efficiency: 0.34
- Buttons:** Calculate, Clear chart, Print Form, Print Chart.
- Station Table:** A table with 10 rows (Station 1-10) and 6 columns (Radius, Bld ang, Chord, Thickne, Drop). All cells are empty.
- Estimated Prop performance:** A table with columns for Wind Speed (mph), Tip Speed Ratio (ms), Watts, and RPM. Rows range from 10 mph (4.4ms) to 28 mph (12.5ms).
- Calculated Generator performance:** A table with columns for Amps, Open V, Rpm, Ratio, and Watts at Rec Ratio. Rows correspond to the wind speeds in the previous table.
- Additional Inputs:**
 - INPUT: wind velocity in m/s to calculate rotor thrust: 10
 - Rotor thrust in pounds: [empty]
 - Rotor offset in inches: [empty]
 - Tail Size in square feet: [empty]
 - Recommended Ratio: [empty]
 - User Ratio: 1
 - Open Voltage: 38.8
 - Measured Rpm: 1000
 - Measured Ohms: 1.2
 - Regulated Voltage: 14.8

Gambar 4.26 Tampilan Software Blade Designer Setelah Diberi Input
(Sumber : Blade Designer)

Setelah itu *icon calculate* ditekan maka software tersebut akan bekerja dan hasilnya adalah:

Blade designer

Rotor diameter (meters) **Calculate**
 Tip Speed Ratio **Clear chart**
 Number of Blades **Print Form**
 Angle of attack (deg) **Print Chart**
 Lift coefficient
 Number of stations
 Overall efficiency

Station	Radius (in)	Bld ang (deg)	Chord (in)	Thickne (in)	Drop (in)
1	4.72	25	5.85	.88	2.84
2	9.45	12	3.55	.53	.95
3	14.17	6	2.47	.37	.45
4	18.9	4	1.88	.28	.26
5	23.62	2	1.51	.23	.17
6					
7					
8					
9					
10					

Estimated Prop performance

	Watts	RPM
10 mph 4.4ms	21	427
12 mph 5.3ms	36	513
14 mph 6.2ms	57	598
16 mph 7.1ms	86	683
18 mph 8.0ms	122	769
20 mph 8.9ms	168	854
22 mph 10ms	223	940
24 mph 10.7ms	290	1025
26 mph 11.6ms	368	1110
28 mph 12.5ms	460	1196

Calculated Generator performance

	Amps	Open V	Rpm	Ratio	Watts at Rec Ratio
	1.42	16.5	425	1.	22
	2.43	17.72	457	.89	63
	3.85	19.42	501	.84	104
	5.81	21.77	561	.82	144
	8.24	24.69	636	.83	185
	11.35	28.42	733	.86	226
	15.07	32.88	847	.9	267
	19.59	38.31	987	.96	308
	24.86	44.64	1150	1.04	349
	31.08	52.1	1343	1.12	390

INPUT: wind velocity in m/s to calculate rotor thrust
 Rotor thrust in pounds
 Rotor offset in inches
 Tail Size in square feet

Recommended Ratio
 User Ratio

Open Voltage
 Measured Rpm
 Measured Ohms
 Regulated Voltage

Gambar 4.27 Tampilan Software Blade Designer Setelah Program Dijalankan
(Sumber : Blade Designer)

Dapat dilihat bahwa parameter yang dapat dibandingkan adalah pada kecepatan angin 4,4 m/s, 10m/s, dan 12,5m/s.

Perbandingan nilai daya dan kecepatan untuk kecepatan angin 10 m/s :

Daya perhitungan teoritis = 230 Watt

Daya dari *software* = 223 Watt

$$\frac{223}{230} \times 100\% = 97\%$$

Kecepatan putaran teoritis = 955,4 rpm

Kecepatan putaran *software* = 940 rpm

$$\frac{940}{955,4} \times 100\% = 98\%$$

Tabel 4.12 Hasil Perbandingan putaran rotor teoritis dan *software*

No	Kecepatan Angin (m/s)	Putaran Rotor Teoritis (rpm)	Putaran Rotor <i>Software</i> (Watt)	Prosentase (%)
1	11,44	1093,00	1110,00	98,00
2	10,00	955,40	940,00	98,00
3	4,63	442,36	427,00	96,50

Tabel 4.13 Hasil Perbandingan daya teoritis dan *software*

No	Kecepatan Angin (m/s)	Daya Teoritis (Watt)	Daya <i>Software</i> (Watt)	Prosentase (%)
1	11,44	305,00	368,00	82,00
2	10,00	230,00	223,00	97,00
3	4,63	23,00	21,00	91,00

Melihat hasil perhitungan perbandingan antara daya dan kecepatan secara teoritis dengan *software*, memiliki tingkat error yang sangat kecil, sehingga dapat disimpulkan bahwa perancangan pembangkit listrik tenaga angin ini adalah benar.

4.6 Pengujian dengan Pembangkit Listrik Tenaga Angin di Pasaran

Pada pengujian ini ditujukan untuk membandingkan kemampuan pembangkit listrik tenaga angin yang dirancang dengan pembangkit tenaga angin yang sudah beredar di pasaran, dengan tujuan dapat digunakan sesuai kondisi sebenarnya. Pengujian ini ditujukan untuk membandingkan daya yang dihasilkan oleh pembangkit yang dirancang dengan pembangkit listrik tenaga angin lainnya.

Dipilih 2 contoh pembangkit listrik tenaga angin yang sudah ada di pasaran yaitu Air-X dan City Swallow-400W. Pembangkit tersebut dipilih karena memiliki spesifikasi yang mendekati pembangkit yang dirancang sebelumnya sehingga tidak keluar dari batasan yang sudah ditetapkan dan kedua pembangkit tersebut memiliki diameter yang berbeda untuk AIR-X lebih pendek dan City Swallow lebih panjang. Adapun pembangkit tersebut adalah:

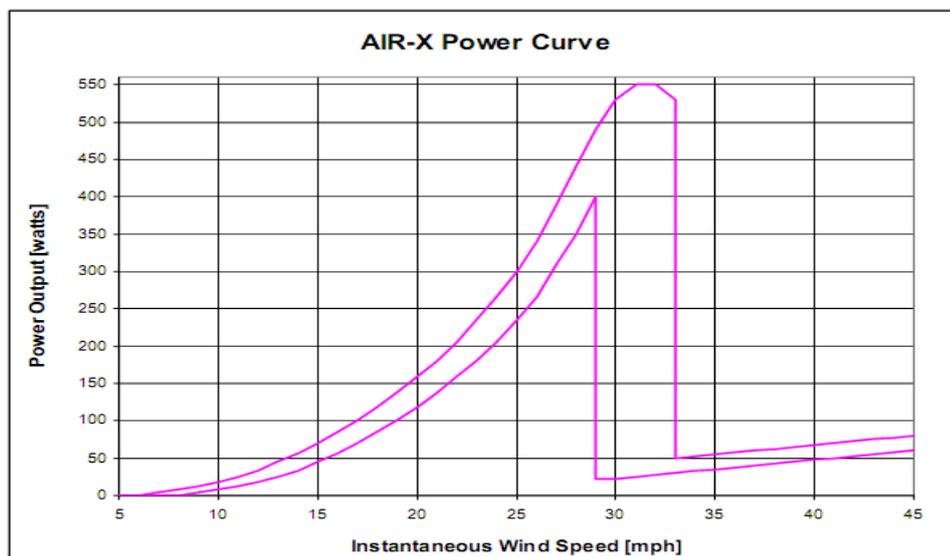
4.6.1 AIR-X

Merupakan pembangkit listrik tenaga angin yang berasal dari Amerika buatan perusahaan *Southwest Windpower*, sudah teruji sejak tahun 2002.



Gambar 4.28 Turbin Angin Tipe Airx

Sumber : http://www.genproenergy.com/southwest_windpower_airx_marine.html



Gambar 4.29 Power Curve Turbin Angin Tipe Airx

Sumber : http://www.genproenergy.com/southwest_windpower_airx_marine.html

Adapun spesifikasinya adalah:

Rotor Diameter	: 46 inci (1.17 meter)
Berat	: 13 lb (6kg)
<i>Start up wind speed</i>	: 7mph (3,0m/s)
<i>Rated power</i>	: 400 watts saat 28 mph (12,5m/s)
Maksimal power	: 500 Watt
<i>Survival wind speed</i>	: 49 m/s
Tegangan <i>output</i>	: 12 dan 24 volt

AIR-X memiliki rotor diameter 1,17meter yang artinya masih dibawah batasan yaitu 1,6 meter, dan survival wind speed 49 m/s untuk batasan minimal 25 m/s. Perbandingan nilai daya untuk setiap kecepatan angin dapat diketahui dengan cara:

- Kecepatan angin 10 m/s

Daya pembangkit yang dirancang = 230 watt

Daya AIR-X = 222 watt

$$\frac{222}{230} \times 100\% = 96,5\%$$

Hasil perbandingan selengkapnya dapat dilihat pada tabel 4.14

Tabel 4.14 Hasil Perbandingan daya turbin yang dirancang dengan AIR-X

No	Kecepatan Angin (m/s)	Daya Teoritis (Watt)	Daya Air-X (Watt)	Prosentase (%)
1	20,87	1854,00	100,16	5,40
2	11,44	305,00	298,90	98,00
3	10,00	230,00	222,00	96,50
4	4,63	23,00	22,00	95,60

Dari tabel perhitungan daya, nilai perbandingan daya pada kecepatan angin 20,87 m/s bernilai 5,4 %, hal ini disebabkan karena pembangkit ini memiliki max daya yang dapat dibangkitkan adalah 500 Watt sehingga saat kecepatan angin bertambah dan sudah

mencapai 500 Watt maka pembangkit ini sudah memasuki fase pengereman secara elektrik sehingga daya yang dibangkitkan menurun.

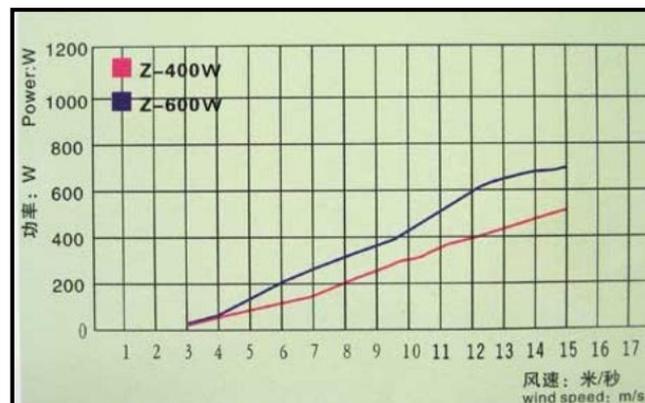
4.6.2 City Swallow 400 Watt

Merupakan pembangkit listrik tenaga angin yang berasal dari cina dan diproduksi oleh *Shenzen Green Electronic Co Ltd*, terdapat dua jenis tipe City Swallow yaitu 400 watt dan 500 watt, untuk pengujian ini yang digunakan adalah tipe 400 watt karena diameter rotornya masih dalam batas toleransi 1,6 meter.



Gambar 4.30 Turbin Angin Tipe City Swallow 400 Watt

Sumber : <http://www.szldk.com/en/view.aspx?a=240>



Gambar 4.31 Power Curve Turbin Angin Tipe City Swallow 400 Watt

Sumber : <http://www.szldk.com/en/view.aspx?a=240>

Spesifikasi City Swallow 400 watt:

Rotor Diameter	: 1.45 meter
Berat	: 17 kg
Cut in wind speed	: 3,0 m/s

Rated power	: 400 Watts at 12 m/s
Maksimal power	: 500 Watt
Survival wind speed	: 45 m/s
Tegangan output	: 12 dan 24 volt

City Swallow memiliki diameter yang sedikit lebih panjang bila dibandingkan diameter dari pembangkit listrik tenaga angin yang dirancang tetapi masih di dalam batas toleransi yaitu 1,6 meter, dan memiliki survival wind speed 45 m/s sehingga sudah melewati batas minimal 25 m/s.

Perbandingan daya untuk setiap kecepatan angin dapat diketahui dengan cara sebagai berikut:

- Kecepatan angin 10 m/s

Daya pembangkit yang dirancang = 230 Watt

Daya City Swallow 400 Watt = 300 Watt

$$\frac{230}{300} \times 100\% = 76,7\%$$

Tabel 4.15 Hasil Perbandingan daya turbin dengan City Swallow 400 Watt

No	Kecepatan Angin (m/s)	Daya Teoritis (Watt)	Daya City Swallow (Watt)	Prosentase (%)
1	20,87	1854,00	no data	no data
2	11,44	305,00	372,00	82,00
3	10,00	230,00	300,00	76,7,00
4	4,63	23,00	57,50	40,00

Hasil perbandingan menunjukkan bahwa turbin angin tipe City Swallow 400 Watt memiliki daya relatif lebih besar daripada pembangkit yang dirancang, hal ini disebabkan oleh diameter sudu dari City Swallow 400 Watt sedikit lebih besar daripada pembangkit yang dirancang.

Data untuk kecepatan angin 20,87 m/s tidak diketahui karena kekurangan data dari City Swallow 400 Watt, sehingga pembangkit ini hanya diperuntukkan untuk 3 kecepatan angin saja.

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil perhitungan dan analisa perancangan pembangkit listrik tenaga angin di PT Ajinomoto Kota Mojokerto dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Pada pengukuran pada jarak 2,5 meter, 5,5 meter, 9,5 meter, dan 13,5 meter dari blower kecepatan angin yang didapat adalah 20,87 m/s, 11,44 m/s, 10 m/s, dan 4,63 m/s.
2. Pada perancangan pembangkit listrik tenaga angin ini adalah tipe TASH dengan diameter sudu 1,2 meter, jumlah sudu 3, TSR 6, memakai sudu tipe *Airfoil* NACA 4412, generator yang memiliki *rated speed* 1000 rpm dan *rated power* 400 watt, serta tower berketinggian 0,6 meter.
3. Nilai daya yang dibangkitkan oleh pembangkit listrik tenaga angin pada kecepatan angin 4,63 m/s, 10 m/s, 11,4 m/s, dan 20,87 m/s secara berurutan adalah 23 watt, 230 watt, 305 watt, dan 1854 watt dengan potensi energi tahunan yang dapat dibangkitkan dengan pembangkit listrik tenaga angin dalam 1 tahun secara berurutan adalah 201,48 Kwh, 20148 Kwh, 2671,8 Kwh, dan 16.241 Kwh.

5.2 Saran

Dari hasil perhitungan dan analisa perancangan pembangkit listrik tenaga angin di PT Ajinomoto Kota Mojokerto yang telah dilakukan ada beberapa saran untuk merancang pembangkit listrik tenaga angin yang baik untuk kedepannya yaitu:

1. Perlu dilakukan studi mendalam tentang cara merancang pembangkit listrik tenaga angin yang memiliki tingkat efisiensi mendekati *betz law*, agar pembangkit listrik tenaga angin dapat bekerja seoptimal mungkin.
2. Perlu dilakukan studi untuk harga dari pembangkit listrik tenaga angin, karena biaya yang dibutuhkan sangatlah mahal.
3. Untuk menjaga kemampuan dari pembangkit listrik tenaga angin perlu dilakukan pengecekan minimal 1-2 bulan sekali, sehingga optimasi dari pembangkit listrik tenaga angin tidak berkurang.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbot and Doenhoff. 1959. *Theory of Wing Section Including a Summary of Airfoil Data*. New York: Dover Publications
- Anderson, J. D. Jr. 1985. *Fundamentals of Aerodynamic*. Singapore: Mc Graw-Hill Book Co.
- Burton Tony dkk, 2001, *Wind Energy Handbook*
- Damanik, Asan. 2011. *Fisika Energi*. Yogyakarta: Univ.Sanata Dharma
- Gevorkian, Peter. 2010. *Alternative Energy Systems In Building Design*. Singapore: Mc Graw-Hill Book Co.
- Hanafie, Hasim. 2007. *Makalah PT Bumi Energi Equatorial*
- Hau, Erich. 2006. *Wind Turbine Fundamental, Technology, Application, Economics 2nd Edition*. Germany: Springer
- Johnson, Gary L. 1994. *WIND ENERGY SYSTEMS*. Manhattan KS
- Manwel, J. K. dkk. 2009. *Wind Energy Explained Theory, Design, and Application 2nd Edition*. United Kingdom: Wiley
- Mc. Cormick, Barnes W. 1995. *Aerodynamics, Aeronautics, and Flight Performance*. Canada: Wiley and Sons
- Nanda, Markus. 2008. *Rancang Bangun Mesin Kincir Angin Bersudu Banyak*. Yogyakarta: Universitas Sanata Dharma
- Nieman, G. 1984. *Elemen Mesin*. Jakarta: Erlangga.
- Piggot, Hugh. 2000. *Wind Power Workshop Building Your Own Wind Turbine*. British Wind Energy Association
- Sularso. 1980. *Dasar Perancangan dan Pemilihan Elemen Mesin*. Jakarta: Pradya Paramita

Wibawa, Unggul. 2001. *Sumber Daya Energi Alternatif*. Malang: Universitas Brawijaya.

www.wikipedia.org

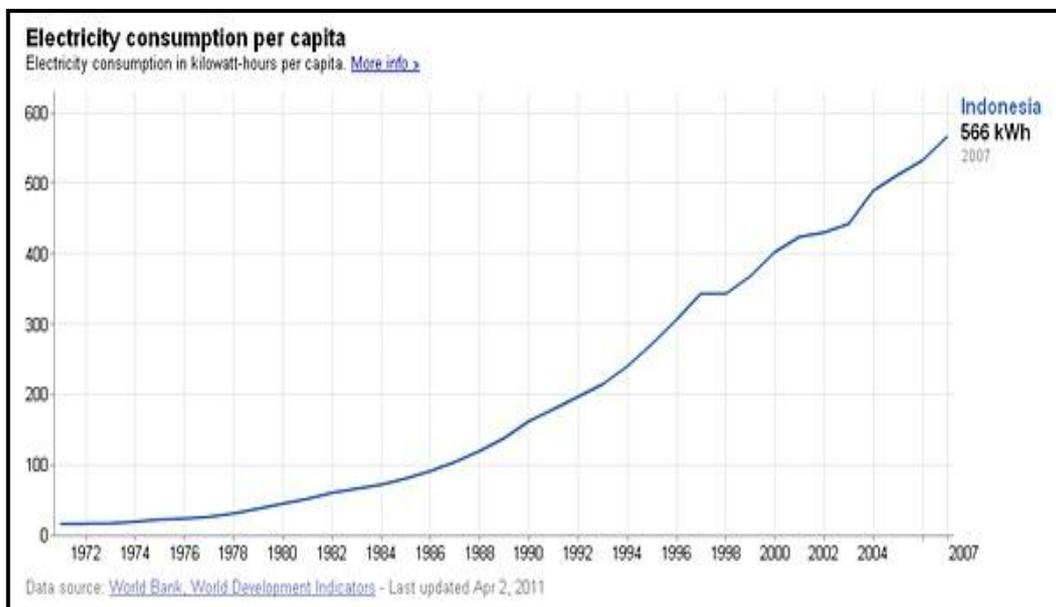
W., Arismunandar. *Penggerak Mula Turbin*. Bandung:ITB PRESS

Zuhal. 1991. *Dasar Teknik Tenaga Listrik*. Bandung: Penerbit ITB.

Lampiran 1: Data dan grafik pemakaian listrik di Indonesia



sumber : esdm.go.id



Lampiran 2: Hasil Pengukuran Aliran Angin Di Pt Ajinomoto

- Untuk sumbu x_1

No	Koord	$y_1 = 1,5 \text{ m}$		$Y_2 = 3,5 \text{ m}$	
		Blower	Tembok	Blower	Tembok
1	x_{1,Z_1}	1,83	2,69	3,26	2,58
2	x_{1,Z_2}	2,00	0,91	4,45	4,25
3	x_{1,Z_3}	0,67	0,55	4,00	5,67
4	x_{1,Z_4}	0,75	0,92	3,55	5,00
5	x_{1,Z_5}	0,65	0,87	2,45	1,72
6	x_{1,Z_6}	1,09	1,96	1,93	1,11
rata-rata (m/s)		1,17	1,32	3,27	3,39

- Untuk sumbu x_2

No	Koord	$y_1 = 1,5 \text{ m}$		$Y_2 = 3,5 \text{ m}$	
		Blower	Tembok	Blower	Tembok
1	x_{2,Z_1}	2,41	0,63	2,24	4,35
2	x_{2,Z_2}	1,51	1,21	1,18	5,76
3	x_{2,Z_3}	1,13	0,69	4,08	4,71
4	x_{2,Z_4}	0,65	0,45	3,00	2,35
5	x_{2,Z_5}	1,21	1,06	5,4	6,16
6	x_{2,Z_6}	1,66	1,49	4,39	2,55
rata-rata (m/s)		1,43	0,92	3,38	4,31

- Untuk sumbu x_3

No	Koord	$y_1 = 1,5 \text{ m}$		$Y_2 = 3,5 \text{ m}$	
		Blower	Tembok	Blower	Tembok
1	x_{3,Z_1}	1,90	1,56	2,66	1,39
2	x_{3,Z_2}	1,54	1,79	4,99	2,43
3	x_{3,Z_3}	0,68	1,07	2,39	5,29
4	x_{3,Z_4}	1,70	0,92	4,7	4,13
5	x_{3,Z_5}	0,98	1,10	3,79	3,55
6	x_{3,Z_6}	1,10	1,15	4,80	5,77
rata-rata (m/s)		1,32	1,27	3,89	3,76

- Untuk sumbu x_4

No	Koord	$y_1 = 1,5 \text{ m}$		$Y_2 = 3,5 \text{ m}$	
		Blower	Tembok	Blower	Tembok
1	$x_{4,Z1}$	2,15	2,01	2,09	1,55
2	$x_{4,Z2}$	1,64	2,38	2,20	1,86
3	$x_{4,Z3}$	1,43	2,26	2,68	3,85
4	$x_{4,Z4}$	1,30	2,59	3,94	2,84
5	$x_{4,Z5}$	1,52	1,08	5,85	6,04
6	$x_{4,Z6}$	1,14	2,89	6,02	5,37
rata-rata (m/s)		1,53	2,20	3,80	3,59

- Untuk sumbu x_5

No	Koord	$y_1 = 1,5 \text{ m}$		$Y_2 = 3,5 \text{ m}$	
		Blower	Tembok	Blower	Tembok
1	$x_{5,Z1}$	1,08	1,13	2,46	2,54
2	$x_{5,Z2}$	0,54	1,31	2,78	3,12
3	$x_{5,Z3}$	1,40	2,04	3,86	2,84
4	$x_{5,Z4}$	0,44	1,37	3,36	2,71
5	$x_{5,Z5}$	1,40	3,83	3,62	2,72
6	$x_{5,Z6}$	3,97	4,60	3,77	4,95
rata-rata (m/s)		1,47	2,38	3,31	3,15

- Untuk sumbu x_6

No	Koord	$y_1 = 1,5 \text{ m}$		$Y_2 = 3,5 \text{ m}$	
		Blower	Tembok	Blower	Tembok
1	$x_{6,Z1}$	1,22	0,99	3,01	2,58
2	$x_{6,Z2}$	1,34	1,47	2,84	2,63
3	$x_{6,Z3}$	0,96	1,32	3,13	3,40
4	$x_{6,Z4}$	1,17	1,80	4,10	3,88
5	$x_{6,Z5}$	2,53	2,33	3,89	2,91
6	$x_{6,Z6}$	2,11	1,96	5,22	4,78
rata-rata (m/s)		1,56	1,65	3,70	3,36

Kecepatan angin rata-rata untuk : blower 1,5 meter : 1,411111 m/s

Tembok 1,5 meter : 1,621667 m/s

Blower 3,5 meter : 3,557778m/s

Tembok 3,5 meter : 3,592778 m/s

- **Kecepatan angin pada blower**

No	jarak (meter)	kecepatan angin (m/s)
1	2,50	20,87
2	5,50	11,44
3	9,50	9,99
4	13,50	4,63

Lampiran 3 : Hasil Perhitungan Daya Yang Dihasilkan Angin Dengan Diameter Sudu
0,5-0,8 Untuk Kecepatan Angin 10 M/S

➤ **radius 0,5 meter**

$$\begin{aligned} A &= \pi r^2 \\ &= 3,14 \cdot 0,25 \\ &= 0,785 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

➤ **radius 0,6 meter**

$$\begin{aligned} A &= \pi r^2 \\ &= 3,14 \cdot 0,36 \\ &= 1,13 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

➤ **radius 0,7 meter**

$$\begin{aligned} A &= \pi r^2 \\ &= 3,14 \cdot 0,49 \\ &= 1,54 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

➤ **radius 0,8 meter**

$$\begin{aligned} A &= \pi r^2 \\ &= 3,14 \cdot 0,64 \\ &= 2,01 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

➤ **Luas daerah sapuan angin radius 0,5 meter**

$$\begin{aligned} P_w &= \frac{1}{2} \rho A v^3 \\ &= \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 0,79 \cdot 10^3 \\ &= 474 \text{ Watt} \end{aligned}$$

➤ **Luas daerah sapuan angin radius 0,6 meter**

$$\begin{aligned}
 P_w &= \frac{1}{2} \rho A v^3 \\
 &= \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 1,13 \cdot 10^3 \\
 &= 678 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

➤ **Luas daerah sapuan angin radius 0,7 meter**

$$\begin{aligned}
 P_w &= \frac{1}{2} \rho A v^3 \\
 &= \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 1,54 \cdot 10^3 \\
 &= 924 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

➤ **Luas daerah sapuan angin radius 0,8 meter**

$$\begin{aligned}
 P_w &= \frac{1}{2} \rho A v^3 \\
 &= \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 2,01 \cdot 10^3 \\
 &= 1206 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

No	Radius (meter)	Luas Daerah Sapuan Angin (m^2)	Daya yang Dihasilkan Angin (watt)
1	0,5	0,79	474
2	0,6	1,13	678
3	0,7	1,54	924
4	0,8	2,01	1206

Lampiran 4: Data Perhitungan Estimasi Daya Di Pt Ajinomoto

1. Angin Alam

- Untuk sumbu x_1

No	Koord	$y_1 = 1,5 \text{ m}$		Daya angin (watt/m ²)	
		Blower	Tembok	Blower	Tembok
1	x_{1,Z_1}	1,83	2,69	0,61	1,95
2	x_{1,Z_2}	2,00	0,91	0,80	0,08
3	x_{1,Z_3}	0,67	0,55	0,03	0,02
4	x_{1,Z_4}	0,75	0,92	0,04	0,08
5	x_{1,Z_5}	0,65	0,87	0,03	0,07
6	x_{1,Z_6}	1,09	1,96	0,13	0,75
rata-rata daya angin (watt)				0,27	0,49

No	Koord	$Y_2 = 3,5 \text{ m}$		Daya angin (watt/m ²)	
		Blower	Tembok	Blower	Tembok
1	x_{1,Z_1}	3,26	2,58	3,46	1,72
2	x_{1,Z_2}	4,45	4,25	8,81	7,68
3	x_{1,Z_3}	4,20	5,67	7,41	18,23
4	x_{1,Z_4}	3,55	5,00	4,47	12,50
5	x_{1,Z_5}	2,45	1,72	1,47	0,51
6	x_{1,Z_6}	1,93	1,11	0,72	0,14
rata-rata daya angin (watt)				4,39	6,80

- Untuk sumbu x_2

No	Koord	$y_1 = 1,5 \text{ m}$		Daya angin (watt/m ²)	
		Blower	Tembok	Blower	Tembok
1	x_{2,Z_1}	2,41	0,63	1,40	0,03
2	x_{2,Z_2}	1,51	1,21	0,34	0,18
3	x_{2,Z_3}	1,13	0,69	0,14	0,03
4	x_{2,Z_4}	0,65	0,45	0,03	0,01
5	x_{2,Z_5}	1,21	1,06	0,18	0,12
6	x_{2,Z_6}	1,66	1,49	0,46	0,33
rata-rata daya angin (watt)				0,43	0,12

No	Koord	Y ₂ = 3,5 m		Daya angin (watt/m ²)	
		Blower	Tembok	Blower	Tembok
1	x _{2,Z1}	2,24	4,35	1,12	8,23
2	x _{2,Z2}	1,18	5,76	0,16	19,11
3	x _{2,Z3}	4,08	4,71	6,79	10,45
4	x _{2,Z4}	3,00	2,35	2,70	1,30
5	x _{2,Z5}	5,40	6,16	15,75	23,37
6	x _{2,Z6}	4,39	2,55	8,46	1,66
rata-rata daya angin (watt)				5,83	10,69

- Untuk sumbu x₃

No	Koord	y ₁ = 1,5 m		Daya angin (watt/m ²)	
		Blower	Tembok	Blower	Tembok
1	x _{3,Z1}	1,90	1,56	0,69	0,38
2	x _{3,Z2}	1,54	1,79	0,37	0,57
3	x _{3,Z3}	0,68	1,07	0,03	0,12
4	x _{3,Z4}	1,70	0,92	0,49	0,08
5	x _{3,Z5}	0,98	1,10	0,09	0,13
6	x _{3,Z6}	1,10	1,15	0,13	0,15
rata-rata daya angin (watt)				0,30	0,24

No	Koord	Y ₂ = 3,5 m		Daya angin (watt/m ²)	
		Blower	Tembok	Blower	Tembok
1	x _{3,Z1}	2,66	1,39	1,88	0,27
2	x _{3,Z2}	4,99	2,43	12,43	1,43
3	x _{3,Z3}	2,39	5,29	1,37	14,8
4	x _{3,Z4}	4,70	4,13	10,38	7,04
5	x _{3,Z5}	3,79	3,55	5,44	4,47
6	x _{3,Z6}	4,80	5,77	11,06	19,21
rata-rata daya angin (watt)				7,09	7,87

- Untuk sumbu x_4

No	Koord	$y_1 = 1,5 \text{ m}$		Daya angin (watt/m ²)	
		Blower	Tembok	Blower	Tembok
1	x_{4,Z_1}	2,15	2,01	0,99	0,81
2	x_{4,Z_2}	1,64	2,38	0,44	1,35
3	x_{4,Z_3}	1,43	2,26	0,29	1,15
4	x_{4,Z_4}	1,30	2,59	0,22	1,74
5	x_{4,Z_5}	1,52	1,08	0,35	0,13
6	x_{4,Z_6}	1,14	2,89	0,15	2,41
rata-rata daya angin (watt)				0,41	1,265

No	Koord	$Y_2 = 3,5 \text{ m}$		Daya angin (watt/m ²)	
		Blower	Tembok	Blower	Tembok
1	x_{4,Z_1}	2,09	1,55	0,91	0,37
2	x_{4,Z_2}	2,20	1,86	1,06	0,64
3	x_{4,Z_3}	2,68	3,85	1,92	5,71
4	x_{4,Z_4}	3,94	2,84	6,12	2,29
5	x_{4,Z_5}	5,85	6,04	20,02	22,03
6	x_{4,Z_6}	6,02	5,37	21,82	15,49
rata-rata daya angin (watt)				8,64	7,76

- Untuk sumbu x_5

No	Koord	$y_1 = 1,5 \text{ m}$		Daya angin (watt/m ²)	
		Blower	Tembok	Blower	Tembok
1	x_{5,Z_1}	1,08	1,13	0,13	0,14
2	x_{5,Z_2}	0,54	1,31	0,02	0,22
3	x_{5,Z_3}	1,40	2,04	0,27	0,85
4	x_{5,Z_4}	0,44	1,37	0,01	0,26
5	x_{5,Z_5}	1,40	3,83	0,27	5,62
6	x_{5,Z_6}	3,97	4,60	6,26	9,73
rata-rata daya angin (watt)				1,16	2,803333

No	Koord	Y ₂ = 3,5 m		Daya angin (watt/m ²)	
		Blower	Tembok	Blower	Tembok
1	x _{5,Z1}	2,46	2,54	1,49	1,64
2	x _{5,Z2}	2,78	3,12	2,15	3,04
3	x _{5,Z3}	3,86	2,84	5,75	2,29
4	x _{5,Z4}	3,36	2,71	3,79	1,99
5	x _{5,Z5}	3,62	2,72	4,74	2,01
6	x _{5,Z6}	3,77	4,95	5,36	12,13
rata-rata daya angin (watt)				3,88	3,85

- Untuk sumbu x₆

No	Koord	y ₁ = 1,5 m		Daya angin (watt/m ²)	
		Blower	Tembok	Blower	Tembok
1	x _{6,Z1}	1,22	0,99	0,18	0,10
2	x _{6,Z2}	1,34	1,47	0,24	0,32
3	x _{6,Z3}	0,96	1,32	0,09	0,23
4	x _{6,Z4}	1,17	1,80	0,16	0,58
5	x _{6,Z5}	253	2,33	1,62	1,26
6	x _{6,Z6}	2,11	1,96	0,94	0,75
rata-rata daya angin (watt)				0,54	0,54

No	Koord	Y ₂ = 3,5 m		Daya angin (watt/m ²)	
		Blower	Tembok	Blower	Tembok
1	x _{6,Z1}	3,01	2,58	2,73	1,72
2	x _{6,Z2}	2,84	2,63	2,29	1,82
3	x _{6,Z3}	3,13	3,40	3,07	3,93
4	x _{6,Z4}	4,10	3,88	6,89	5,84
5	x _{6,Z5}	3,89	2,91	5,89	2,46
6	x _{6,Z6}	5,22	4,78	14,22	10,92
rata-rata daya angin (watt)				5,85	4,49

Rata-rata daya yang dihasilkan oleh : blower 1,5 m : 0,58 watt

Tembok 1,5 m : 0,91 watt

Blower 3,5m : 5,95 watt

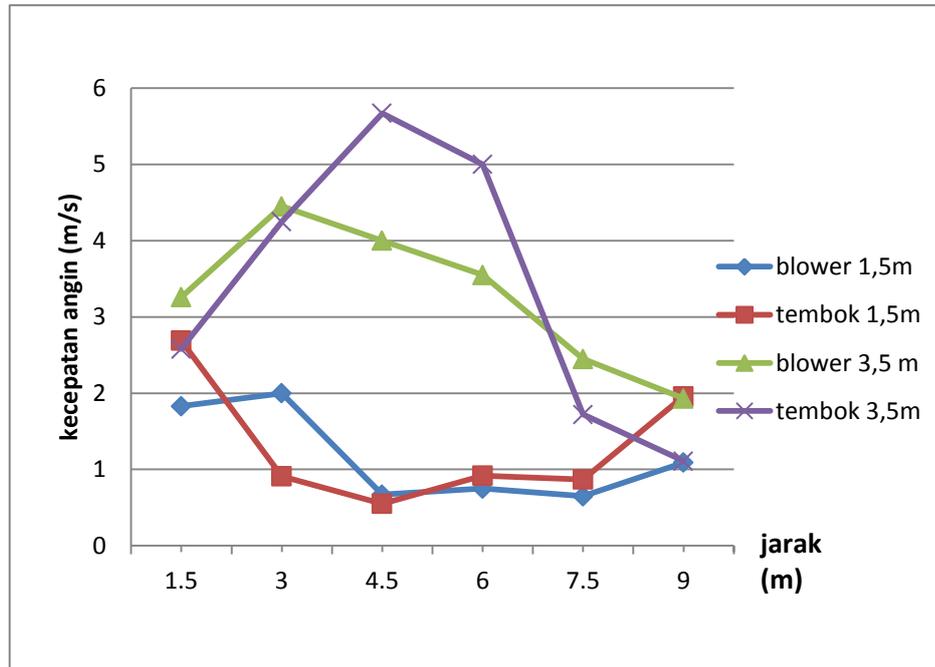
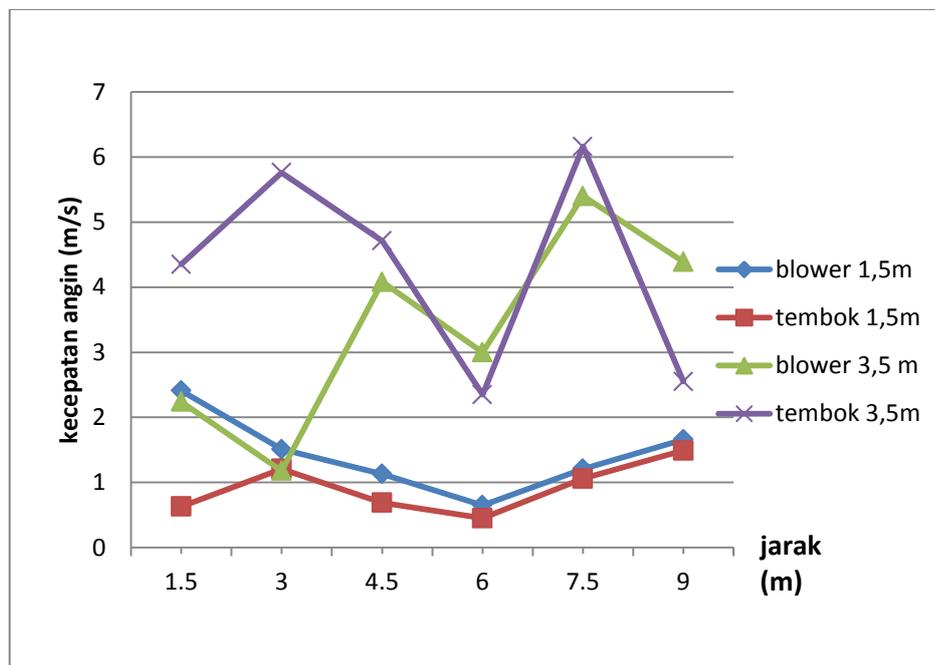
Tembok 3,5 m : 6,91 watt

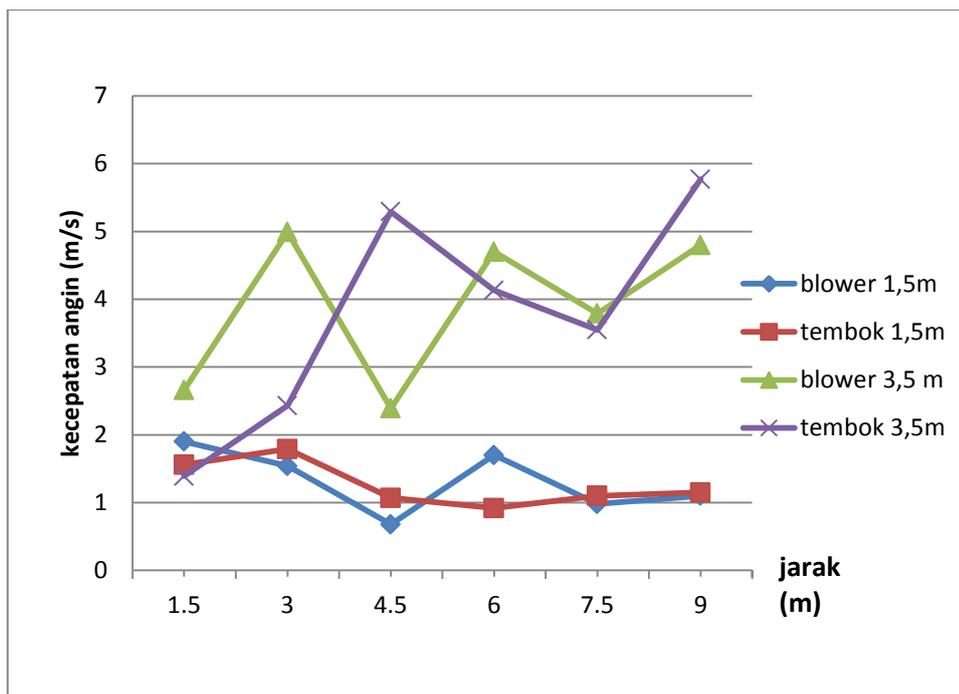
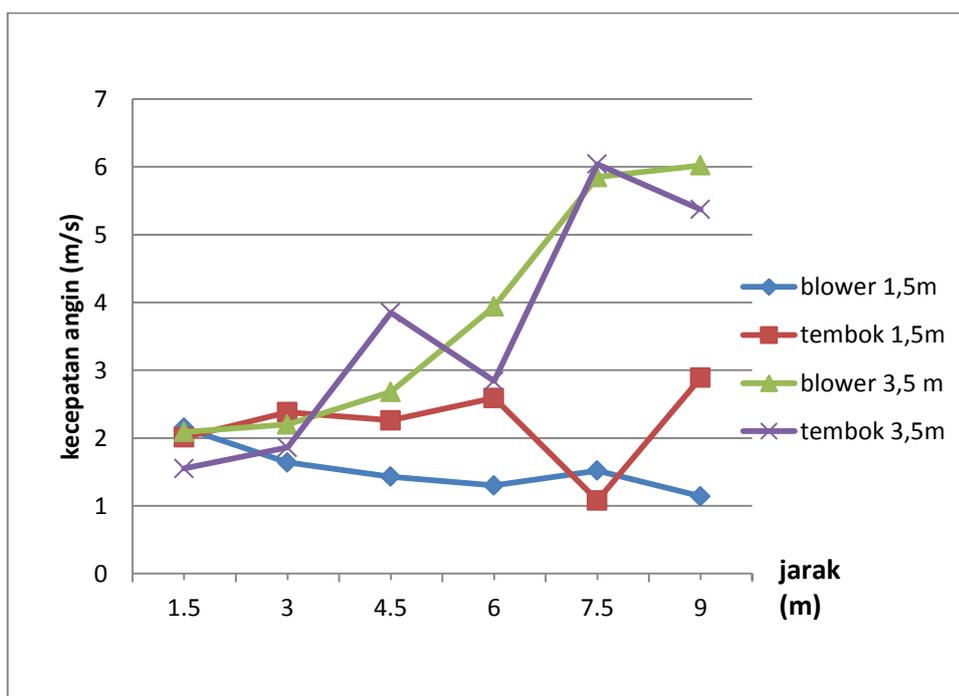
2. Angin Blower

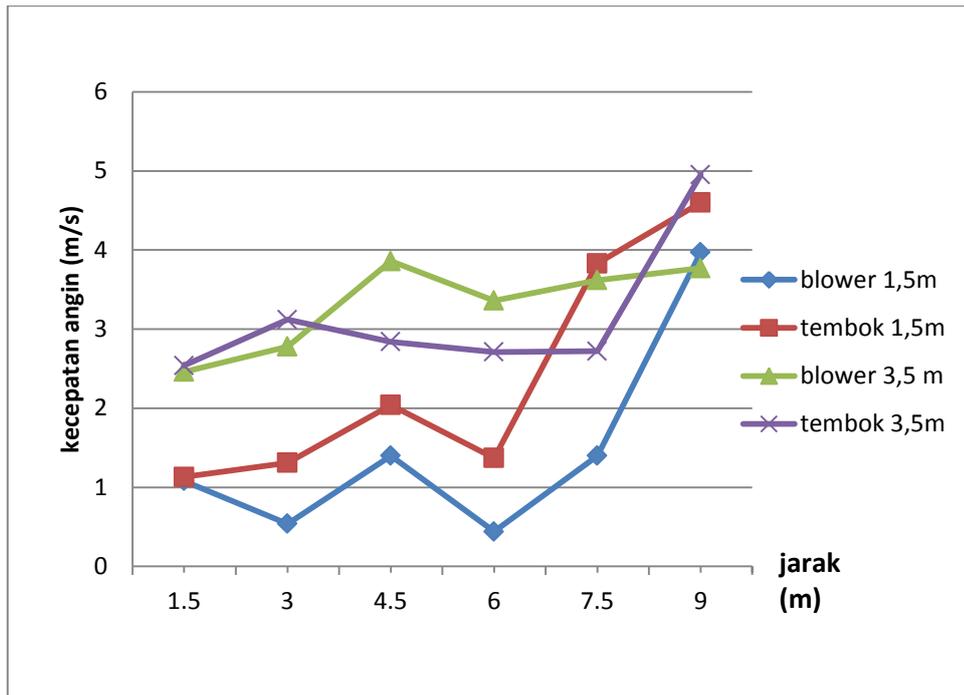
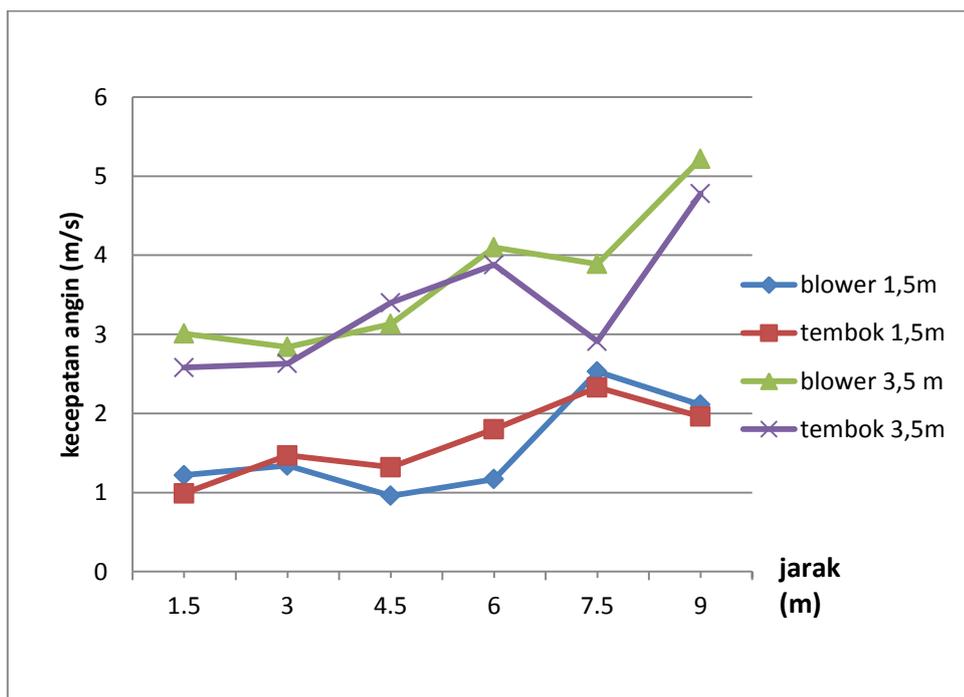
No	jarak (meter)	kecepatan angin (m/s)	Daya angin (watt/m ²)
1	2,50	20,87	909,01
2	5,50	11,44	149,72
3	9,50	10,00	100,00
4	13,50	4,63	9,93

Lampiran 5: Grafik Estimasi Daya Di Pt Ajinomoto.

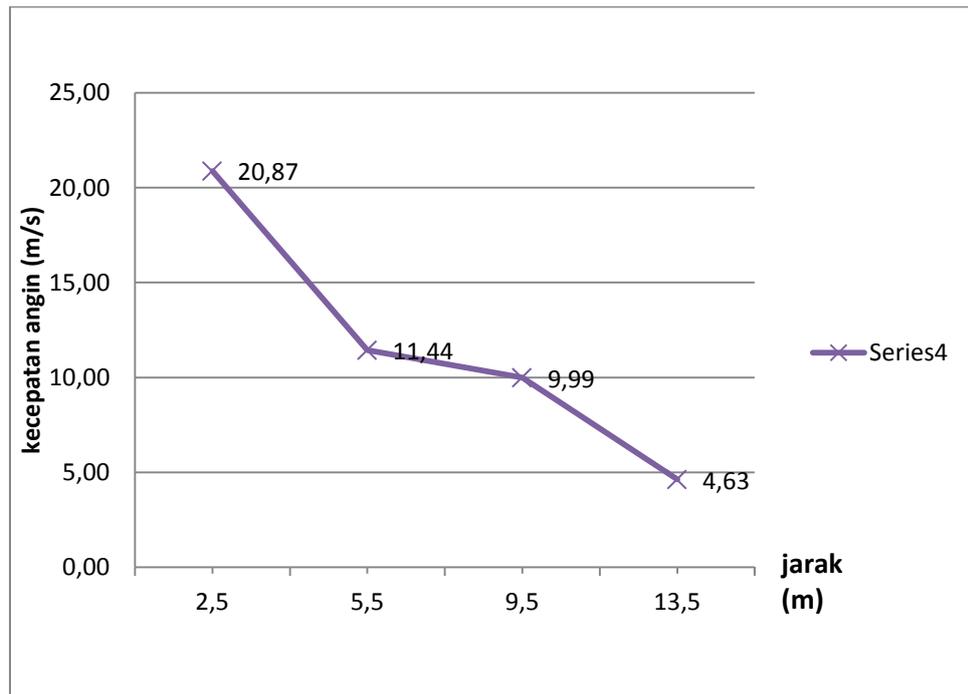
1. Angin Alam

Potensi Angin di Titik x_1 Potensi Angin di Titik x_2

Potensi Angin di Titik x_3 Potensi Angin di Titik x_4

Potensi Angin di Titik x_5 Potensi Angin di Titik x_6

2. Angin Blower



Lampiran 6: Data Perhitungan Parameter-Parameter Angin

- **HASIL PERHITUNGAN DYNAMIC PRESSURE**

➤ Kecepatan angin $v = 4,63\text{m/s}$

$$\begin{aligned} W_d &= \frac{1}{2} \rho v^2 \\ &= \frac{1}{2} \mathbf{1,2} \cdot 4,63^2 \\ &= 13 \text{ N/m}^2 = 1,33 \text{ kg} \end{aligned}$$

➤ Kecepatan angin $v = 10\text{m/s}$

$$\begin{aligned} W_d &= \frac{1}{2} \rho v^2 \\ &= \frac{1}{2} \mathbf{1,2} \cdot 10^2 \\ &= 60 \text{ N/m}^2 = 6,12 \text{ kg} \end{aligned}$$

➤ Kecepatan angin $v = 11,44\text{m/s}$

$$\begin{aligned} W_d &= \frac{1}{2} \rho v^2 \\ &= \frac{1}{2} \mathbf{1,2} \cdot 11,44^2 \\ &= 78,5 \text{ N/m}^2 = 8 \text{ kg} \end{aligned}$$

➤ Kecepatan angin $v = 20,87\text{m/s}$

$$\begin{aligned} W_d &= \frac{1}{2} \rho v^2 \\ &= \frac{1}{2} \mathbf{1,2} \cdot 20,87^2 \\ &= 261 \text{ N/m}^2 = 26 \text{ kg} \end{aligned}$$

No	Jarak (meter)	Kecepatan Angin (m/s)	Dynamic Pressure	
			(N/m ²)	Kg
1	2,50	20,87	13,00	1,33
2	5,50	11,44	60,00	6,12
3	9,50	10,00	78,50	8,00
4	13,50	4,63	261,00	26,00

➤ **HASIL PEHITUNGAN LIFT AND DRAG FORCE**

- **Kecepatan angin $v = 4,63\text{m/s}$**

$$\begin{aligned} p_L &= \frac{1}{2} \rho v^2 C_L \\ &= \frac{1}{2} \mathbf{1,2} \cdot 4,63^2 \mathbf{0,8} \\ &= 10,4 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_D &= \frac{1}{2} \rho v^2 C_D \\ &= \frac{1}{2} \mathbf{1,2} \cdot 4,63^2 \mathbf{0,008} \\ &= 0,104 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

- **Kecepatan angin $v = 10\text{m/s}$**

$$\begin{aligned} p_L &= \frac{1}{2} \rho v^2 C_L \\ &= \frac{1}{2} \mathbf{1,2} \cdot 10^2 \mathbf{0,8} \\ &= 48 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_D &= \frac{1}{2} \rho v^2 C_D \\ &= \frac{1}{2} \mathbf{1,2} \cdot 10^2 \mathbf{0,008} \\ &= 0,48 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

- **Kecepatan angin $v = 11,4\text{m/s}$**

$$\begin{aligned} p_L &= \frac{1}{2} \rho v^2 C_L \\ &= \frac{1}{2} \mathbf{1,2} \cdot 11,44^2 \mathbf{0,8} \\ &= 62,8 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_D &= \frac{1}{2} \rho v^2 C_D \\ &= \frac{1}{2} \mathbf{1,2} \cdot 11,44^2 \mathbf{0,008} \\ &= 0,63 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

- **Kecepatan angin $v = 20,87\text{m/s}$**

$$\begin{aligned} p_L &= \frac{1}{2} \rho v^2 C_L \\ &= \frac{1}{2} \mathbf{1,2} \cdot 20,87^2 \mathbf{0,8} \\ &= 209,07 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

$$p_D = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 20,87^2 \cdot 0,008$$

$$= 2,09 \text{ N/m}^2$$

No	Jarak (meter)	Kecepatan Angin (m/s)	Lift Pressure (N/m ²)	Drag Pressure (N/m ²)
1	2,50	20,87	10,40	0,10
2	5,50	11,44	48,00	0,48
3	9,50	10,00	62,80	0,63
4	13,50	4,63	209,07	2,09

- **HASIL PERHITUNGAN KECEPATAN SUDUT**

- Kecepatan angin $v = 4,63\text{m/s}$

$$\lambda = \frac{\omega R}{v_1}$$

$$\omega = \frac{\lambda v_1}{R}$$

$$= \frac{6,4,63}{0,6}$$

$$= 46,3 \text{ rad/s}$$

- Kecepatan angin $v = 10\text{m/s}$

$$\lambda = \frac{\omega R}{v_1}$$

$$\omega = \frac{\lambda v_1}{R}$$

$$= \frac{6,10}{0,6}$$

$$= 100 \text{ rad/s}$$

- Kecepatan angin $v = 11,44\text{m/s}$

$$\lambda = \frac{\omega R}{v_1}$$

$$\omega = \frac{\lambda v_1}{R}$$

$$= \frac{6.11,44}{0,6}$$

$$= 114,4 \text{ rad/s}$$

- Kecepatan angin $v = 20,87 \text{ m/s}$

$$\lambda = \frac{\omega R}{v_1}$$

$$\omega = \frac{\lambda v_1}{R}$$

$$= \frac{6.20,87}{0,6}$$

$$= 208,7 \text{ rad/s}$$

No	Jarak (meter)	Kecepatan Angin (m/s)	Kecepatan Sudut (rad/s)
1	2,50	20,87	208,70
2	5,50	11,44	114,40
3	9,50	10,00	100,00
4	13,50	4,63	46,30

➤ HASIL PERHITUNGAN PUTARAN ROTOR

- Kecepatan angin $v = 4,63 \text{ m/s}$

$$N = \frac{60\omega}{2\pi}$$

$$= \frac{60.46,3}{2.3,14}$$

$$= 442,36 \text{ rpm}$$

- Kecepatan angin $v = 10 \text{ m/s}$

$$N = \frac{60\omega}{2\pi}$$

$$= \frac{60.100}{2.3,14}$$

$$= 955,4 \text{ rpm}$$

- Kecepatan angin $v = 11,44\text{m/s}$

$$\begin{aligned} N &= \frac{60\omega}{2\pi} \\ &= \frac{60.114,4}{2.3,14} \\ &= 1093 \text{ rpm} \end{aligned}$$

- Kecepatan angin $v = 20,87\text{m/s}$

$$\begin{aligned} N &= \frac{60\omega}{2\pi} \\ &= \frac{60.208,7}{2.3,14} \\ &= 1994 \text{ rpm} \end{aligned}$$

No	Jarak (meter)	Kecepatan Angin (m/s)	Putaran Rotor (rpm)
1	2,50	20,87	1994,00
2	5,50	11,44	1093,00
3	9,50	10,00	955,40
4	13,50	4,63	442,36

➤ **HASIL PERHITUNGAN DAYA YANG DIHASILKAN ANGIN**

- **Kecepatan angin $v = 4,63 \text{ m/s}$**

$$\begin{aligned} P_w &= \frac{1}{2}\rho Av^3 \\ &= \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 1,13 \cdot 4,63^3 \\ &= 67,3 \text{ Watt} \end{aligned}$$

- **Kecepatan angin $v = 10 \text{ m/s}$**

$$\begin{aligned} P_w &= \frac{1}{2}\rho Av^3 \\ &= \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 1,13 \cdot 10^3 \\ &= 678 \text{ Watt} \end{aligned}$$

- **Kecepatan angin $v = 11,44 \text{ m/s}$**

$$\begin{aligned} P_w &= \frac{1}{2}\rho Av^3 \\ &= \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 1,13 \cdot 11,44^3 \end{aligned}$$

$$= 1015,1 \text{ Watt}$$

➤ **Kecepatan angin v = 20,87 m/s**

$$\begin{aligned} P_w &= \frac{1}{2} \rho A v^3 \\ &= \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 1,13 \cdot 20,87^3 \\ &= 6163 \text{ Watt} \end{aligned}$$

No	Jarak (meter)	Kecepatan Angin (m/s)	Daya yang Dihasilkan Angin (watt)
1	2,50	20,87	6163,00
2	5,50	11,44	1051,10
3	9,50	10,00	678,00
4	13,50	4,63	67,30

➤ **HASIL PERHITUNGAN DAYA YANG DAPAT DIAMBIL DARI ANGIN**

• **Kecepatan angin v = 4,63 m/s**

$$\begin{aligned} P_A &= \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho A v^3 \\ &= \frac{16}{27} \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 1,13 \cdot 4,63^3 \\ &= 40 \text{ Watt} \end{aligned}$$

• **Kecepatan angin v = 10 m/s**

$$\begin{aligned} P_A &= \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho A v^3 \\ &= \frac{16}{27} \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 1,13 \cdot 10^3 \\ &= 400 \text{ Watt} \end{aligned}$$

• **Kecepatan angin v = 11,44 m/s**

$$\begin{aligned} P_A &= \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho A v^3 \\ &= \frac{16}{27} \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 1,13 \cdot 11,44^3 \\ &= 600 \text{ Watt} \end{aligned}$$

• **Kecepatan angin v = 20,87 m/s**

$$\begin{aligned} P_A &= \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho A v^3 \\ &= \frac{16}{27} \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 1,13 \cdot 20,87^3 \end{aligned}$$

$$= 3636 \text{ Watt}$$

No	Jarak (meter)	Kecepatan Angin (m/s)	Daya yang Dapat Diambil dari Angin(watt)
1	2,50	20,87	3636,00
2	5,50	11,44	600,00
3	9,50	10,00	400,00
4	13,50	4,63	40,00

➤ **HASIL PERHITUNGAN DAYA DENGAN Cp 0,4**

➤ **Kecepatan angin v = 4,63 m/s**

$$\begin{aligned} P_D &= \frac{1}{2} \rho v^3 A \cdot C_p \\ &= \frac{1}{2} 1,2 \cdot 4,63^3 \cdot 1,13 \cdot 0,4 \\ &= 27 \text{ Watt} \end{aligned}$$

➤ **Kecepatan angin v = 10 m/s**

$$\begin{aligned} P_D &= \frac{1}{2} \rho v^3 A \cdot C_p \\ &= \frac{1}{2} 1,2 \cdot 10 \cdot 1,13 \cdot 0,4 \\ &= 271 \text{ Watt} \end{aligned}$$

➤ **Kecepatan angin v = 11,44 m/s**

$$\begin{aligned} P_D &= \frac{1}{2} \rho v^3 A \cdot C_p \\ &= \frac{1}{2} 1,2 \cdot 11,44^3 \cdot 1,13 \cdot 0,4 \\ &= 406 \text{ Watt} \end{aligned}$$

➤ **Kecepatan angin v = 20,87 m/s**

$$\begin{aligned} P_D &= \frac{1}{2} \rho v^3 A \cdot C_p \\ &= \frac{1}{2} 1,2 \cdot 20,87^3 \cdot 1,13 \cdot 0,4 \\ &= 2465 \text{ Watt} \end{aligned}$$

No	Jarak (meter)	Kecepatan Angin (m/s)	Daya dengan koefisien 0,4 (watt)
1	2,50	20,87	27,00
2	5,50	11,44	271,00
3	9,50	10,00	406,00
4	13,50	4,63	2465,00

➤ HASIL PERHITUNGAN DAYA TOTAL

➤ Kecepatan angin $v = 4,63$ m/s

$$\begin{aligned}
 P_T &= \frac{1}{2} \rho v^3 A C_p \eta_g \\
 &= \frac{1}{2} 1,2 \cdot 4,63^3 \cdot 1,13 \cdot 0,4 \cdot 0,85 \\
 &= 23 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

➤ Kecepatan angin $v = 10$ m/s

$$\begin{aligned}
 P_T &= \frac{1}{2} \rho v^3 A C_p \eta_g \\
 &= \frac{1}{2} 1,2 \cdot 10^3 \cdot 1,13 \cdot 0,4 \cdot 0,85 \\
 &= 230 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

➤ Kecepatan angin $v = 11,44$ m/s

$$\begin{aligned}
 P_T &= \frac{1}{2} \rho v^3 A C_p \eta_g \\
 &= \frac{1}{2} 1,2 \cdot 11,44^3 \cdot 1,13 \cdot 0,4 \cdot 0,85 \\
 &= 305 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

➤ Kecepatan angin $v = 20,87$ m/s

$$\begin{aligned}
 P_T &= \frac{1}{2} \rho v^3 A C_p \eta_g \\
 &= \frac{1}{2} 1,2 \cdot 20,87^3 \cdot 1,13 \cdot 0,4 \cdot 0,85 \\
 &= 1854 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

No	Jarak (meter)	Kecepatan Angin (m/s)	Daya Total (watt)
1	2,50	20,87	1854,00
2	5,50	11,44	305,00
3	9,50	10,00	230,00
4	13,50	4,63	23,00

➤ **HASIL PERHITUNGAN TORSI**

➤ **Kecepatan angin v = 4,63 m/s**

$$T = \frac{P}{\omega}$$

$$= \frac{23}{46,3}$$

$$= 0,5 \text{ Nm}$$

➤ **Kecepatan angin v = 10 m/s**

$$T = \frac{P}{\omega}$$

$$= \frac{230}{100}$$

$$= 2,3 \text{ Nm}$$

➤ **Kecepatan angin v = 11,44 m/s**

$$T = \frac{P}{\omega}$$

$$= \frac{305}{114,4}$$

$$= 2,67 \text{ Nm}$$

➤ **Kecepatan angin v = 20,87 m/s**

$$T = \frac{P}{\omega}$$

$$= \frac{1854}{208,7}$$

= 8,9 Nm

No	Jarak (meter)	Kecepatan Angin (m/s)	Torsi (Nm)
1	2,50	20,87	8,90
2	5,50	11,44	2,67
3	9,50	10,00	2,30
4	13,50	4,63	0,50

➤ **HASIL PERHITUNGAN POTENSI ENERGI TAHUNAN**

No	Jarak (meter)	Kecepatan Angin (m/s)	Potensi Energi Tahunan (Kwh)
1	2,50	20,87	16.241,00
2	5,50	11,44	2671,80
3	9,50	10,00	2014,80
4	13,50	4,63	201,480

➤ **HASIL PERHITUNGAN HARGA LISTRIK DENGAN TARIF PLN**

No	Kecepatan Angin (m/s)	Potensi Energi Tahunan (Kwh)	Tarif Listrik PLN per Tahun (Rupiah)
1	20,87	16.241,00	8.120.500
2	11,44	2671,80	1.335.900
3	10,00	2014,80	1.007.400
4	4,63	201,48	100.740

➤ **HASIL PERBANDINGAN PUTARAN ROTOR DENGAN SOFTWARE**

No	Kecepatan Angin (m/s)	Putaran Rotor Teoritis (rpm)	Putaran Rotor Software (watt)	Prosentase (%)
1	11,44	1093,00	1110,00	98,00
2	10,00	955,40	940,00	98,00
3	4,63	442,36	427,00	96,50

➤ **HASIL PERBANDINGAN DAYA DENGAN SOFTWARE**

No	Kecepatan Angin (m/s)	Daya Teoritis (watt)	Daya Software (watt)	Prosentase (%)
1	11,44	305,00	368,00	82,00
2	10,00	230,00	223,00	97,00
3	4,63	23,00	21,00	91,00

➤ **HASIL PERBANDINGAN DAYA DENGAN AIR-X**

No	Kecepatan Angin (m/s)	Daya Teoritis (watt)	Daya Air-X (watt)	Prosentase (%)
1	20,87	1854,00	100,16	5,40
2	11,44	305,00	298,90	98,00
3	10,00	230,00	222,00	96,50
4	4,63	23,00	22,00	95,60

➤ **HASIL PERBANDINGAN DAYA DENGAN CITY SWALLOW**

No	Kecepatan Angin (m/s)	Daya Teoritis (watt)	Daya City Swallow (watt)	Prosentase (%)
1	20,87	1854,00	no data	no data
2	11,44	305,00	372,00	82,00
3	10,00	230,00	300,00	76,70
4	4,63	23,00	57,50	40,00

Lampiran 7: Data Spesifikasi Pembangkit Listrik

1. Air-x 400 watt

introducing the latest evolution in small **wind turbines**. The **AIR-X** wind generator builds upon what made AIR the world's #1 selling small wind turbine with new technology previously found only in today's state-of-the-art mega-watt-class **wind turbines**. All of these features are primarily found within the body of the turbine. The new microprocessor based speed control results in increased performance, improved battery charging capability and the reduction of "flutter" noise from the machine. The controller allows for peak-power tracking of the wind by optimizing the alternator's output on all points of the cubic curve and then efficiently delivers the energy to the battery. The turbine's smart controller allows it to actually control blade rotation speed thus eliminating the buzzing noise commonly found with the AIR 403 and 303 in high winds. Furthermore, a new series of carbon-reinforced blades with a modified pitch angle further increases power production. The new electronics are a considerable improvement over the AIR 403 controller that consists of diode-rectification and a simple off/off voltage switch.



Much Lower Noise: Previous *AIR wind turbines* relied on their aero-elastic blade design for protection in high winds, causing loud flutter noise in winds above 35 mph (16 m/s). **AIR-X's** circuit monitors the wind speed and electronically slows the blades as it reaches its rated output preventing it from going into flutter. This results in a much quieter **wind turbine**. In high winds, the **AIR-X wind turbine** will continue to produce power at a reduced level until the wind decreases, at which point maximum output will resume. The Benefit: Quieter and neighbor friendly operation.



AIR-X Internal Controller

Improved battery charging: Previous **AIR wind turbine** designs required 300-400 amp hour battery banks so the trickle charge of the wind turbine could be adequately absorbed. The AIR-X's charge controller periodically stops charging, reads the battery voltage, compares it to the voltage setting and if the battery is charged, it completely shuts off all current going to the battery. This function is performed within a few milliseconds. The closer the battery is to reaching its full state of charge, the more often the AIR-X's circuit repeats this action. This means any size battery bank from 25 to 25,000 amp hours or higher can be charged safely. When the battery has reached its charged state, the AIR-X will slow to an almost complete stop. Only when the battery has dropped below its voltage set point will it startup and resume charging. The Benefit: Extended battery life, no overcharging.

Lower stress design: AIR-X limits power on the input side of the electronics by controlling the torque from the blades. The power no longer has to be dissipated by the electronics resulting in lower stress on the circuit, bearings and other materials. Furthermore, stress on wind turbines occurs primarily in high winds. Under these conditions, the electronic stall design reduces the blade speed to 600 rpm, thereby significantly reducing turbine and tower loading while still producing power. The Benefit: Greater confidence in turbine operation in high wind conditions without manually operating the stop switch. Note: A manual stop switch control is an available option for the AIR-X.

Design changes are primarily found within the body of the wind turbine:

- New microprocessor-based controller.
- New "wave washer" combined with looser bearing-to-body tolerances are incorporated into the face bearing set. This results in lower compression on the bearing/race, with quieter running and lower startup speed. It also lowers stress on the bearings and shaft when subject to twisting forces during normal operation.
- New series of carbon reinforced blades.
- More robust tower clamp and yaw assembly for stronger and more secure tower mounting.

Features of the Air X Wind Turbine

- Unprecedented 3 YEAR WARRANTY
- Simple rooftop installation; no tower necessary
- Carbon Fiber Composite Blades
- Aircraft quality aluminum alloy castings
- Exclusive Brush-less neodymium cubic curve alternator
- Sophisticated internal battery charge regulator
- Maintenance-free - Only two moving parts
- Exclusive Auto-brake-feature that slows the AIR to a silent spin when the batteries are charged thus extending bearing life and reducing noise.
- High Wind Safe Mode - Automatically slows turbine in potentially damaging winds and reduces noise.
- Neighbor Friendly.

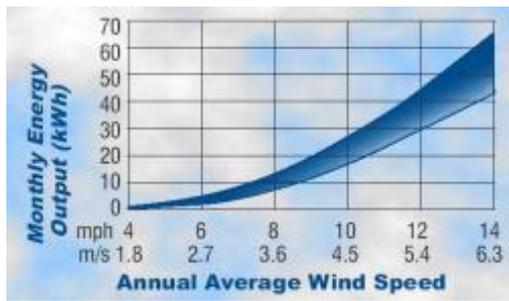
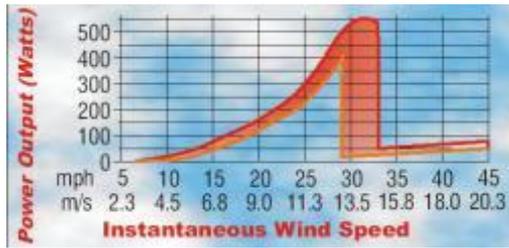
Air X Applications

- Remote homes & cabins
- Water pumping
- Recreational vehicles
- Battery charging
- Science & education projects

Specifications

Rotor Diameter:	46" (1.14 meters)
Weight:	13 lbs (6 kg)
Start up wind speed:	7 mph (3 m/s)
Voltage:	12 & 24 VDC (36/48 VDC available soon)
Output:	400 watts at 28 mph (12.5 m/s)

Performance Curves



Southwest Windpower

2. City Swallow 400 Watt



Production specifications:

1. Streamlined design, simple structure, running stably, power supply for city lamps, monitoring and home.
2. Small size and flexibility, lively Colors, beautiful curve, low noise, and environmental harmony.

Technical parameter:

Wind generator part	Model	Z-400W		Z-600W	
	Name	City Swallow		City Swallow	
	Rated power	400W		600W	
	Rated DC voltage	DC 12V/24V		DC 24V	
	Rated current	33A/17A		25A	
	Rated speed	740r/m		640r/m	
	Max power	460W		680W	
	Number of blade	3 pcs	5 pcs	3pcs	5 pcs
	Starting wind speed	3m/s	2.5m/s	3m/s	2.5m/s
	Cut-in wind speed	3.5m/s	3m/s	3.5m/s	3m/s
	Cut-out wind speed	15m/s		15m/s	

	Security wind speed	45m/s	45m/s	
	Rated wind speed	12m/s	12m/s	
	Engine	Three-phase permanent magnel generator	Three-phase permanent magnel generator	
	Rotor diameter	1450mm	1850mm	
	Blade material	Carbon fiber reinforced plastics	Carbon fiber reinforced plastics	
	Output line anti-winding device	Over all three-phase commutator	Over all three-phase commutator	
	Over-speed wind protection	Tip stall protection + turned protection + Electromagnetic brake	Tip stall protection + turned protection + Electromagnetic brake	
	Life span	15 years	15 years	
	Equipment surface protection	Aluminum oxide + plastic coating	Aluminum oxide + plastic coating	
	Working temperature	-40°C-70°C	-45°C-70°C	
	N.W.	17.5kg	19kg	19.5kg 21.3kg
	Packing material	Carton box and foam material	Carton box and foam material	
	packing dimension	1110*580*240mm	1110*580*240mm	
	G.W.	20kg	21.5kg	22kg 23.8kg
Tower part	Tower height	5M (Φ60mm zincd iron tube)	5M (Φ60mmzincd iron tube)	
	Packing material	Carton box and foam material	Carton box and foam material	
	Packing dimension	1580*320*150mm	1580*320*150mm	
	G.W.	33.5kg	33.5kg	
the controlling circuit equipment	Controller	400w	600w	
	Inverter	500w	600w	
	Packing material	Carton box and foam material	Carton box and foam material	

	N.W.	2.2kg	2.2kg
Solarpanel	Model	250w	400w
	N.W.	19.6kg	41.8kg
Battery	Model	150AH/12V	200AH/12V
	N.W.	48kg	65kg

Remark:

1. The sample price is FOB SHENZHEN price, which is valid in seven days.
2. delivery time: within a half month; Payment: T/T, prior to delivery.

Lampiran 8: Tabel Data Tarif Listrik PLN

Golongan Tarif (TTL 2010)

TARIF DASAR LISTRIK UNTUK KEPERLUAN INDUSTRI					
No	GOL. TARIF	BATAS DAYA	REGULER		
			BIAYA BEBAN (Rp/kVA/bulan)	BIAYA PEMAKAIAN (Rp/kWh) dan BIAYA kVArh (Rp/kVArh)	PRA BAYAR (Rp/kWh)
1.	1-1 KR	450 VA	26.000	Blok I : 0 s.d. 30 kwh . 160 Blok II : di atas 30 kwh : 395	485
2.	I-1/TR	900 VA	31.500	Blok I : 0 s.d. 72 kwh : 315 Blok II : di atas 72 kwh : 405	600
3.	I-1/TR	1.300 VA	*)	765	765
4.	I-1/TR	2.200 VA	*)	790	790
5.	I-1/TR	3.500 VA s.d. 14 kVA	*)	915	915
6.	I-2/TR	di atas 14 kVA s.d. 200 kVA	**)	Blok WBP = K x 800 Blok LWBP = 800 kVArh = 875 *****)	-
7.	I-3/TM	di atas 200 kVA	**)	Blok WBP = K x 800 Blok LWBP = 800 kVArh = 735 *****)	-
8.	1-4/TT	30.000	***)	Blok WBP dan LWBP = 605	-

		kVA ke atas		kVA _{rh} = 605 *****)	
--	--	----------------	--	--------------------------------	--

Catatan :

*) Diterapkan Rekening Minimum (RM) : $RM1 = 40 \text{ (Jam Nyala)} \times \text{Daya tersambung (kVA)} \times \text{Biaya Pemakaian}$.

**) Diterapkan Rekening Minimum (RM) : $RM2 = 40 \text{ (Jam Nyala)} \times \text{Daya tersambung (kVA)} \times \text{Biaya Pemakaian Blok I}$

***) Diterapkan Rekening Minimum (RM): $RM3 = 40 \text{ (Jam Nyala)} \times \text{Daya tersambung (kVA)} \times \text{Biaya Pemakaian LWBP}$.

- Jam nyala : kwh per bulan dibagi dengan kVA tersambung.
- H 1: Persentase batas hemat terhadap jam nyala rata-rata nasional x daya tersambung (kVA).
- H 2 : Pemakaian listrik (kwh) – H1.
- Biaya kelebihan pemakaian daya reaktif (kVA_{rh}) dikenakan dalam hal faktor daya rata-rata setiap bulan kurang dari 0,85 (Nol koma delapan lima per seratus)
- Besar persentase batas hemat dan jam nyala rata-rata nasional ditetapkan oleh Direksi Perusahaan Perseroan (Persero) PT Perusahaan Listrik Negara dengan persetujuan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral.
- K : Faktor perbandingan antara harga WBP dan LWBP sesuai dengan karakteristik beban sistem kelistrikan setempat ($1,4 \leq K \leq 2$), ditetapkan oleh Direksi Perusahaan Perseroan (Persero) PT Perusahaan Listrik Negara
- WBP : Waktu Beban Puncak
- LWBP : Luar Waktu Beban Puncak

Lampiran 9: Top 5 Wind Turbine In The World

Sumber: American Wind Energy Association (AWEA)

1. [Southwest Windpower Skystream 3.7](#)



The Skystream 3.7 is the first fully-integrated, grid-tied wind energy system designed for residential use. This “plug and play” turbine is an all-inclusive wind generator (with controls and inverter built in) designed to provide quiet, clean electricity in very low winds.

Unlike many other turbines, the Skystream 3.7 will turn downwind because it has no tail rudder to keep it facing into the wind.

Cost*: \$5399 (not including tower and installation materials)

Rated Capacity: 1.9 kW continuous output, 2.6 kW peak

Startup Windspeed: 8mph

Rotor: 12 feet (3.72 m); 50-325 RPM

Interconnection: Utility connected or battery charging

Alternator: Gearless, permanent magnet brushless

Voltage Output: 240 VAC (Optional 208 VAC)

Estimated Energy Production: 400 kWh/month @ 12 MPH (5.4 m/s)

Source: [Clean Technica \(http://s.tt/12tlR\)](http://s.tt/12tlR)

2. Southwest Windpower Air X



The AIR is the world's number one selling small wind turbine. The redesigned Air X incorporates a new microprocessor-based technology that results in increased performance, improved battery charging capability, greater reliability and the reduction of "flutter" noise from the machine.

The Air X is ideally designed for powering small appliances in off-grid installations, remote communications facilities, marine applications, and communities in the developing world.

Cost: \$600

Rated Capacity: 400 watts

Startup Windspeed: 8mph

Rotor: 46 inches (1.17 m)

Interconnection: Battery charging

Voltage Output: 12, 24, 48 VDC

Estimated Energy Production: 288 kWh/month @ 12 MPH (5.4 m/s)

Source: [Clean Technica \(http://s.tt/12tIR\)](http://s.tt/12tIR)

[3. AeroVironment Architectural Wind](#)

Architectural Wind is a small, modular wind turbine system designed for installation on buildings in urban and suburban areas. This is done by eliminating the support tower, reducing noise and vibration, and creating a modular housing that installs quickly and easily onto buildings, without penetrating the roof.



The turbine design has received critical praise for a while now, receiving the Red Dot International Design award and a 2007 Annual Design Review award. With a sleek, color-matched series of specially designed, highly efficient and low profile wind turbines, property owners can integrate Architectural Wind systems easily into new and existing buildings. As Preston at Jetson Green pointed out, [the AeroVironment turbines have been installed](#) at the new Kettle Chip facility in Beloit, WI that can produce roughly 28,000 kilowatt hours of power per year under normal wind conditions.

Architectural Wind is scalable and works very well in urban environments. The price and output of the machines will vary because of the drastically different requirements of individual installations. If you need more information on cost and specs, you can contact [AeroVironment through their website](#).

Source: [Clean Technica](http://s.tt/12tIR) (<http://s.tt/12tIR>)

4. Southwest Windpower Whisper 500



The Whisper 500 can produce enough energy to power a small to moderately sized home. Formerly the Whisper 175, the Whisper 500 was completely redesigned in 2004 to work in harsh, high wind environments.

The Whisper 500 is a two bladed fiberglass reinforced blade and incorporates a patented “angle governor,” designed for quiet operations in high winds. Side-furling overspeed protection turns alternator and blades out of high winds without cutting power output.

Cost: \$7,095

Rated Capacity: 3kw

Startup Windpeed: 7.5mph

Rotor: 15 feet (4.6 m)

Interconnection: Utility connected or battery charging

Voltage Output: 24, 32, 48 VDC or 240 VAC

Estimated Energy Production: 1500 KWh/month @ 12.5mph

5. Bergey Excel



The Bergey Excel is designed for high reliability, low maintenance, and automatic operation in adverse weather conditions. It is available in two configurations: battery charging and grid-tied.

The Excel is a ruggedly built turbine that comes with a 5 year warranty. Connected to the grid, the BWC EXCEL can provide most of the electricity for an average total electric home at moderate wind sites. The all new GridTek 10 power processor (inverter) is the most advanced in the industry and it carries a full UL certification to the latest utility standards.

In a location with moderate winds, the Excel 10kw can provide enough electricity for the average home.

Cost: \$21,900-\$27,900

Rated Capacity: 10kw

Startup Windspeed: 7.5 mph

Rotor: 22 feet (6.7 m)

Interconnection: Utility connected or battery charging

Voltage Output: 48 VDC or 120, 240 VAC

Estimated Energy Production: 1500 KWh/month @12.5mph

Source: [Clean Technica \(http://s.tt/12tIR\)](http://s.tt/12tIR)