

**PENGARUH JUMLAH BILAH TERHADAP UNJUK KERJA TURBIN  
ANGIN TIPE BILAH BERSIRIP**

**SKRIPSI  
KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
Memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

**MOKHAMAD IKHWANUL KHOIRON**  
**NIM. 0910620079 - 62**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN  
UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
MALANG  
2014**

## LEMBAR PERSETUJUAN

### PENGARUH JUMLAH BILAH TERHADAP UNJUK KERJA TURBIN ANGIN TIPE BILAH BERSIRIP

#### SKRIPSI KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
Memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:  
**MOKHAMAD IKHWANUL KHOIRON**  
NIM. 0910620079 – 62

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

**Dosen Pembimbing 1**

**Dosen Pembimbing 2**

**Agung Sugeng W, ST., MT., Ph.D**  
NIP. 19710321 199802 1 001

**Francisca Gayuh Utami Dewi ST., MT.**  
NIP. 820219 06 1 2 0259

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala karunia dan rahmat-Nya, juga sholawat serta salam yang tak lupa penulis limpahkan kepada Nabi Muhammad SAW, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan skripsi dengan judul “Pengaruh Jumlah Bilah Terhadap Unjuk Kerja Turbin Angin Tipe Bilah Bersirip” ini dengan baik.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan dan penyelesaian skripsi ini telah dibantu oleh banyak pihak. Oleh sebab itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan skripsi ini:

1. Kedua orang tua saya, yang telah memberikan kasih sayang, doa, motivasi, semangat dan dukungannya baik berupa lahir dan batin yang mereka berikan kepada penulis.
2. Bapak Dr. Eng. Nurcholis Hamidi, ST., M Eng., selaku Ketua Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
3. Bapak Purnami, ST., M.T., selaku Sekretaris Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
4. Bapak Agung Sugeng Widodo, ST., MT., Ph.D, selaku dosen pembimbing I skripsi dan Ketua Kelompok Konsentrasi Konversi Energi Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya yang telah memberikan pengarahan, bimbingan dan memberikan motivasi selama penyusunan skripsi ini.
5. Ibu Francisca Gayuh Dewi Utami, ST., MT., selaku dosen pembimbing II skripsi yang telah memberikan pengarahan, bimbingan dan memberikan motivasi selama penyusunan skripsi ini.
6. Seluruh Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin yang telah banyak memberikan ilmu pengetahuan yang sangat mendukung baik dalam perkuliahan maupun selama penyusunan skripsi saya.
7. Seluruh Staf Administrasi Jurusan Teknik Mesin serta Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
8. M. Kharis Irvan dan teman-teman asisten Laboratorium Fluida yang telah banyak membantu dalam penelitian yang dilaksanakan di Laboratorium Fluida Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

9. Teman-teman Mesin angkatan 2009 “Black Mamba” yang telah menemani perjuangan penulis dalam perkuliahan dan memberikan doa, semangat, serta motivasi.
10. Seluruh pihak terkait yang telah membantu dan tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih jauh dari kata sempurna, oleh karena itu penulis bersedia menerima kritik yang bersifat membangun agar bisa lebih menyempurnakan skripsi ini. Akhirnya penulis berharap semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Malang, Desember 2013

Penulis



## DAFTAR ISI

Halaman

<b>KATA PENGANTAR</b> .....	i
<b>DAFTAR ISI</b> .....	iii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	v
<b>DAFTAR GRAFIK</b> .....	vi
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	vii
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	viii
<b>RINGKASAN</b> .....	ix
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.4 Tujuan Penelitian .....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Jurnal Terkait .....	4
2.2 Angin .....	4
2.2.1 Proses Terbentuknya Angin.....	4
2.2.2 Potensi Angin di Indonesia.....	5
2.2.3 Energi Angin.....	6
2.3 Klasifikasi Turbin Angin .....	7
2.3.1 Turbin Angin Poros Horizontal.....	8
2.3.1 Turbin Angin Poros Vertikal .....	9
2.4 Turbin Angin Poros Vertikal Tipe Bilah Bersirip .....	10
2.4.1 Tinjauan Umum Turbin Angin Poros Vertikal Tipe Bilah Bersirip	10
2.4.2 Prinsip Kerja Turbin Angin Poros Vertikal Tipe Bilah Bersirip .....	11
2.5 Unjuk Kerja Turbin Angin Poros Vertikal Tipe Bilah Bersirip.....	12
2.5.1 Brake Horse Power (BHP).....	12
2.5.2 Torsi (T).....	14



2.5.3 Efisiensi ( $\eta$ ).....	14
2.6 Persamaan .....	15
2.6.1 Teori Betz .....	15
2.6.2 Coefficient of Power ( $C_p$ ) .....	16
2.6.3 Daya pada Turbin Angin Tipe Bilah Bersirip.....	16
2.6.4 Momen Inersia .....	18
2.7 Hipotesa .....	19

### **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

3.1 Metode Penelitian .....	20
3.2 Tempat dan Waktu Pelaksanaan.....	20
3.3 Prosedur Pelaksanaan Penelitian .....	20
3.4 Instalasi Penelitian.....	21
3.5 Peralatan Penelitian .....	21
3.6 Variabel Penelitian .....	27
3.7 Metode Pengambilan Data.....	28
3.8 Diagram Alir Penelitian.....	29

### **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

4.1 Hasil .....	30
4.1.1 Data Hasil Pengujian.....	30
4.1.2 Pengolahan Data .....	33
4.2 Pembahasan .....	36
4.2.1 Hubungan Antara Kecepatan Angin Terhadap Daya Poros (BHP).....	36
4.2.2 Hubungan Antara Kecepatan Angin Terhadap Torsi (T) .....	37
4.2.2 Hubungan Antara Kecepatan Angin Terhadap Efisiensi ( $\eta$ ) .....	38

### **BAB V PENUTUP**

5.1.Kesimpulan .....	40
5.2.Saran .....	40

### **DAFTAR PUSTAKA**

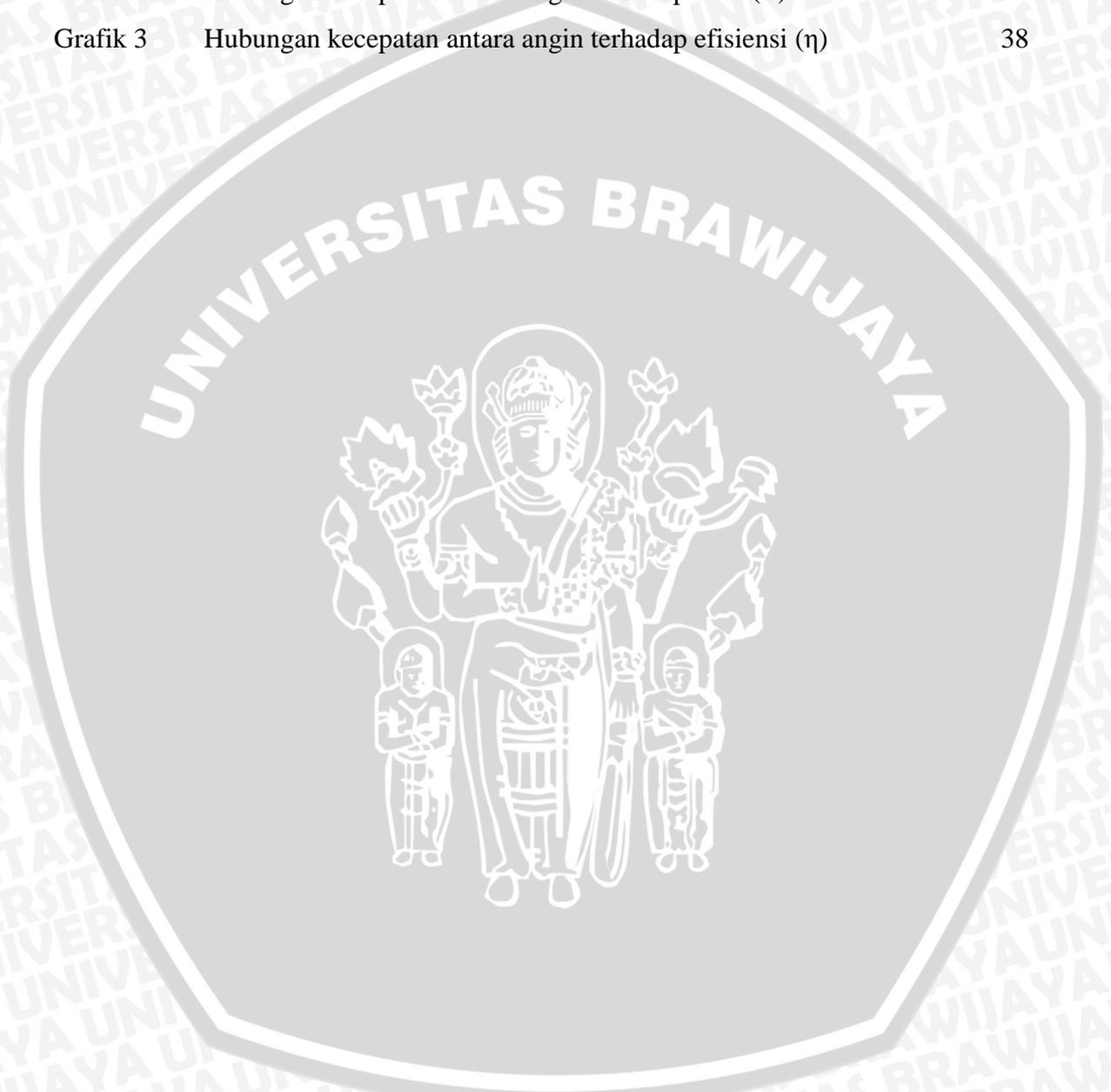
### **LAMPIRAN**

## DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Kecepatan dan arah aliran angin di Indonesia	5
Gambar 2.2	Prinsip kerja tipe savonius	8
Gambar 2.3	Prinsip kerja Tipe darrieus	9
Gambar 2.4	Turbin Angin H-Rotor	10
Gambar 2.5	Model turbin angin vertikal tipe bilah bersirip	11
Gambar 2.6	Ilustrasi Pergerakan Sirip Saat Membuka dan menutup	12
Gambar 2.7	Pengukuran Tegangan DC	13
Gambar 2.8	Pengukuran Arus DC	14
Gambar 2.9	Asumsi Teori Betz	15
Gambar 2.10	Performance of main conventional wind machine	21
Gambar 3.1	Instalasi turbin	21
Gambar 3.2	Centrifugal blower	22
Gambar 3.3	Wind tunnel	23
Gambar 3.4	Spesifikasi Wind Tunnel	23
Gambar 3.5	Desain turbin tipe bilah bersirip	24
Gambar 3.6	Digital Anemometer	25
Gambar 3.7	Digital tachometer	25
Gambar 3.8	Digital multimeter	26
Gambar 3.9	Generator listrik	27
Gambar 3.10	Diagram Alir Penelitian	29

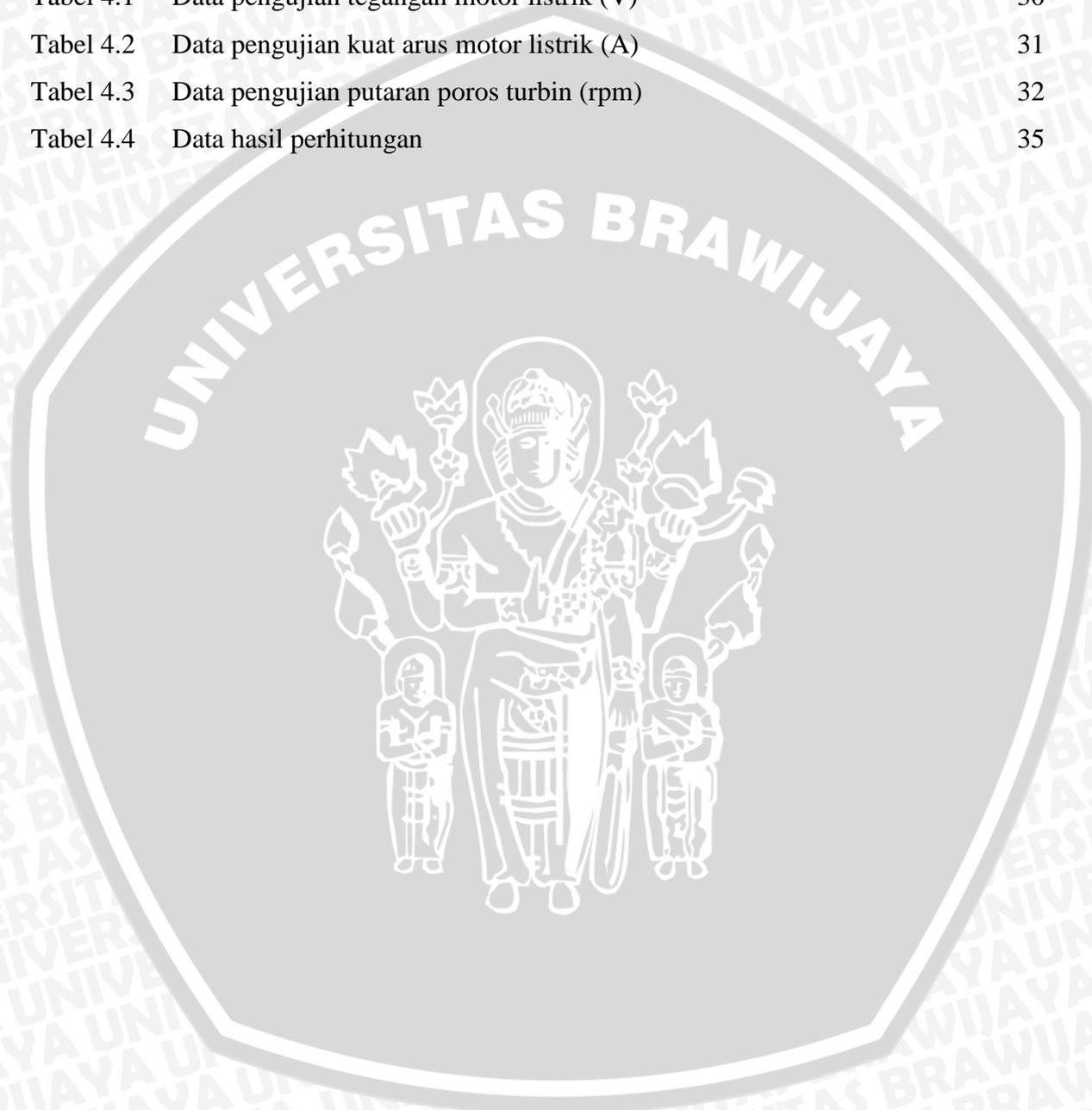
## DAFTAR GRAFIK

No.	Judul	Halaman
Grafik 1	Hubungan kecepatan antara angin terhadap daya poros (BHP)	36
Grafik 2	Hubungan kecepatan antara angin terhadap torsi (T)	37
Grafik 3	Hubungan kecepatan antara angin terhadap efisiensi ( $\eta$ )	38



**DAFTAR TABEL**

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Pemanfaatan energi angin di Indonesia	6
Tabel 4.1	Data pengujian tegangan motor listrik (V)	30
Tabel 4.2	Data pengujian kuat arus motor listrik (A)	31
Tabel 4.3	Data pengujian putaran poros turbin (rpm)	32
Tabel 4.4	Data hasil perhitungan	35



## DAFTAR LAMPIRAN

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

Lampiran 2 Model Turbin Angin Poros Vertikal Tipe Bilah Berserip



## RINGKASAN

*Mokhamad Ikhwanul Khoiron, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juli 2013, Pengaruh Jumlah Bilah Terhadap Unjuk Kerja Turbin Angin Tipe Bilah Bersirip, Dosen Pembimbing: Agung Sugeng Widodo dan Francisca Gayuh*

Teknologi yang semakin berkembang menyebabkan manusia mulai mencari sumber-sumber energi alternatif untuk menggantikan sumber energi konvensional. Salah satu energi alternatif yang mudah didapatkan dan digunakan adalah energi dari angin. Di Indonesia, penggunaan turbin angin sangat cocok, mengingat daerah pesisir pantai yang luas, karena pada daerah tersebut memiliki energi angin yang lebih kencang.

Pada penelitian ini menggunakan turbin angin tipe bilah bersirip yang termasuk kategori turbin angin poros vertikal. Turbin ini menggunakan sirip yang bisa membuka dan menutup sesuai dengan arah datangnya angin sehingga dapat menurunkan energi drag. Sirip-sirip pada bilah akan terbuka apabila berlawanan dengan arah datangnya angin dan putaran poros sehingga akan menurunkan energi drag, dan sebaliknya.

Penelitian dilakukan dengan instalasi wind tunnel di Laboratorium Mesin Mesin Fluida Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang. Metode yang digunakan adalah metode penelitian eksperimental nyata (true experimental research). Variabel bebas dalam penelitian ini adalah variasi kecepatan angin sebesar 3, 4, 5, 6, dan 7 m/s serta jumlah bilah 2 buah, 3 buah, 4 buah. Variabel terikat dalam penelitian ini yaitu Daya poros, Torsi, dan Efisiensi yang dihasilkan turbin angin tipe bilah bersirip. Sedangkan variabel terkontrol dalam penelitian ini adalah panjang dan lebar masing-masing adalah 25 cm dan 6 cm dengan suhu ruangan 27°C. Dari hasil pengujian dan pengolahan data menunjukkan bahwa jumlah bilah pada turbin angin tipe bilah bersirip berpengaruh terhadap unjuk kerja turbin angin tipe bilah bersirip. Nilai BHP tertinggi diperoleh dengan jumlah bilah 2 buah yaitu sebesar  $9,8 \times 10^{-2}$  Watt pada kecepatan angin 7 m/s. Nilai torsi tertinggi pada turbin angin diperoleh dengan jumlah bilah 2 buah sebesar  $3,54 \times 10^{-3}$  Nm pada kecepatan angin 7m/s. Sedangkan, nilai efisiensi tertinggi pada turbin yang diperoleh dengan jumlah bilah 2 buah sebesar 6,08 % pada kecepatan angin 5 m/s.

**Kata kunci:** turbin angin bilah bersirip, jumlah bilah, unjuk kerja.

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar belakang

Penggunaan energi alternatif merupakan suatu topik yang mulai banyak dibahas. Hal ini disebabkan karena teknologi semakin berkembang yang menyebabkan manusia mulai mencari sumber-sumber energi alternatif untuk menggantikan sumber energi konvensional. Energi konvensional sendiri merupakan sumber energi yang terbatas, yang tidak dapat diperbarui sehingga perlu dikembangkan pemanfaatan energi alternatif lainnya yang dapat diperbarui. Salah satu energi alternatif yang mudah didapatkan dan digunakan adalah energi dari angin. Penggunaan turbin angin yang paling baik adalah di daerah pesisir dimana tempat tersebut anginnya berpotensi lebih kencang, karena perbedaan densitas udara yang berubah antara daratan dan lautan yang terjadi setiap waktu. Energi angin dapat dimanfaatkan mulai dari pembangkit listrik hingga penggerak mekanik untuk keperluan lain. Salah satu alat yang digunakan untuk memanfaatkan energi angin adalah turbin angin.

Angin sebagai potensi energi sebenarnya bukan hal yang baru di tengah peradaban manusia. Penggunaan angin melalui turbin atau kincir sudah dikenal sejak jaman dahulu kala. Pada awalnya turbin angin dibuat untuk mengakomodasi kebutuhan para petani dalam penggilingan padi, keperluan irigasi, dan sebagainya. Seiring dengan perkembangan teknologi saat ini, penggunaan turbin angin kini sudah dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan listrik masyarakat, dengan menggunakan prinsip konversi energi. Prinsip konversi energi dari turbin angin adalah mengubah energi kinetik yang dimiliki angin, menjadi energi mekanik pada turbinnya. Selanjutnya dengan menggunakan generator energi mekanik diubah menjadi energi listrik dengan menghubungkan poros dengan generator.

Turbin dikelompokkan menjadi 2 jenis berdasarkan arah sumbu rotasinya, yaitu *Vertical Axis Wind Turbine* (VWAT) dan *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT). Turbin jenis *Axis Wind Turbine* (VWAT) ini memiliki poros atau sumbu rotor utama yang disusun tegak lurus terhadap permukaan tanah. Turbin tipe ini memang memiliki efisiensi lebih kecil dibandingkan dengan *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT). Tetapi ada beberapa kelebihan yang dimiliki *Axis Wind Turbine* (VWAT) diantaranya adalah aman, mudah membangunnya, dan yang paling utama adalah turbin ini tidak memerlukan *yaw*, yaitu sistem yang mengatur posisi bilah/sudu agar menghadap arah angin, sehingga dapat digerakkan dengan berbagai arah angin. Dengan demikian dapat digunakan di tempat-tempat yang memiliki arah angin yang bervariasi. Oleh karena itu, turbin ini sangat cocok bila diletakkan di daerah pesisir

pantai Indonesia. Menurut data dari *World Wind Energy Association* (WWEA), Indonesia menempati urutan ke-84 dunia dalam pemanfaatan energi angin, yaitu hanya 1,4 MW (WWEA, 2011). Hal ini menunjukkan bahwa sangat rendahnya pemanfaatan energi angin di Indonesia sekarang ini.

Sebuah contoh pengaplikasian, puluhan turbin angin setinggi 48 meter berdiri kokoh menghiasi pegunungan di dekat kota Dali China. Berada di ketinggian 300 meter di atas permukaan laut, teknologi tersebut menjadi lambang keseriusan China dalam mengungkap energi yang ramah lingkungan. Setiap turbin di Dali mampu menghasilkan listrik sebanyak 30,75 MegaWatt. Dengan 41 turbin yang ada maka jumlah energi listrik yang dihasilkan sama dengan pembakaran 20 ribu ton batubara. Diperkirakan penggunaan turbin angin di Dali mampu mengurangi emisi hingga 50 ribu ton karbon dioksida per tahun.

Penelitian oleh Marnoto (2010), mengenai turbin angin vertikal jenis bilah bersirip dengan variasi panjang (0,3 m; 0,215 m; 0,155 m), lebar bilah (0,3 m; 0,25 m; dan 0,2 m), jumlah sirip tiap bilah (10, 7, 5) dan variasi kecepatan angin antara 3,1-7,8 m/s, didapatkan sebuah kesimpulan bahwa variasi di atas dapat mempengaruhi efisien sebesar 23,54 % dan turbin dapat berputar pada kecepatan angin minimal sebesar 3,1 m/s.

Dari penelitian sebelumnya yang dilaksanakan oleh Trifiananto (2012), dengan variasi kecepatan angin 3, 4, 5, 6, 7 m/s dan variasi panjang bilah 0,15 m; 0,2 m; 0,25 m telah diperoleh daya poros tertinggi yang dicapai turbin dengan panjang bilah 0,25 m yaitu sebesar  $3 \times 10^{-3}$  Watt pada kecepatan 7 m/s. Torsi yang tertinggi dicapai oleh turbin dengan panjang bilah 0,25 m dan kecepatan 7 m/s yaitu sebesar  $1,52 \times 10^{-4}$  Nm. Untuk efisiensi yang tertinggi diperoleh pada bilah dengan panjang 0,25 m dan kecepatan angin 4 m/s sebesar 0,18%.

Untuk memperoleh unjuk kerja turbin angin yang optimal maka ada beberapa hal yang perlu diperhatikan di antaranya adalah jumlah bilah untuk turbin angin tipe bilah bersirip. Dengan memvariasikan jumlah bilah tersebut maka kita bisa mengetahui jumlah bilah untuk suatu turbin angin agar dapat dicapai unjuk kerja maksimalnya.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, dapat dirumuskan suatu permasalahan sebagai berikut:

- Bagaimana pengaruh jumlah bilah terhadap unjuk kerja turbin angin tipe bilah bersirip?

### 1.3 Batasan Masalah

Berdasarkan rumusan masalah diatas, maka dalam penelitian ini diberikan batasan masalah sebagai berikut:

1. Udara sebagai fluida kerja.
2. Variasi kecepatan angin yang digunakan pada penelitian ini yang dilakukan pada *wind tunnel* adalah 3; 4; 5; 6; 7 m/s.
3. Panjang setiap bilah 25 cm, dan lebarnya 10 cm.
4. Variasi jumlah bilah adalah 2 bilah, 3 bilah dan 4 bilah.
5. Dalam penelitian ini, unjuk kerja turbin angin tipe bilah bersirip adalah torsi, daya poros, dan efisiensi.

### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi jumlah bilah pada setiap turbin terhadap unjuk kerja turbin angin bilah bersirip.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini dapat diketahui sebagai berikut:

1. Sebagai media untuk mengaplikasikan teori yang diperoleh selama perkuliahan, khususnya mengenai mekanika fluida dan konversi energi.
2. Menambah pemahaman tentang energi alternatif yang mana dalam hal ini adalah energi angin untuk masyarakat.
3. Dapat dijadikan sebagai referensi tambahan bagi penelitian lebih lanjut mengenai usaha pemanfaatan energi yang ramah lingkungan.
4. Dapat mengetahui unjuk kerja dari turbin angin bilah bersirip yang tergolong baru.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Jurnal Terkait

Penelitian yang dilakukan oleh Marnoto (2011), turbin angin poros vertikal model bilah bersirip lebih efisien dibandingkan dengan tipe *savonius rotor* dan dapat diterapkan di semua daerah yang memiliki kecepatan dan arah angin yang berubah-ubah. Tipe ini juga memiliki beberapa kelebihan antara lain: aman, mudah pembangunannya, bisa dipasang tidak jauh dari tanah, dan dapat menangkap angin dari berbagai arah sehingga tidak membutuhkan *yaw*. Bilah kincir angin dari turbin angin poros vertikal berputar secara horizontal pada sumbu vertikal terhadap tanah, sehingga setiap bilah turbin mengalami *headwind* dan *tailwind*. *Headwind* terjadi ketika arah bilah berlawanan dengan arah angin yang masuk sedangkan *tailwind* terjadi ketika arah bilah sama dengan arah angin yang masuk. *Headwind* cenderung menghambat rotasi sehingga dapat menyebabkan koefisien kincir turun maksimum sekitar 16% (Gasch & Twele, 2002). Masalah ini dapat dipecahkan dengan merancang bilah kincir khusus yang dapat memperkecil *headwind* dengan mekanisme buka tutup. Sirip sirip akan terbuka pada posisi bilah berlawanan arah dengan angin, dan sebaliknya sirip-sirip akan menutup jika searah dengan arah angin karena dorongan angin itu sendiri.

Dari hasil penelitian kincir angin tipe bilah bersirip yang dilakukan Marnoto (2010) model kincir angin ini rata-rata dapat berputar pada kecepatan angin terendah 3,1 m/s. Pada penelitian tersebut diberikan variasi kecepatan angin antara 3,1-7,8 m/s dengan power 0,008-2,93W dan efisiensinya mencapai 2,17-23,54%. Efisiensi tertinggi dicapai oleh turbin dengan panjang bilah 0,215 m, lebar bilah 0,3 m, jumlah sirip tiap bilah 7, dan torsi 0,545.

#### 2.2 Angin

##### 2.2.1 Proses Terbentuknya Angin

Angin merupakan udara yang bergerak yang diakibatkan rotasi bumi dan juga karena adanya perbedaan tekanan udara di sekitarnya. Angin bergerak dari tempat bertekanan udara tinggi ke tempat bertekanan udara rendah. Udara akan memuai jika dipanaskan. Udara yang memuai menjadi lebih ringan sehingga naik. Apabila ini terjadi, maka tekanan udara akan menjadi turun karena udaranya berkurang. Lalu udara disekitarnya yang dingin akan mengalir ke tempat yang bertekanan rendah tadi. Udara menyusut menjadi lebih berat dan turun ke tanah. Lalu di atas tanah udara menjadi panas lagi dan naik kembali (Daryanto, 2007).

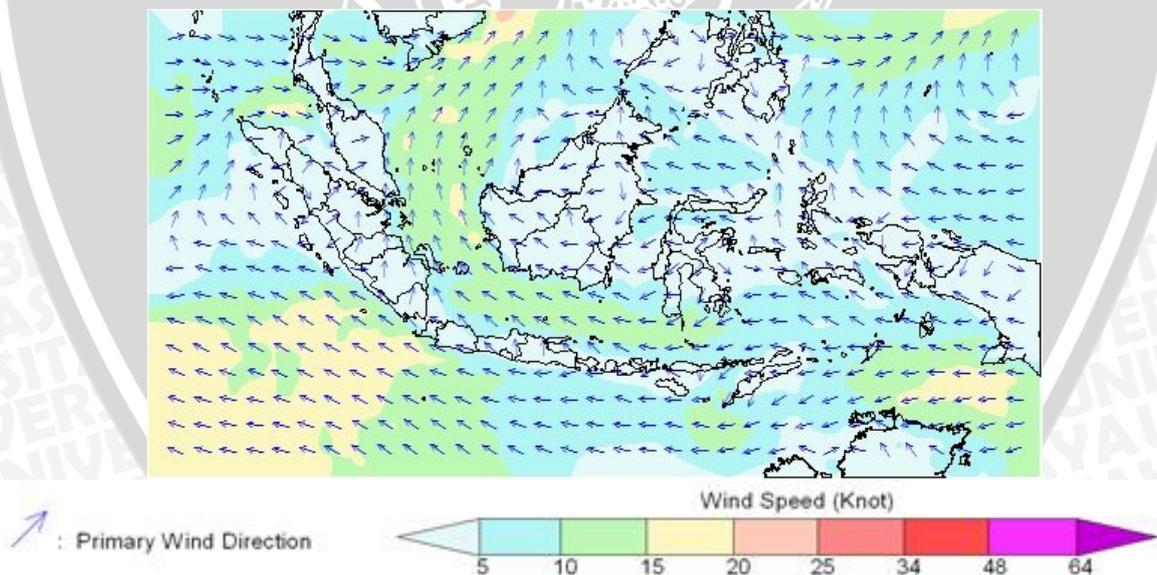
Meskipun pada kenyataannya angin tidak dapat dilihat bagaimana bentuk wujudnya, namun dapat diketahui keberadaannya melalui efek yang ditimbulkan pada benda-benda yang

mendapat hembusan angin. Misalnya saja ketika bendera yang berkibar karena adanya hembusan angin, daun yang berterbangan ketika dihembus angin, dan lain-lain.

### 2.2.2 Potensi Angin di Indonesia

Indonesia merupakan salah satu negara yang berpotensi untuk mengembangkan pembangkit listrik tenaga angin karena Indonesia mempunyai garis pantai keempat terpanjang di dunia yaitu 95.181 kilometer (km). Di tengah potensi angin melimpah di kawasan pesisir Indonesia, total kapasitas terpasang dalam sistem konversi energi angin saat ini kurang dari 800 kilowatt. Di seluruh Indonesia, lima unit kincir angin pembangkit berkapasitas masing-masing 80 kilowatt (kW) sudah dibangun. Mengacu pada kebijakan energi nasional, maka pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) ditargetkan mencapai 250 megawatt (MW) pada tahun 2025.

Secara umum, pemanfaatan energi angin di Indonesia memang kurang mendapat perhatian. Sampai tahun 2011, kapasitas terpasang dari pemanfaatan tenaga angin hanya mencapai 1,4 MW (WWEA, 2011). Padahal kapasitas pembangkitan listrik tenaga angin di dunia telah berkembang pesat dengan laju pertumbuhan yang kumulatif. Aliran angin yang mengalir melewati wilayah Indonesia seperti pada gambar di bawah ini, cukup mempunyai potensi untuk dikonversikan menjadi sumber energi.



Gambar 2.1: Kecepatan dan arah aliran angin di Indonesia

Sumber: [http://maritim.bmkg.go.id/index.php/main/peta\\_prakiraan/peta\\_angin](http://maritim.bmkg.go.id/index.php/main/peta_prakiraan/peta_angin)

Tabel 2.1 Pemanfaatan energi angin di Indonesia

Kelas	Kec. Angin (m/s)	Daya spesifik (W/m <sup>2</sup> )	Kapasitas (kW)	Lokasi (wilayah)
Skala kecil	2,5-4	<75	0-10	Jawa, NTB, NTT, Maluku, Sulawesi
Skala menengah	4-5	75-150	10-100	NTB, NTT, Sulsel, Sultra, Selatan Jawa
Skala besar	>5	>150	>100	Sulsel, NTB, NTT, Pantai Selatan Jawa

Sumber: Diolah dari Kementerian Riset dan Teknologi (2010)

### 2.2.3 Energi Angin

Model sederhana dari turbin angin mengambil dasar teori dari momentum, angin dengan kecepatan tertentu menabrak rotor yang memiliki performa sayap atau propeller. Menurut ilmu fisika, energi kinetik sebuah benda dengan massa  $m$  dan kecepatan  $v$  dirumuskan sesuai dengan rumus 2-1 berikut, dengan ketentuan  $v$  tidak mendekati kecepatan cahaya.

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

dengan:

$E$  : energi dari udara yang bergerak (Joule)

$m$  : massa udara (kg)

$v$  : kecepatan angin (m/detik)

Rumus 2-1 juga berlaku untuk angin yang merupakan udara yang bergerak. Bilamana suatu “blok” udara mempunyai penampang  $A$  dan bergerak dengan kecepatan  $v$ , maka jumlah massa yang melewati suatu tempat dapat dilihat dengan rumus 2-2 dibawah ini:

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

dengan:

$\dot{m}$  : laju alir massa (kg/s)

$\rho$  : massa jenis udara (kg/m<sup>3</sup>)

$v$  : kecepatan angin (m/detik)

$A$  : luas penampang (m<sup>2</sup>)

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

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

$$\begin{aligned} P &= (1/2m.v^2)/t \\ &= 1/2. m/t. v^2 \\ &= 1/2. m. v^2 \\ &= \rho.A.v^3 \end{aligned}$$

dengan:

- P : daya angin (Watt)  
Work : energi angin (Joule)  
 $\rho$  : massa jenis udara (kg/m<sup>3</sup>)  
v : kecepatan angin (m/detik)  
A : luas penampang (m<sup>2</sup>)

### 2.3 Klasifikasi Turbin Angin

Turbin angin merupakan mesin dengan sudu berputar yang mengonversikan energi kinetik angin menjadi energi mekanik. Jika energi mekanik digunakan langsung secara permesinan seperti pompa atau *grinding stones*, maka mesin (turbin) disebut *windmill*. Jika energi mekanik dikonversikan menjadi energi listrik, maka mesin disebut turbin angin atau *wind energy converter* (WEC).

Turbin angin sebagai mesin konversi energi dapat digolongkan berdasarkan prinsip aerodinamik yang dimanfaatkan rotornya. Berdasarkan prinsip aerodinamik, turbin angin dibagi menjadi dua bagian yaitu:

1. Jenis *drag* yaitu prinsip konversi energi yang memanfaatkan selisih koefisien *drag*.
2. Jenis *lift* yaitu prinsip konversi energi yang memanfaatkan gaya *lift*.

Turbin angin terdahulu banyak dibangun di Denmark, Belanda dan negara-negara Eropa lainnya, turbin ini biasanya disebut juga dengan *windmill*. Dan saat ini, turbin angin lebih banyak digunakan untuk mengakomodasi kebutuhan listrik masyarakat, dengan menggunakan prinsip konversi energi dan menggunakan sumber daya alam yang dapat diperbaharui yaitu angin (Daryanto, 2007).

Pengelompokan turbin angin berdasarkan prinsip aerodinamik pada rotor yang dimaksud yaitu apakah rotor turbin angin mengekstrak energi angin memanfaatkan gaya *drag* dari aliran udara yang melalui sudu rotor atau rotor angin mengekstrak energi angin dengan memanfaatkan gaya *lift* yang dihasilkan aliran udara yang melalui profil aerodinamis sudu. Kedua prinsip aerodinamik yang dimanfaatkan turbin angin memiliki perbedaan putaran pada rotornya, dengan prinsip gaya *drag* memiliki putaran rotor relatif rendah dibandingkan turbin angin yang rotornya menggunakan prinsip gaya *lift*.

Jika dilihat dari arah sumbu rotasi rotor, turbin angin dapat dibagi menjadi dua bagian yaitu:

1. Turbin angin sumbu horisontal
2. Turbin angin sumbu vertikal

### 2.3.1 Turbin Angin Poros Horisontal

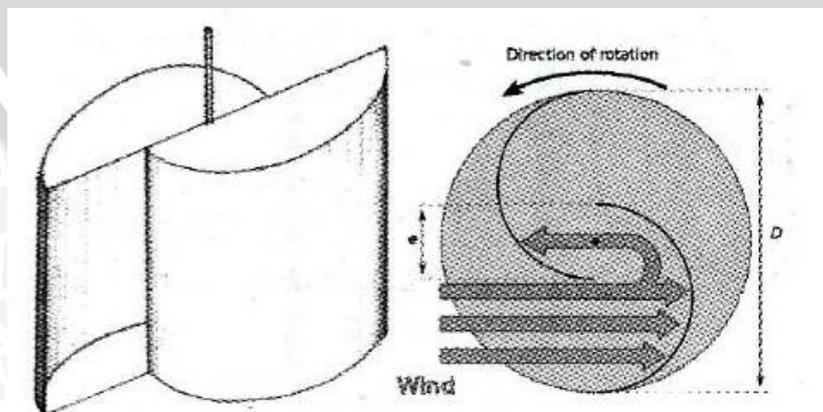
Turbin angin yang mempunyai poros horizontal mempunyai bilah yang berputar dalam bidang vertikal seperti halnya propeller pesawat terbang. Turbin angin biasanya memiliki bilah dengan bentuk irisan melintang khusus dimana aliran udara pada salah satu sisinya bergerak lebih cepat dari udara disisi yang lain ketika angin melewatinya. Fenomena ini menimbulkan daerah tekanan rendah pada belakang bilah dan daerah tekanan tinggi di depan bilah. Perbedaan tekanan ini menimbulkan bilah berputar.

### 2.3.2. Turbin Angin Poros Vertikal

Ada berbagai tipe turbin angin poros vertikal yang sering digunakan, diantaranya adalah tipe *Savonius*, tipe *Darrieus*, tipe H-Rotor.

#### a. Tipe *Savonius*

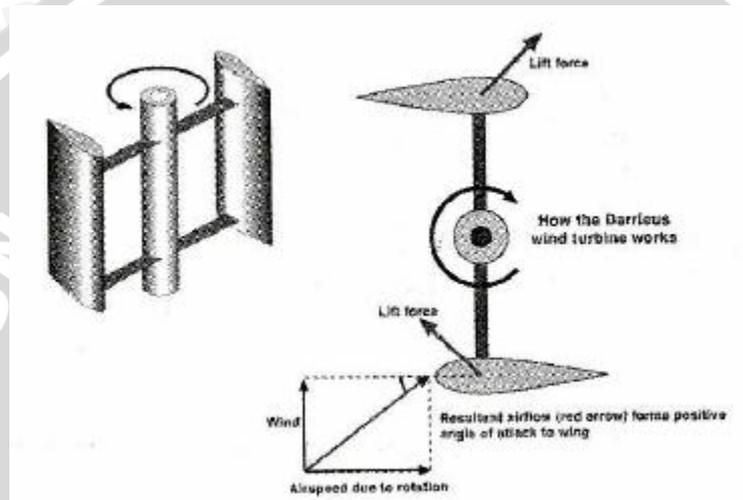
Turbin tipe *savonius* diciptakan oleh seorang insinyur dari Finlandia SJ Savonius pada tahun 1929. Kincir pada turbin ini merupakan yang paling sederhana dan menjadi versi besar dari *anemometer*. Kincir *Savonius* dapat berputar karena adanya daya dorong dari angin sehingga putaran rotor pun tidak akan melebihi kecepatan angin. Meskipun daya koefisien untuk jenis turbin angin bervariasi antara 30% sampai 40%, menurut banyak peneliti untuk jenis turbin *Savonius* biasanya tidak lebih dari 25%. Jenis turbin ini cocok untuk aplikasi daya yang rendah dan biasanya digunakan pada kecepatan angin yang berbeda. (*Savonius* SJ. The S-Rotor and its application : 1931)



Gambar 2.2 Prinsip kerja tipe *savonius*  
Sumber: Marnoto Tjukup, 2010

### b. Tipe *Darrieus*

Tipe ini ditemukan oleh seorang insinyur Perancis George Jean Marie Darrieus yang dipatenkan pada tahun 1931. Ia memiliki 2 bentuk turbin yang digunakan diantaranya adalah “*eggbeater/curved bladed*” dan “*straightbladed*”. Sketsa dari kedua variasi konsep Darrieus ditunjukkan dalam gambar 2.3 kincir angin Darrieus mempunyai bilah-bilah yang disusun dalam posisi simetri dengan bilah-bilah yang diatur relatif terhadap poros. Pengaturan ini cukup efektif untuk menangkap berbagai arah angin. Berbeda dengan *Savonius*, kincir angin *Darrieus* bergerak dengan memanfaatkan gaya angkat yang terjadi ketika angin bertiup. Bilah-bilah turbin *Darrieus* bergerak berputar mengelilingi sumbu.

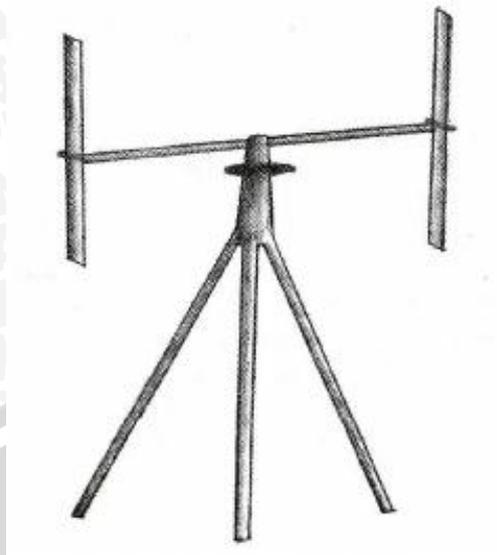


Gambar 2.3 Prinsip kerja Tipe *Darrieus*

Sumber: Marnoto Tjukup, 2010

### c. Tipe H-Rotor

Tipe ini dikembangkan di Inggris melalui penelitian yang dilakukan selama 1970-1980an, diuraikan bahwa yang digunakan pada pisau berbilah lurus (*straight-bladed*) Darrieus tidak diperlukan, ternyata telah ditemukan bahwa efek hambatan yang diciptakan oleh sebuah pisau akan membatasi kecepatan aliran angin. Oleh karena itu, H-Rotor akan mengatur semua kecepatan angin untuk mencapai kecepatan putaran optimalnya.



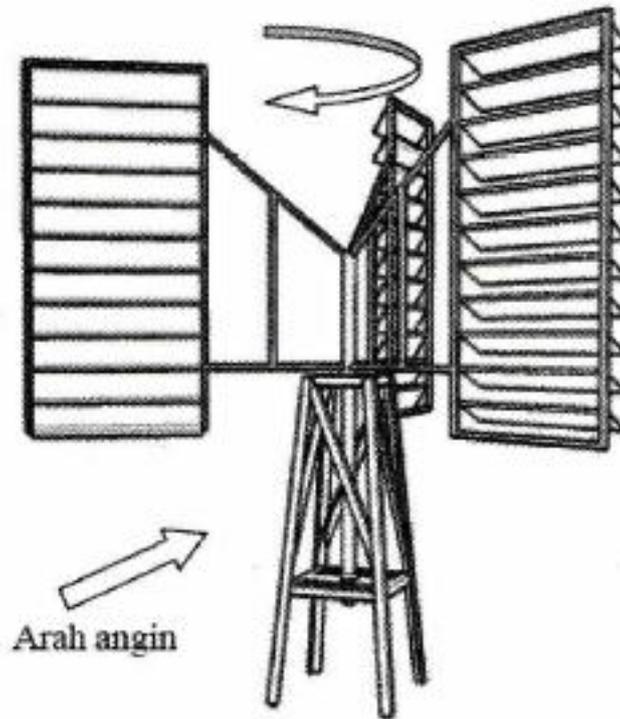
Gambar 2.4 Turbin Angin H-Rotor

Sumber: Marnoto Tjukup, 2010

#### **2.4. Turbin Angin Poros Vertikal Tipe Bilah Bersirip**

##### **2.4.1. Tinjauan Umum Turbin Angin Poros Vertikal Tipe Bilah Bersirip**

Turbin jenis ini tergolong baru yang difokuskan pada peningkatan efisiensi, dengan model yang menurunkan energi *drag* penghambat dan memperluas kolektor energi *drag* (pendorong) sehingga akan meningkatkan efisiensi dan menurunkan kecepatan angin minimum yang dapat memutar turbin. Turbin angin yang dirancang ini menggunakan 2, 3 dan 4 buah bilah bersirip, yang masing-masing bilahnya terdapat 5 sirip. Bilah ini bila berlawanan dengan arah mata angin dan putaran *rotor* maka sirip-sirip akan terbuka sehingga akan menurunkan energi *drag* (penghambat) sebaliknya jika posisi searah dengan arah angin dan putaran *rotor* sirip-sirip akan menutup karena dorongan angin itu sendiri sehingga meningkatkan daya dorong. Dengan rancangan baru ini dapat meningkatkan efisiensi konversi energi dan menurunkan kecepatan angin minimum untuk memutar turbin, sehingga turbin turbin ini dapat diterapkan pada semua lokasi yang memiliki kecepatan dan arah angin yang berubah-ubah.

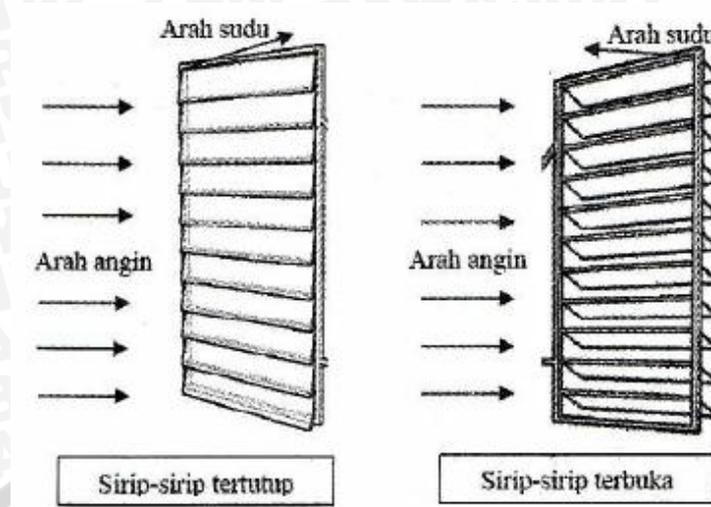


Gambar 2.5 Model turbin angin vertikal tipe bilah bersirip  
Sumber: Marnoto Tjukup, 2010

#### 2.4.2 Prinsip Kerja Turbin Angin Poros Vertikal Tipe Bilah Bersirip

Turbin angin jenis ini memiliki prinsip kerja sama dengan turbin pada umumnya. Dimulai dari pemanfaatan energi kinetik yang dimiliki oleh angin, yang kemudian dikonversikan oleh bilah menjadi energi mekanik pada poros atau *rotor*.

Perbedaan yang mencolok antara turbin angin poros vertikal tipe bilah bersirip dengan turbin angin lainnya adalah mekanisme buka-tutup sirip. Dimana sistem buka tutup ini dimaksudkan untuk mengurangi gaya hambat yang dapat menyebabkan berkurangnya putaran poros. Sehingga luas bilah tidak berpengaruh terhadap gaya penghambat, oleh karena itu luas bilah dapat dibuat lebar agar kolektor angin lebih besar. Dibawah ini adalah ilustrasi saat sirip membuka dan menutup.



Gambar 2.6 Ilustrasi Pergerakan Sirip Saat Membuka Dan Menutup.  
Sumber: Marnoto Tjukup, 2010

Dari gambar diatas terlihat bahwa pada saat *tailwind* sirip-sirip tertutup dan *headwind* sirip-sirip terbuka. *Tailwind* adalah kondisi dimana arah bilah sama dengan arah angin. Sedangkan *headwind* terjadi ketika arah bilah berlawanan dengan arah angin masuk. Kondisi *headwind* cenderung memperlambat rotasi.

## 2.5 Unjuk Kerja Turbin Angin Vertikal Tipe Bilah Bersirip

Dalam pembahasan kali ini, parameter-parameter dari performasi turbin angin yang dibahas adalah *Brake Horse Power (BHP)*, torsi, efisiensi.

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

*Brake Horse Power (BHP)* adalah daya turbin yang diukur sebelum mengalami kerugian energi yang disebabkan oleh *gearbox*, pompa ataupun perangkat tambahan lainnya. Dalam percobaan nantinya *Brake Horse Power (BHP)* diukur dengan menggunakan motor listrik. Dengan mengukur besarnya tegangan dan arus yang dihasilkan maka bisa diketahui besarnya daya, dengan menggunakan hukum ohm seperti pada rumusan.

$$P_{\text{motor}} = V \cdot I \quad (\text{PT. PLN;2001:8}) \quad (2-4)$$

dengan:

$P_{\text{motor}}$  : daya motor listrik (Watt)

$V$  : tegangan motor listrik (Volt)

$I$  : arus listrik (A)

Setelah didapatkan besarnya harga  $P_{\text{motor}}$  maka dapat dihitung besarnya BHP, seperti pada rumus berikut:

$$\text{BHP} = \frac{P_{\text{motor}}}{\eta_{\text{motor}}} \quad (2-5)$$

dengan:

BHP : daya poros motor listrik (Watt)

$P_{\text{motor}}$  : daya motor listrik (Watt)

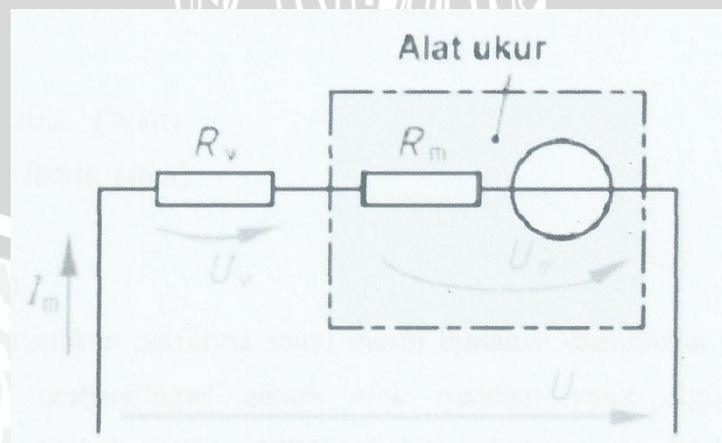
$\eta_{\text{motor}}$  : efisiensi motor listrik (%)

- **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, mempunyai akurasi tinggi dan mudah dioperasikan. Digital multimeter mampu menampilkan beberapa pengukuran untuk arus miliAmpere, temperature °C, tegangan milivolt, resistansi ohm, frekuensi Hz, daya listrik mW sampai kapasitansi.

- ❖ **Pengukuran Tegangan DC**

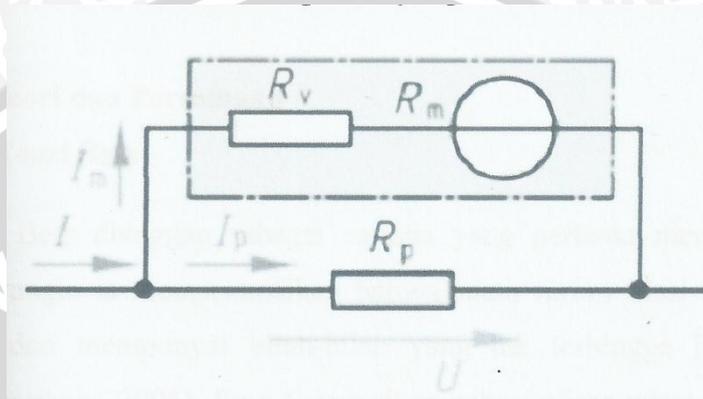
Tegangan DC dapat diukur dengan menggunakan voltmeter, prinsip kerjanya semakin tinggi arus yang melewati voltmeter maka semakin besar medan magnet yang dihasilkan sehingga pembacaan pada layar semakin besar pula. Pengukuran voltmeter memiliki tahanan meter  $R_m$  seperti pada gambar 2.7 tahanan dalam 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

Untuk pengukuran arus DC itu sendiri dapat menggunakan alat Amperemeter. Namun alat ukur ini 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  $R_m$  sebesar  $I_m$ .



Gambar 2.8 Pengukuran Arus DC  
Sumber: PT. PLN (2001)

### 2.5.2 Torsi

Torsi juga bisa disebut dengan momen atau momen gaya yang menyebabkan suatu benda berputar pada sumbu tertentu. Torsi juga dapat didefinisikan sebagai keefektifan gaya tersebut dalam menghasilkan putaran atau rotasi mengelilingi sumbu tersebut (Bueche, 1988 :16). Besarnya torsi juga dapat dihitung dengan menggunakan rumus (2-6).

$$T = \frac{P}{2\pi \cdot \frac{n}{60}} \quad (\text{Musthofa Lutfi; 2008; 232}) \quad (2-6)$$

dengan:

T : torsi (Nm)

P : daya motor listrik (Watt)

n : putaran motor listrik (rpm)

### 2.5.3 Efisiensi

Efisiensi merupakan perbandingan antara efek manfaat yang digunakan dengan pengorbanan yang dilakukan (Fox, 1994) yang biasanya digunakan untuk menyatakan performa suatu mesin. Lebih sederhananya, efisiensi adalah perbandingan antara input dan output yang dinyatakan dalam persen. Seperti pada rumus 2-7 berikut ini,

$$\eta = \frac{P_{\text{usefull}}}{P_{\text{input}}} \times 100\% \quad (\text{Fox; 1994; 570}) \quad (2-7)$$

dengan:

$\eta$  : efisiensi (%)

$P_{\text{usefull}}$  : daya yang bermanfaat (Watt)

$P_{\text{input}}$  : daya yang dikorbankan (Watt)

## 2.6 Persamaan

### 2.6.1 Teori Betz

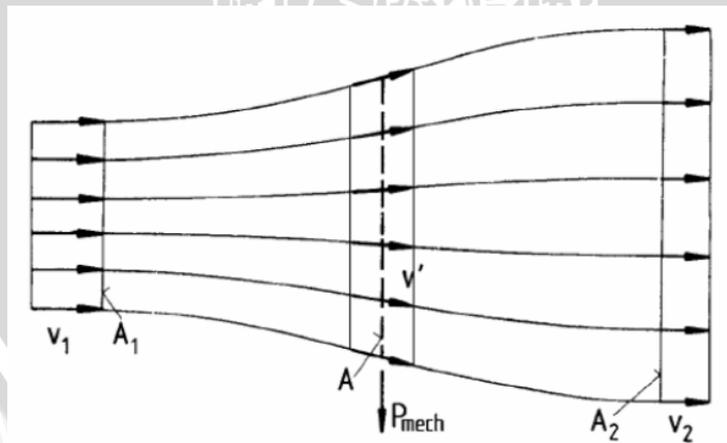
Betz merupakan seorang sarjana yang dianggap telah pertama kali memperkenalkan teori tentang turbin angin, ia mengasumsikan bahwa suatu turbin ideal merupakan rotor tanpa naf (hub) dan mempunyai bilah-bilah yang tak terhingga jumlahnya tanpa hambatan (Reksoatmojo,2004). Juga diasumsikan bahwa aliran udara di depan dan di belakang rotor memiliki kecepatan yang seragam (laminar). Jika  $V_1$ = kecepatan di depan rotor,  $V_2$ = kecepatan di belakang rotor, dan  $V$  = kecepatan angin pada saat melewati rotor, maka berdasarkan persamaan kontinuitas:

$$A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2 \quad (\text{Reksoatmodjo; 2004; 67}) \quad (2-8)$$

dengan:

$A$  : Luas penampang ( $\text{m}^2$ )

$V$  : kecepatan alir udara (m/s)



Gambar 2.9 Asumsi Teori Betz  
Sumber: Hau, 2006

Selanjutnya berdasarkan teorema Euler, gaya yang bekerja pada rotor adalah sebagai berikut :

$$F = \rho \cdot A \cdot V(V_1 - V_2) \quad (2-9)$$

Karena gaya kinetik yang diserap oleh rotor, maka:

$$P = F \cdot V = \rho \cdot A \cdot V^2(V_1 - V_2) \quad (2-10)$$

Selisih energi kinetik di depan dan di belakang rotor dapat dihitung dengan persamaan Bernoulli:

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V (V_1^2 - V_2^2) \quad (2-11)$$

### 2.6.2 Coefficient of Power (Cp)

Cp atau power faktor dapat didefinisikan sebagai rasio antara daya turbin pada poros (Pt) dengan daya angin (Pw) karena energi kinetiknya sebelum mengenai permukaan bilah turbin (Sargolzaei, 2007), berikut ini adalah persamaannya:

$$C_p = P_t / P_w \quad (\text{Sargolzaei, 2007:52}) \quad (2-19)$$

dengan:

Cp : Coefficient of power

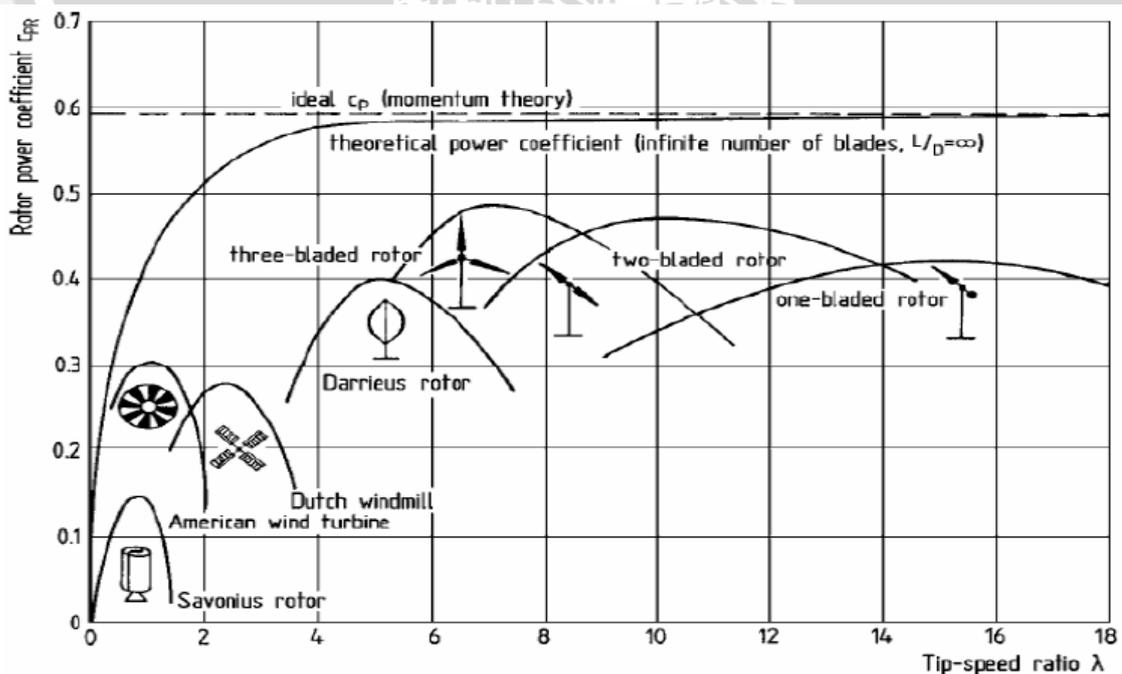
Pt : daya pada poros turbin (Watt)

Pw : daya angin (Watt)

Hasil dari persamaan di atas adalah bilangan tanpa satuan yang menyatakan factor keefektifan dari daya yang dihasilkan dengan arah putaran turbin yang sama. Sehingga bentuk dari bilah sangat berpengaruh pada Cp.

### 2.6.3 Daya pada Turbin Angin Bilah Bersirip

Besarnya gaya yang dapat dibangkitkan dari putaran rotor turbin angin bilah bersirip dapat dihitung melalui pendekatan sebuah teori, yaitu teori Betz. Percobaan Betz itu sendiri dapat dilihat pada gambar (2-11) berikut ini:



Gambar 2.10 Performance of Main Conventional Wind Machines

Sumber: Hau, 2006

Berdasarkan teori Betz yang divisualisasikan dalam bentuk grafik pada gambar 2.11 diatas, menjelaskan bahwa suatu turbin angin terbaik dengan tipe apapun tidak mungkin akan menghasilkan efisiensi rotor yang melebihi angka 56%. Nilai dari efisiensi 56% ini juga sering disebut juga dengan Betz Limit.

Nilai  $C_p$  untuk satu tipe turbin angin tidak selalu sama hal ini dikarenakan 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 sangat perlu diketahui terlebih dahulu besarnya nilai tiap speed ratio yang dihasilkan dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (\text{Fox, 1994: 579}) \quad (2-20)$$

dengan :

$$\omega \quad : \text{kecepatan bilah} = \frac{2\pi n}{60}$$

R : radius rotor (m)

v : kecepatan angin (m/s)

Dengan diketahuinya besar nilai dari  $\lambda$  dapat ditarik suatu garis lurus vertikal pada grafik gambar 2.11 untuk mengetahui berapa besarnya nilai dari  $C_p$  maksimum. Pada turbin angin *Savonius* dengan tinggi rotor H, serta jari-jari rotor R, dan dikenai aliran angin berkecepatan V, maka daya maksimumnya adalah seperti persamaan berikut:

$$P_{\text{aktual}} = C_p \cdot \rho \cdot R \cdot H \cdot v^3 \quad (\text{Menet, 2004: 20}) \quad (2-21)$$

dengan:

$P_{\text{aktual}}$  : daya aktual pada turbin (Watt)

$C_p$  : *coefficient of power*

$\rho$  : massa jenis udara ( $\text{kg/m}^3$ )

R : jari-jari bilah (m)

H : tinggi bilah (m)

v : kecepatan angin (m/s)

Kemudian untuk  $P_{\text{teoritis}}$ , besarnya nilai daya maksimum dapat diketahui dari putaran poros rotor turbin angin *Savonius* saat mengkonversikan energi kinetik aliran angin.

### 2.6.4 Momen Inersia

Momen Inersia **adalah** ukuran kelembaman suatu benda untuk berotasi terhadap porosnya. Besaran ini adalah analog rotasi daripada massa. **Momen inersia** berperan dalam dinamika rotasi seperti massa dalam dinamika dasar, dan menentukan hubungan antara momentum sudut dan kecepatan sudut, momen gaya dan percepatan sudut, dan beberapa besaran lain. Konsep ini diperkenalkan oleh Euler dalam bukunya a *Theoria motus corporum solidorum seu rigidorum* pada tahun 1730. Dalam buku tersebut, dia mengupas momen inersia dan banyak konsep terkait.

$$I = m r^2 \quad (\text{Gorzkowski,2000}) \quad (2-22)$$

dengan

I : Momen Inersia ( $\text{kg/m}^2$ )

m : massa (kg)

r : jari – jari (m)

Besarnya nilai momen inersia berbanding lurus dengan massa, jadi semakin besar massa yang terkandung dalam turbin, semakin besar momen inersia yang dihasilkan. Menurut hukum Newton II, gaya yang yang dihasilkan oleh benda yang bergerak dapat dirumuskan:

$$\Sigma F = m a \quad (\text{Giancoli, 1995}) \quad (2-23)$$

dengan

F : gaya (N m)

m : massa (kg)

a : percepatan ( $\text{m} / \text{s}^2$ )

Menurut hukum Newton, benda bergerak disebabkan oleh gaya. Prinsip ini juga berlaku pada gerak rotasi yang berarti benda bergerak rotasi disebabkan oleh torsi. Akan tetapi, dalam gerak rotasi hukum Newton II dirumuskan seperti persamaan berikut:

$$\Sigma T = I \alpha \quad (\text{Giancoli, 1995}) \quad (2-24)$$

dengan

T : Torsi atau momen gaya (N m)

I : momen inersia ( $\text{kg/m}^2$ )

$\alpha$  : percepatan sudut ( $\text{rad} / \text{s}^2$ )

Jadi momen inersia dan percepatan sudut yang terjadi pada turbin berpengaruh pada torsi yang dihasilkan turbin itu sendiri.

## 2.7 Hipotesa

Semakin banyak jumlah bilah pada suatu turbin angin bertipe bilah bersirip maka akan semakin berkurang putaran pada rotor, sehingga berkurangnya putaran pada rotor akan mengakibatkan daya poros juga akan berkurang begitu juga dengan efisiensi dari turbin angin vertikal tipe bilah bersirip akan berkurang, dan sebaliknya. Hal ini disebabkan karena massa yang terkandung dalam turbin. Jika jumlah bilah semakin banyak, maka massa yang terkandung dalam turbin juga semakin besar, yang menyebabkan putaran poros pada turbin juga berkurang.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



## BAB III

### METODE PENELITIAN

#### 3.1 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental, yaitu melakukan pengamatan untuk mencari data sebab akibat dalam suatu proses yang dilakukan melalui eksperimen sehingga dapat mengetahui pengaruh jumlah bilah terhadap unjuk kerja turbin angin tipe bilah bersirip.

#### 3.2 Tempat dan Waktu Pelaksanaan

Tempat pelaksanaan penelitian ini dilakukan di Laboratorium Fluida Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya dan waktu pelaksanaan penelitian dilakukan pada bulan Juli 2013 – selesai.

#### 3.3 Prosedur Pelaksanaan Penelitian

Prosedur pelaksanaan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

##### 1. Studi Literatur

Studi literatur ini 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 dimulai dengan membuat kerangka bilah turbin berbentuk kotak yang terbuat dari alumunium, kemudian dibuat sirip-sirip yang bahan dasarnya adalah mika dan poros turbin menggunakan alumunium.

##### 4. Perancangan Instalasi

Pada perancangan instalasi dimulai dengan membuat bilah alumunium, kemudian pemasangan poros yang terbuat dari alumunium pada bilah, dan yang terakhir penempatan semua alat pada turbin.

##### 5. Pengambilan Data

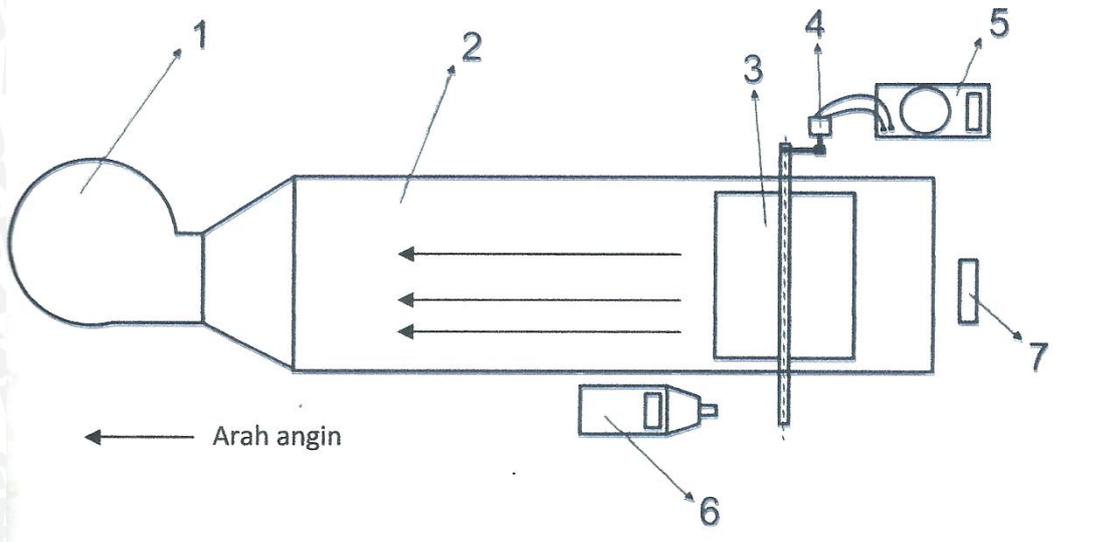
Pengambilan data yang diperlukan dalam penelitian ini adalah voltase, arus, dan putaran. Untuk setiap variasi jumlah sirip dilakukan 3 kali pengambilan data kemudian dirata-rata.

## 6. Pengolahan dan Pembahasan

Setelah pengambilan data selesai dilakukan, maka langkah selanjutnya adalah pengolahan data dengan cara perhitungan dengan rumus-rumus tertentu untuk mendapatkan nilai unjuk kerja turbin. Kemudian nilai-nilai tersebut dibentuk menjadi suatu grafik yang nantinya pada grafik tersebut akan dilakukan pembahasan.

### 3.4 Instalasi Penelitian

Instalasi penelitian dirancang sedemikian rupa, dapat dilihat seperti pada gambar 3.1 berikut ini:



Gambar 3.1 Instalasi Turbin

Keterangan:

1. *Blower*
2. *Wind tunel*
3. Turbin angin vertikal tipe bilah bersirip
4. Motor listrik
5. *Digital multimeter*
6. *Digital tachometer*
7. *Anemometer*

### 3.5 Peralatan Penelitian

Peralatan yang diperlukan guna menunjang penelitian ini antara lain sebagai berikut:

1. *Blower*

Alat ini digunakan untuk mengalirkan udara dari luar menuju turbin melalui *wind tunnel*, sehingga udara dapat menumbuk turbin yang menyebabkan turbin dapat berputar

akibat tumbukan angin yang dialirkan *blower*. Bentuk dari *blower* itu sendiri dapat dilihat pada gambar 3.2 berikut ini:



Gambar 3.2 *Centrifugal blower*

Sumber: Laboratorium Mesin Fluida Teknik Mesin Universitas Brawijaya

Spesifikasi:

Tipe	: U 7181 No. 7076-2977
Model	: 4C 668A
Daya	: 1/6 Hp
Putaran max	: 1600 rpm
Voltase	: 115/230 V
Frekuensi	: 50-60 Hz
Ampere	: 2,6-1,3 A

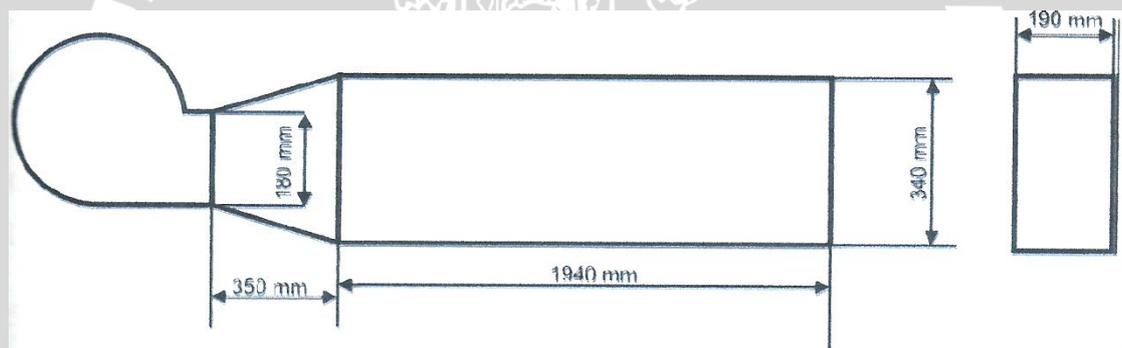
## 2. *Wind tunnel*

Alat ini digunakan sebagai terowongan angin yang mengalirkan udara dari udara luar menuju *blower*, sehingga udara dapat melewati turbin. Penelitian ini menggunakan *wind tunnel* yang terdapat pada Laboratorium Fluida Universitas Brawijaya, seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.3 dan gambar 3.4



Gambar 3.3 *Wind tunnel*

Sumber: Laboratorium Mesin Fluida Teknik Mesin Universitas Brawijaya

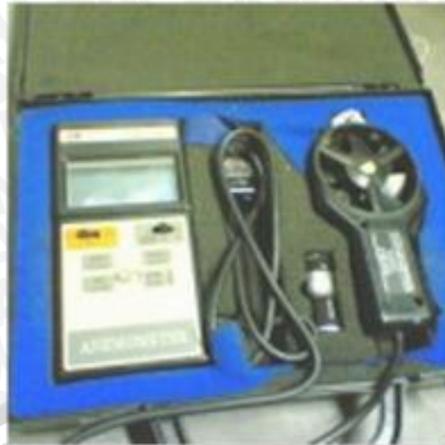


Gambar 3.4 Spesifikasi *wind tunnel*

### 3. Bilah turbin angin vertikal tipe bilah bersirip

Bilah yang digunakan dalam penelitian ini terbuat dari *acrylic* dengan 3 variasi jumlah bilah yang berbeda, poros yang terbuat dari aluminium dan sirip yang terbuat dari *acrylic*.





Gambar 3.6 Anemometer

Sumber : Laboraturium Mesin Fluida Teknik Mesin Universitas Brawijaya

Spesifikasi:

<i>Measuring Range</i>	: -10-45°C
<i>Wind speed measuring range</i>	: 0,3-30 m/s °C/°F selection
<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

#### 5. Digital tachometer

*Digital tachometer* digunakan untuk mengukur kecepatan putar dari poros turbin dalam rpm, seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.6



Gambar 3.7 Digital Tachometer

Sumber: Laboraturium Mesin Fluida Teknik Mesin Universitas Brawijaya

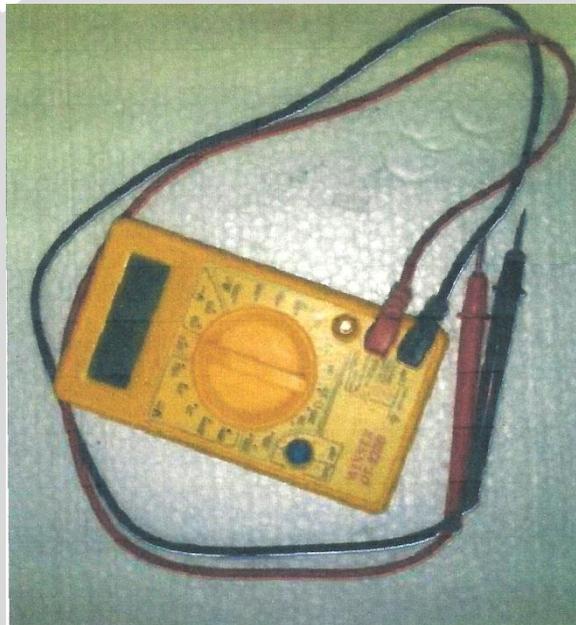
Spesifikasi:

<i>Model</i>	: DM6234P + Laser digital tachometer
<i>Display</i>	: 5 digit 18mm LCD

<i>Accuracy</i>	: 0.05% + 1 digit
<i>Sampling time</i>	: 0.5 sec (over 120 rpm)
<i>Resolution</i>	: 0.1RPM (for 2.5 ~ 999. 99RPM), 1RPM (over 1000 RPM )
<i>Memory</i>	: Max value, Min. value, Last value
<i>Test range</i>	: 2.5-99999 rpm
<i>Detecting distance</i>	: 50-500 mm
<i>Battery</i>	: 4x1.5 V AAA

#### 6. Digital multimeter

*Multimeter* digunakan untuk mengukur tegangan dan arus yang dihasilkan motor listrik serta mengukur hambatan *resistor*. Alat yang digunakan adalah seperti pada gambar 3.8 di bawah ini.



Gambar 3.8 *Digital multimeter*

Sumber: Laboraturium Mesin Fluida Teknik Mesin Universitas Brawijaya

#### Spesifikasi:

<i>Merk</i>	: Victor
<i>Display</i>	: 61 x 36mm LCD display, 1,999 counts max
<i>DC Volt</i>	: 200mV/2V/20V/200V/1,000V
<i>AC Volt</i>	: 20V/200V/750V
<i>Resistance</i>	: 200 $\Omega$ / 2k $\Omega$ / 20k $\Omega$ / 200k $\Omega$ / 20M $\Omega$ / 200M $\Omega$
<i>Ampere Max</i>	: 200 mA
<i>Capacitance</i>	: 20nF/2uF/200uF
<i>Battery</i>	: 4x1.5V AAA Battery 29

## 7. Generator listrik

Untuk dapat mengetahui daya yang dihasilkan dari turbin, digunakan sebuah generator listrik yang nantinya akan menghasilkan tegangan listrik yang kemudian diukur dengan *digital multimeter*. Gambar motor listrik dapat dilihat pada gambar 3.9 berikut ini.



Gambar 3.9 Generator Listrik

Sumber: Laboraturium Mesin Fluida Teknik Mesin Universitas Brawijaya

### Spesifikasi:

<i>Voltage</i>	: 6 V DC
<i>Current</i>	: 1200 mA
<i>Rpm</i>	: 13.600

### 3.6 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 bilah: 2 bilah, 3 bilah, 4 bilah.
- Kecepatan angin: 3, 4, 5, 6, 7 m/s

#### 2. Variabel terikat

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

- Torsi yang dihasilkan oleh turbin angin bilah bersirip.
- Daya poros yang dihasilkan oleh turbin angin bilah bersirip.
- Efisiensi yang dihasilkan oleh turbin angin bilah bersirip.

#### 3. Variabel terkontrol

Variabel terkontrol adalah variabel yang nilainya ditentukan oleh peneliti dan dikondisikan konstan. Dalam variabel terkontrol ini variabel terkontrolnya adalah:

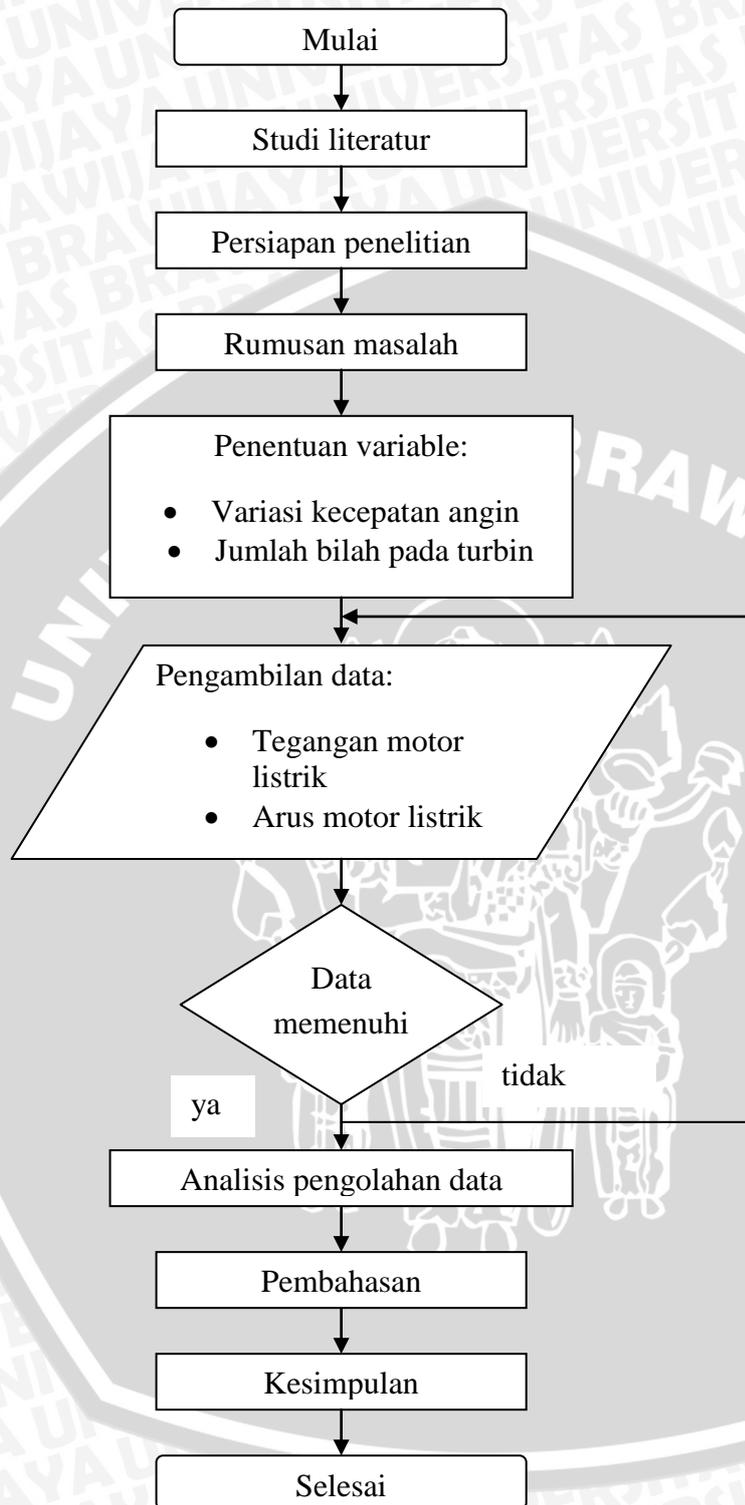
- Jumlah sirip setiap bilah sebanyak 5 buah
- Panjang dan lebar bilah adalah 25 cm dan 6 cm

### 3.7 Metode Pengambilan Data

Adapun urutan proses pengambilan data adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan instalasi *wind tunnel* dan turbin angin dengan tinggi bilah yang telah ditentukan sebagai variabel terkontrol.
2. Pengambilan data dimulai setelah mengalirkan udara dari *wind tunnel* ke seluruh instalasi turbin angin. Kecepatan angin diatur dengan melihat *anemometer*, dimana kecepatan dimulai dari 3 m/s sampai kecepatan 7 m/s. Kecepatan angin diatur dengan mengatur bukaan katup pada *blower*.
3. Pengambilan data pada penelitian ini berupa putaran pada poros dengan menggunakan *digital tachometer*.
4. Pengambilan data berupa tegangan yang dihasilkan motor listrik menggunakan *digital multimeter*.
5. Mengulangi langkah satu sampai empat sebanyak 3 kali.
6. Mengganti turbin dengan jumlah bilah yang berbeda untuk pengujian selanjutnya.
7. Mengulangi langkah satu sampai dengan lima dengan variasi jumlah bilah turbin.
8. Pengolahan data tegangan listrik 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

#### 4.1.2 Data Hasil Pengujian

Data hasil pengujian pengaruh jumlah sirip terhadap unjuk kerja turbin angin tipe bilah bersirip

- Tabel 4.1 Data pengujian tegangan motor listrik (V)

Jumlah bilah	Kecepatan Angin (m/s)	Tegangan Motor Listrik (V)			Rata-rata
2	3	0,71	0,74	0,82	0,757
	4	1,43	1,46	1,73	1,540
	5	2,33	2,34	2,29	2,320
	6	2,58	2,5	2,51	2,530
	7	2,71	2,84	2,84	2,797
3	3	0,69	0,7	0,71	0,700
	4	1,11	1,74	1,09	1,313
	5	1,98	2,01	1,98	1,990
	6	2,2	2,2	2,3	2,233
	7	2,59	2,52	2,62	2,577
4	3	0,27	0,26	0,24	0,257
	4	0,93	0,93	0,96	0,940
	5	1,75	1,85	1,88	1,827
	6	2,51	2,48	2,51	2,500
	7	2,31	2,4	2,37	2,360

• Tabel 4.2 Data pengujian kuat arus motor listrik (A)

Jumlah Bilah	Kecepatan Angin (m/s)	Arus Motor Listrik (A)			Rata-rata
2	3	0,0071	0,0074	0,0082	0,00757
	4	0,0143	0,0146	0,0173	0,01540
	5	0,0233	0,0234	0,0229	0,02320
	6	0,0258	0,025	0,0251	0,02530
	7	0,0271	0,0284	0,0284	0,02797
3	3	0,0069	0,007	0,0071	0,00700
	4	0,0111	0,0174	0,0109	0,01313
	5	0,0198	0,0201	0,0198	0,01990
	6	0,022	0,022	0,023	0,02233
	7	0,0259	0,0252	0,0262	0,02577
4	3	0,0027	0,0026	0,0024	0,00257
	4	0,0093	0,0093	0,0096	0,00940
	5	0,0175	0,0185	0,0188	0,01827
	6	0,0251	0,0248	0,0251	0,02500
	7	0,0231	0,024	0,0237	0,02360

• Tabel 4.3 Data pengujian putaran poros turbin (rpm)

Jumlah Bilah	Kecepatan Angin (m/s)	Putaran Poros Turbin (rpm)			Rata-rata
2	3	90	92	96	92,667
	4	134	135	139	136,000
	5	182	185	178	181,667
	6	196	191	193	193,333
	7	206	213	214	211,000
3	3	83	86	89	86,000
	4	127	135	124	128,667
	5	160	165	158	161,000
	6	173	174	179	175,333
	7	197	193	203	197,667
4	3	40	39	36	38,333
	4	105	107	112	108,000
	5	140	150	155	148,333
	6	164	171	170	168,333
	7	190	187	193	190,000

#### 4.1.2 Pengolahan Data

Perhitungan data dilakukan untuk mencari nilai daya poros, torsi dan efisiensi turbin angin tipe bilah bersirip dengan pengaruh jumlah bilah. Di bawah ini adalah contoh perhitungan data hasil penelitian untuk jumlah bilah 2 buah dan kecepatan 5 m/s. Contoh perhitungan:

Data yang diperoleh saat penelitian adalah sebagai berikut:

- Panjang bilah ( $p$ ) : 0,25m
- Lebar bilah ( $l$ ) : 0,06m
- Hambatan : 100  $\Omega$
- Efisiensi motor listrik ( $\eta$ ) : 80%
- 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 wind tunnel yang dilewati angin ( $A$ )

$$A = p.l$$

$$A = 0,32 \text{ m} \cdot 0,17 \text{ m}$$

$$A = 0,0544 \text{ m}^2$$

- Daya angin ( $P_{\text{angin}}$ ), pada kecepatan angin ( $v$ ) = 5 m/s

$$P_{\text{angin}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 1,18 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,0544 \text{ m}^2 \cdot (5)^3 \text{ m/s}$$

$$= 4,012 \text{ kg m}^2/\text{s}^3$$

- Daya Poros (BHP), pada kecepatan angin ( $v$ ) = 5 m/s

Didapatkan tegangan listrik ( $V$ ) = 2,32 Volt dan arus ( $I$ ) = 0,0232 Ampere

$$\text{BHP} = \frac{V \cdot I}{\eta}$$

$$\text{BHP} = \frac{2,32 \cdot 0,0232}{80\%}$$

$$\text{BHP} = 0,06728 \text{ Watt}$$

- Torsi (Nm)

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

$$= \frac{0,00053824}{2 \cdot 3,14 \cdot \frac{181,333}{60}}$$

$$= 0,002835894 \text{ Nm}$$

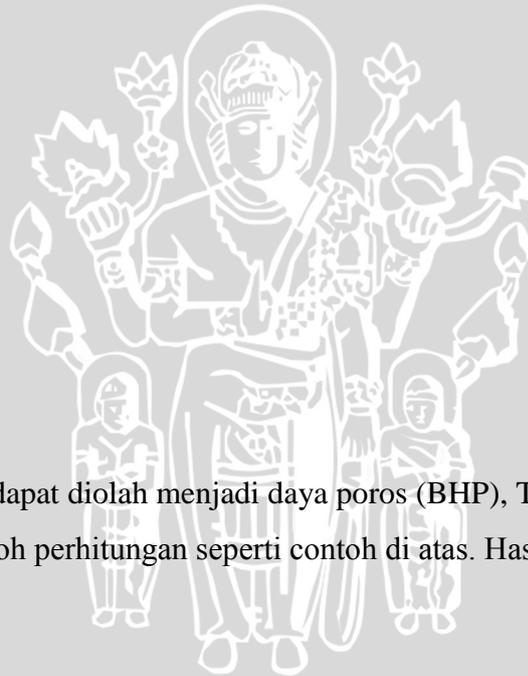
- Efisiensi ( $\eta$ )

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

$$= \frac{0,06728}{4,012} \cdot 100\%$$

$$= 1,68\%$$

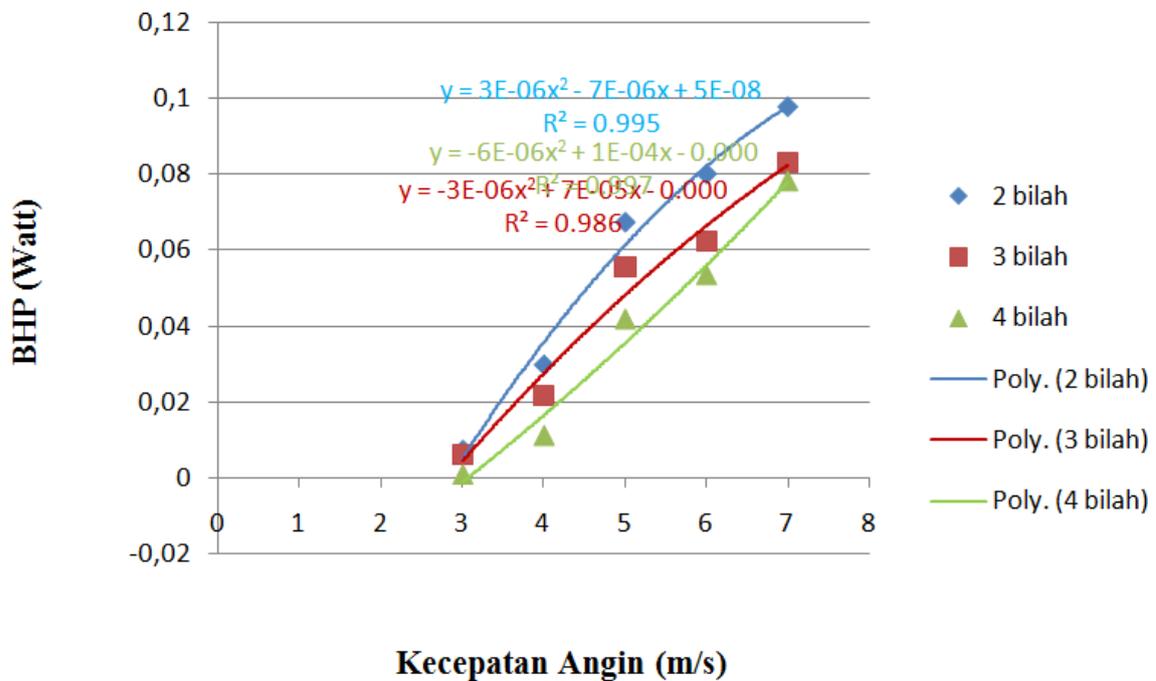
Dari data-data hasil penelitian dapat diolah menjadi daya poros (BHP), Torsi (T), Efisiensi ( $\eta$ ), dengan menggunakan contoh perhitungan seperti contoh di atas. Hasilnya dapat dilihat pada tabel 4.4 berikut ini:





## 4.2 Pembahasan

### 4.2.1 Grafik Hubungan Antara Kecepatan Angin Terhadap Brake Horse Power (BHP)



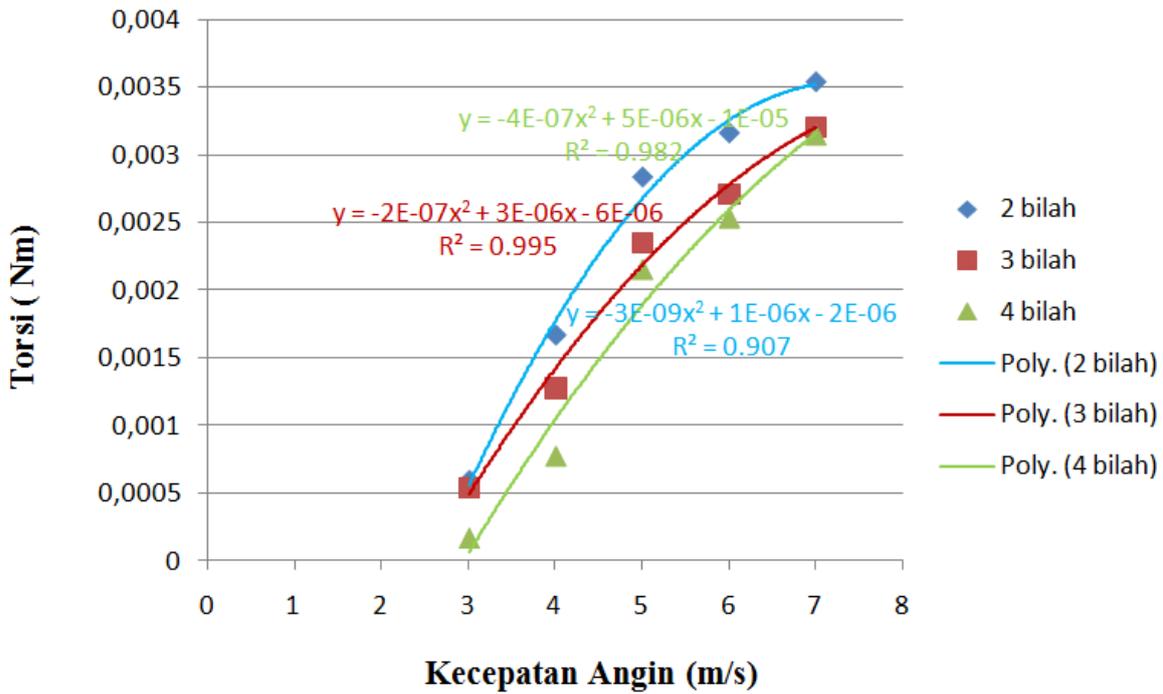
Gambar 4.1 Grafik hubungan kecepatan angin terhadap BHP

Pada grafik diatas dapat dilihat bahwa kecenderungan grafik semakin meningkat seiring dengan bertambahnya kecepatan angin. Hal ini dapat disebabkan karena adanya momentum angin yang menumbuk bilah turbin angin bersirip sehingga daya drag dan torsi untuk memutar turbin tersebut juga semakin besar. Pada kecepatan angin yang sama semakin sedikit jumlah bilah pada turbin maka semakin besar pula BHP yang dihasilkan karena angin yang menumbuk pada turbin dengan jumlah bilah yang sedikit lebih mudah memutar turbin. Untuk turbin yang jumlahnya sedikit, berat turbin tersebut lebih kecil jika dibandingkan dengan jumlah turbin yang banyak. Oleh karena itu, semakin banyak jumlah bilah dalam turbin maka BHP akan semakin menurun.

Dari grafik diatas dapat kita lihat pula bahwa nilai BHP dari yang tertinggi sampai yang terendah pada turbin angin tipe bilah bersirip dicapai oleh turbin dengan jumlah bilah 2 buah kemudian bilah dengan jumlah bilah 3 buah dan yang terakhir bilah dengan jumlah bilah 4 buah. BHP tertinggi yang dicapai oleh semua turbin didapatkan saat kecepatan angin 7m/s, yaitu dengan jumlah bilah 2 buah adalah 0,098 Watt. Kemudian untuk turbin dengan

jumlah bilah 3 buah adalah 0,083 Watt, lalu untuk turbin dengan jumlah bilah 4 buah adalah 0,078 Watt.

#### 4.2.2 Grafik Hubungan Antara Kecepatan Angin Terhadap Torsi



Gambar 4.2 Grafik hubungan antara kecepatan angin terhadap torsi

Dari grafik diatas terlihat bahwa grafik cenderung meningkat dimana nilai torsi tersebut meningkat seiring dengan bertambahnya kecepatan angin. Hal tersebut disebabkan karena adanya gaya drag yang bekerja pada bilah turbin juga semakin besar, sehingga mengakibatkan torsi menjadi naik. Kenaikan torsi tersebut dikarenakan daya poros yang juga semakin meningkat seiring dengan bertambahnya kecepatan angin. Kenaikan nilai BHP itu sendiri dikarenakan putaran poros yang semakin meningkat sehingga dihasilkan voltase dan arus yang besar pula pada turbin angin tipe bilah bersip, sehingga nilai BHP berbanding lurus dengan daya motor.

Seperti pada rumus :

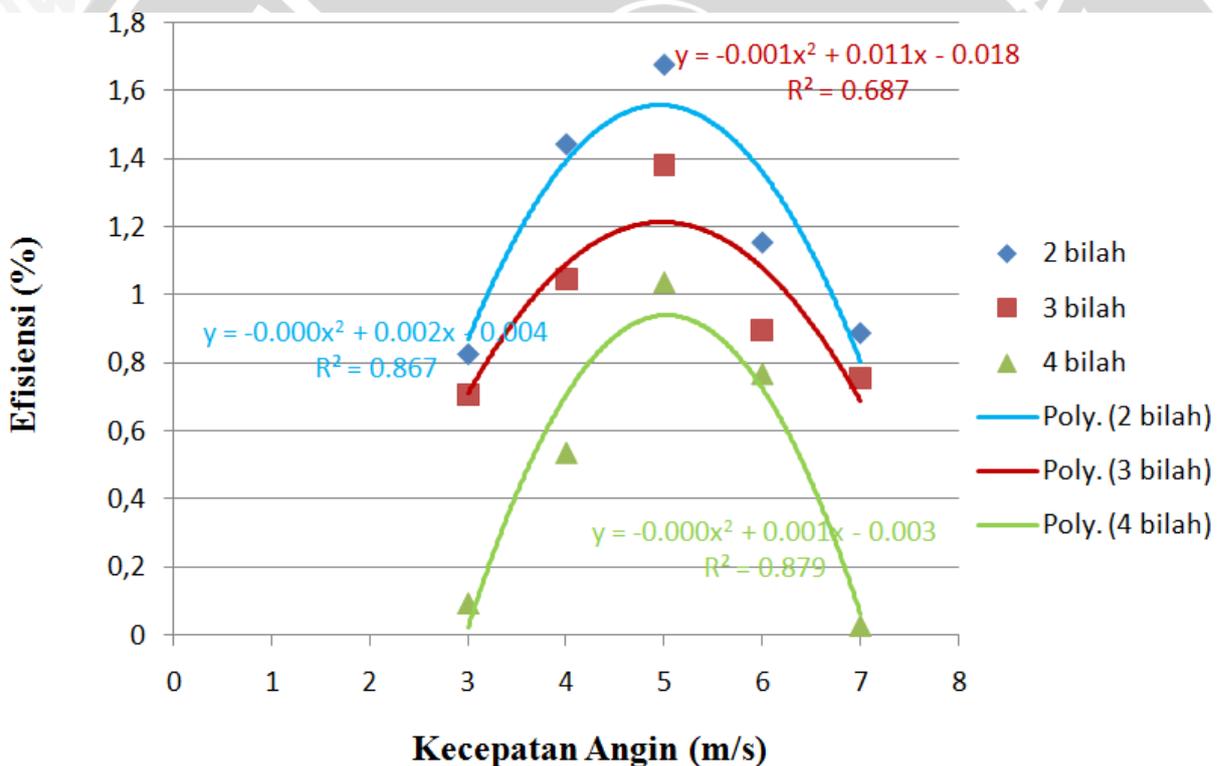
$$BHP = \frac{P_{motor}}{\eta_{motor}}$$

Pada kecepatan yang sama, untuk turbin dengan jumlah bilah 2 buah cenderung memiliki torsi yang lebih besar bila dibandingkan dengan turbin dengan jumlah bilah 3 buah

dan 4 buah, walaupun berada pada kecepatan 3-7 m/s. Hal ini terjadi karena angin yang menumbuk turbin dengan jumlah bilah yang sedikit, lebih mudah memutar turbin tersebut dibandingkan dengan turbin yang jumlah bilangannya lebih banyak. Semakin sedikit jumlah bilangannya, maka berat turbin itu sendiri semakin ringan, sehingga putaran per menit yang dihasilkan juga semakin besar.

Pada grafik diatas dapat disimpulkan bahwa nilai torsi tertinggi dicapai oleh turbin dengan jumlah bilah 2 buah, yaitu sebesar 0,00354 Nm. Kemudian diikuti turbin dengan jumlah bilah 3 buah sebesar 0.00321 Nm, selanjutnya turbin dengan jumlah bilah 4 buah dengan nilai torsi 0.00314 Nm. Dari masing-masing bilah turbin tersebut, torsi tertinggi diperoleh pada saat kecepatan angin 7 m/s.

#### 4.2.3 Grafik Hubungan Antara Kecepatan Angin Terhadap Efisiensi



Gambar 4.3 Grafik hubungan antara kecepatan angin terhadap efisiensi

Pada grafik hubungan antara kecepatan angin terhadap efisiensi dapat dilihat bahwa grafik cenderung naik kemudian mengalami penurunan. Efisiensi merupakan perbandingan antara output dengan input. Pada grafik diatas efisiensi tertinggi didapatkan saat kecepatan angin 5 m/s dengan jumlah bilah 2 buah diikuti dibawahnya dengan jumlah bilah 3 buah

dan 4 buah. Hal ini dikarenakan BHP yang dihasilkan oleh turbin dengan jumlah bilah 2 buah cenderung lebih besar daripada yang lainnya.

Pada grafik diatas terlihat bahwa grafik mengalami penurunan setelah masing-masing dari bilah bersirip tersebut mencapai efisiensi puncaknya. Penurunan ini dikarenakan kenaikan BHP tidak sebanding dengan WHP yang peningkatannya semakin besar seiring peningkatan kecepatan angin.

Pada grafik diatas dapat disimpulkan bahwa nilai efisiensi tertinggi yang diperoleh turbin dengan jumlah bilah 2 buah pada kecepatan angin sebesar 5 m/s dengan efisiensi sebesar 1,68 %.



## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Hasil penelitian yang telah dilakukan maka dapat diperoleh beberapa kesimpulan seperti yang dijelaskan dibawah ini:

1. Hasil pengujian dan pengolahan data menunjukkan bahwa jumlah bilah berpengaruh terhadap unjuk kerja turbin angin tipe bilah bersirip.
2. BHP akan semakin meningkat seiring meningkatnya kecepatan angin karena momentum angin yang menumbuk bilah turbin semakin besar.
3. Torsi yang dihasilkan turbin angin tipe bilah bersirip semakin meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan angin yang menumbuk bilah turbin.
4. Efisiensi paling tinggi yang diperoleh adalah 1,68 % pada kecepatan angin 5 m/s dengan jumlah bilah 2 buah.

#### 5.2 Saran

Dari kesimpulan diatas, maka penulis menyampaikan beberapa hal untuk penelitian lebih lanjut tentang kinerja turbin angin tipe bilah bersirip diantaranya adalah:

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang pengaruh lebar bilah terhadap unjuk kerja turbin angin tipe bilah bersirip.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang pengaruh jenis material bilah terhadap unjuk kerja turbin angin tipe bilah bersirip.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anonymous I. [http://maritim.bmkg.go.id/index.php/main/peta\\_prakiraan/peta\\_angin](http://maritim.bmkg.go.id/index.php/main/peta_prakiraan/peta_angin) (diakses 7 September 2013)
- Bueche, F. J. 1998. *Fisika*. Jakarta: Erlangga.
- Dietzel, Fritz. 1990. *Turbin Pompa dan Kompresor*, Jakarta: Erlangga.
- Daryanto. 2007. *Kajian Potensi Angin untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu*. Yogyakarta: BALAI PPTAGG.
- Fox, Robert W. and McDonald Alan T. 1994. *Introduction to Fluid Mechanics*. New York: John Willey and Sons Inc.
- Giancoli, Douglas C. 1995. *Physics Fourth Edition*. New Jersey: Prentice Hall International Inc.
- Hau, Erich. 2005. *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. Horst von Renouard: Springer.
- Hunt, V. Daniel. 1981: *Wind Power*. New York: Nostard Reinhold.
- Holman, J. P. 1997. *Perpindahan Kalor*. Jakarta: Erlangga.
- Kementrian Riset dan Teknologi. 2010. "Menggapai Indonesia Bisa" *Teknologi Listrik Hybrid di Bantul, DIY*. Jakarta: Ristek.
- Marnoto, Tjukup. 2010. *Perancangan Kincir Angin Axis Vertikal Tipe Baru untuk Generator Listrik Tenaga Angin*. Jogjakarta: Universitas Pembangunan Nasional Veteran.
- Marnoto, Tjukup. 2010. *Peningkatan Efisiensi Kincir Angin Poros Vertikal Melalui System Buka Tutup Sirip Pada 3 Sudu*. Jogjakarta: Universitas Pembangunan Nasional Veteran.
- PT. PLN. 2001. *Teori Dasar Listrik*. Jawa Barat: PT. PLN.
- Reksoatmodjo, Tedjo Narsoyo. 2004. *Vertical Axis-Differential Dragmill*. Semarang: UNJANI.
- Sargolzaei, J. 2007. *Prediction of The Power Ratio in Wind Turbine Savonious Rotors Using Artificial Neural Networks*. Zahedan: Baluchestan University.
- Trifiananto, Muhammad. 2012. *Pengaruh Panjang Bilah Terhadap Unjuk Kerja Turbin Angin Tipe Bilah Bersirip*. Malang: Universitas Brawijaya Malang.
- White, Frank M. 1986. *Fluids Mechanics*. New York: McGraw Hill Book Company.
- WWEA. 2011. *10<sup>th</sup> World Wind Energy Conference & Renewable Energy Exhibition*; World Wind Energy Association WWEA 2011, Bonn.

## LAMPIRAN

### Lampiran 1

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

Lampiran A Beberapa Daftar

589

Daftar A-5 Sifat-sifat Udara pada Tekanan Atmosfer†  
 Nilai  $\mu$ ,  $k$ ,  $c_p$ , dan Pr tidak terlalu bergantung pada tekanan dan dapat digunakan untuk rentang tekanan yang cukup luas.

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

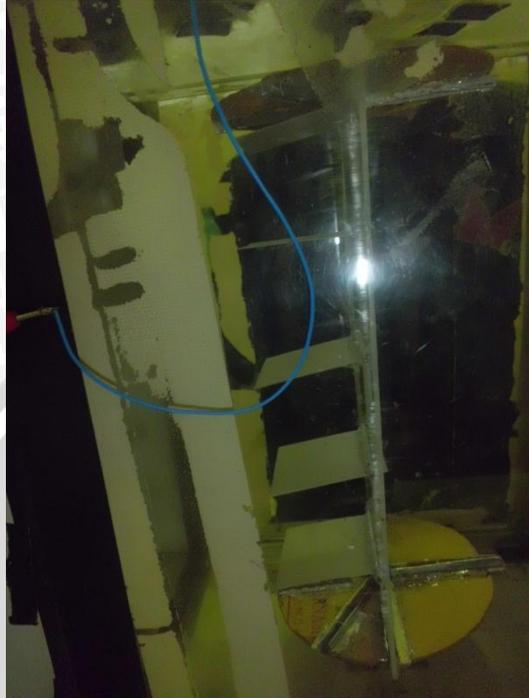
† Dari Natl. Bur. Stand (U. S.) Circ. 564, 1965

Daftar ini menggunakan satuan SI.

## Lampiran 2

### Model Turbin Angin Bilah Berserip dengan Jumlah Bilah yang Berbeda

- Turbin dengan jumlah bilah 2 buah



- Turbin dengan jumlah bilah 3 buah



- Turbin dengan jumlah bilah 4 buah



BRAWIJAYA

