

**PENGARUH JUMLAH SUDU TERHADAP  
UNJUK KERJA TURBIN ANGIN SAVONIUS**

**SKRIPSI  
KONSENTRASI KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**



Disusun oleh :

**HENDRA ADIYATMA**

**NIM. 0810620011-62**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN  
UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
MALANG  
2012**

## LEMBAR PERSETUJUAN

### PENGARUH JUMLAH SUDU TERHADAP UNJUK KERJA TURBIN ANGIN SAVONIUS

#### SKRIPSI

#### KONSENTRASI KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh :

**HENDRA ADIYATMA**  
NIM. 0810620011-62

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

**Prof. Dr. Ir. Rudy Soenoko, M.Eng. Sc.**  
NIP. 19490911 198403 1 001

**Ir. Djoko Sutikno, M.Eng.**  
NIP. 19541009 198303 1 002

**LEMBAR PENGESAHAN**

**PENGARUH JUMLAH SUDU TERHADAP  
UNJUK KERJA TURBIN ANGIN SAVONIUS**

**SKRIPSI  
KONSENTRASI KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun Oleh :

**HENDRA ADIYATMA**

**NIM. 0810620011-62**

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada  
tanggal 7 Agustus 2012

**Skripsi 1**

**Skripsi 2**

**Ir. Endi Sutikno, MT.**  
**NIP. 19590411 198710 1 001**

**Prof. Ir. ING Wardana, M.Eng., Ph.D.**  
**NIP. 19590703 198303 1 002**

**Komprehensif**

**Dr.Eng. Moch. Agus Choiron, ST., MT.**  
**NIP. 19720817 200003 1 001**

**Mengetahui**  
**Ketua Jurusan Teknik Mesin**

**Dr.SlametWahyudi, ST.,MT.**  
**NIP. 19720903 199702 1 001**

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT, atas segala limpahan rahmat-Nya, sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi yang berjudul “Pengaruh Jumlah Sudu Terhadap Unjuk Kerja Turbin Angin *Savonius*”. Dalam pembuatan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua, M Shohib dan Titin Sri Hartiningsih serta kakak tercinta Ani Setyaningsih yang selalu memberikan dorongan, semangat dan do'a.
2. Bapak Dr. Slamet Wahyudi, ST., M.T. selaku Ketua Jurusan Mesin, Universitas Brawijaya Malang.
3. Bapak Dr.Eng. Anindito Purnowidodo, ST., M.Eng. selaku Sekretaris Jurusan Mesin, Universitas Brawijaya Malang.
4. Ibu Dr.Eng. Lilis Yuliati, ST., MT. selaku Ketua Kelompok Konsentrasi Teknik Konversi Energi, Jurusan Mesin, Universitas Brawijaya.
5. Bapak Prof.Dr.Ir. Rudy Soenoko, M.Eng.,Sc. selaku Dosen Pembimbing I dan Dosen Wali yang telah banyak memberikan bimbingan penyusunan skripsi ini.
6. Bapak Ir. Djoko Sutikno, M.Eng. selaku Dosen Pembimbing II yang telah banyak memberikan bimbingan penyusunan skripsi ini.
7. Seluruh Staf Pengajar dan Administrasi Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
8. Seluruh “nawak-nawak” KBMM Universitas Brawijaya khususnya Keluarga Besar *EMPEROR* yang selalu setia berkumpul dalam suka maupun duka.
9. Keluarga Besar Laboratorium Otomasi Manufaktur “Mas Hartono, Mbak Jeki, Mas Purbo, Mas Arya, Mas Herik, Mas Tarjo, Mas Abror, Mas Adimas, Mas Michael, Mas Komang, Yudo “Kebo”, Dicsy, Samsul, Ichwanul “Muklis”, Fikri, Hardianto “Cak To” serta punggawa baru Praditya “Wayan”, Habib, Hafidz dan Tito” yang telah memberikan semangat, do'a dan motivasi serta dukungan dalam menyelesaikan skripsi ini.
10. “Yang tersayang” dan “menyayangi saya”, yang selalu memberikan semangat, do'a dan motivasi hingga terselesaikannya skripsi ini.
11. Teman seperjuangan skripsi, Anton dan Hendri yang selalu membantu hingga terselesaikannya skripsi ini.

12. “Dulur-dulur” *JKB Community* ”Bayu, Angga “Badel”, Rony, Nurul, Angga “Klonye”, Apri “Bejoe”, Habi, Habob, Verga “Kakang”, Ipunk, Bagus, Anas, Okik” yang selalu setia berkumpul dalam suka maupun duka.
13. Sahabat *Palsoe Community* “Itsbat , “Bos” Zakky, Prima, Fadjar, Hendro, Mas Wahyu, Bayu “Mbak Rie” dan Usman “Aba” yang telah memberikan semangat, do’a dan motivasi serta dukungan dalam menyelesaikan skripsi ini.
14. Serta semua pihak yang telah membantu terselesaikannya skripsi ini, yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu.

Tiada gading yang tak retak, begitu juga halnya dengan skripsi ini yang masih banyak ditemukan kekurangan-kekurangan. Oleh sebab itu, penulis menerima masukan, saran, ataupun kritik yang sifatnya membangun dari semua pihak untuk penyempurnaan skripsi ini. Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat bagi masyarakat khususnya para akademisi.



Malang, Agustus 2012

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	i
<b>DAFTAR ISI</b> .....	iii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	v
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	vi
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	vii
<b>DAFTAR SIMBOL</b> .....	viii
<b>RINGKASAN</b> .....	ix
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan Penelitian .....	2
1.5 Manfaat Penelitian .....	2
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	3
2.1 Penelitian Sebelumnya .....	3
2.2 Angin .....	4
2.2.1 Pengertian Angin .....	4
2.2.2 Proses Terbentuknya Angin .....	4
2.3 Turbin Angin .....	7
2.3.1 Pengertian Turbin Angin .....	7
2.3.2 Klasifikasi Turbin Angin .....	8
2.4 Turbin Angin <i>Savonius</i> .....	9
2.4.1 Pengertian Turbin Angin <i>Savonius</i> .....	9
2.4.2 Prinsip Kerja Turbin Angin <i>Savonius</i> .....	10
2.5 Unjuk Kerja Turbin Angin <i>Savonius</i> .....	12
2.5.1 <i>Brake Horse Power (BHP)</i> .....	12
2.5.2 Torsi .....	14
2.5.3 Efisiensi .....	14
2.6 Teori dan Persamaan .....	14
2.6.1 Teori Betz .....	14



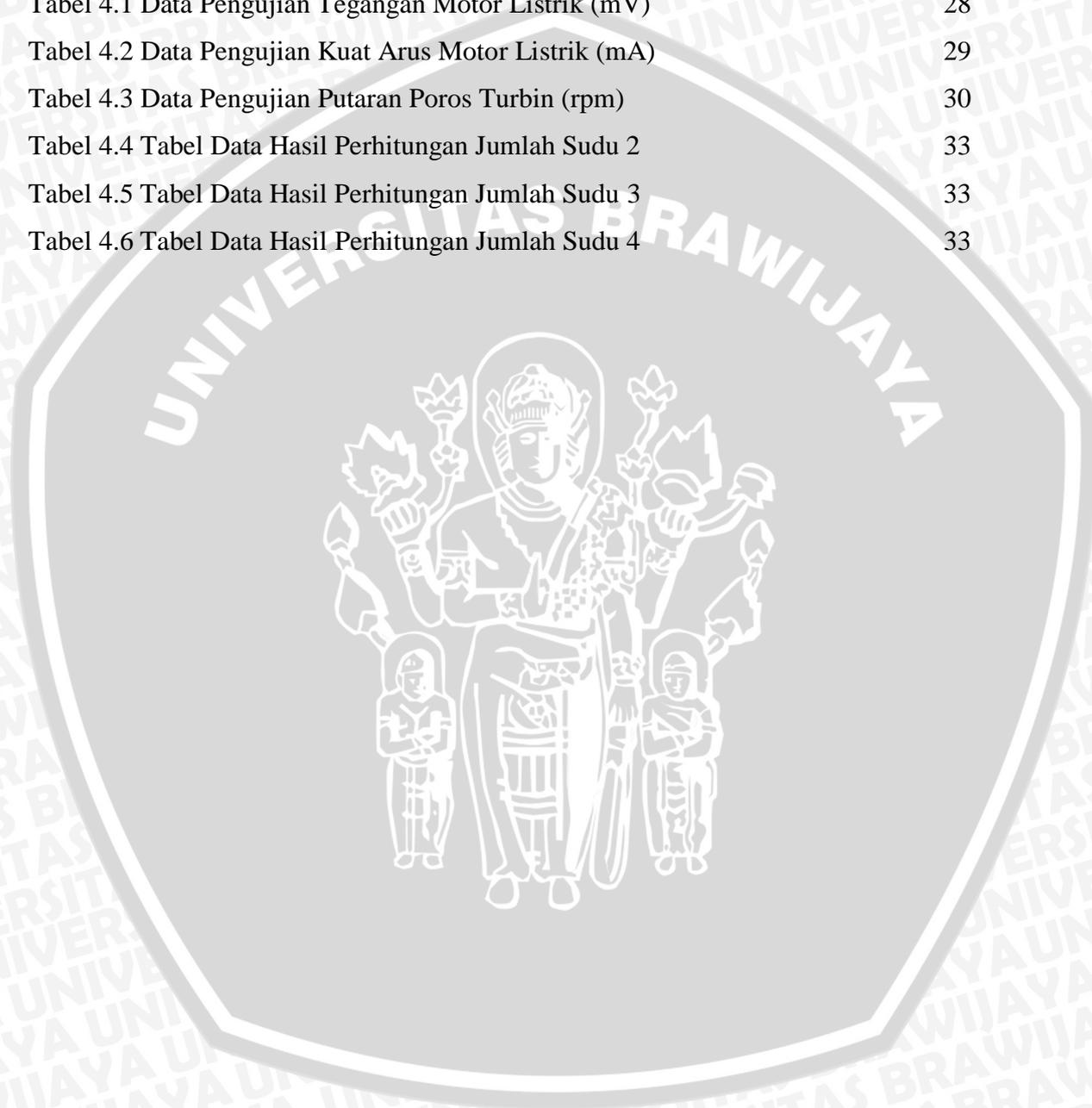
2.6.2 Segitiga Kecepatan .....	15
2.6.3 Daya Pada Turbin Angin <i>Savonius</i> .....	16
2.7 Hipotesa .....	18
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	19
3.1 Metode Penelitian .....	19
3.2 Tempat dan Waktu Pelaksanaan .....	19
3.3 Variabel Penelitian .....	19
3.4 Peralatan Penelitian .....	19
3.5 Instalasi Penelitian .....	24
3.6 Prosedur Penelitian .....	25
3.7 Metode Pengambilan Data .....	26
3.8 Diagram Alir Penelitian .....	27
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	28
4.1 Hasil .....	28
4.1.1 Data Hasil Pengujian .....	28
4.1.2 Pengolahan Data .....	31
4.2 Pembahasan .....	34
4.2.1 Grafik Hubungan Antara Kecepatan Angin Terhadap Daya Poros (BHP) .....	34
4.2.2 Grafik Hubungan Antara Kecepatan Angin Terhadap Torsi .....	36
4.2.3 Grafik Hubungan Antara Kecepatan Angin Terhadap Efisiensi ...	37
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b> .....	39
5.1 Kesimpulan .....	39
5.2 Saran .....	39
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	
<b>LAMPIRAN</b>	

## DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Skema Terjadinya Angin	4
Gambar 2.2	Laju Pertumbuhan Energi Angin Tahunan di Dunia	5
Gambar 2.3	Macam-macam Turbin Angin Horizontal	8
Gambar 2.4	Macam-macam Turbin Angin Vertikal	9
Gambar 2.5	Turbin angin tipe <i>Savonius</i>	10
Gambar 2.6	Prinsip Kerja Turbin Angin <i>Savonius</i>	10
Gambar 2.7	Pengukuran Tegangan DC	13
Gambar 2.8	Pengukuran Arus DC	13
Gambar 2.9	Asumsi Teori Betz	15
Gambar 2.10	Skema Segitiga Kecepatan	16
Gambar 2.11	<i>Performance of Main Conventional Wind Machines</i>	17
Gambar 3.1	<i>Anemometer</i>	20
Gambar 3.2	<i>Blower</i>	20
Gambar 3.3	<i>Wind Tunnel</i>	21
Gambar 3.4	Spesifikasi <i>Wind tunnel</i>	21
Gambar 3.5	Sudu Turbin	22
Gambar 3.6	<i>Digital Multitester</i>	23
Gambar 3.7	<i>Digital Tachometer</i>	23
Gambar 3.8	Generator Listrik	24
Gambar 3.9	Skema Instalasi Uji	25
Gambar 3.10	Diagram Alir Penelitian	27
Gambar 4.1	Grafik Hubungan Kecepatan Angin Terhadap Daya Poros (BHP)	34
Gambar 4.2	Grafik Hubungan Antara Kecepatan Angin Terhadap Torsi	36
Gambar 4.3	Grafik Hubungan Antara Kecepatan Angin Terhadap Efisiensi	37

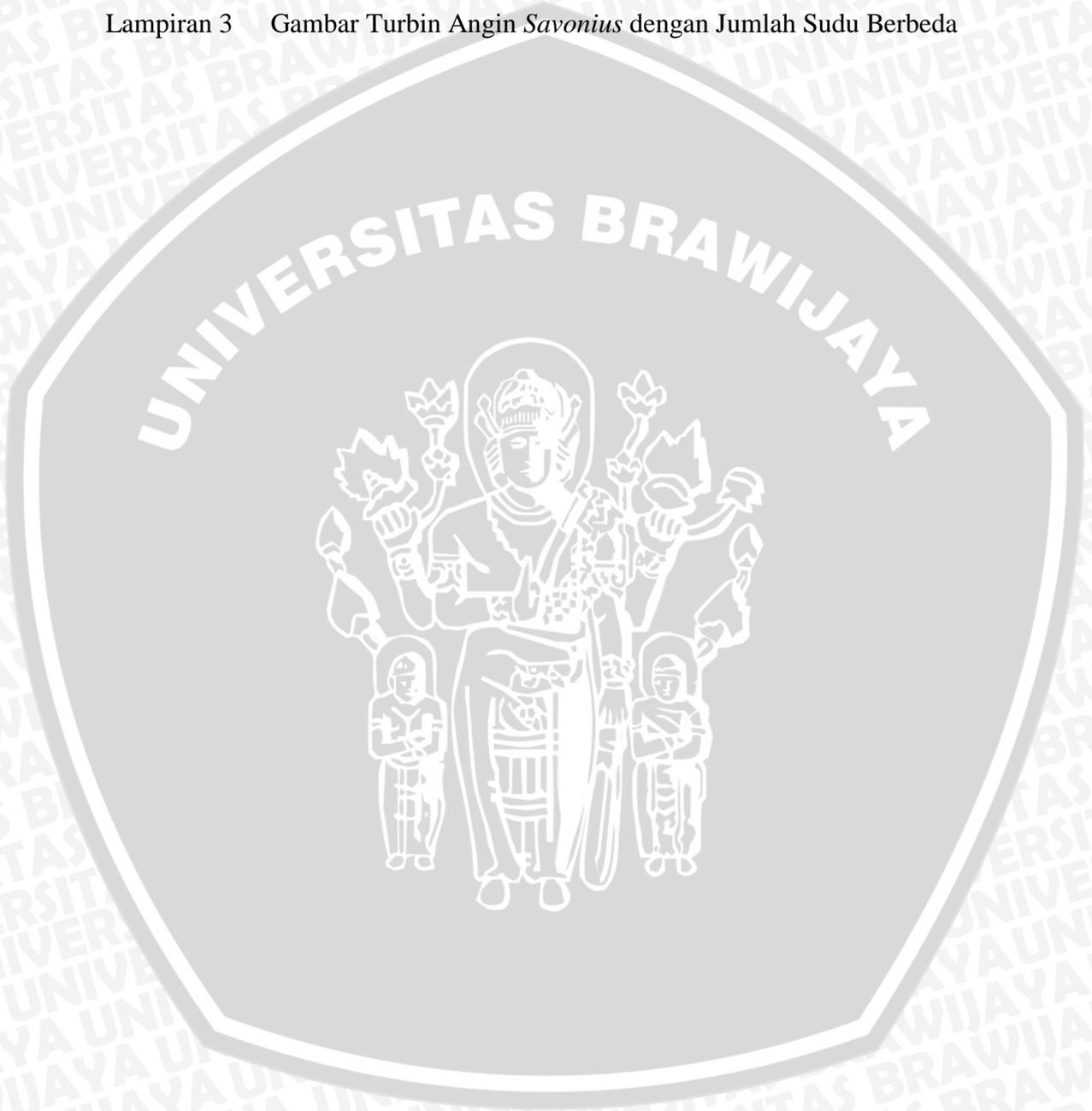
## DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Skala Beaufort	6
Tabel 2.2	Tabel <i>Coefficient of Drag</i> Tiap-tiap Bentuk Sudu	11
Tabel 4.1	Data Pengujian Tegangan Motor Listrik (mV)	28
Tabel 4.2	Data Pengujian Kuat Arus Motor Listrik (mA)	29
Tabel 4.3	Data Pengujian Putaran Poros Turbin (rpm)	30
Tabel 4.4	Tabel Data Hasil Perhitungan Jumlah Sudu 2	33
Tabel 4.5	Tabel Data Hasil Perhitungan Jumlah Sudu 3	33
Tabel 4.6	Tabel Data Hasil Perhitungan Jumlah Sudu 4	33



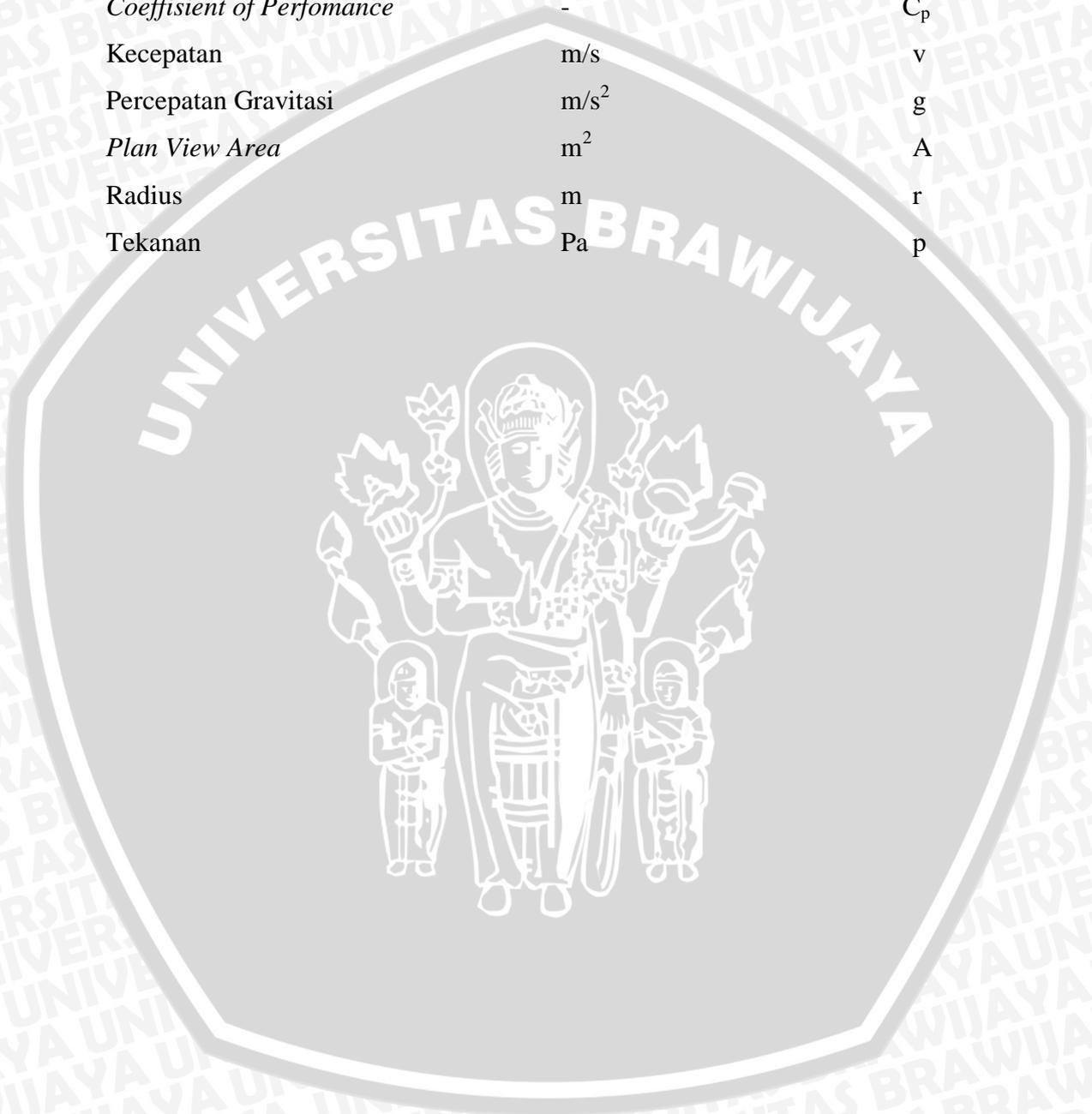
## DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
Lampiran 1	Tabel Viskositas dan Massa Jenis Udara pada Tekanan 1 atm
Lampiran 2	Model Turbin Angin <i>Savonius</i> dengan Jumlah Sudu Berbeda
Lampiran 3	Gambar Turbin Angin <i>Savonius</i> dengan Jumlah Sudu Berbeda



## DAFTAR SIMBOL

Besaran dasar	Satuan	Simbol
<i>Coeffisient of Drag</i>	-	$C_d$
<i>Coeffisient of Perfomance</i>	-	$C_p$
Kecepatan	m/s	$v$
Percepatan Gravitasi	$m/s^2$	$g$
<i>Plan View Area</i>	$m^2$	$A$
Radius	m	$r$
Tekanan	Pa	$p$



## RINGKASAN

**HENDRA ADIYATMA**, Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Agustus 2012, *Pengaruh Jumlah Sudu Terhadap Unjuk Kerja Turbin Angin Savonius*, Dosen Pembimbing I : Prof.Dr.Ir. Rudy Soenoko, M.Eng.,Sc. Dosen Pembimbing II : Ir. Djoko Sutikno, M.Eng.

Semakin menipisnya sumber energi yang tidak dapat terbarukan (*non-renewable*), memerlukan suatu jalan alternatif guna mengganti sumber energi tersebut dengan sumber energi yang terbarukan (*renewable*). Sumber energi tak terbarukan yang banyak digunakan saat ini adalah bahan bakar yang berasal dari fosil (minyak bumi, gas alam, dan batu bara). Salah satu upaya mengatasi masalah tersebut adalah dengan menggunakan energi angin. Contoh nyata kemajuan pesat di bidang *engineering* atau rekayasa ini adalah makin banyaknya penggunaan turbin angin.

Turbin angin adalah salah satu mesin konversi energi yang merubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik pada porosnya dan selanjutnya diubah menjadi energi listrik melalui generator. Turbin angin *savonius* memiliki kemampuan *self-starting* yang bagus sehingga hanya membutuhkan angin dengan kecepatan rendah untuk dapat memutar rotor dari turbin angin ini, sesuai dengan kondisi di Indonesia. Secara umum turbin angin *savonius* hanya memanfaatkan *drag force* dari angin, sehingga semakin besar *drag force*, maka efisiensi turbin juga semakin besar.

Metode yang digunakan adalah penelitian eksperimental dengan memvariasikan jumlah sudu (2,3 dan 4 buah) dengan variabel bebas kecepatan angin pada *wind tunnel* dari kecepatan 3 m/s sampai 7 m/s. Sedangkan variabel terikatnya adalah daya poros, torsi dan efisiensi.

Hasil pengujian dan analisis perhitungan menunjukkan bahwa turbin angin dengan jumlah sudu 3 mempunyai unjuk kerja yang tinggi dibandingkan dengan jumlah sudu yang lainnya. Kerenggangan pada poros sudu turbin menjadikan aliran dapat menerobos dan menerpa sudu dibelakang poros dan ini akan meningkatkan gaya momen serta menambah gaya hambat negatif pada sudu tersebut.

**Kata kunci** : turbin angin *savonius*, jumlah sudu, unjuk kerja

## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Semakin menipisnya sumber energi yang tidak dapat terbarukan (*non-renewable*), serta penggunaan bahan bakar yang ramah lingkungan, memerlukan suatu jalan alternatif guna mengganti sumber energi tersebut dengan sumber energi yang terbarukan (*renewable*). Sumber energi tak terbarukan yang banyak digunakan saat ini adalah bahan bakar yang berasal dari fosil (minyak bumi, gas alam, dan batu bara). Salah satu upaya mengatasi masalah tersebut adalah dengan menggunakan energi angin. Angin termasuk salah satu sumber daya energi yang terbarukan, dan ramah lingkungan sehingga sangat potensial untuk mengurangi ketergantungan terhadap energi bahan bakar minyak. Contoh nyata kemajuan pesat di bidang *engineering* atau rekayasa ini adalah makin banyaknya penggunaan turbin angin.

Turbin angin adalah kincir angin yang saat ini banyak digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik. Turbin angin ini pada awalnya dibuat untuk mengakomodasi kebutuhan para petani dalam melakukan penggilingan padi, keperluan irigasi, dan lain-lain. Prinsip dasar kerja dari turbin angin untuk pembangkitan listrik adalah mengubah energi mekanik dari angin menjadi energi putar pada kincir, sehingga memutar generator yang akan menghasilkan listrik.

Salah satu jenis turbin angin adalah Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV). TASV memiliki poros atau sumbu rotor utama yang disusun tegak lurus permukaan tanah. Kelebihan utama susunan ini adalah turbin tidak harus diarahkan ke angin untuk menghasilkan energi listrik. Kelebihan ini sangat berguna di tempat-tempat yang arah anginnya sangat bervariasi. TASV mampu mendayagunakan angin dari berbagai arah. TASV terdiri dari beberapa jenis turbin angin, salah satunya adalah turbin angin *savonius*. Jenis ini memiliki kemampuan *self-starting* yang bagus, sehingga hanya membutuhkan angin dengan kecepatan rendah untuk dapat memutar rotor dari turbin angin ini. Selain itu, torsi yang dihasilkan turbin angin jenis *savonius* relatif tinggi (Sargolzei, 2007).

Unjuk kerja dari suatu turbin angin dapat dilihat dari daya poros, torsi, dan efisiensi turbin yang dihasilkannya. Oleh karena itu, dalam studi *experiment* ini diteliti seberapa besar pengaruh bidang kontak antara sudu dengan angin dengan memvariasikan jumlah sudu pada sistem turbin angin *savonius*.

### 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, dapat dirumuskan suatu permasalahan sebagai berikut:

- Bagaimana pengaruh jumlah sudu terhadap unjuk kerja turbin angin *savonius*?

### 1.3 Batasan Masalah

Untuk menjawab rumusan masalah di atas dan menghindari meluasnya permasalahan yang ada, maka dalam penelitian ini diberikan batasan masalah sebagai berikut:

1. Jumlah sudu 2; 3; dan 4 buah.
2. Penelitian dilakukan pada *wind tunnel* dengan kecepatan angin 3; 4; 5; 6; dan 7 m/s.
3. Sudu turbin terbuat dari pipa PVC dengan poros akrilik.
4. Unjuk kerja turbin angin *savonius* dalam penelitian ini adalah daya poros, torsi dan efisiensi.
5. Temperatur udara ruangan dianggap tetap yaitu pada temperatur 27 °C.

### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh jumlah sudu terhadap unjuk kerja turbin angin *savonius*.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini antara lain:

1. Media untuk mengaplikasikan teori yang telah diperoleh selama perkuliahan, khususnya mengenai mekanika fluida dan mesin konversi energi.
2. Mahasiswa dapat memahami lebih jauh tentang energi alternatif, dalam hal ini adalah energi angin.
3. Sebagai sumber informasi lebih jauh mengenai turbin angin *savonius*, serta penerapannya di masyarakat untuk mencapai unjuk kerja maksimalnya.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Penelitian sebelumnya

Hermawan (2010), dalam penelitiannya yang berjudul “Unjuk kerja model turbin angin poros vertikal tipe *savonius* dengan variasi jumlah sudu dan variasi posisi sudut turbin”. Penelitian ini menggunakan turbin *savonius* tipe U tiga tingkat. Nilai  $C_p$  maksimum yang dicapai untuk turbin angin dengan dua sudu adalah 0,1016 atau 10,16 % diperoleh pada saat *tip speed ratio* sebesar 0,2474 dengan kecepatan angin 4,92 m/s, sedangkan nilai  $C_p$  maksimum yang dicapai untuk turbin angin dengan tiga sudu adalah 0,0755 atau 7,55 % diperoleh pada saat *tip speed ratio* sebesar 0,2113 dengan kecepatan angin 4,92 m/s. Daya turbin maksimum yang dihasilkan oleh turbin angin dengan dua sudu adalah 0,6451 watt, yaitu pada model 1, pada putaran rotor sekitar 174,7 rpm, dicapai pada kecepatan angin 6,35 m/s. Sedangkan daya maksimum yang dihasilkan oleh turbin dengan tiga sudu adalah 0,3718 watt, yaitu pada model 4, pada putaran rotor sekitar 134,4 rpm, dicapai pada kecepatan angin 6,35 m/s.

Karnowo (2008), dalam penelitiannya yang berjudul “Pengaruh *overlap* sudu terhadap torsi yang dihasilkan turbin *savonius* tipe – U”, salah satu kelebihan dari turbin angin jenis *savonius* adalah kemampuan *self-starting* dan torsi yang tinggi apabila dibandingkan dengan tipe turbin angin sumbu horizontal. Maka dari itu, untuk mendapatkan efisiensi konversi energi yang maksimal dilakukan penelitian dengan memvariasikan besar *overlap* antar sudu. Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa torsi tertinggi didapatkan pada nilai *overlap* 10-12 cm dengan diameter sudu 15 cm atau 70% dari diameter sudu. Begitu juga pada turbin dengan diameter 17 cm, torsi maksimum didapatkan pada *overlap* 12-14 cm dengan kata lain 76% dari diameter sudu. Sehingga dapat disimpulkan bahwa untuk mendapatkan nilai torsi yang maksimal sebaiknya nilai *overlap* berkisar antara 70-76% dari diameter sudu.

Sargolzaei (2007), dalam tulisan ini menggunakan turbin angin *savonius* dengan variasi kecepatan angin. Hal tersebut untuk mengetahui pengaruhnya terhadap *Coefficient of Power/Power Ratio* ( $C_p$ ). Hasilnya menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan angin dimana akan meningkatkan nilai dari bilangan reynold, maka besarnya  $C_p$  juga akan meningkat dikarenakan jumlah energi angin pun meningkat.

## 2.2 Angin

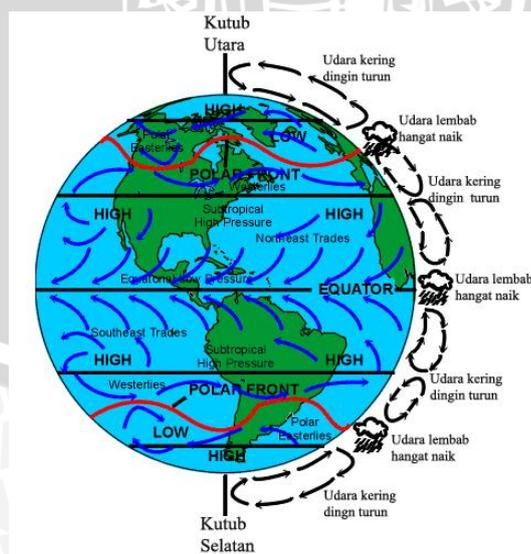
### 2.2.1 Pengertian Angin

Angin adalah udara yang bergerak akibat adanya perbedaan tekanan dengan arah aliran angin dari tempat yang memiliki tekanan tinggi ke tempat yang bertekanan rendah atau dari daerah yang memiliki suhu rendah ke tempat yang bersuhu tinggi. Angin di daerah khatulistiwa atau garis ekuator seperti Indonesia lebih kencang daripada daerah kutub (Kadir, 1996).

### 2.2.2 Proses Terbentuknya Angin

Angin memiliki hubungan erat dengan sinar matahari karena daerah yang terkena banyak sinar matahari akan memiliki suhu yang lebih tinggi serta tekanan udara yang lebih rendah dari daerah disekitarnya sehingga menyebabkan terjadinya aliran udara. Angin juga dapat disebabkan oleh pergerakan benda, sehingga mendorong udara di sekitarnya untuk bergerak ke tempat lain.

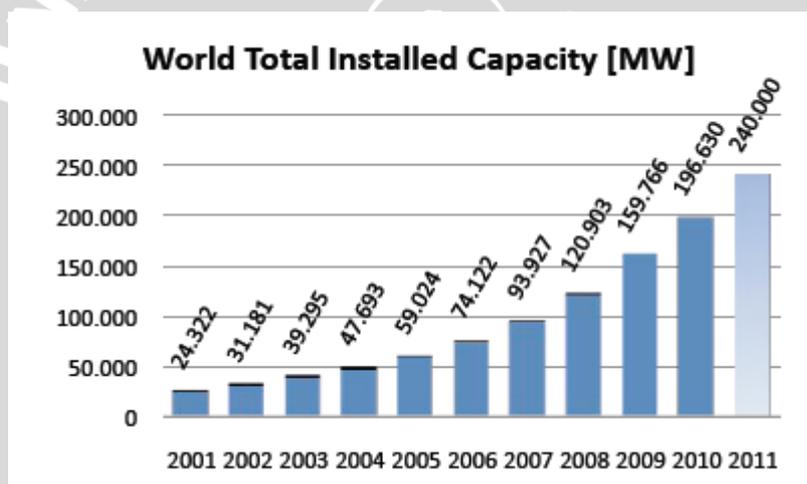
Di daerah khatulistiwa yang panas, udaranya menjadi panas, mengembang dan menjadi ringan, naik ke atas dan bergerak ke daerah yang lebih dingin, misalnya daerah kutub. Sebaliknya, daerah kutub yang dingin, udaranya menjadi dingin dan turun kebawah. Dengan demikian terjadi suatu perputaran udara dari kutub utara ke garis khatulistiwa menyusuri permukaan bumi. Dan sebaliknya, suatu perpindahan udara dari garis khatulistiwa kembali ke kutub utara melalui lapisan udara yang lebih tinggi.



Gambar 2.1 Skema Terjadinya Angin.  
Sumber : Kadir, 1996

Pemanfaatan energi angin dapat dilakukan di mana-mana, baik di daerah landai maupun dataran tinggi, bahkan dapat di terapkan di laut, berbeda halnya dengan energi air. Pemanfaatan energi angin selain dapat mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil, diharapkan juga dapat meningkatkan efektivitas dan efisiensi sistem pertanian, yang pada gilirannya akan meningkatkan produktivitas masyarakat pertanian (Daryanto, 2007).

Pemanfaatan tenaga angin di Indonesia secara umum kurang mendapat perhatian. Hingga tahun 2010, kapasitas angin Indonesia 1,4 MW. Tetapi pemanfaatan akan tenaga angin itu sendiri masih belum ada. Padahal seperti kita lihat di gambar 2.2 kapasitas pembangkitan listrik tenaga angin di dunia telah berkembang pesat dengan laju pertumbuhan kumulatif sampai dengan tahun 2011 mencapai 240.000 MW per tahun dari kapasitas terpasang 24.322 MW pada tahun 2001 (*World Wind Energy Association*, 2011).



Gambar 2.2 Laju Pertumbuhan Energi Angin Tahunan Di Dunia.  
Sumber : *World Wind Energy Association*, 2011

Pada *altitude* tinggi, arah angin akan dipengaruhi oleh arah putaran bumi dan bergerak sejajar dengan garis isobar. Pada belahan bumi utara, angin berputar melawan arah jarum jam, sementara di belahan bumi selatan angin berputar searah jarum jam. Arah angin ditentukan oleh arah darimana angin itu berhembus. Jadi angin barat berarti angin yang berhembus dari barat ke timur (Kadir, 1996). Secara fisik kecepatan angin dan fenomena yang terjadi dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Skala Beaufort

Skala Beaufort	Tingkatan	Kecepatan (knot)	Kecepatan (km/jam)	Kecepatan (m/s)	Tanda-tanda di darat
0	Tenang	<1	0-0,2	<1	Tenang, asap mengepul vertical
1	Teduh	1-3	0,3-1,5	1-5	Asap mengepul miring tetapi alat anemometer tidak berputar
2	Sepoi Lemah	4-6	1,6-3,3	6-11	Terpaan angin terasa di muka, anemometer berputar perlahan
3	Sepoi Lembut	7-10	3,4-5,4	12-19	Daun-daun kecil di pohon bergerak, bendera dapat bergerak
4	Sepoi Sedang	11-16	5,5-7,9	20-28	Debu dan kertas dapat terbang, ranting pohon bergerak
5	Sepoi Segar	17-21	8,0-10,7	29-38	Pohon-pohon kecil terlihat condong. Genangan air tanah terlihat mengombak kecil
6	Sepoi Kuat	22-27	10,8-13,8	39-49	Batang pohon terlihat bergerak, suara berdesing dari kawat telepon dapat terdengar, payung dapat terangkat
7	Angin ribut lemah	28-33	13,9-17,1	50-61	Pohon-pohon bergerak, berjalan terasa berat
8	Angin ribut	34-40	17,2-20,7	62-74	Batang pohon dapat tumbang
9	Angin ribut kuat	41-47	20,8-24,4	75-88	Dapat membuat kerusakan cerobong, pot-pot beterbangan
10	Badai	48-55	24,5-28,4	89-102	Kerusakan lebih besar, tetapi di darat jarang
11	Badai amuk	56-63	28,5-32,6	103-117	Kerusakan berat tetapi sangat jarang terjadi di darat
12	Topan	>63	>32,6	>117	Hampir tidak pernah terjadi

Sumber : Daryanto, 2007

Sebagaimana diketahui menurut ilmu fisika, energi kinetik dari sebuah benda dengan massa  $m$  dan kecepatan  $v$  dirumuskan sesuai dengan rumus 2-1 berikut, dengan ketentuan kecepatan  $v$  tidak mendekati kecepatan cahaya.

$$E = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (\text{Bueche; 1991: 46}) \quad (2-1)$$

dimana :

$E$  = energi dari udara yang bergerak (joule)

$m$  = massa udara (kg)

$v$  = kecepatan angin (m/detik)

rumus 2-1 di atas juga berlaku untuk angin yang merupakan udara yang bergerak. Jika suatu “blok” udara memiliki penampang A dan bergerak dengan kecepatan v, maka jumlah massa yang melewati suatu tempat dapat dilihat pada rumus 2-2 berikut:

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v \quad (\text{White; 2001; 133}) \quad (2-2)$$

dimana :

$$\dot{m} = \text{laju alir massa udara} \quad (\text{kg/s})$$

$$\rho = \text{kerapatan udara} \quad (\text{kg/m}^3)$$

$$A = \text{luas penampang} \quad (\text{m}^2)$$

$$A = d \times h$$

$$d : \text{diameter sudu} \quad (\text{m})$$

$$h : \text{tinggi sudu} \quad (\text{m})$$

$$v = \text{kecepatan udara} \quad (\text{m/s})$$

Dengan demikian maka energi yang dapat dihasilkan per satuan waktu adalah sesuai dengan rumus 2-3 berikut :

$$\text{Power} = \text{Work} / \text{time} \quad (\text{Giancoli; 1995; 157}) \quad (2-3)$$

$$= (1/2 \cdot m \cdot v^2) / t$$

$$= 1/2 \cdot m/t \cdot v^2$$

$$= 1/2 \cdot \dot{m} \cdot v^2$$

$$= 1/2 \rho \cdot A \cdot v^3$$

dimana :

$$P = \text{daya angin} \quad (\text{watt})$$

$$E = \text{energi angin} \quad (\text{joule})$$

$$\rho = \text{kerapatan angin} \quad (\text{kg/m}^3)$$

$$A = \text{luas penampang} \quad (\text{m}^2)$$

$$v = \text{kecepatan angin} \quad (\text{m/detik})$$

## 2.3 Turbin Angin

### 2.3.1 Pengertian Turbin Angin

Turbin angin adalah sebuah sistem yang berfungsi untuk mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik pada poros turbin tersebut (Sargolzaei, 2007:51). Energi angin dikonversi sebagian menjadi energi putar oleh rotor. Dengan atau tanpa roda gigi, putaran rotor tersebut biasanya digunakan untuk memutar generator yang akan menghasilkan energi listrik. Pembangkit listrik yang memanfaatkan energi angin

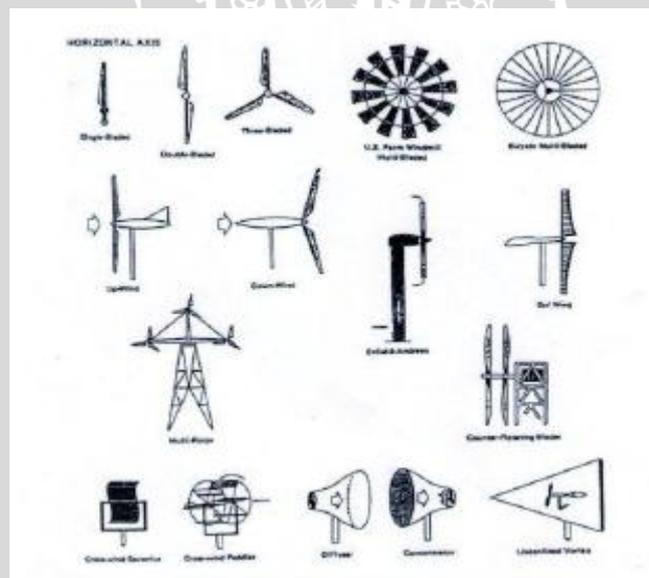
biasa disebut dengan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Energi listrik dari PLTB ini kebanyakan disimpan ke dalam baterai sebelum dapat dimanfaatkan.

### 2.3.2 Klasifikasi Turbin Angin

Secara umum turbin angin dibagi menjadi dua jenis berdasarkan arah sumbunya, yaitu:

#### 1. Turbin angin sumbu horizontal atau *Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)*

Turbin angin sumbu horizontal memiliki sudu yang berputar pada bidang vertikal layaknya baling-baling pesawat terbang. Turbin ini biasanya memiliki sudu dengan bentuk irisan melintang khusus dimana aliran udara pada salah satu sisinya dapat bergerak lebih cepat dari aliran udara di sisi yang lain ketika melewatinya. Sehingga menimbulkan daerah tekanan rendah pada belakang sudu dan daerah tekanan tinggi pada depan sudu. Perbedaan tekanan ini membentuk gaya yang menyebabkan sudu berputar. Gambar 2.3 memperlihatkan berbagai jenis turbin angin horizontal.



Gambar 2.3 Macam-macam turbin angin horizontal  
Sumber : Hunt, 1981

#### 2. Turbin angin sumbu vertikal atau *Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)*

Turbin angin sumbu vertikal/tegak memiliki poros/sumbu rotor utama yang disusun tegak lurus terhadap permukaan tanah. Pada umumnya turbin angin jenis ini memiliki putaran awal yang baik, sehingga dapat beroperasi walaupun dalam kecepatan angin yang rendah. Turbin angin ini terdiri dari berbagai jenis, yang dapat

dilihat pada gambar 2.4, yaitu : Savonius Rotor, Darrieus Rotor, Giromill, dan H-Rotor.



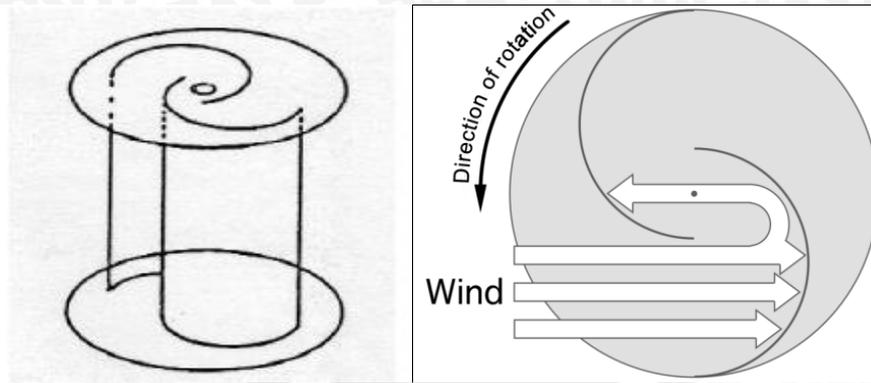
Gambar 2.4 Macam-macam turbin angin vertikal  
Sumber : [www.energi.iastute.edu](http://www.energi.iastute.edu)

## 2.4 Turbin Angin Savonius

### 2.4.1 Pengertian Turbin Angin Savonius

Turbin angin tipe *savonius* merupakan turbin dengan konstruksi sederhana pertama kali ditemukan oleh sarjana Finlandia bernama Sigurd J. Savonius. Turbin yang termasuk dalam kategori VAWT ini memiliki rotor dengan bentuk dasar setengah silinder. Konsep turbin angin *savonius* cukup sederhana, prinsip kerjanya berdasarkan *differential drag windmill*. Pada perkembangan selanjutnya, *savonius* rotor tidak lagi selalu berbentuk setengah silinder, tetapi mengalami modifikasi guna meningkatkan performa dan efisiensi.

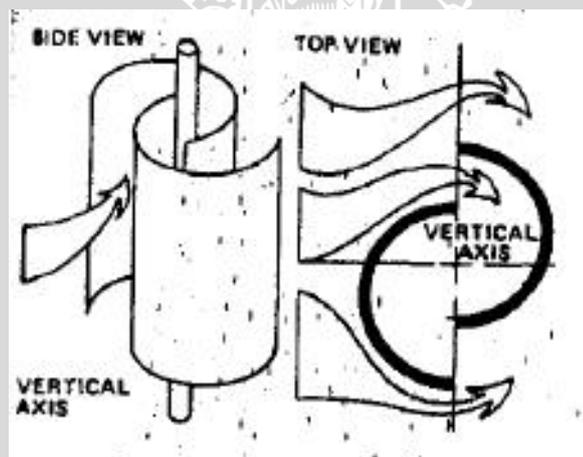
Awal mula ditemukannya turbin angin *savonius*, pada saat itu juga turbin angin poros horizontal telah banyak digunakan, tetapi dengan desain yang sulit dan biaya pemeliharaan yang cukup mahal. Turbin angin *savonius* menjadi alternatif yang baik karena turbin ini sesuai untuk aplikasi perairan seperti sistem pemompaan. Desain turbin angin *savonius* mempunyai beberapa keuntungan dibandingkan dengan turbin angin poros horizontal. Dalam kaitannya dengan poros, *savonius* dapat beroperasi pada arah angin yang bermacam-macam, dimana hal ini tidak ditemukan pada turbin poros horizontal. Desain *savonius* dapat beroperasi pada kecepatan angin yang rendah, sehingga tidak memerlukan sebuah menara penyangga dan dapat ditempatkan pada dasar tanah untuk mempermudah pemeliharaan. Dari kesederhanaan struktur turbin angin *savonius*, maka banyak dimanfaatkan untuk kebutuhan rumah tangga, seperti pembangkit listrik skala kecil. Salah satu contoh turbin angin *savonius* seperti pada gambar 2.5 di bawah ini.



Gambar 2.5 Turbin angin tipe *savonius*  
 Sumber : Cheremisinoff, 1978

**2.4.2 Prinsip Kerja Turbin Angin Savonius**

Turbin angin memiliki prinsip kerja sama seperti turbin pada umumnya. Dimulai dari pemanfaatan energi kinetik yang dimiliki oleh angin, yang kemudian dikonversikan oleh sudu menjadi energi mekanik poros atau rotor. Data dilihat pada gambar 2.6 dibawah ini.



Gambar 2.6 Prinsip kerja turbin angin *savonius*  
 Sumber : Hunt, 1981

Turbin angin *savonius* adalah jenis turbin angin tipe drag, dimana turbin ini menghasilkan daya dengan memanfaatkan gaya drag yang di hasilkan dari tiap-tiap sudunya. Drag merupakan gaya yang bekerja sejajar atau paralel dengan arah angin yang menumbuk sudu (White, 1986: 412). Besarnya gaya drag yang dihasilkan oleh masing sudu tergantung dari nilai *Coefficient of Drag* dari sudu tersebut sesuai dengan rumus 2-4 berikut:

$$C_d = \frac{Drag}{\frac{1}{2}\rho Av^2} \quad \text{(White, 1986: 413)} \quad (2-4)$$

$$Drag = C_d \frac{1}{2}\rho Av^2$$

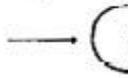
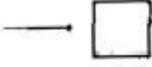
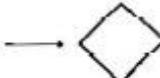
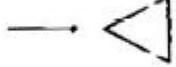
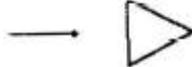
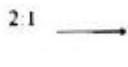
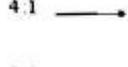


dengan :

$C_d$	=	<i>Coefficient of Drag</i>
Drag	=	Gaya drag (kg.m/s <sup>2</sup> )
$\rho$	=	Massa jenis udara (kg/m <sup>3</sup> )
A	=	Luas permukaan sudu (m <sup>2</sup> )
v	=	Kecepatan angin (m/s)

Untuk mengetahui besarnya *Coefficient of Drag* dari tiap-tiap bentuk sudu dapat dilihat pada tabel dibawah

Tabel 2.2 Tabel *Coefficient of Drag* tiap-tiap bentuk sudu

Shape	$C_p$ based on frontal area	Shape	$C_p$ based on side
Plate: 	2.0	Half-cylinder: 	1,2
Square Cylinder 	2.1		2,1
	1.6	Equilateral triangle: 	1
Half tube: 	1.2		2,1
	2.3		
Elliptical Cylinder		Laminar	Turbulen
1:1 		1.2	0.3
2:1 		0.6	0.2
4:1 		0.35	0.15
8:1 		0.25	0.1

Sumber : White, 1986

Dari tabel di atas terlihat perbedaan *Coefficient of Drag* pada bentuk setengah lingkaran dengan dua posisi berbeda. Dari perbedaan tersebut *drag* yang dihasilkan masing-masing sudu juga berbeda, sehingga resultan gaya-gaya yang bekerja akan mengakibatkan rotor berputar. Dengan kata lain, torsi pada turbin angin *savonius* dihasilkan dari perbedaan tekanan antara bentuk cembung dan cekung sudu yang

menghadap kearah angin dan juga dari efek resirkulasi pada sisi cembung yang mengarahkan angin ke belakang melawan arah angin.

## 2.5 Unjuk Kerja Turbin Angin *Savonius*

Dalam pembahasan kali ini, parameter - parameter dari unjuk kerja turbin angin yang dibahas adalah *brake horse power* (BHP), torsi (T), efisiensi ( $\eta$ ).

### 2.5.1 *Brake Horse Power (BHP)*

*Brake horse power* adalah daya dari turbin yang diukur sebelum mengalami kerugian energi yang disebabkan oleh *altenator*, *gearbox*, pompa ataupun perangkat tambahan lainnya. Dalam percobaan nantinya *BHP* diukur dengan menggunakan motor listrik. Dengan mengukur besarnya tegangan yang dihasilkan maka bisa diketahui besarnya daya, dengan menggunakan hukum ohm seperti pada rumusan:

$$P_{\text{motor}} = V \times I \quad (\text{PT.PLN; 2001: 8}) \quad (2-5)$$

dengan :

$P_{\text{motor}}$  = Daya motor listrik (Watt)

$V$  = Tegangan motor listrik (Volt)

$I$  = Arus listrik (Ampere)

Setelah didapatkan harga  $P_{\text{motor}}$  maka dapat dihitung BHP :

$$BHP = \frac{P_{\text{motor}}}{\eta_{\text{motor}}} \quad (2-6)$$

dengan:

BHP = Daya poros motor listrik (watt)

$P_{\text{motor}}$  = Daya motor listrik (watt)

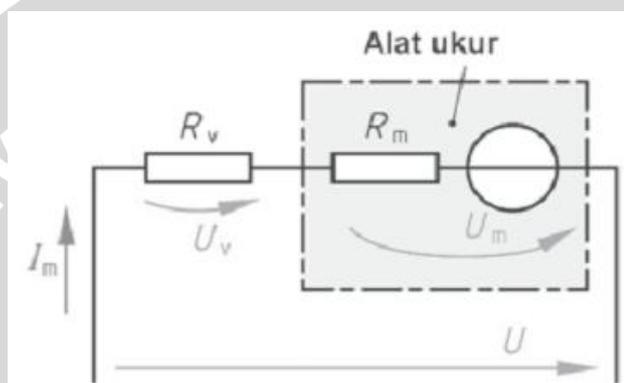
$\eta_{\text{motor}}$  = Efisiensi motor listrik (%)

#### ➤ Prinsip Pengukuran Tegangan dan Arus DC

Pengukuran tegangan dan arus listrik dilakukan dengan menggunakan *digital multimeter*. Alat ukur ini banyak digunakan dalam pengukuran tegangan dan arus listrik karena praktis, murah dan mudah dioperasikan. *Digital Multimeter* mampu menampilkan beberapa pengukuran untuk arus miliampere, temperatur °C, tegangan milivolt, resistansi ohm, frekuensi Hz, daya listrik mW sampai kapasitansi nF.

- Pengukuran Tegangan DC

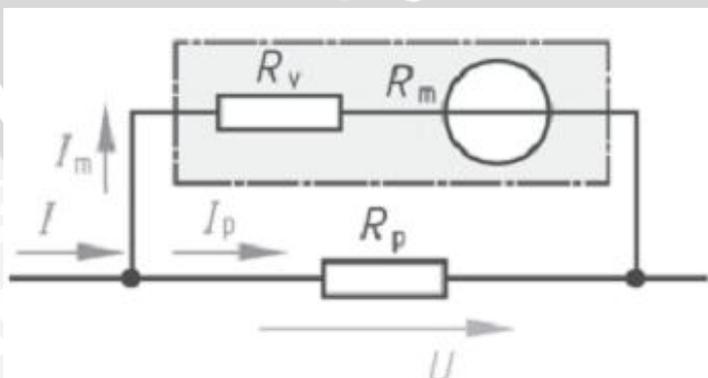
Tegangan DC dapat diukur dengan menggunakan voltmeter, prinsip kerjanya semakin tinggi arus listrik yang melewati voltmeter maka semakin besar medan magnet yang dihasilkan sehingga pembacaan pada layar akan semakin besar pula. Pengukur tegangan voltmeter memiliki tahanan meter  $R_m$  seperti gambar 2.7. Tahanan dalam meter juga menunjukkan kepekaan meter, disebut *fsd (full scale deflection)* arus yang diperlukan untuk menggerakkan jarum meter pada skala penuh. Untuk menaikkan batas ukur voltmeter harus dipasang tahanan seri sebesar  $R_v$ .



Gambar 2.7 Pengukuran Tegangan DC  
Sumber : PT. PLN, 2001

- Pengukuran Arus DC

Arus DC diukur dengan menggunakan amperemeter. Namun pengukur arus listrik amperemeter memiliki keterbatasan untuk dapat mengukur arus, tahanan dalam meter  $R_m$  membatasi kemampuan batas ukur. Menaikkan batas ukur dilakukan dengan memasang tahanan paralel  $R_p$  dengan amperemeter gambar 2.8. Tahanan  $R_p$  akan dialiri arus sebesar  $I_p$ , arus yang melalui meter  $R_m$  sebesar  $I_m$ .



Gambar 2.8 Pengukuran Arus DC  
Sumber : PT. PLN, 2001

### 2.5.2 Torsi ( T )

Torsi biasa juga disebut momen atau momen gaya yang menyebabkan benda berputar pada suatu sumbu. Torsi juga didefinisikan ukuran keefektifan gaya tersebut dalam menghasilkan putaran atau rotasi mengelilingi sumbu tersebut (Bueche, 1988: 16). Besarnya torsi dapat dihitung dengan menggunakan rumus (2-7) :

$$T = \frac{P}{2 \pi \frac{n}{60}} \quad (\text{Musthofa lutfi ; 2008; 232}) \quad (2-7)$$

dengan :

T = Torsi (Nm)

P = Daya motor listrik (Watt)

n = Putaran motor listrik (rpm)

### 2.5.3 Efisiensi ( $\eta$ )

Untuk menyatakan performa suatu mesin biasanya dinyatakan dalam efisiensi yang merupakan perbandingan antara efek manfaat yang digunakan dengan pengorbanan yang dilakukan (Fox, 1994). Lebih sederhananya adalah perbandingan antara *input* dan *output* yang dinyatakan dalam persen. Seperti pada rumus 2-8 berikut:

$$\eta = \frac{P_{\text{usefull}}}{P_{\text{input}}} \times 100 \% \quad (\text{Fox; 1994: 570}) \quad (2-8)$$

dengan :

$\eta$  = efisiensi (%)

$P_{\text{usefull}}$  = efek bermanfaat (watt)

$P_{\text{input}}$  = masukan yang dikorbankan (watt)

## 2.6 Teori dan Persamaan

### 2.6.1 Teori Betz

Betz dianggap sebagai sarjana yang pertama memperkenalkan teori tentang turbin angin. Ia mengasumsikan bahwa suatu turbin ideal merupakan rotor tanpa naf (hub) dan mempunyai sudu-sudu yang tak terhingga jumlahnya tanpa hambatan (Reksoatmojdo, 2004). Juga diasumsikan bahwa aliran udara didepan dan belakang rotor memiliki kecepatan yang seragam (laminar). Jika  $V_1$  = kecepatan angin didepan

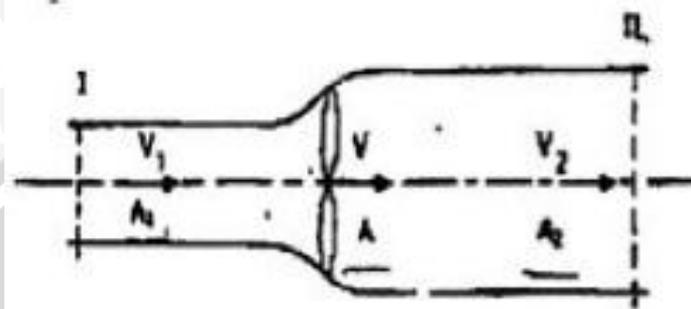
rotor,  $V_2$  = kecepatan angin dibelakang rotor dan  $V$  = kecepatan angin pada saat melewati rotor, maka berdasarkan persamaan kontinuitas:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (\text{Reksoatmodjo; 2004: 67}) \quad (2-9)$$

dengan:

$A$  = Luas penampang ( $m^2$ )

$V$  = Kecepatan alir udara (m/s)

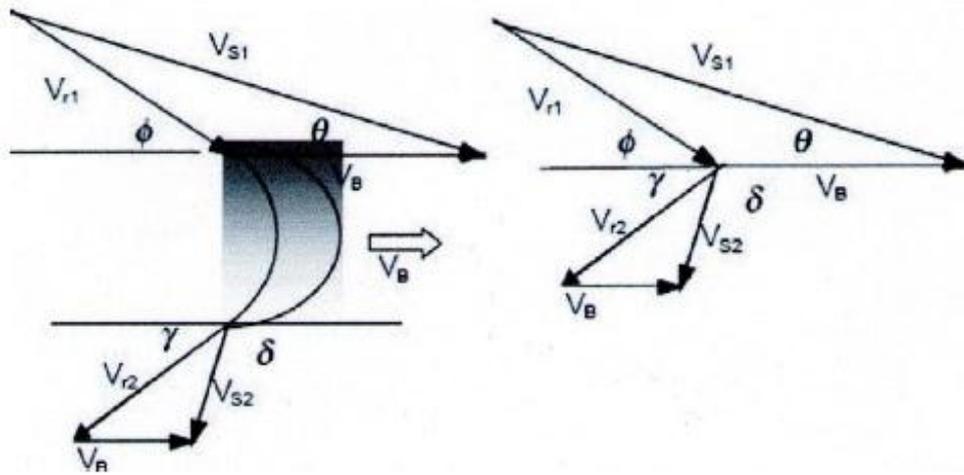


Gambar 2.9 Asumsi Teori Betz  
Sumber : Reksoatmodjo, 2004

### 2.6.2 Segitiga Kecepatan

Pada mesin – mesin berputar yang memanfaatkan sudu, biasanya digunakan segitiga kecepatan untuk menghitung performa dasar dari sebuah tingkat turbin. Seperti gambar 2.10 segitiga kecepatan terdiri dari tiga buah vektor kecepatan yaitu kecepatan absolut, kecepatan relatif, dan kecepatan tangensial. Setiap fluida di tiap titik ditinjau mempunyai segitiga kecepatan. Kecepatan absolut adalah kecepatan suatu fluida terhadap benda acuan yang diam. Untuk kecepatan fluida yang ditinjau terhadap benda lain yang juga bergerak disebut kecepatan relatif. Kecepatan fluida yang disebabkan gerakan memutar adalah kecepatan tangensial.

Pada umumnya tinjauan untuk segitiga kecepatan ada pada sisi masuk dan sisi keluar sudu. Pada sisi masuk, fluida keluar dari nozel dengan kecepatan tangensial  $V_B$ . Relativ terhadap rotor, kecepatan fluida masuk runner sebesar  $V_{r1}$ . Fluida setelah melewati sudu akan mempunyai kecepatan keluar relatif terhadap rotor  $V_{r2}$  dan juga kecepatan tangensial  $V_B$  sehingga kecepatan keluar absolut  $V_{s2}$ . Segitiga kecepatan disusun menggunakan tiga macam kecepatan tersebut. Dari hubungan ketiga kecepatan diatas dapat diketahui bahwa penjumlahan vektor kecepatan relatif dan kecepatan tangensial akan menghasilkan vektor kecepatan absolut.



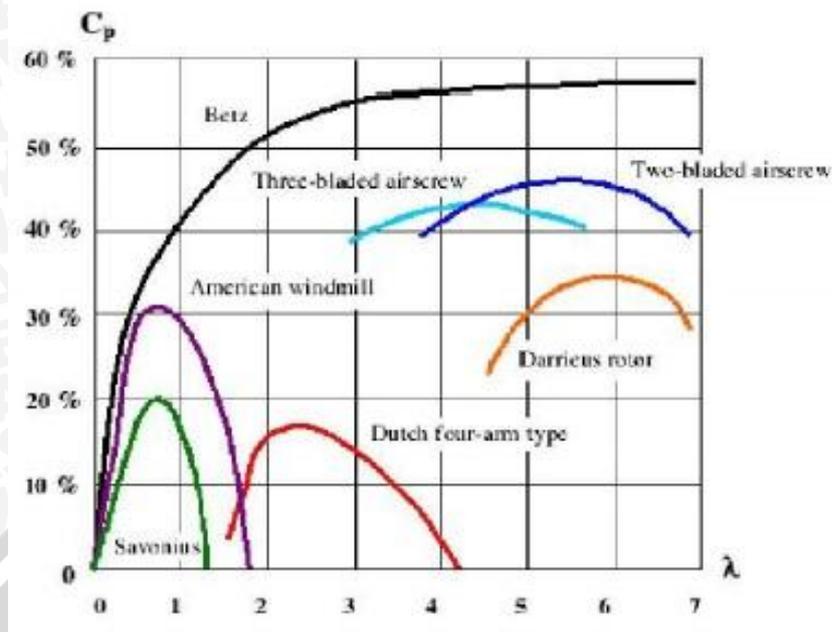
Gambar 2.10 Skema segitiga kecepatan  
 Sumber : Sunyoto, 2011

Segitiga kecepatan adalah dasar kinematika dari aliran fluida yang menumbuk sudu turbin. Dengan pemahaman segitiga kecepatan akan sangat membantu dalam pemahaman proses konversi energi pada sudu-sudu turbin. Adapun notasi dari segitiga kecepatan adalah sebagai berikut:

- $V_{s1}$  = kecepatan absolut fluida meninggalkan nosel
- $V_B$  = kecepatan tangensial
- $V_{r1}$  = kecepatan relatif fluida
- $V_{r2}$  = kecepatan relatif fluida meninggalkan sudu
- $V_{s2}$  = kecepatan absolut fluida meninggalkan sudu

### 2.6.3 Daya pada Turbin Angin Savonius

Besar daya yang dapat dibangkitkan dari putaran rotor turbin angin *savonius* dapat dihitung melalui pendekatan Betz. Percobaan Betz dapat dilihat pada gambar 2.11 berikut:



Gambar 2.11 Performance of main conventional wind machine  
 Sumber : Bourabaa, 2004

Berdasarkan teori Betz yang divisualisasikan dalam bentuk grafik pada gambar 2.11, menjelaskan ketidakmungkinan suatu desain turbin angin memiliki *coeffisien power* ( $C_p$ ) diatas angka 56%. Hal ini dapat diartikan bahwa desain turbin terbaik tipe apapun tidak akan menghasilkan efisiensi rotor diatas 56%. Nilai efisiensi 56% juga sering disebut sebagai Betz Limit.

Nilai  $C_p$  untuk satu tipe turbin angin tidak selalu sama karena nilai  $C_p$  merupakan fungsi dari *tip speed ratio* atau  $\lambda$ . Untuk mengetahui nilai  $C_p$  maksimal yang mampu dihasilkan oleh sebuah turbin angin, maka perlu diketahui terlebih dahulu berapa nilai *tip speed ratio* yang dihasilkan dengan persamaan:

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad \text{(Fox, 1994: 579)} \quad (2-19)$$

dimana:

- $\omega$  = Kecepatan sudut =  $\frac{2\pi n}{60}$
- R = Radius rotor (m)
- v = Kecepatan angin (m/s)

Dengan diketahuinya nilai  $\lambda$  dapat ditarik suatu garis lurus vertikal pada grafik gambar 2.11 untuk mengetahui berapa nilai  $C_p$  maksimum. Pada turbin angin *savonius* dengan

tinggi rotor H serta jari-jari rotor R, dikenai aliran angin berkecepatan V, maka daya maksimumnya adalah:

$$P_{\text{aktual}} = C_p \rho R H v^3 \quad (\text{Menet, 2004: 3}) \quad (2-20)$$

dengan :

$P_{\text{aktual}}$  = Daya aktual turbin (watt)

$C_p$  = *Coefficient of Power*

$\rho$  = Massa jenis udara ( $\text{kg/m}^3$ )

R = Jari-jari sudu (m)

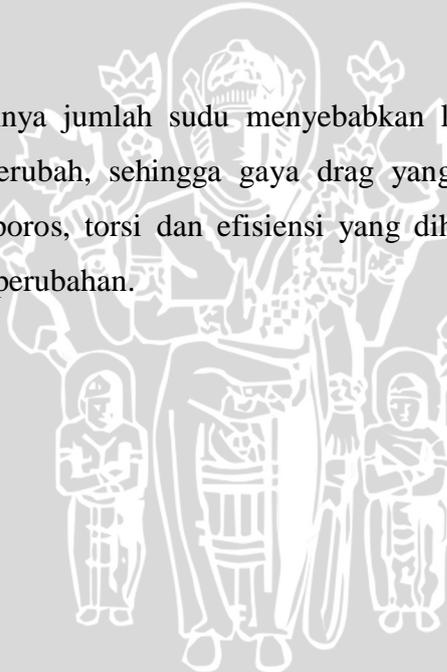
H = Tinggi sudu (m)

v = Kecepatan angin (m/s)

$P_{\text{teoritis}}$  merupakan daya maksimum yang dihasilkan oleh poros rotor turbin angin *savonius* ketika mengkonversikan energi kinetik aliran angin.

## 2.7 Hipotesa

Dengan bertambahnya jumlah sudu menyebabkan luas daerah terpaan angin pada sudu turbin akan berubah, sehingga gaya drag yang bekerja pada sudu juga berubah, akibatnya daya poros, torsi dan efisiensi yang dihasilkan oleh turbin angin *savonius* akan mengalami perubahan.



## BAB III

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode penelitian eksperimental (*experimental research*), yaitu melakukan pengamatan untuk mencari data sebab-akibat dalam suatu proses melalui eksperimen sehingga dapat mengetahui pengaruh kecepatan angin dan jumlah sudu terhadap unjuk kerja pada turbin angin *savonius*.

#### 3.2 Tempat dan Waktu Pelaksanaan

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Fluida Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya pada bulan Maret 2012 – selesai.

#### 3.3 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

##### 1. Variabel bebas

Variabel bebas adalah variabel yang tidak dipengaruhi oleh variabel yang lain.

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah :

- Jumlah sudu : 2; 3; dan 4 buah
- Kecepatan angin: 3; 4; 5; 6 dan 7 m/s

##### 2. Variabel terikat

Variabel terikat adalah variabel yang dipengaruhi oleh variabel bebas yang telah ditentukan dalam penelitian ini. Variabel terikatnya adalah :

- Daya poros dari turbin angin *savonius*
- Torsi yang dihasilkan oleh turbin angin *savonius*
- Efisiensi yang dihasilkan turbin angin *savonius*

##### 3. Variabel terkontrol

Variabel terkontrol adalah variabel yang nilainya dijaga konstan selama pengujian berlangsung.

#### 3.4 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

## 1. Anemometer

Anemometer seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.1 digunakan untuk mengetahui kecepatan angin dari *wind tunnel*. Dalam penelitian digunakan kecepatan angin dalam satuan m/s.



Gambar 3.1 Anemometer

Sumber : *Starmeter instrument co.,ltd.* 2009

Spesifikasi Anemometer:

<i>Measuring range</i>	: -10~45°C
<i>Wind speed measuring range</i>	: 0.3~30 m/s
<i>Accuracy of temperature</i>	: ± 2°C
<i>Accuracy of wind speed</i>	: ± 5%
<i>Resolution</i>	: 0.1 m/s 0.2°C
<i>Measuring unit</i>	: M/s, Ft/min Knots, Km/hr, Mph

## 2. Blower

Digunakan untuk menggerakkan angin menuju turbin. Sehingga dapat menyebabkan turbin berputar akibat tumbukan angin dari *blower*.



Gambar 3.2 Blower

Spesifikasi motor *blower*:

Tipe : U 7181 No 7076-2977

Model : 4C 668A

Daya : 1/6 Hp

Putaran Max : 1600 RPM

Voltase : 115/230 V

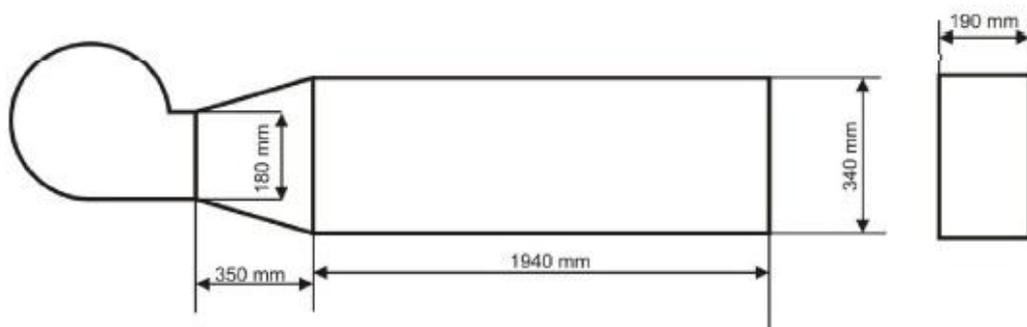
Ampere : 2,6 \_ 1,3 A

### 3. *Wind tunnel*

Digunakan sebagai terowongan angin yaitu angin yang dari *blower* menuju turbin.



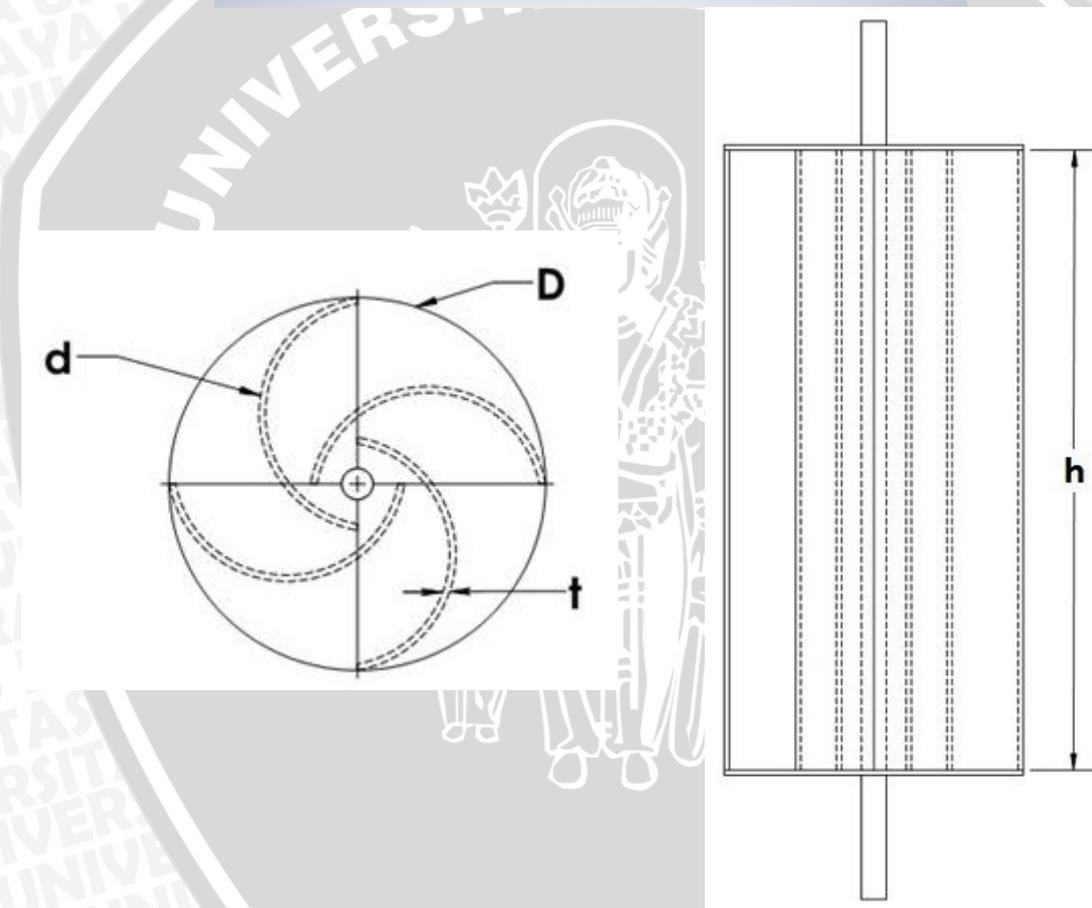
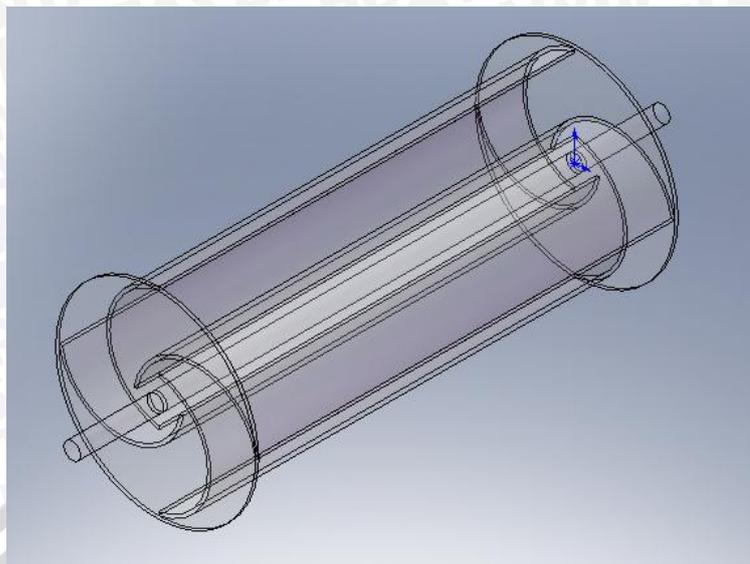
Gambar 3.3 *Wind tunnel*



Gambar 3.4 Spesifikasi *wind tunnel*

### 4. Sudu turbin

Dalam penelitian ini, sudu turbin terbuat dari pipa PVC dengan diameter  $3'' = 7.62 \text{ cm} = 0.0762 \text{ m}$ .



Gambar 3.5 Sudu turbin

Keterangan :

- D : diameter rotor
- d : diameter sudu (3D)
- h : tinggi sudu (250 mm)
- t : tebal (2mm)

### 5. Digital Multitester

*Digital multitester* digunakan untuk mengukur tegangan dan kuat arus yang dihasilkan motor listrik serta mengukur hambatan resistor. *Digital multitester* yang digunakan adalah seperti gambar 3.6 dibawah ini



Gambar 3.6 *Digital multitester*  
Sumber : Shanghai MCP Corp. 2009

Spesifikasi :

Merk	: CADIC
Tipe	: Cadic 32B
Battery Voltage	: 9V
Display	: 9 digit 18mm LCD
DC Volt	: 0-1000 V
Ac Volt	: 0-759 V
Ampere max	: 200mA , 10A unfused
Ohm max	: 2000 kOhm
Batery	: 4 x 1,5v AAA battery

### 6. Digital Tachometer

Digunakan untuk mengukur kecepatan putar dari poros turbin dalam RPM.



Gambar 3.7 *Digital tachometer*  
Sumber : Weaf instrument Co.,Ltd. 2010

Spesifikasi *Digital tachometer* :

<i>Display</i>	: 5 digits 18mm LCD
<i>Accuracy</i>	: 0.05%+1digit
<i>Sampling time</i>	: 0.5sec (over 120 RPM)
<i>Memory</i>	: Max. value, Min. value, Last value
<i>Test range</i>	: 2.5~99,999 RPM
<i>Resolution</i>	: 0.1RPM (2.5~999.9RPM),1RPM(over 1,000RPM)
<i>Detecting distance</i>	: 50~500mm
<i>Battery</i>	: 4x1.5 V AAA battery

### 7. Generator Listrik

Adalah alat yang digunakan untuk mengkonversikan energi mekanik pada rotor turbin menjadi energi listrik, yang nantinya *output* listriknya di ukur dengan *Digital Multitester*.



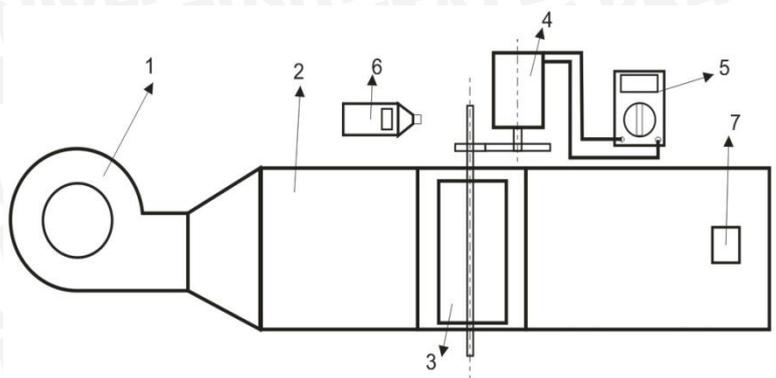
Gambar 3.8 Generator listrik

Spesifikasi :

Tipe	: A – 130
RPM with load	: 1500
Voltage	: 3V DC

### 3.5 Instalasi Penelitian

Instalasi penelitian dapat dilihat seperti pada gambar 3.9 berikut



Keterangan :

1. *Blower*
2. *Wind tunnel*
3. Turbin angin *savonius*
4. Generator listrik
5. *Digital Multitester*
6. *Digital Tachometer*
7. *Anemometer*

Gambar 3.9 Skema Instalasi Uji

### 3.6 Prosedur Penelitian

Langkah-langkah yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

#### 1. Studi literatur

Studi literatur dilakukan untuk mempelajari hal-hal yang berhubungan dengan penelitian yang akan dilakukan sehingga dapat menguatkan dalam pengambilan hipotesa serta memperjelas hasil penelitian.

#### 2. Observasi lapangan

Observasi lapangan dilakukan untuk studi terhadap peralatan-peralatan yang diperlukan dalam penelitian.

#### 3. Pembuatan alat

Pembuatan alat dilakukan dengan mempersiapkan pipa PVC untuk pembuatan sudu turbin dan batang akrilik sebagai poros dari turbin.

#### 4. Perancangan instalasi

Perancangan instalasi dimulai dengan membuat sudu dari pipa PVC, pemasangan sudu di poros, dan penempatan turbin.

#### 5. Pengujian dan pengambilan data

Pengujian dilakukan pada instalasi *windtunnel* dan pengambilan data yang diperlukan dalam penelitian ini adalah tegangan dan kuat arus listrik serta putaran poros turbin.

#### 6. Analisa

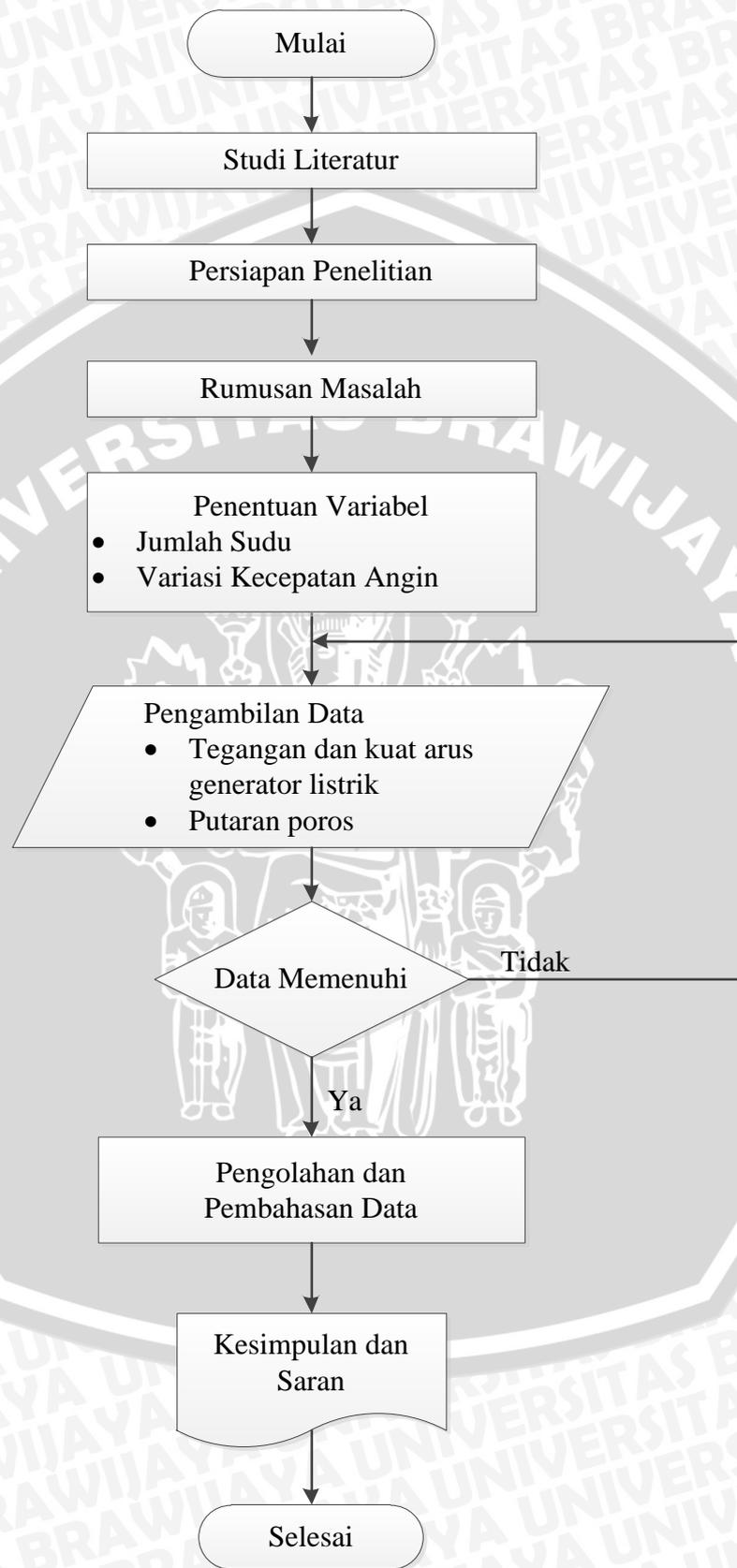
Analisa pengujian dilakukan dengan menghitung data-data menggunakan rumus kemudian ditampilkan dalam bentuk grafik.

### 3.7 Metode Pengambilan Data

Adapun proses pengambilan data adalah sebagai berikut :

1. Menyiapkan instalasi *wind tunnel* dan turbin angin dengan jumlah sudu yang telah ditentukan, dimulai dengan jumlah sudu 2.
2. Pengambilan data dimulai setelah mengalirkan fluida dari *wind tunnel* ke seluruh instalasi turbin angin. Kecepatan angin diatur dengan melihat *anemometer*, dimana kecepatan dimulai dari 3 m/s sampai dengan kecepatan 7 m/s. Kecepatan angin diatur dengan mengatur bukaan katup pada *blower*.
3. Pengambilan data berupa putaran pada poros dengan menggunakan *digital tachometer*.
4. Pengambilan data berupa tegangan dan kuat arus yang dihasilkan motor listrik menggunakan *digital multimeter*.
5. Mengulangi langkah 1 sampai 4 sebanyak lima kali.
6. Mengganti sudu dengan jumlah sudu lain yang diuji selanjutnya (jumlah sudu 3 dan 4).
7. Mengulangi langkah 1 sampai 5 dengan variasi jumlah sudu yang tetap.
8. Pengolahan data tegangan dan kuat arus listrik beserta putaran poros untuk mendapatkan besar daya poros, torsi dan efisiensi.

3.8 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.10 Diagram Alir Penelitian

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil

#### 4.1.1 Data Hasil Pengujian

Data hasil pengujian pengaruh jumlah sudu terhadap unjuk kerja turbin angin *savonius*.

- Tabel 4.1 Data pengujian tegangan motor listrik (mV)

		Kecepatan Angin (m/s)				
		3	4	5	6	7
<b>JUMLAH SUDU</b>	2 buah	407	563	815	987	1154
		408	564	817	989	1152
		409	563	816	987	1153
		408	562	816	988	1154
		407	563	817	991	1155
	Rata - rata	407.8	563	816.2	988.4	1153.6
	3 buah	486	648	852	1005	1200
		484	649	854	1006	1194
		485	648	852	1005	1192
		485	649	853	1007	1191
		487	650	852	1004	1194
	Rata - rata	485.4	648.8	852.6	1005.4	1194.2
	4 buah	260	450	641	784	940
		258	448	642	783	941
		256	449	640	782	942
		263	446	643	783	941
		261	448	640	784	942
	Rata - rata	259.6	448.2	641.2	783.2	941.2

- Tabel 4.2 Data pengujian kuat arus motor listrik (mA)

		Kecepatan Angin (m/s)				
		3	4	5	6	7
<b>JUMLAH SUDU</b>	2 buah	22	40.5	55.3	67.1	78.6
		22.1	40.4	55.4	67.3	79
		22.2	40	55.2	66.7	79
		21.8	40.3	55	67.3	79.6
		22	40.1	55.3	67	78.7
	Rata - rata	22.02	40.26	55.24	67.08	78.98
	3 buah	23.4	41.6	62.1	70.5	81
		23.1	41.7	61.8	70.4	81.2
		23.2	41.5	62	70.4	81.5
		22.7	41.7	62.1	70.3	81.4
		23	41.6	62.2	70.4	81.3
	Rata - rata	23.08	41.62	62.04	70.4	81.28
	4 buah	21.2	30.4	48.6	59.3	66.7
		21	30.7	48.8	59	67.3
		21.1	30.8	48.4	58.9	66.8
		21	30.4	48.7	59.2	66.9
		21.2	30.6	48.6	59	67
	Rata - rata	21.1	30.58	48.62	59.08	66.94

• Tabel 4.3 Data pengujian putaran poros turbin (rpm)

		Kecepatan Angin (m/s)				
		3	4	5	6	7
<b>JUMLAH SUDU</b>	2 buah	323.7	449.5	617.3	698.5	822.1
		324.1	449	617.8	698.9	822.2
		323.8	449.4	616.7	699.8	823.3
		323.5	449.2	617.8	699	824
		323.5	449.3	617.6	699.3	822.5
	Rata - rata	323.72	449.28	617.44	699.1	822.82
	3 buah	395.3	506.5	674.3	803.7	960
		395	506.1	673.6	804.2	960.3
		395.7	506.4	674.8	804.6	960.4
		395.8	506.5	675.5	804.3	959.91
		395.7	506.8	674.6	803.9	959.9
	Rata - rata	395.5	506.46	674.56	804.14	960.102
	4 buah	200.1	351.9	490.4	610.3	731.4
		199.9	351.7	490.7	610	731.7
		199.3	351.6	490.7	610.2	731.4
		199.4	351.1	490	609.7	731.7
		199.1	350.7	490.7	610.8	731
	Rata - rata	199.56	351.4	490.5	610.2	731.44



#### 4.1.2 Pengolahan Data

Perhitungan data dilakukan untuk mencari nilai daya poros, torsi dan efisiensi turbin angin *savonius* dengan pengaruh jumlah sudu. Berikut ini adalah contoh perhitungan data hasil penelitian untuk jumlah sudu 3 dan bukaan katup kecepatan angin 6 m/s. Contoh perhitungan:

Data yang diperoleh pada saat penelitian adalah sebagai berikut:

- Tinggi turbin (h) = 0,25 m
- Hambatan (R) = 2  $\Omega$
- Efisiensi motor listrik ( $\eta$ ) = 85 %
- Kecepatan angin (v) = 3-7 m/s
- Temperatur udara ruangan (T) = 27 °C

Dari temperatur udara pada 27° C tersebut didapatkan nilai massa jenis udara sebagai berikut (berdasar tabel viskositas dan massa jenis udara pada tekanan 1 atm J.P. Holman, 1997 : 589):

- Massa jenis udara ( $\rho$ ) = 1,18 kg/m<sup>3</sup>

Contoh perhitungan data:

- Luas penampang turbin (A)

Contoh pada diameter sudu (d) = 7,62 cm = 0,0762 m

$$\begin{aligned} A &= D \cdot h \\ &= 0,0762 \text{ m} \cdot 0,25 \text{ m} \\ &= 0,01905 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

- Daya angin ( $P_{\text{angin}}$ )

Contoh pada kecepatan angin (v) = 6 m/s

$$\begin{aligned} P_{\text{angin}} &= \frac{1}{2} \rho A v^3 \\ &= \frac{1}{2} \cdot 1,18 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,01905 \text{ m}^2 \cdot (6 \text{ m/s})^3 \\ &= 2,427732 \text{ kg m}^2/\text{s}^3 \end{aligned}$$

- Daya poros (BHP)

Contoh pada kecepatan angin (v) = 6 m/s dan jumlah sudu 3

Didapatkan :

Tegangan listrik (V) = 964,4 mVolt ; dan arus (I) = 76,4 mAmpere

$$BHP = \frac{P}{\eta_{motor}}$$

$$BHP = \frac{V.I}{\eta_{motor}}$$

$$= \frac{0,9644 \times 0,0764}{0,85}$$

$$= 0,083270776 \text{ Watt}$$

- Torsi (Nm)

$$T = \frac{P}{2 \pi \frac{n}{60}}$$

$$= \frac{0,083270776}{2,3,14,13,40233}$$

$$= 0,000989356 \text{ Nm}$$

- Efisiensi ( $\eta$ )

$$\eta = \frac{BHP}{P_{angin}} \cdot 100 \%$$

$$= \frac{0,083270776}{2,427732} \cdot 100 \%$$

$$= 3,429982241 \%$$

Dari data-data hasil penelitian dapat diolah menjadi data daya poros (BHP), torsi (T), efisiensi ( $\eta$ ), dengan menggunakan perhitungan seperti contoh diatas. Hasilnya dapat dilihat pada tabel 4.4 sampai dengan 4.6 berikut:

Tabel 4.4 Tabel Data Hasil Perhitungan Jumlah Sudu 2

KECEPATAN ANGIN (m/s)	Jumlah sudu			Daya Angin
	2 buah			
	BHP	T	$\eta$	
3	0,010564419	0,000311794	3,481247131	0.3034665
4	0,026666329	0,000567071	3,707116838	0.719328
5	0,053043398	0,000820783	3,775498743	1.4049375
6	0,078002202	0,001066005	3,212965943	2.427732
7	0,107189798	0,00124463	2,780432392	3.8551485

Tabel 4.5 Tabel Data Hasil Perhitungan Jumlah Sudu 3

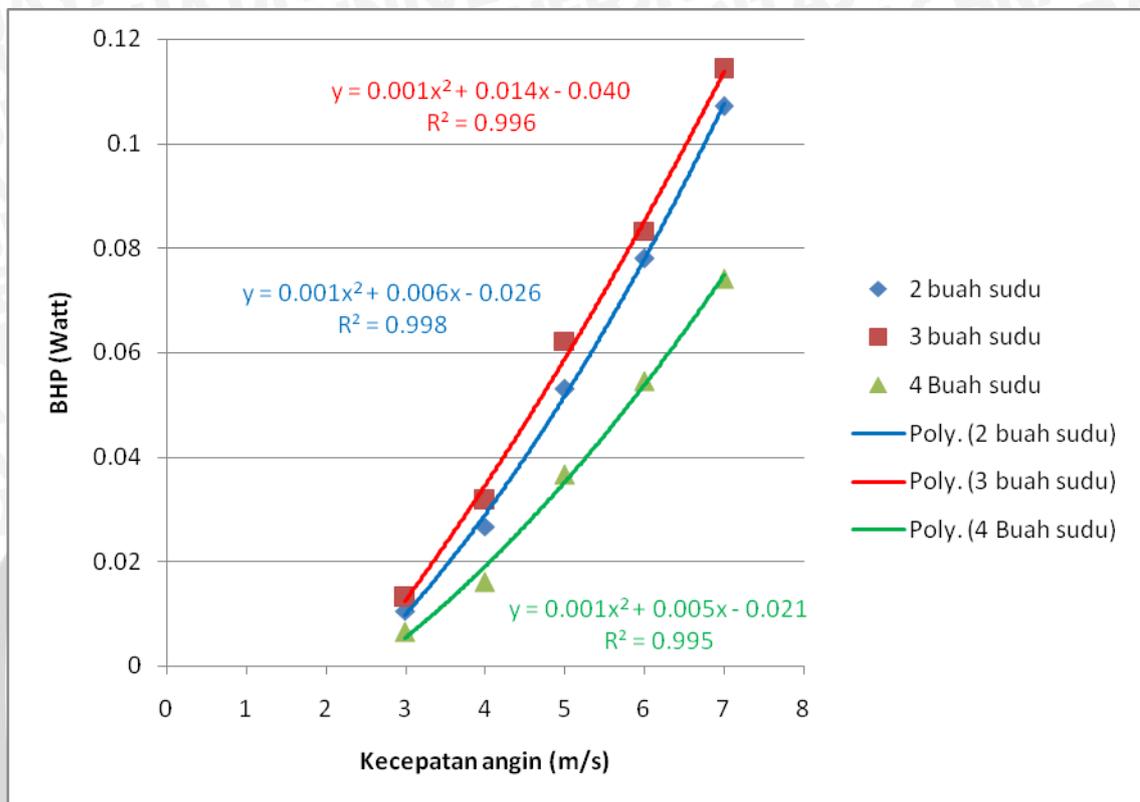
KECEPATAN ANGIN (m/s)	Jumlah sudu			Daya Angin
	3 buah			
	BHP	T	$\eta$	
3	0,013180038	0,000318392	4,343160661	0.3034665
4	0,031768301	0,000599295	4,416386013	0.719328
5	0,062229769	0,000881392	4,429362118	1.4049375
6	0,083270776	0,000989356	3,429982241	2.427732
7	0,114193619	0,00113636	2,962106877	3.8551485

Tabel 4.6 Tabel Data Hasil Perhitungan Jumlah Sudu 4

KECEPATAN ANGIN (m/s)	Jumlah sudu			Daya Angin
	4 buah			
	BHP	T	$\eta$	
3	0,006444188	0,000308522	2,123525409	0.3034665
4	0,016124654	0,00043841	2,24162748	0.719328
5	0,03667664	0,000714401	2,610553138	1.4049375
6	0,054437007	0,000852342	2,242298864	2.427732
7	0,074122268	0,000968192	1,922682569	3.8551485

## 4.2 Pembahasan

### 4.2.1 Hubungan Antara Kecepatan Angin Terhadap Daya Poros (BHP)



Gambar 4.1 Grafik hubungan antara kecepatan angin terhadap daya poros (BHP)

Dari grafik (gambar 4.1) dapat diketahui bahwa kecepatan angin berpengaruh terhadap daya poros yang dihasilkan. Pada awal sampai akhir grafik hubungan antara kecepatan angin terhadap daya poros pada jumlah sudu yang sama mengalami kecenderungan yang meningkat. Semakin meningkatnya kecepatan angin akan menyebabkan semakin besar momentum angin yang menumbuk turbin setiap detiknya, maka perbedaan tekanan antara bagian depan sudu dan bagian belakang sudu meningkat, sehingga gaya drag yang dihasilkan semakin meningkat pula. Akibat dari peningkatan gaya drag ini akan menyebabkan peningkatan dari daya poros turbin itu sendiri.

Pada turbin angin dengan jumlah sudu 2 mengalami arah putar yang berlawanan dengan arah perputaran turbin yang semestinya (searah jarum jam). Akibat hampir seimbang gaya momen antara keduanya, turbin angin jumlah sudu 2 dengan posisi seperti ini mempunyai potensi berbalik arah akibat delta momen putar sangat kecil. Daya poros maksimal didapat pada jumlah sudu 3, hal ini terjadi karena kerenggangan

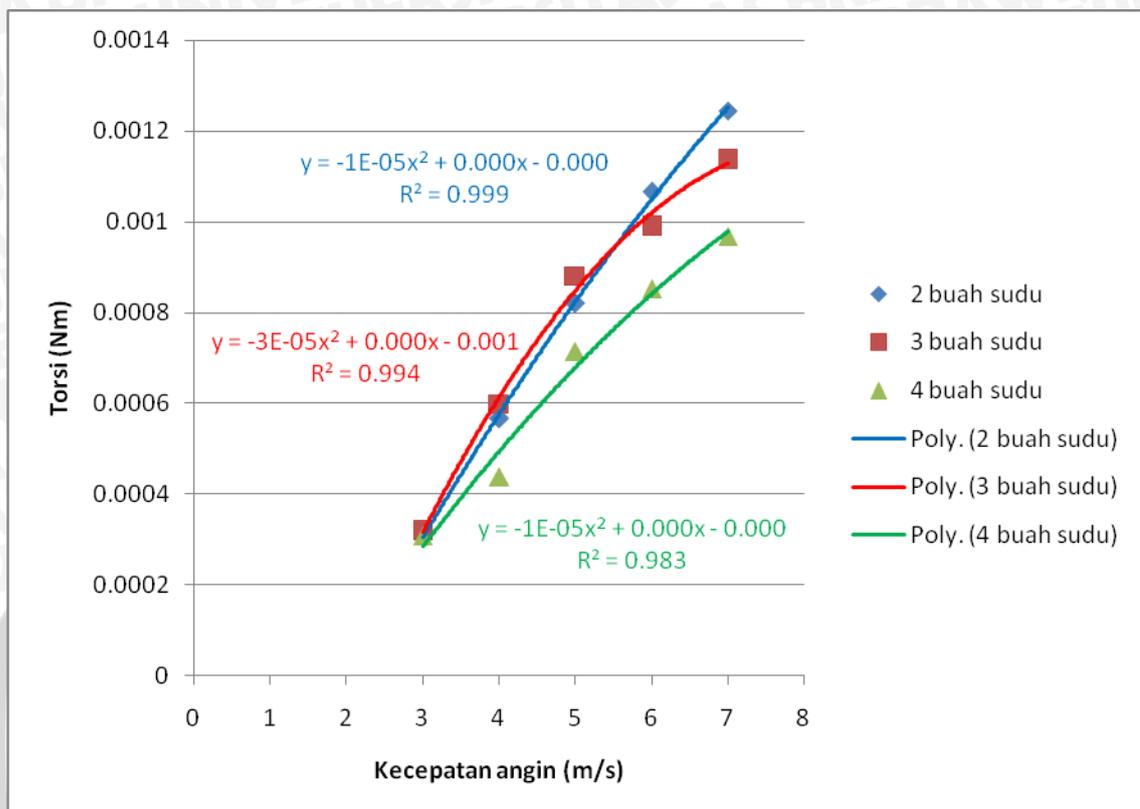
pada poros sudu turbin menjadikan aliran dapat menerobos dan menerpa sudu dibelakang poros dan ini akan meningkatkan gaya momen serta menambah gaya hambat negatif pada sudu tersebut. Berbeda dengan jumlah sudu 4, dimana gaya drag pada masing-masing sudu lebih tinggi daripada jumlah sudu yang lain, namun terdapat turbulensi udara di area rotor sehingga dapat menurunkan performa turbin itu sendiri. Bertambahnya jumlah sudu yang akan mengakibatkan saling reduksi gaya positif dan negatif antara satu sudu dengan sudu lainnya.

Hal itu dapat disebabkan karena semakin tinggi gaya dorong yang dihasilkan, juga akan meningkatkan putaran dari turbin. Semakin tinggi putaran maka daya motor yang dihasilkan akan semakin meningkat pula. Hal ini sesuai dengan persamaan berikut yaitu:

$$BHP = \frac{P_{motor}}{\eta_{motor}}$$

Pada gambar 4.1 terlihat bahwa turbin dengan jumlah sudu 3 mempunyai nilai daya poros yang lebih besar jika dibandingkan turbin angin dengan jumlah sudu lainnya. Pada jumlah sudu 3, daya poros tertinggi dicapai pada kecepatan angin 7 m/s dengan daya poros 0,114193619 Watt dan daya terendah dicapai pada saat kecepatan angin 3 m/s dengan daya poros 0,013180038 Watt.

#### 4.2.2 Hubungan Antara Kecepatan Angin Terhadap Torsi



Gambar 4.2 Grafik hubungan antara kecepatan angin terhadap torsi

Dari grafik ( gambar 4.2 ) hubungan antara kecepatan angin terhadap torsi, dapat dilihat bahwa pada kecepatan angin yang sama untuk jumlah sudu yang berbeda terdapat perbedaan torsi yang bekerja. Hal ini dikarenakan pada jumlah sudu yang sedikit mempunyai titik tangkap gaya yang berbeda dengan jumlah sudu yang banyak. Dengan demikian torsi yang dihasilkan oleh masing-masing turbin angin dengan jumlah sudu yang sedikit dan banyak adalah berbeda.

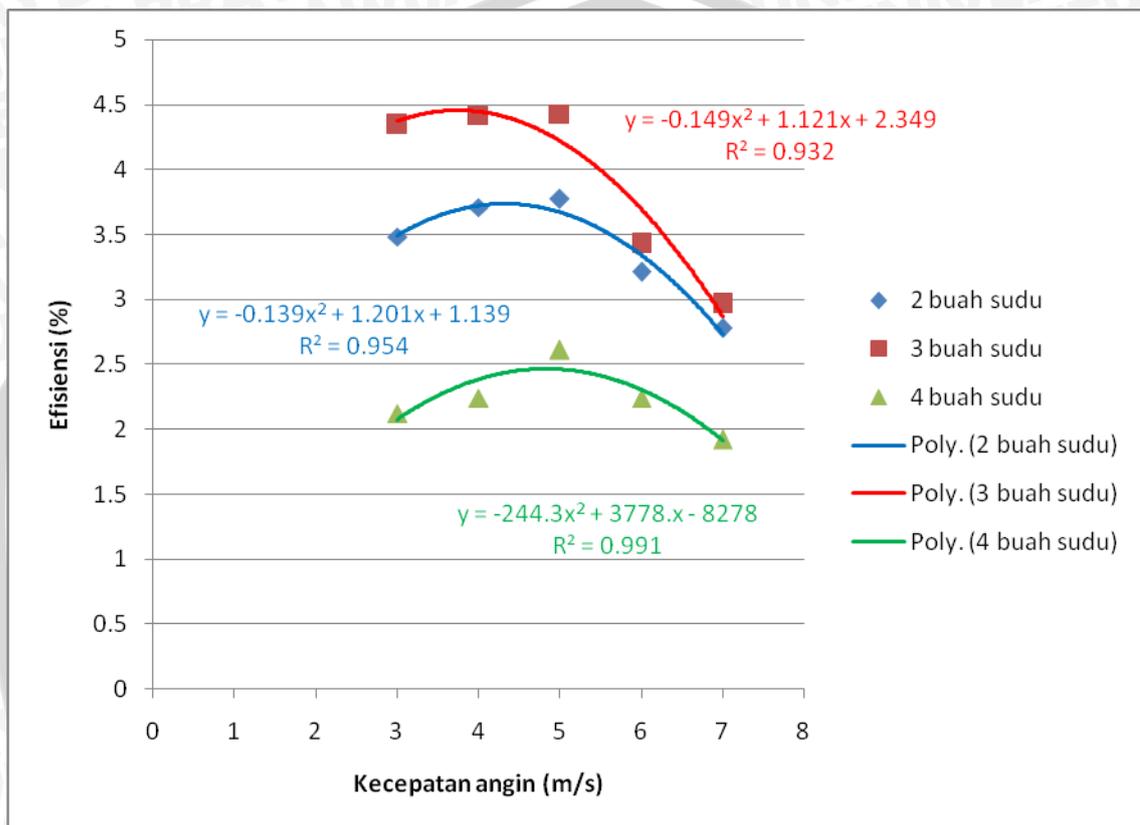
Pada gambar 4.2 grafik hubungan antara kecepatan angin terhadap torsi mengalami kecenderungan yang meningkat. Hal ini dikarenakan semakin meningkatnya kecepatan angin maka massa dan titik tangkap gaya akan semakin besar. Dengan demikian torsi yang dihasilkan besar. Hal ini sesuai dengan persamaan berikut yaitu:

$$T = \frac{P}{2 \pi \frac{n}{60}}$$

Pada gambar 4.2 terlihat bahwa turbin angin dengan jumlah sudu 2 mempunyai nilai torsi yang besar jika dibandingkan turbin dengan yang lainnya. Pada jumlah sudu 2

torsi tertinggi dicapai pada kecepatan angin 7 m/s dengan nilai torsi 0,00124463 Nm dan torsi terendah dicapai pada saat kecepatan angin 3 m/s dengan nilai torsi 0,000311794 Nm

#### 4.2.3 Hubungan Antara Kecepatan Angin Terhadap Efisiensi



Gambar 4.3 Grafik hubungan antara kecepatan angin terhadap efisiensi

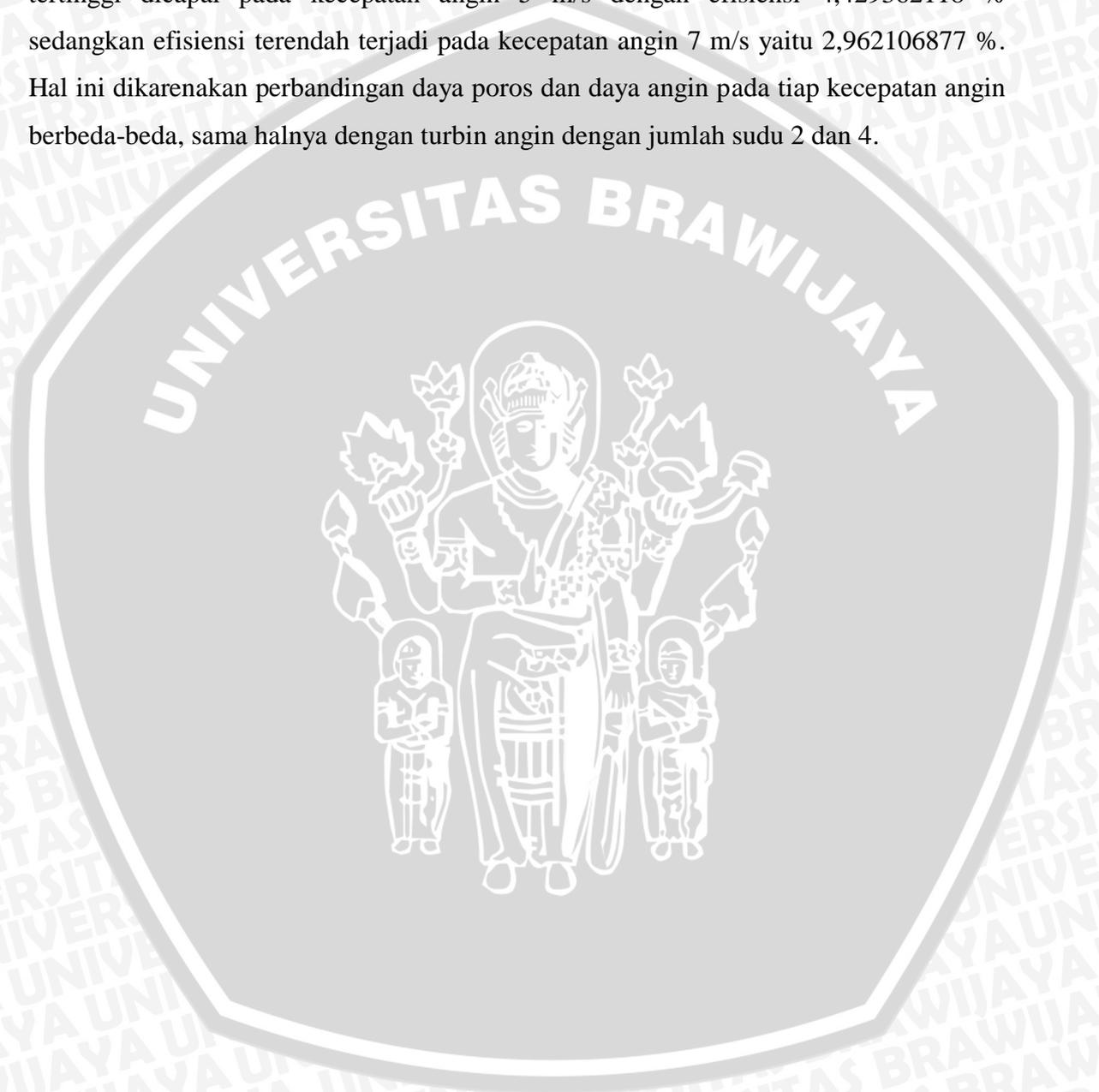
Dari grafik ( gambar 4.3 ) hubungan antara kecepatan angin terhadap efisiensi, dapat dilihat bahwa semakin meningkatnya kecepatan angin maka kenaikan daya poros semakin besar. Hal ini dikarenakan efisiensi merupakan perbandingan antara daya poros dengan daya angin, seperti yang telah dijelaskan pada pembahasan grafik (4.1) sehingga nilai efisiensi yang dihasilkan semakin meningkat. Hal ini sesuai dengan persamaan berikut yaitu:

$$\eta = \frac{BHP}{P \text{ angin}} \cdot 100 \%$$

Pada gambar 4.3 grafik hubungan antara kecepatan angin terhadap efisiensi mengalami tren grafik berbentuk parabolik, dimana efisiensi optimum diperoleh pada saat kecepatan angin 5 m/s dan kemudian mengalami penurunan seiring dengan

bertambahnya kecepatan angin. Hal ini dikarenakan, kenaikan daya poros tidak sebanding dengan daya angin yang peningkatannya semakin besar seiring peningkatan kecepatan angin dan luas bidang terima.

Pada gambar 4.3 terlihat bahwa pada jumlah sudu 3 mempunyai nilai efisiensi yang tinggi jika dibandingkan dengan jumlah sudu lainnya. Pada jumlah sudu 3 efisiensi tertinggi dicapai pada kecepatan angin 5 m/s dengan efisiensi 4,429362118 % sedangkan efisiensi terendah terjadi pada kecepatan angin 7 m/s yaitu 2,962106877 %. Hal ini dikarenakan perbandingan daya poros dan daya angin pada tiap kecepatan angin berbeda-beda, sama halnya dengan turbin angin dengan jumlah sudu 2 dan 4.



## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa jumlah sudu dan kecepatan angin berpengaruh terhadap unjuk kerja turbin angin *savonius*, dimana:

- Pada jumlah sudu yang sama dan kecepatan angin yang meningkat diperoleh daya poros dan torsi yang meningkat.
- Pada jumlah sudu yang semakin bertambah dan kecepatan angin yang tetap diperoleh unjuk kerja turbin yang meningkat sampai pada jumlah sudu 3.
- Efisiensi terbesar adalah 4,429362118 % pada jumlah sudu 3 dan kecepatan 5 m/s, kemudian daya poros terbesar yang diperoleh adalah 0,114193819 Watt pada jumlah sudu 3 dan torsi tertinggi yaitu 0,00124463 Nm pada jumlah sudu 2 yang masing-masing pada kecepatan angin 7 m/s.

#### 5.2 Saran

Dari penelitian yang telah dilakukan disarankan untuk:

1. Dilakukan penelitian tentang pengaruh bentuk sudu terhadap unjuk kerja turbin angin *savonius*.
2. Dilakukan penggabungan antara turbin angin *savonius* dan *darrieus* untuk mengetahui unjuk kerja dari turbin tersebut.

## DAFTAR PUSTAKA

- Bueche, F. J.; 1988: *Fisika*; Erlangga, Jakarta.
- Cheremisinoff, Nicholas P; 1978; *Fundamentals of Wind Energy*; Ann Arbor Science Publishers, Mich
- Dietzel, Fritz; 1990: *Turbin Pompa dan Kompresor*; Erlangga, Jakarta.
- Fox, Robert W. and McDonald Alan T.; 1994: *Introduction to Fluid Mechanics*; John Wiley and Sons Inc., New York.
- Giancoli, Douglas C.; 1995: *Physics Fourth Edition*; Prentice Hall International Inc., New Jersey.
- Hermawan; 2010: *Unjuk Kerja Model Turbin Angin Poros Vertikal tipe Savonius dengan Variasi Jumlah Sudu dan Variasi Posisi Sudut* ; Jurusan Teknik Mesin dan Industri Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada
- Hunt, V. Daniel; 1981: *Wind Power*; Nostard Reinhold, New York.
- Holman, J.P; 1997: *Perpindahan Kalor*; Erlangga, Jakarta
- Kadir, Abdul; 1996: *Energy*; UIP, Jakarta.
- Karnowo; 2008: *Pengaruh Overlap Sudu Terhadap Torsi yang Dihasilkan Turbin Savonius Tipe-U; STTR, Cepu*
- Menet, J.L., Bourabaa, N.; 2004: *Increase In The Savonius Rotors Via a Parametric Investigation*; Universete de Valenciennes, France
- PT.PLN.; 2001: *Teori Dasar Listrik*; PT. PLN, Jawa Barat
- Reksoatmodjo, Tedjo Narsoyo; 2004: *Vertical Axis-Differential Dragmill*; UNJANI, Semarang
- Sargolzaei, J; 2007: *Prediction of The Power Ratio in Wind Turbine Savonius Rotors Using Artificial Neural Networks*; Baluchestan University, Zahedan.
- White, Frank M.;1986 : *Fluid Mechanics*; McGraw Hill Book Company, New York.
- WWEA; 2011: *10<sup>th</sup> World Wind Energy Conference & Renewable Energy exhibition*; World Wind Energy Association WWEA 2011, Bonn.
- <http://www.energy.iastate.edu>

## LAMPIRAN

### Lampiran 1

#### Tabel Viskositas dan Massa Jenis Udara pada Tekanan 1 atm

**Table A-5** Properties of Air at Atmospheric Pressure†

The values of  $\mu$ ,  $k$ ,  $c_p$ , and Pr are not strongly pressure-dependent and may be used over a fairly wide range of pressures.

T, K	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$c_p$ , kJ/kg · °C	$\mu$ , kg/m · s × 10 <sup>5</sup>	$\nu$ , m <sup>2</sup> /s × 10 <sup>6</sup>	$k$ , W/m · °C	$\alpha$ , m <sup>2</sup> /s × 10 <sup>4</sup>	Pr
100	3.6010	1.0266	0.6924	1.923	0.009246	0.02501	0.770
150	2.3675	1.0099	1.0283	4.343	0.013735	0.05745	0.753
200	1.7684	1.0061	1.3289	7.490	0.01809	0.10165	0.739
250	1.4128	1.0053	1.5990	11.31	0.02227	0.15675	0.722
300	1.1774	1.0057	1.8462	15.69	0.02624	0.22160	0.708
350	0.9980	1.0090	2.075	20.76	0.03003	0.2983	0.697
400	0.8826	1.0140	2.286	25.90	0.03365	0.3760	0.689
450	0.7833	1.0207	2.484	31.71	0.03707	0.4222	0.683
500	0.7048	1.0295	2.671	37.90	0.04038	0.5564	0.680
550	0.6423	1.0392	2.848	44.34	0.04360	0.6532	0.680
600	0.5879	1.0551	3.018	51.34	0.04659	0.7512	0.680
650	0.5430	1.0635	3.177	58.51	0.04953	0.8578	0.682
700	0.5030	1.0752	3.332	66.25	0.05230	0.9672	0.684
750	0.4709	1.0856	3.481	73.91	0.05509	1.0774	0.686
800	0.4405	1.0978	3.625	82.29	0.05779	1.1951	0.689
850	0.4149	1.1095	3.765	90.75	0.06028	1.3097	0.692
900	0.3925	1.1212	3.899	99.3	0.06279	1.4271	0.696
950	0.3716	1.1321	4.023	108.2	0.06525	1.5510	0.699
1000	0.3524	1.1417	4.152	117.8	0.06752	1.6779	0.702
1100	0.3204	1.160	4.44	138.6	0.0732	1.969	0.704
1200	0.2947	1.179	4.69	159.1	0.0782	2.251	0.707
1300	0.2707	1.197	4.93	182.1	0.0837	2.583	0.705
1400	0.2515	1.214	5.17	205.5	0.0891	2.920	0.705
1500	0.2355	1.230	5.40	229.1	0.0946	3.262	0.705
1600	0.2211	1.248	5.63	254.5	0.100	3.609	0.705
1700	0.2082	1.267	5.85	280.5	0.105	3.977	0.705
1800	0.1970	1.287	6.07	308.1	0.111	4.379	0.704
1900	0.1858	1.309	6.29	338.5	0.117	4.811	0.704
2000	0.1762	1.338	6.50	369.0	0.124	5.260	0.702
2100	0.1682	1.372	6.72	399.6	0.131	5.715	0.700
2200	0.1602	1.419	6.93	432.6	0.139	6.120	0.707
2300	0.1538	1.482	7.14	464.0	0.149	6.540	0.710
2400	0.1458	1.574	7.35	504.0	0.161	7.020	0.718
2500	0.1394	1.688	7.57	543.5	0.175	7.441	0.730

†From *Natl. Bur. Stand. (U.S.) Circ.* 564, 1955.

Lampiran 2

Model Turbin Angin *Savonius* dengan Jumlah Sudu yang Berbeda

Jumlah Sudu 2

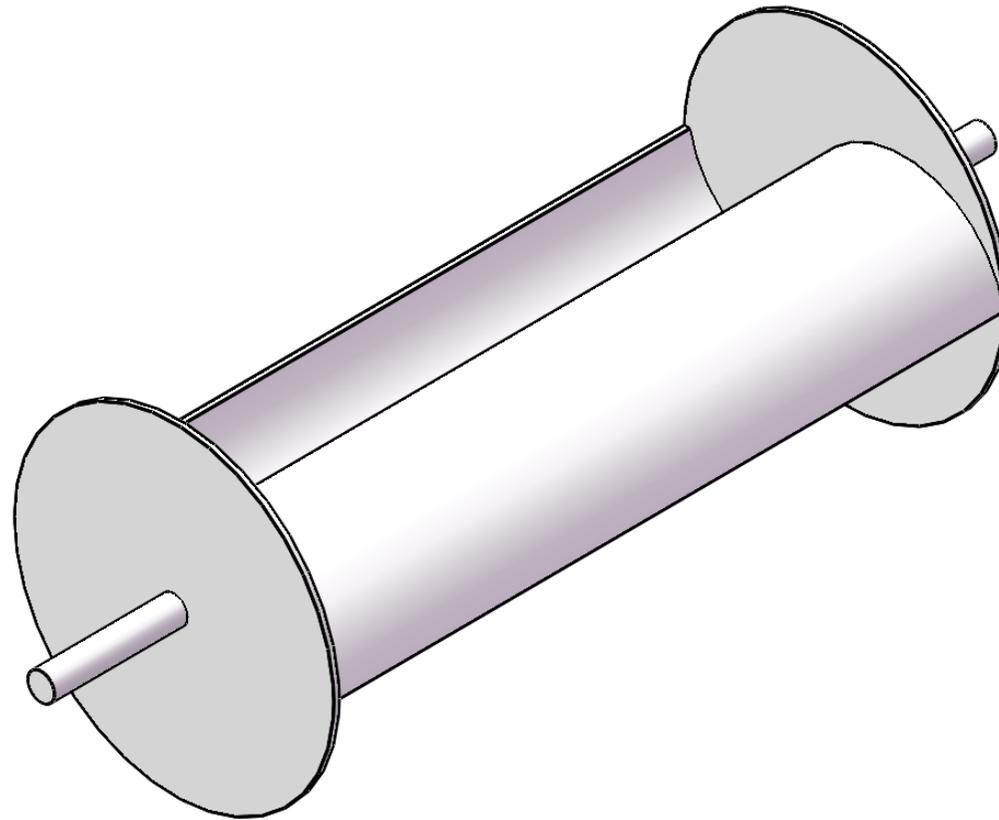


Jumlah Sudu 3

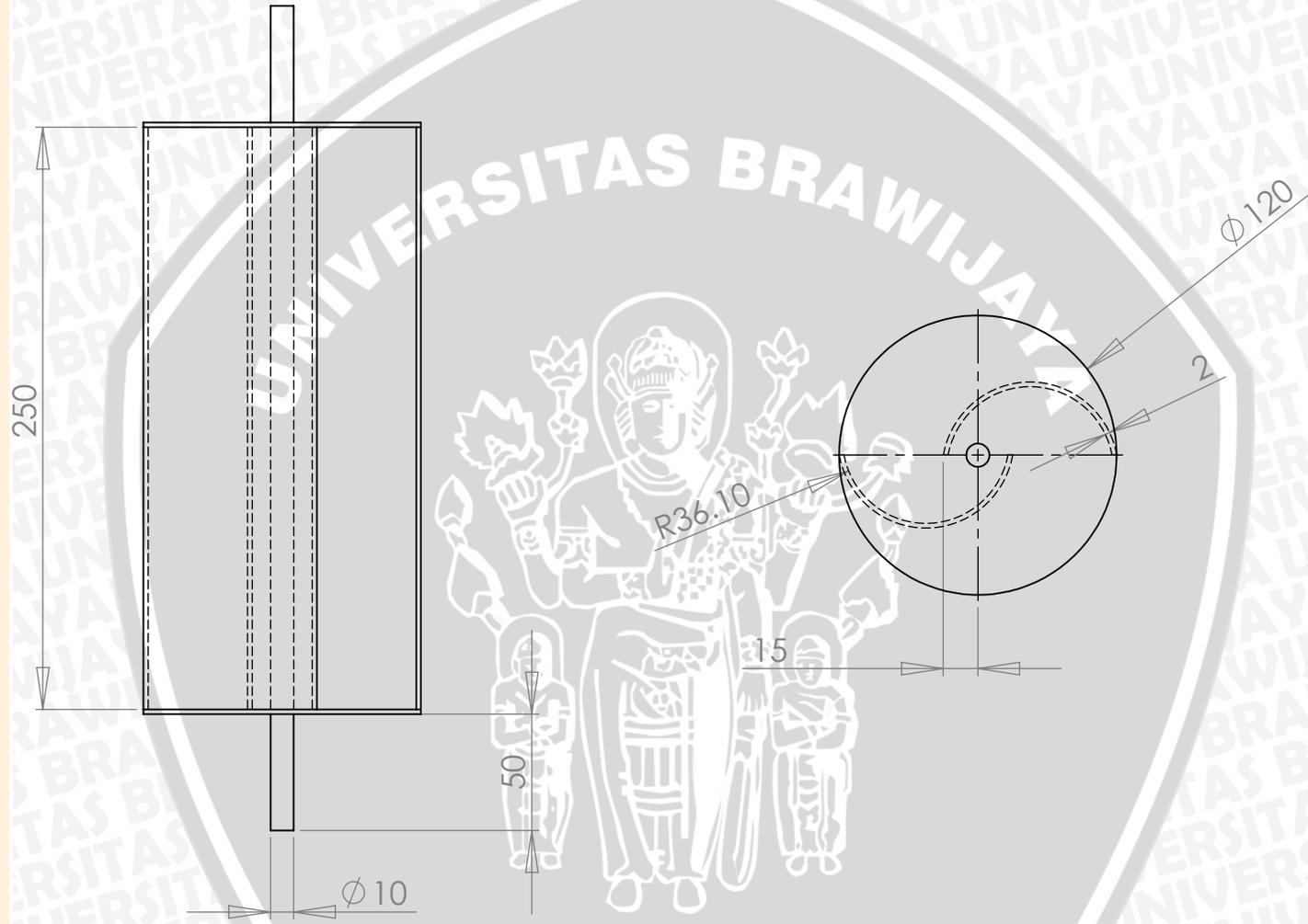


Jumlah Sudu 4

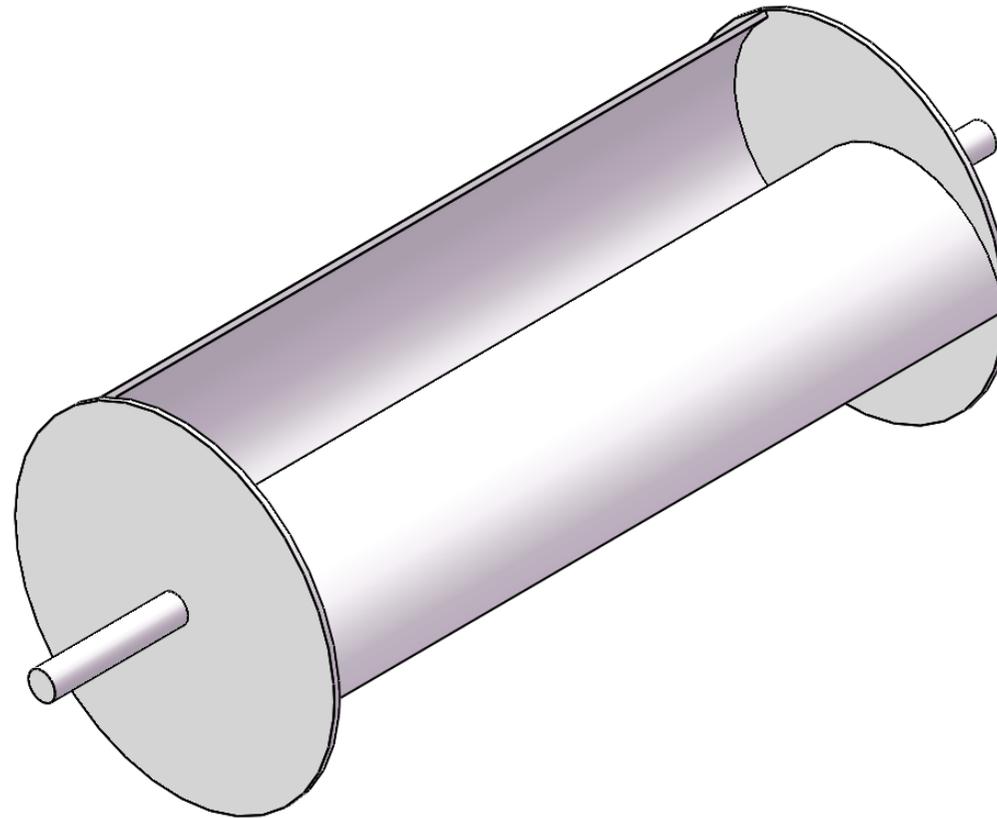




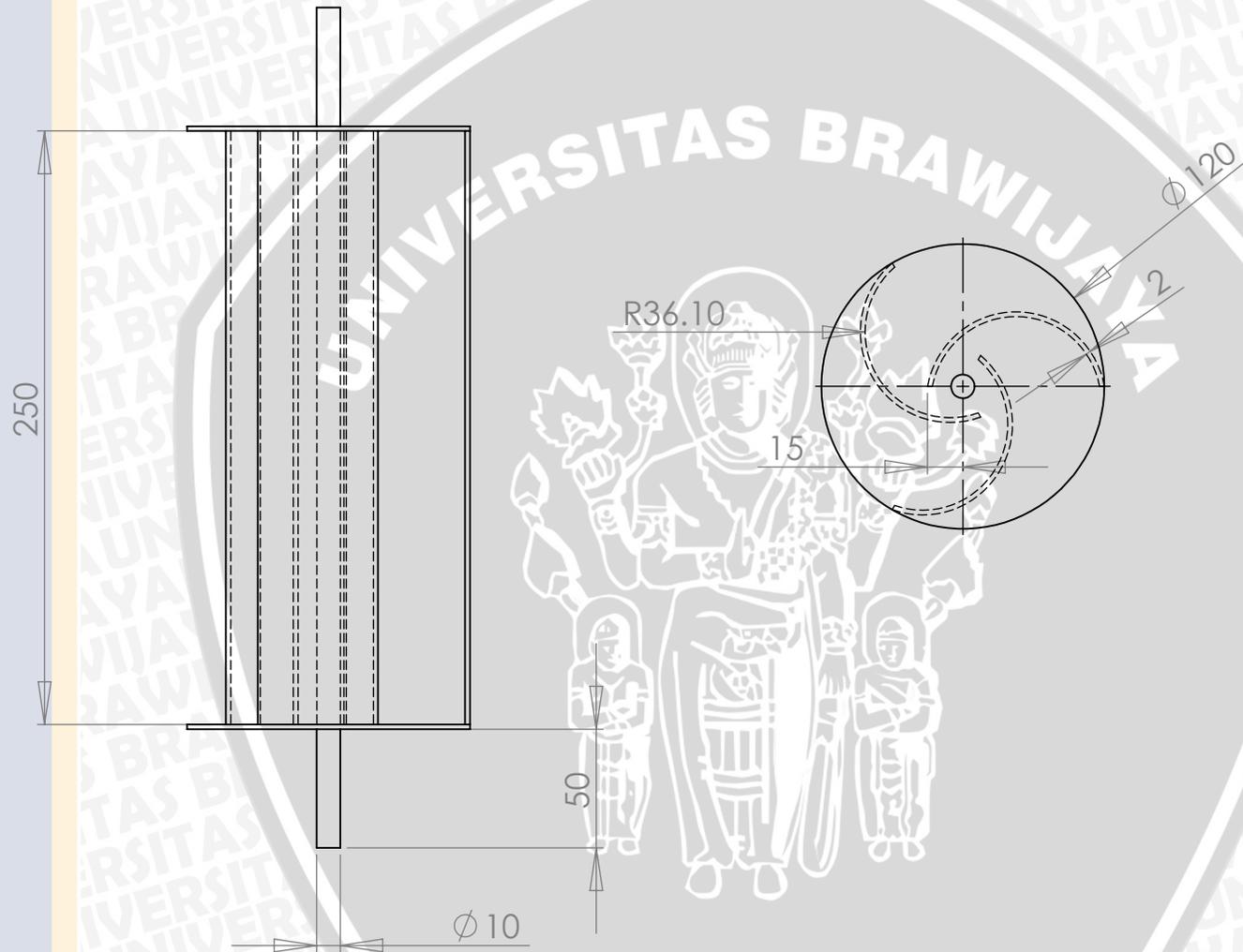
ISOMETRI	SKALA : 1:2	DIGAMBAR : HENDRA ADIYATMA	KETERANGAN :	
	UKURAN : mm	DEPT. : MESIN FT-UB		
	TANGGAL : 07-08-2012	DIPERIKSA :		
TEKNIK MESIN UNIVERSITAS BRAWIJAYA	TURBIN ANGIN JUMLAH SUDU 2		01	A4



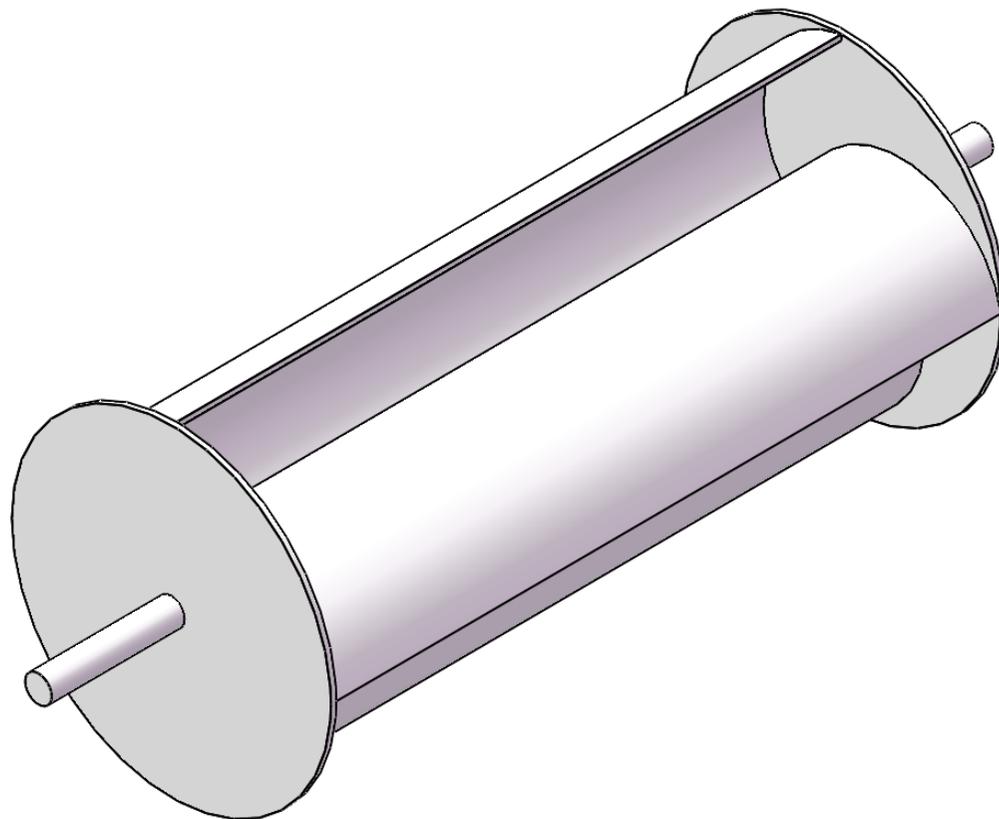
	SKALA : 1:3	DIGAMBAR : HENDRA ADIYATMA	KETERANGAN :	
	UKURAN : mm	DEPT. : MESIN FT-UB		
	TANGGAL : 07-08-2012	DIPERIKSA :		
TEKNIK MESIN UNIVERSITAS BRAWIJAYA	TURBIN ANGIN JUMLAH SUDU 2		02	A4



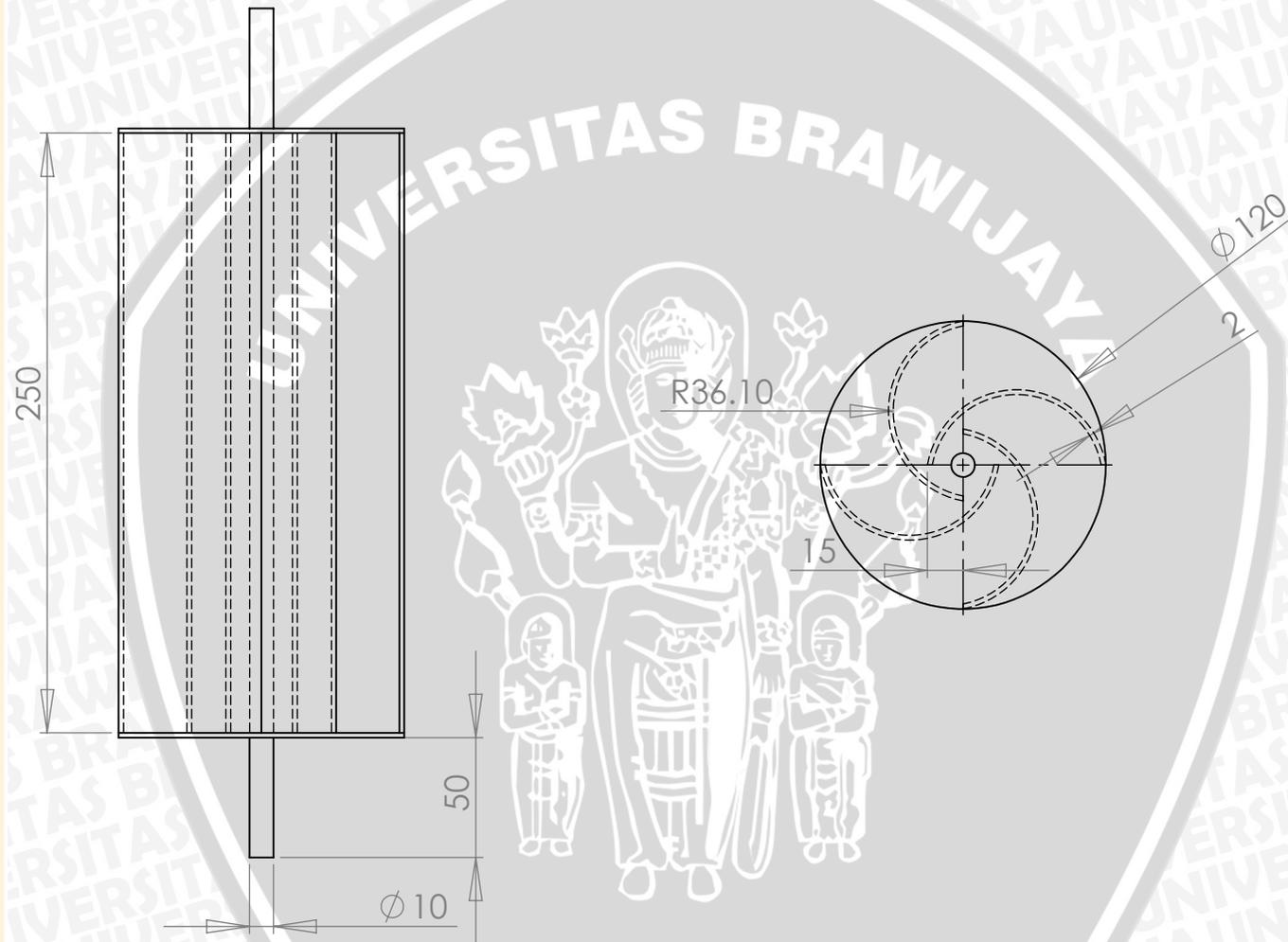
ISOMETRI	SKALA : 1:2	DIGAMBAR : HENDRA ADIYATMA	KETERANGAN :	
	UKURAN : mm	DEPT. : MESIN FT-UB		
	TANGGAL : 07-08-2012	DIPERIKSA :		
TEKNIK MESIN UNIVERSITAS BRAWIJAYA	TURBIN ANGIN JUMLAH SUDU 3		03	A4



	SKALA : 1:3	DIGAMBAR : HENDRA ADIYATMA	KETERANGAN :	
	UKURAN : mm	DEPT. : MESIN FT-UB		
	TANGGAL : 07-08-2012	DIPERIKSA :		
TEKNIK MESIN UNIVERSITAS BRAWIJAYA	TURBIN ANGIN JUMLAH SUDU 3		04	A4



ISOMETRI	SKALA : 1: 2	DIGAMBAR : HENDRA ADIYATMA	KETERANGAN :	
	UKURAN : mm	DEPT. : MESIN FT-UB		
	TANGGAL : 07-08-2012	DIPERIKSA :		
TEKNIK MESIN UNIVERSITAS BRAWIJAYA	TURBIN ANGIN JUMLAH SUDU 4		05	A4



	SKALA : 1:3	DIGAMBAR : HENDRA ADIYATMA	KETERANGAN :	
	UKURAN : mm	DEPT. : MESIN FT-UB		
	TANGGAL : 07-08-2012	DIPERIKSA :		
TEKNIK MESIN UNIVERSITAS BRAWIJAYA	TURBIN ANGIN JUMLAH SUDU 4		06	A4