

**PENGARUH VARIASI PANJANG SUDU TERHADAP KINERJA
TURBIN ANGIN *DARRIEUS* TIPE SUDU J**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh :
BHIRANGGA ERLANG GIRINDRA WARDHANA HIMAWAN
NIM. 0910620043 – 62

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

LEMBAR PERSETUJUAN

**PENGARUH VARIASI PANJANG SUDU TERHADAP KINERJA
TURBIN ANGIN *DARRIEUS* TIPE SUDU J**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh:

BHIRANGGA ERLANG GIRINDRA WARDHANA HIMAWAN
NIM. 0910620043-62

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr.Eng. Eko Siswanto, ST.,MT.
NIP. 19701017 199802 1 001

Ir. Agustinus Ariseno, MT.
NIP. 19510822 198701 1 001

LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH VARIASI PANJANG SUDU TERHADAP KINERJA
TURBIN ANGIN *DARRIEUS* TIPE SUDU J**

**SKRIPSI
KONSENTRASI KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun Oleh :

**BHIRANGGA ERLANG GIRINDRA WARDHANA HIMAWAN
NIM. 0910620043-62**

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
tanggal 27 Januari 2014

Majelis Penguji

Skripsi I

**Prof.Ir. Sudjito, Ph.D.
NIP. 19470330 198002 1 001**

Skripsi II

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

Skripsi III

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

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Mesin

**Dr.Eng. Nurkholis Hamidi, ST., M.Eng.
NIP.19740121 199903 1 001**

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala limpahan berkat dan rahmat-Nya, serta sholawat dan salam yang tidak lupa penulis panjatkan kepada Nabi Muhammad SAW, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “Pengaruh Variasi Panjang Sudu Terhadap Kinerja Turbin Angin *Darrieus* Tipe Sudu J” 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. Bapak Dr. Eng. Nurkholis Hamidi, ST., M. Eng., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
2. Bapak Purnami, ST., MT., selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
3. Bapak Agung Sugeng Widodo, ST., MT., Ph.D, selaku Ketua Kelompok Konsentrasi Konversi Energi Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
4. Bapak Eko Siswanto, ST., MT., Dr. Eng., selaku dosen pembimbing I skripsi yang telah banyak memberikan pengarahan, bimbingan dan memberikan motivasi selama penyusunan skripsi ini.
5. Bapak Agustinus Ariseno, Ir., MT., selaku dosen pembimbing II skripsi yang telah memberikan bimbingan, masukan, dan saran dalam menyusun skripsi ini.
6. Bapak Endi Sutikno, Ir., MT., selaku dosen pembimbing akademik yang telah memberikan pengarahan, bimbingan dan semangat selama masa perkuliahan.
7. Ibu Lilis Yuliaty, ST., MT., Dr. Eng. selaku Kepala Laboratorium Mesin-mesin Fluida.
8. Orang tua saya, Bapak Himawan dan Ibu Mas’amah, kakak saya Cista Mira dan adik saya Citrakara, yang telah memberikan kasih sayang, doa, motivasi, semangat, serta dukungan moral dan materiil.
9. Seluruh Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin yang telah banyak memberikan ilmu pengetahuan yang sangat mendukung baik dalam perkuliahan maupun selama penyusunan skripsi saya.
10. Seluruh Staf Administrasi Jurusan Teknik Mesin serta Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

11. Asisten-asisten Laboratorium Mesin-mesin Fluida yang telah membantu selama pelaksanaan penelitian.
12. Sulistyono, Candra, Umar, Dani, Zendy, Surya, Alfian, Azmi, Ichwan, Yashero, Aan, Teguh, serta saudara seperjuangan yang telah memberikan doa, semangat, hiburan, serta motivasi dalam menyelesaikan skripsi ini.
13. Teman-teman apartemen 69 yang telah memberikan doa, petunjuk, dan dukungan moral.
14. Seseorang spesial yang telah mengajarkan kepada saya berbagai hal dan menjadi inspirasi bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini.
15. 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, Januari 2014

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR LAMPIRAN	viii
RINGKASAN	ix
BAB I PENDAHULUAN	
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
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Penelitian Sebelumnya.....	4
2.2 Angin	4
2.2.1 Proses Terbentuknya Angin.....	4
2.2.2 Potensi Energi Angin di Indonesia	6
2.2.3 Energi Angin.....	7
2.3 Turbin Angin.....	8
2.3.1 Klasifikasi Turbin Angin	8
2.4 Turbin Angin <i>Darrieus</i>	10
2.4.1 Pengertian Turbin Angin <i>Darrieus</i>	10
2.4.2 Prinsip Kerja Turbin Angin <i>Darrieus</i>	11
2.4.3 Macam-macam Jenis Sudu Turbin Angin <i>Darrieus</i>	13
2.4.3.1 <i>Airfoil</i> NACA.....	13
2.4.3.2 Sudu <i>J (J-Blades)</i>	14
2.5 Kinerja Turbin Angin.....	15
2.5.1 <i>Brake Horse Power (BHP)</i>	15
2.5.2 Torsi (T).....	17

2.5.3 Efisiensi (η).....	17
2.6 Teori dan Persamaan.....	18
2.6.1 Teori Betz	18
2.6.2 <i>Tip Speed Ratio</i>	19
2.7 Hipotesa	21

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian	22
3.2 Tempat dan Waktu Pelaksanaan	22
3.3 Variabel Penelitian	22
3.4 Peralatan Penelitian.....	23
3.5 Instalasi Penelitian.....	27
3.6 Prosedur Penelitian.....	28
3.7 Metode Pengambilan Data	28
3.8 Diagram Alir Penelitian	30

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil	31
4.1.1 Data Hasil Pengujian	31
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
4.2.3 Hubungan Antara Kecepatan Angin terhadap Efisiensi (η)	39
4.2.4 Perbandingan Daya Poros (BHP) yang Dihasilkan antar Turbin	40
4.2.5 Perbandingan Torsi yang Dihasilkan antar Turbin	41
4.2.6 Perbandingan Efisiensi yang Dihasilkan antar Turbin	42

BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan	44
5.2. Saran	44

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN



DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Skema terjadinya angin.	5
Gambar 2.2	Macam-macam alat pengukur angin	5
Gambar 2.3	Laju pertumbuhan pembangkitan listrik tenaga angin tahunan di dunia	6
Gambar 2.4	Varian turbin angin sumbu vertikal	9
Gambar 2.5	Varian turbin angin sumbu horizontal	9
Gambar 2.6	Turbin angin <i>Darrieus</i>	10
Gambar 2.7	NACA <i>airfoil geometry</i>	13
Gambar 2.8	Gaya pada <i>airfoil</i>	14
Gambar 2.9	Ilustrasi gaya-gaya yang bekerja pada sudu J	15
Gambar 2.10	Perbandingan penampang pada sudu J dengan sudu konvensional	15
Gambar 2.11	Rangkaian pengukuran tegangan DC	16
Gambar 2.12	Rangkaian pengukuran arus DC	17
Gambar 2.13	Asumsi teori Betz	18
Gambar 2.14	Variasi <i>tip speed ratio</i> dan koefisien daya C_p pada berbagai jenis turbin angin	20
Gambar 3.1	<i>Blower</i>	23
Gambar 3.2	<i>Wind tunnel</i>	24
Gambar 3.3	Dimensi <i>wind tunnel</i>	24
Gambar 3.4	Rancangan model turbin angin <i>Darrieus</i> sudu J	25
Gambar 3.5	<i>Digital multimeter</i>	26
Gambar 3.6	Generator listrik	27
Gambar 3.7	Skema Instalasi Uji	27
Gambar 3.8	Diagram Alir Penelitian	30
Gambar 4.1	Grafik hubungan antara kecepatan angin terhadap daya poros (BHP)	36
Gambar 4.2	Grafik hubungan antara kecepatan angin terhadap torsi	37
Gambar 4.3	Grafik hubungan antara kecepatan angin terhadap efisiensi	39
Gambar 4.4	Grafik perbandingan daya poros yang dihasilkan antar turbin	40
Gambar 4.5	Grafik perbandingan torsi yang dihasilkan antar turbin	41



DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Pengelompokkan potensi energi angin, pemanfaatan, dan lokasi potensial.	6
Tabel 4.1	Data hasil pengujian tegangan generator listrik (V)	31
Tabel 4.2	Data hasil pengujian kuat arus generator listrik (A)	32
Tabel 4.3	Data hasil pengujian putaran poros turbin (rpm)	33
Tabel 4.4	Data hasil perhitungan panjang sudu 200 mm	35
Tabel 4.5	Data hasil perhitungan panjang sudu 250 mm	35
Tabel 4.6	Data hasil perhitungan panjang sudu 300 mm	36



DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 Tabel Viskositas dan Massa Jenis Udara pada Tekanan 1 atm
- Lampiran 2 Model Turbin Angin *Darrieus* Tipe Sudu J dengan Panjang Sudu yang Berbeda



RINGKASAN

Erlang Bhirangga, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Januari 2014, *Pengaruh Variasi Panjang Sudu Terhadap Kinerja Turbin Angin Darrieus Tipe Sudu J*, Dosen Pembimbing: Eko Siswanto dan Agustinus Ariseno.

Kebutuhan energi yang semakin meningkat seiring dengan perkembangan jaman mengakibatkan semakin menipisnya ketersediaan energi yang bersumber dari bahan bakar fosil. Krisis energi ini harus ditangani dengan sangat serius, karena selain jumlah ketersediaan bahan bakar fosil yang semakin menipis, dampak negatif terhadap lingkungan dari penggunaan bahan bakar fosil sudah sangat mengkhawatirkan. Listrik adalah sumber daya yang paling banyak digunakan saat ini, karena mempunyai banyak manfaat bagi manusia. Hal ini membuat banyak negara termasuk Indonesia mencari cara dalam pemanfaatan energi untuk menambah pasokan listrik guna mencukupi kebutuhan manusia. Salah satu energi alternatif terbarukan yang ramah terhadap lingkungan adalah energi yang berasal dari angin. Pemanfaatan energi angin yang sangat potensial karena ketersediaannya di alam yang cukup memadai, dapat diperoleh secara gratis dan tidak menimbulkan pencemaran udara dalam pemanfaatannya belum begitu luas, tetapi sejalan dengan semakin menipisnya ketersediaan cadangan bahan bakar fosil, maka pemanfaatan energi angin ini mulai mendapat perhatian sebagai sumber energi yang terbarukan. Oleh karena itu turbin angin digunakan sebagai pembangkit listrik energi alternatif, dengan cara mengkonversi energi angin menjadi energi listrik. Prinsip dasar dari turbin angin adalah mengubah energi kinetik dari angin menjadi energi mekanik pada rotor turbin, lalu putaran rotor digunakan untuk memutar generator, yang pada akhirnya akan menghasilkan listrik.

Salah satu jenis turbin angin adalah turbin angin sumbu vertikal atau tegak yang memiliki poros atau sumbu rotor utama yang disusun tegak lurus terhadap permukaan tanah. Dalam penelitian ini digunakan turbin angin sumbu vertikal, yaitu turbin angin *Darrieus* tipe sudu J. Keuntungan dari turbin angin *Darrieus* adalah tidak memerlukan mekanisme orientasi pada arah angin atau tidak perlu mendeteksi arah angin yang paling tinggi kecepatannya seperti pada turbin angin propeller karena bentuknya yang simetri. Beberapa usaha telah dilakukan untuk meningkatkan unjuk kerja dari turbin angin jenis ini. Penelitian ini bertujuan meneliti seberapa besar pengaruh variasi panjang sudu terhadap kinerja turbin angin *Darrieus* tipe sudu J. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode penelitian eksperimental, yaitu melakukan pengamatan untuk mencari data sebab akibat dalam suatu proses melalui eksperimen sehingga dapat mengetahui kinerja turbin angin *Darrieus* tipe sudu J dengan variasi panjang sudu. Variabel bebas yang digunakan dalam penelitian ini adalah panjang sudu sebesar 200 mm, 250 mm, 300 mm, dan kecepatan angin sebesar 3 m/s, 4 m/s, 5 m/s, 6 m/s, dan 7 m/s. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah daya poros, torsi, dan efisiensi yang dihasilkan oleh turbin angin *Darrieus* tipe sudu J. Sedangkan variabel terkontrol dalam penelitian ini adalah jumlah sudu sebanyak 3 buah.

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa panjang sudu dan kecepatan angin mempunyai pengaruh terhadap kinerja turbin angin *Darrieus* tipe sudu J, yaitu pada panjang sudu yang sama dan kecepatan angin yang meningkat akan diperoleh daya poros, torsi, dan efisiensi yang meningkat pula. Sedangkan pada kecepatan angin yang tetap dan panjang sudu yang semakin bertambah akan diperoleh kinerja turbin yang meningkat. Pada penelitian ini diketahui kinerja turbin angin *Darrieus* tipe sudu J, yaitu daya poros atau BHP, torsi, dan efisiensi yang paling tinggi

dihasilkan oleh turbin angin *Darrieus* tipe sudu J dengan variasi panjang sudu sebesar 300 mm dan kecepatan angin sebesar 7 m/s pada *wind tunnel*. Nilai daya poros tertinggi yang dihasilkan sebesar 0,3463 Watt, torsi tertinggi yang dihasilkan sebesar 0,0038 Nm, dan efisiensi tertinggi yang dihasilkan sebesar 5,0033%.

Kata kunci: Turbin Angin *Darrieus*, Sudu-J, Panjang Sudu, Daya Poros, Torsi, Efisiensi.



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi yang semakin meningkat sejalan dengan perkembangan teknologi yang semakin canggih saat ini mendorong berbagai upaya pemanfaatan sumber energi baru yang dapat diperbarui sehubungan dengan jumlah ketersediaan energi yang bersumber dari bahan bakar fosil makin berkurang. Krisis energi ini harus ditangani dengan sangat serius, karena selain jumlah ketersediaan bahan bakar fosil yang semakin menipis, dampak negatif terhadap lingkungan dari penggunaan bahan bakar fosil sudah sangat mengkhawatirkan.

Listrik adalah suatu sumber daya yang paling banyak digunakan sekarang ini karena memiliki banyak fungsi, antara lain dalam menunjang kehidupan manusia, listrik digunakan sebagai *supplay* alat-alat elektronik dan alat-alat lainnya yang menggunakan listrik. Hal ini membuat banyak negara termasuk Indonesia mencari cara dalam pemanfaatan energi untuk menambah pasokan listrik guna memenuhi kebutuhan manusia.

Salah satu energi alternatif terbarukan yang ramah terhadap lingkungan adalah energi yang berasal dari angin. Banyak negara termasuk di Indonesia, pemanfaatan angin sebagai energi belum begitu luas, tetapi seiring dengan semakin menipisnya cadangan bahan bakar fosil, maka pemanfaatan energi angin ini mulai mendapat perhatian sebagai sumber energi terbarukan pengganti bahan bakar fosil. Energi angin ini merupakan energi yang sangat potensial karena ketersediaannya di alam yang cukup memadai, dapat diperoleh secara gratis di alam, dan tidak menimbulkan pencemaran udara dalam pemanfaatannya. Atau dengan kata lain pemanfaatannya ramah terhadap lingkungan.

Untuk mengkonversikan energi angin menjadi energi listrik dibutuhkan turbin angin. Prinsip dasar kerja dari turbin angin adalah mengubah energi kinetik dari angin menjadi energi mekanik berupa putaran pada rotor, lalu putaran rotor digunakan untuk memutar generator, yang akhirnya akan menghasilkan listrik. Salah satu jenis turbin angin adalah turbin angin sumbu vertikal atau tegak yang memiliki poros atau sumbu rotor utama yang disusun tegak lurus terhadap permukaan tanah. Turbin angin *Darrieus* merupakan salah satu jenis turbin angin yang digolongkan dalam jenis turbin angin berporos tegak. Turbin angin ini pertama kali ditemukan oleh GJM Darrieus tahun

1920. Keuntungan dari turbin angin jenis *Darrieus* adalah tidak memerlukan mekanisme orientasi pada arah angin (tidak perlu mendeteksi arah angin yang paling tinggi kecepatannya) seperti pada turbin angin propeler.

Beberapa usaha telah dilakukan untuk memperoleh kinerja turbin angin *Darrieus* yang optimal, salah satu hal yang perlu dipertimbangkan dalam perancangan turbin angin tipe *Darrieus* adalah pada bagian panjang sudu. Dengan membuat variasi panjang sudu, maka kita dapat mengetahui pengaruh panjang sudu terhadap kinerja turbin angin tersebut dan dapat mengetahui panjang sudu yang paling baik untuk menghasilkan kinerja yang maksimal.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan di atas, maka dapat dirumuskan suatu permasalahan, yaitu bagaimana pengaruh variasi panjang sudu terhadap kinerja turbin angin *Darrieus* tipe sudu-J?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan-batasan masalah pada penelitian ini meliputi:

1. Variasi panjang sudu yang digunakan adalah 200; 250; dan 300 mm.
2. Penelitian dilakukan pada *wind tunnel* dengan variasi kecepatan angin 3; 4; 5; 6; dan 7 m/s.
3. Sudu turbin terbuat dari plat aluminium dengan poros silinder baja.
4. Kinerja turbin angin *Darrieus* tipe sudu-J dalam penelitian ini meliputi torsi, daya poros, dan efisiensi.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi panjang sudu terhadap kinerja turbin angin *Darrieus* tipe sudu-J.

1.5 Manfaat Penelitian

Dengan dilakukannya penelitian ini, maka diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Menambah wawasan yang baru kepada masyarakat umum mengenai pemanfaatan energi angin sebagai energi alternatif yang terbarukan.

2. Dapat memberikan tambahan referensi bagi mahasiswa teknik mesin tentang turbin angin *Darrieus* tipe sudu-J untuk dijadikan penelitian selanjutnya.
3. Dapat memperoleh pengetahuan tentang hasil pengaruh variasi panjang sudu terhadap kinerja turbin angin *Darrieus* tipe sudu-J.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Wisnu (2012), telah melakukan penelitian turbin angin *Darrieus* dengan membuat variasi diameter sapuan rotornya, yaitu 0.20 m; 0.24 m; 0.28 m; 0.32 m dan menggunakan kecepatan angin 3 m/s; 4 m/s; 5 m/s; 6 m/s; 7 m/s. Variabel terikat yang digunakan dalam penelitiannya sebagai parameter kinerja pada turbin *Darrieus* adalah daya poros dan efisiensi. Berdasarkan hasil penelitian tentang pengaruh variasi diameter sapuan rotor terhadap kinerja turbin angin *Darrieus* tipe sudu H ini diperoleh peningkatan daya poros pada setiap peningkatan diameter sapuan rotor, namun efisiensi yang dihasilkan menurun. Efisiensi tertinggi pada penelitian ini adalah 30.52 % pada diameter 0.32 m dan daya poros tertinggi adalah 0.55 Watt pada variasi diameter sapuan rotor 0.32 m dengan kecepatan angin 7 m/s.

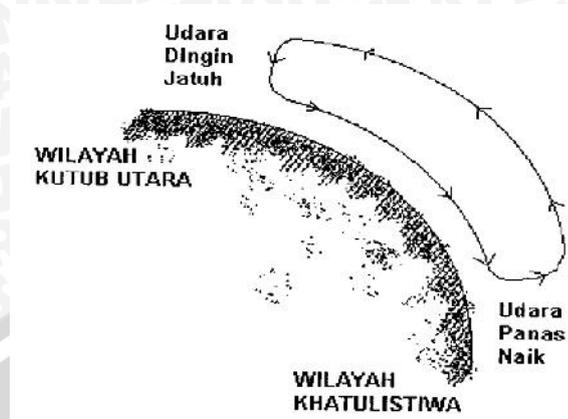
Sulistyono (2013), membuat variasi radius bagian depan sudu Turbin angin *Darrieus* tipe sudu J yaitu 5; 10; dan 15 mm dengan menggunakan kecepatan angin 3 m/s; 4 m/s; 5 m/s; 6 m/s; 7 m/s pada *wind tunnel*. Variabel terikat yang digunakan dalam penelitiannya adalah daya poros, torsi, dan efisiensi. Berdasarkan penelitian tersebut diperoleh hasil bahwa turbin angin *Darrieus* tipe sudu J memiliki nilai daya poros, torsi, dan efisiensi maksimum pada variasi radius bagian depan sudu 15 mm dengan kecepatan angin sebesar 7 m/s.

2.2 Angin

2.2.1 Proses Terbentuknya Angin

Angin adalah udara yang bergerak dari tempat bertekanan tinggi ke tempat bertekanan rendah atau dari tempat yang bersuhu udara rendah ke tempat yang bersuhu udara tinggi. Angin terjadi karena adanya perbedaan tekanan udara atau perbedaan suhu udara pada suatu daerah atau wilayah. Hal ini berkaitan dengan besarnya energi panas matahari yang diterima oleh permukaan bumi. Di daerah khatulistiwa yang menerima energi panas matahari lebih besar, udaranya menjadi panas mengembang dan menjadi ringan, kemudian naik ke atas dan bergerak ke daerah yang lebih dingin. Sebaliknya daerah kutub yang dingin, udaranya menjadi dingin dan turun ke bawah. Hal ini mengakibatkan terjadinya perputaran udara, berupa perpindahan udara dari kutub utara ke garis khatulistiwa menyusuri permukaan bumi, dan sebaliknya suatu

perpindahan udara dari garis khatulistiwa kembali ke kutub utara, melalui lapisan yang lebih tinggi. Hal ini dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Skema Terjadinya Angin.
Sumber: Kadir, 1996

Meskipun pada kenyataan angin tidak dapat dilihat bagaimana wujudnya, namun masih dapat diketahui keberadaannya melalui efek yang ditimbulkan pada benda – benda yang mendapat hembusan angin. Dari mana angin bertiup dan berapa kecepatannya dapat diketahui dengan menggunakan alat – alat pengukur angin. Alat – alat pengukur angin tersebut adalah :

1. *Anemometer*, yaitu alat yang mengukur kecepatan angin.
2. *Wind vane*, yaitu alat untuk mengetahui arah angin.
3. *Windsock*, yaitu alat untuk mengetahui arah angin dan memperkirakan besar kecepatan angin. Biasanya ditemukan di bandara – bandara. Macam – macam alat pengukur dapat dilihat pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Macam-macam Alat Pengukur Angin
Sumber: <http://jendeladenngabei.blogspot.com/2012/11/alatukurangin.html>

2.2.2 Potensi Energi Angin di Indonesia

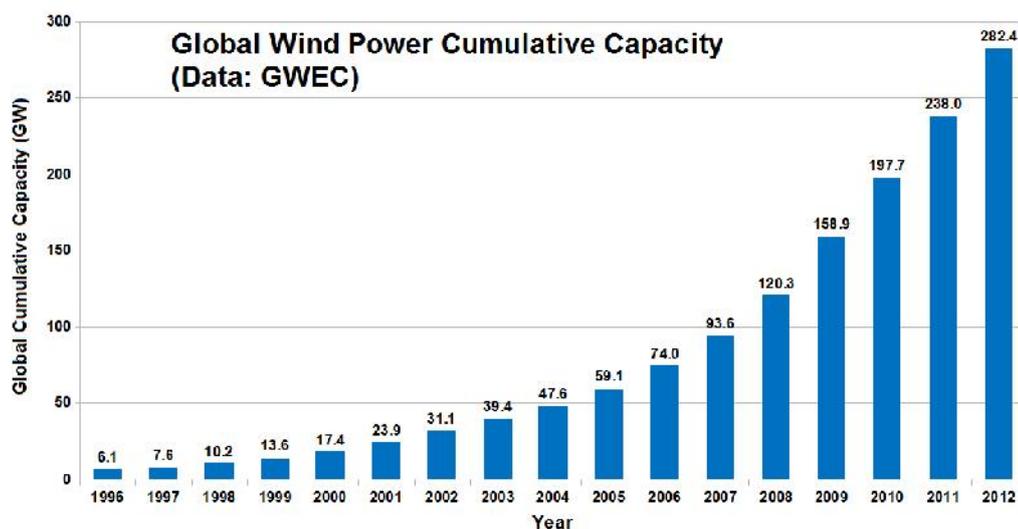
Secara keseluruhan potensi energi angin di Indonesia rata-rata tidak besar, yaitu dengan kecepatan rata-rata 3,5 - 7 m/s. Berdasarkan survei Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) pada 120 lokasi di Indonesia menunjukkan beberapa wilayah yang memiliki kecepatan angin diatas 5 m/s, yaitu Nusa Tenggara Timur, Nusa Tenggara Barat, Sulawesi Selatan, dan Pantai Selatan Jawa. Seperti terlihat pada tabel 2.1. Hal ini dapat dijadikan sebagai faktor pendukung pengembangan teknologi tenaga angin di Indonesia.

Tabel 2.1 Pengelompokkan potensi energi angin, pemanfaatan dan lokasi potensial.

Kelas	Kec. Angin (m/s)	Daya Spesifik (W/m ²)	Kapasitas (kW)	Lokasi (wilayah)
Skala kecil	2,5-4	<75	s/d 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: Kementerian Riset dan Teknologi, 2010

Berdasarkan gambar 2.3 dapat dilihat kapasitas pembangkitan listrik tenaga angin di dunia terus mengalami peningkatan hingga mencapai 282,4 GW pada tahun 2012. Ini dapat dijadikan dasar untuk pengembangan teknologi pembangkit listrik energi angin di Indonesia yang memiliki potensi sumber daya alam yang memadai.



Gambar 2.3 Laju Pertumbuhan Pembangkitan Listrik Tenaga Angin Tahunan di Dunia
Sumber : *World Wind Energy Association*, 2012

2.2.3 Energi Angin

Energi angin merupakan energi yang berasal dari alam. Angin ini disebabkan karena adanya perbedaan suhu antara udara panas dan udara dingin. Menurut ilmu fisika, energi kinetik dari sebuah benda dengan massa m dan kecepatan v adalah $E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$. Rumus ini juga berlaku untuk menghitung energi kinetik yang diakibatkan oleh gerakan angin. Energi kinetik dapat dinyatakan dengan rumus:

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

Keterangan:

E_k = energi dari udara yang bergerak (joule)

m = massa udara (kg)

v = kecepatan angin untuk waktu tertentu (m/detik)

Bila suatu blok udara yang mempunyai penampang A dalam satuan m^2 , dan bergerak dengan kecepatan v dalam satuan m/s , maka jumlah massa yang melewati suatu tempat dapat dilihat pada rumus 2-2:

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v \quad (\text{White; 1986; 133}) \quad (2-2)$$

keterangan:

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

v = kecepatan udara (m/s)

ρ = kerapatan udara (kg/m^3)

A = luas penampang (m^2)

Dimana $A = d \times h$ (2-3)

Keterangan: d = diameter sudu (m)

h = tinggi sudu (m)

Dengan melihat persamaan 2-1 dan 2-2, kita bisa menghitung daya yang dihasilkan dari energi angin, sebagai berikut:

$$P_{\text{angin}} = \text{Energi} / \text{waktu} \quad (\text{Giancoli; 1995; 157}) \quad (2-4)$$

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

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

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

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

Keterangan:

$$P_{\text{angin}} = \text{daya angin} \quad (\text{W})$$

ρ	= massa jenis udara	(kg/m ³)
A	= luas penampang	(m ²)
v	= kecepatan angin	(m/detik)

2.3 Turbin Angin

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

Kini turbin angin lebih banyak digunakan untuk memenuhi kebutuhan listrik masyarakat, dengan menggunakan prinsip konversi energi dan menggunakan sumber daya alam yang dapat diperbaharui yaitu angin. Walaupun sampai saat ini pembangunan turbin angin masih belum dapat menyaingi pembangkit listrik konvensional (PLTD, PLTU, dll), turbin angin masih lebih dikembangkan oleh para ilmuwan karena dalam waktu dekat manusia akan dihadapkan dengan masalah kekurangan sumber daya alam tak terbarui (Contoh: batubara, minyak bumi) sebagai bahan dasar untuk membangkitkan listrik. Prinsip kerja dari turbin angin adalah mengubah energi mekanik dari angin menjadi energi putar pada kincir, lalu putaran kincir digunakan untuk memutar generator, yang akhirnya akan menghasilkan listrik.

2.3.1 Klasifikasi Turbin Angin

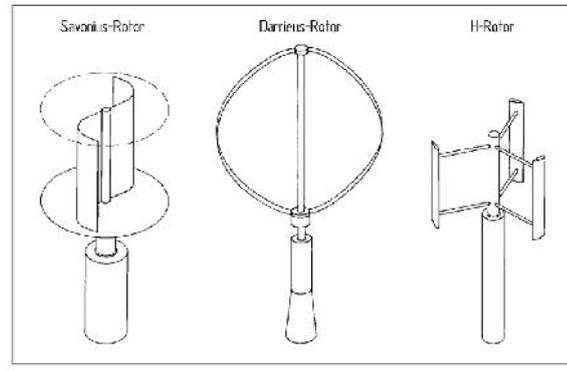
Turbin angin dibagi menjadi dua macam berdasarkan arah sumbu rotasi rotornya, yaitu:

1. Turbin angin sumbu vertikal

Turbin angin sumbu vertikal memiliki sudu yang bergerak pada sumbu putar yang tegak lurus dengan permukaan tanah. Pada umumnya turbin angin sumbu vertikal mempunyai putaran awal yang baik, sehingga dapat beroperasi walaupun dalam kecepatan angin yang rendah.

Keuntungan dari turbin angin sumbu vertikal adalah sederhana dalam perancangannya, diantaranya memungkinkan menempatkan komponen mekanik dan komponen elektronik, dan rotor turbin angin sumbu vertikal berputar tanpa dipengaruhi oleh arah angin. Sehingga tidak membutuhkan mekanisme pengatur arah seperti pada

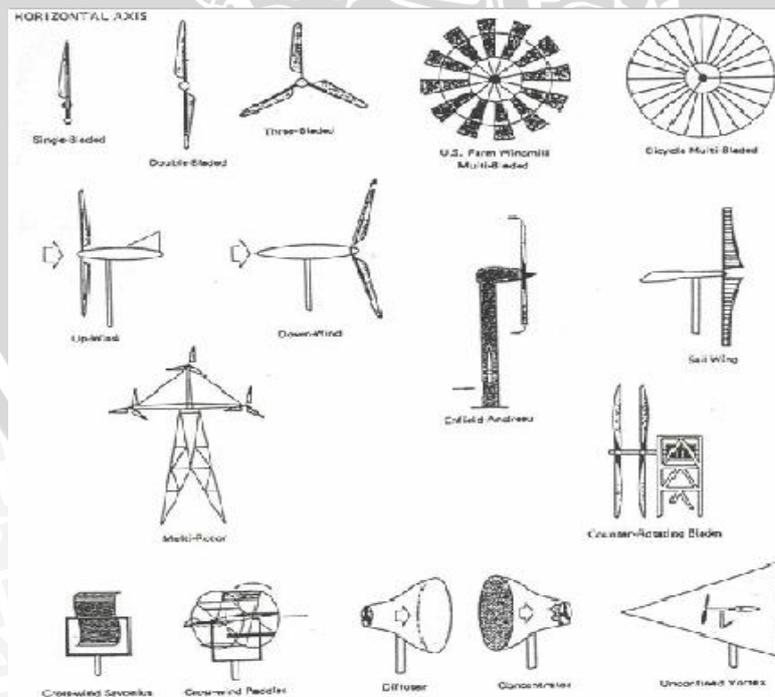
turbin angin sumbu horizontal. Berikut macam – macam turbin angin sumbu vertikal dapat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Varian Turbin Angin Sumbu Vertikal
Sumber: Hau E, (2006)

2. Turbin angin sumbu horizontal atau turbin angin aksial

Turbin angin horizontal memiliki sumbu putar yang terletak sejajar dengan permukaan tanah. 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 lain ketika melewatinya. Sehingga menimbulkan daerah tekanan rendah pada bagian belakang sudu dan daerah tekanan tinggi pada bagian depan sudu. Perbedaan tekanan ini membentuk gaya yang menyebabkan sudu berputar.

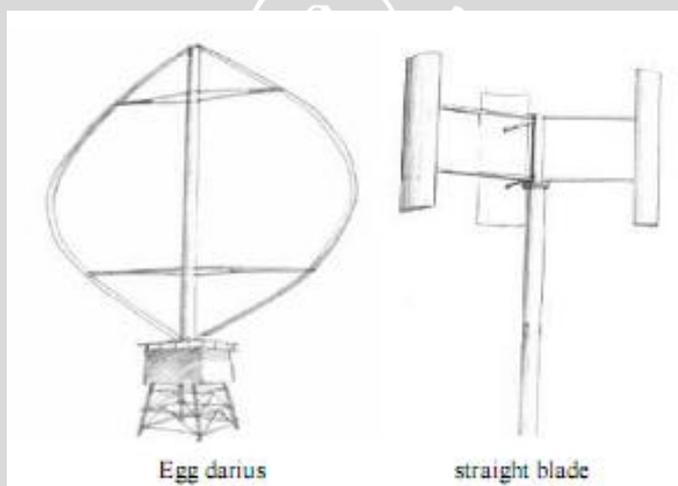


Gambar 2.5 Varian Turbin Angin Sumbu Horizontal
Sumber: Daryanto (2007)

2.4 Turbin Angin *Darrieus*

2.4.1 Pengertian Turbin Angin *Darrieus*

Turbin angin *Darrieus* merupakan suatu sistem konversi energi angin yang digolongkan dalam jenis turbin angin berporos tegak. Turbin angin ini pertama kali ditemukan oleh George Jean Marie Darrieus yang merupakan seorang *aeronautical engineer* asal Perancis pada tahun 1931. Ia memiliki dua bentuk turbin yang digunakan diantaranya adalah “*Eggbeater* atau *Curved Bladed*” dan “*Straightbladed*” *VAWT*. Sketsa dari kedua variasi konsep Darrieus ditunjukkan dalam gambar 2.6. Kincir angin *Darrieus VAWT* 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 2.6 Turbin Angin *Darrieus*
 Sumber: Marnoto Tjukup (2010)

Keuntungan dari turbin angin jenis *Darrieus* adalah tidak memerlukan mekanisme orientasi pada arah angin (tidak perlu mendeteksi arah angin yang paling tinggi kecepatannya) seperti pada turbin angin propeler karena bentuknya yang simetri, mampu beroperasi pada *head* dan kecepatan yang rendah, sedangkan kelemahannya adalah ketidakmampuan melakukan *self starting*, dan getaran yang tinggi. (El-Sayed, 1995)

2.4.2 Prinsip Kerja Turbin Angin *Darrieus*

Prinsip kerja turbin angin *Darrieus* adalah akibat kecepatan aliran udara maka menyebabkan sudu berputar dengan kecepatan putar tertentu, maka resultan dari kecepatan tersebut akan menghasilkan gaya *aerodinamis*. Gaya angkat (*lift*) dihasilkan karena bentuk airfoil dari sudu turbin. Sudu-sudu ini memotong udara dengan sudut serang yang mengakibatkan perbedaan tekanan. Hasil dari perbedaan tekanan inilah yang dapat mengakibatkan terjadinya gaya angkat, yang kemudian mendorong sudu bergerak ke depan. Untuk mendorong turbin, torsi yang disebabkan oleh gaya angkat (*lift*) harus lebih besar dibanding torsi yang dihasilkan oleh gaya hambat (*drag*) sehingga menghasilkan torsi netto. (DeCoste, 2004)

Sedangkan proses konversi energi yang terjadi pada turbin angin *Darrieus* adalah mengubah energi kinetik dari angin menjadi energi mekanik pada rotor turbin, lalu putaran rotor turbin digunakan untuk memutar generator, yang akhirnya akan menghasilkan listrik. Tetapi sebenarnya prosesnya tidak semudah itu, karena terdapat berbagai macam sub-sistem yang dapat meningkatkan keamanan dan efisiensi dari turbin angin tersebut, yaitu:

1. *Gearbox*

Alat ini berisi sistem roda gigi yang berfungsi untuk mengubah laju putar rendah rotor turbin (sekitar 100 RPM) menjadi laju putar tinggi (lebih dari 1500 RPM) untuk masuk ke *generator*.

2. *Brake System*

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

3. *Generator*

Ini adalah salah satu komponen yang paling penting dalam pembuatan sistem turbin angin. Generator ini dapat mengubah energi gerak menjadi energi listrik. Prinsip kerjanya dapat dipelajari dengan menggunakan teori medan elektromagnetik.

Singkatnya, (mengacu pada salah satu cara kerja generator) poros pada generator dipasang dengan material ferromagnetik permanen. Setelah itu disekeliling poros terdapat *stator* yang bentuk fisisnya adalah kumparan-kumparan kawat yang membentuk loop. Ketika poros generator mulai berputar maka akan terjadi perubahan fluks pada *stator* yang akhirnya karena terjadi perubahan fluks ini akan dihasilkan tegangan dan arus listrik tertentu. Tegangan dan arus listrik yang dihasilkan ini disalurkan melalui kabel jaringan listrik untuk akhirnya digunakan oleh masyarakat.

4. Penyimpan Energi

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

5. *Rectifier-inverter*

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

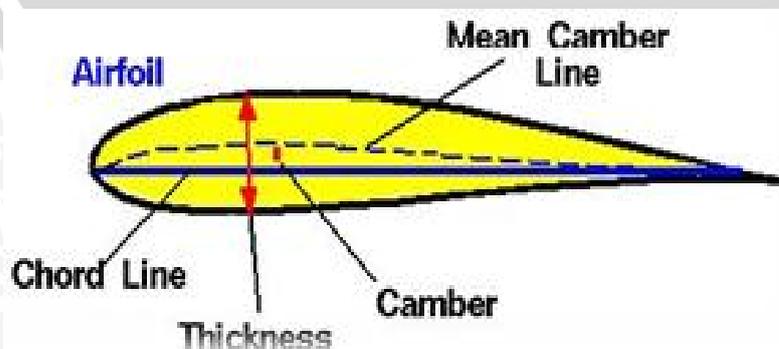
2.4.3 Macam-macam Jenis Sudu Turbin Angin Darrieus

2.4.3.1 Airfoil NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*)

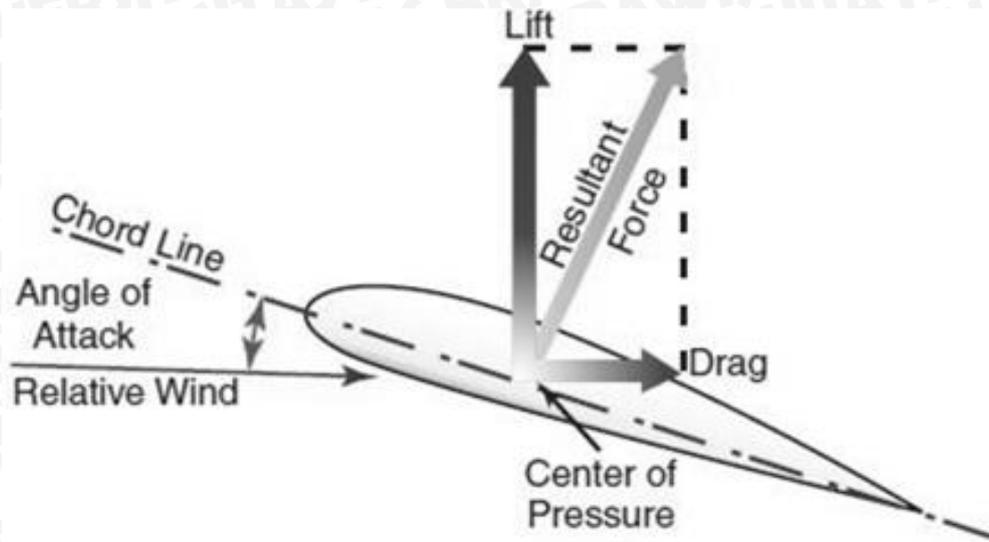
NACA *airfoil* adalah salah satu bentuk bodi aerodinamika sederhana yang berfungsi memberikan gaya angkat tertentu terhadap suatu bodi lainnya dan dengan bantuan penyelesaian matematis sangat memungkinkan untuk memprediksi berapa besarnya gaya angkat yang dihasilkan oleh suatu bodi *airfoil*. Gaya – gaya yang bekerja pada *airfoil* dapat dilihat pada gambar 2.8.

Hingga sekitar Perang Dunia II, *airfoil* yang banyak digunakan adalah hasil riset Gottingen. Selama periode ini banyak pengajuan *airfoil* dilakukan di berbagai negara, namun hasil riset NACA lah yang paling terkemuka. Pengujian yang dilakukan NACA lebih sistematis dengan membagi pengaruh efek kelengkungan dan distribusi ketebalan atau *thickness*, serta pengujiannya dilakukan pada bilangan *Reynold* yang lebih tinggi dibanding yang lain. Hal ini sering dirangkum oleh beberapa parameter seperti: ketebalan maksimum, maksimum bentuk melengkung, posisi maksimum ketebalan, posisi maksimum bentuk melengkung, dan hidung jari-jari. Seperti terlihat pada gambar 2.7 suatu *airfoil* terdiri dari: (Mulyadi, 2010)

- *Mean camber line* adalah tempat kedudukan titik-titik antara permukaan atas dan bawah *airfoil* yang diukur tegak lurus terhadap *mean camber line* itu sendiri.
- *Leading edge* adalah titik paling depan pada *mean camber line*, biasanya berbentuk lingkaran dengan jari-jari mendekati 2% dari panjang *chord*.
- *Trailing edge* adalah titik paling belakang pada *mean camber line*
- *Camber* adalah jarak maksimum antara *mean camber line* dan garis *chord* yang diukur tegak lurus terhadap garis *chord*.
- Ketebalan (*thickness*) adalah jarak antara permukaan atas dan permukaan bawah yang diukur tegak lurus terhadap garis *chord*.



Gambar 2.7 NACA Airfoil Geometry
Sumber : Benson (2010)

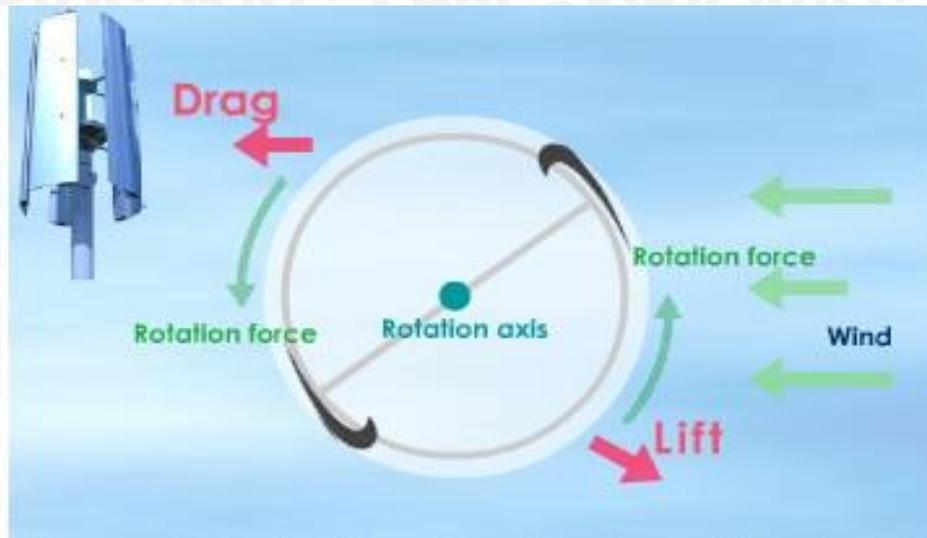


Gambar 2.8 Gaya pada *Airfoil*
Sumber: Suseno (2010)

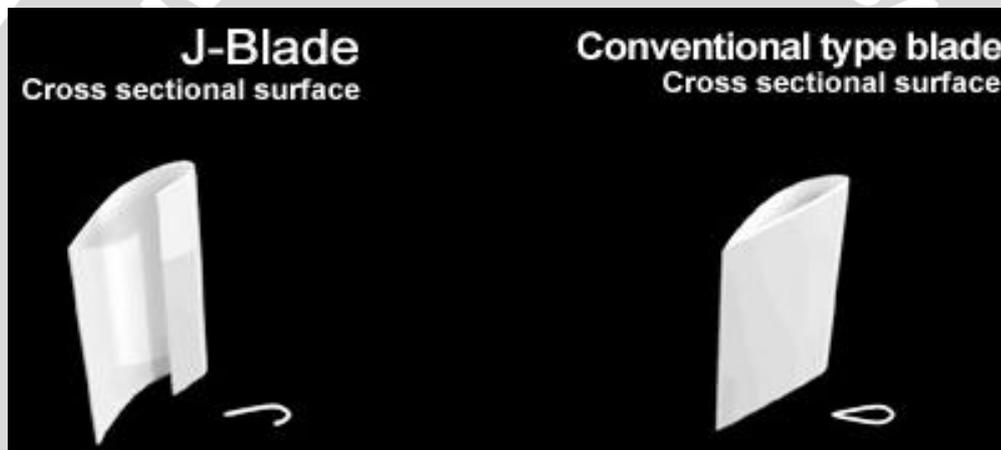
Pada gambar 2.8 dapat dilihat bahwa ada dua macam gaya yang menggerakkan rotor pada turbin angin, yaitu gaya *lift* dan gaya *drag*. Gaya *lift* adalah gaya pada arah tegak lurus arah aliran yang dihasilkan ketika fluida bergerak melalui benda yang berpenampang airfoil. Jika penampang airfoil menyapu udara dengan kecepatan tertentu, maka tekanan udara pada bagian atas rotor akan lebih kecil dari bagian bawah rotor. Hal ini mengakibatkan adanya gaya angkat pada rotor turbin tersebut yang disebut gaya *lift*. Sedangkan gaya *drag* adalah gaya hambat yang arahnya berlawanan dengan arah gerak benda.

2.4.3.2 Sudu J (*J-Blades*)

Sudu J diperkenalkan oleh sebuah perusahaan Wind-Smile Co., LTD. Tokyo pada tahun 2006. Sudu J ini sudah terdaftar dengan hak paten Jepang dengan nomor 3451085. Tetapi perusahaan Wind-Smile tidak memberikan penjelasan lebih lanjut tentang dimensi dari sudu J tersebut. Perusahaan Wind-Smile menunjukkan ilustrasi gaya – gaya yang bekerja pada sudu J pada gambar 2.9 dan menunjukkan perbandingan penampang pada sudu J dengan sudu konvensional pada gambar 2.10.



Gambar 2.9 Ilustrasi gaya-gaya yang bekerja pada Sudu J
 Sumber : www.wind-smile.com/technology/utilized.html



Gambar 2.10 Perbandingan penampang pada sudu J dengan sudu konvensional
 Sumber : www.wind-smile.com/technology/utilized.html

2.5 Kinerja Turbin Angin

Dalam pembahasan kali ini, parameter – parameter dari kinerja turbin angin yang akan dibahas adalah *Brake Horse Power* (BHP), Torsi (T), dan Efisiensi (η).

2.5.1 Brake Horse Power (BHP)

Brake Horse Power adalah daya dari turbin yang diukur setelah mengalami kerugian energi. Dalam percobaan ini nantinya *Brake Horse Power* (BHP) dinyatakan dengan menggunakan generator listrik. Setelah besar arus dan tegangan yang dihasilkan diketahui, maka bisa mengetahui besarnya daya yang dihitung dengan menggunakan hukum ohm. Seperti pada rumus berikut:

$$P_{\text{generator}} = V \times I \quad (2-5)$$

Keterangan:

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

V = Tegangan generator listrik (Volt)

I = Arus listrik (Ampere)

Setelah didapatkan nilai $P_{\text{generator}}$ maka BHP dapat dihitung menggunakan persamaan:

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

Keterangan:

BHP = Brake Horse Power (watt)

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

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

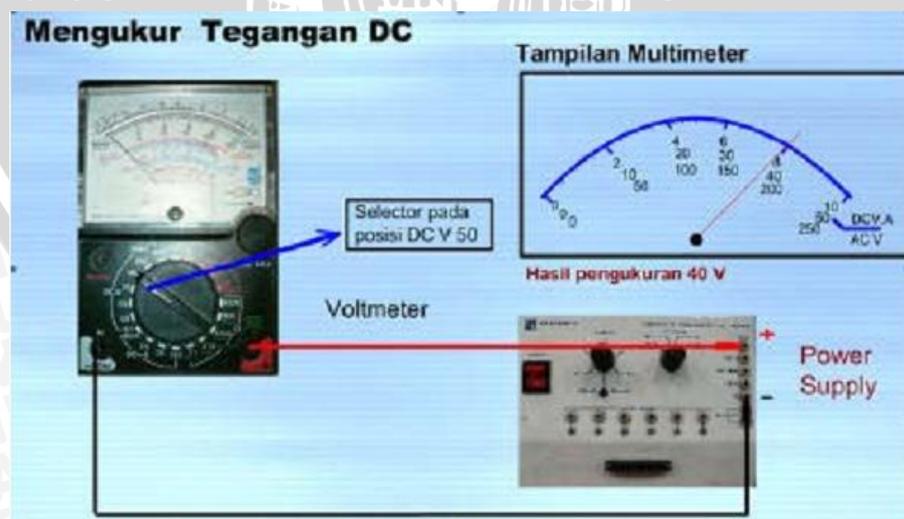
- Prinsip pengukuran tegangan dan arus DC

Pengukuran tegangan dan arus DC dilakukan dengan menggunakan *digital multimeter*.

Pada alat ukur ini ditampilkan beberapa panel untuk pengukuran arus (mA), temperatur ($^{\circ}\text{C}$), Hambatan atau resistansi (ohm), tegangan (mV), Frekuensi (Hz) dan daya listrik (mW). Berikut ini penjelasan tentang pengukuran tegangan dan arus DC:

- Pengukuran tegangan DC

Tegangan DC dapat diukur dengan menggunakan Voltmeter. Prinsip kerjanya yaitu semakin tinggi arus listrik yang melewati voltmeter, maka semakin besar pula medan magnet yang dihasilkan. Sehingga pembacaan pada layar juga akan semakin besar, dapat dilihat pada gambar 2.11.



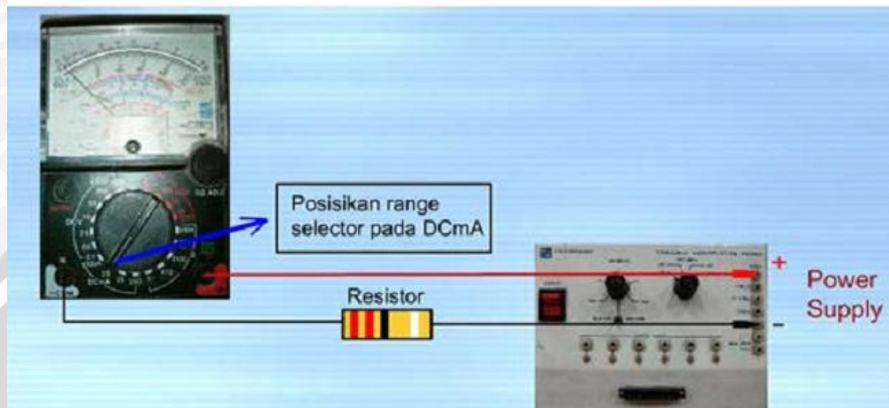
Gambar 2.11 Rangkaian Pengukuran Tegangan DC

Sumber : Sri (2008 : 78)

- Prinsip pengukuran arus DC

Pengukuran arus dilakukan menggunakan multimeter digital dengan cara yang terlihat seperti pada gambar 2.12.

Pemasangan meter seri terhadap beban yang akan di ukur arusnya.



Gambar 2.12 Rangkaian Pengukuran Arus DC

Sumber: Sri (2008:85)

2.5.2 Torsi (T)

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

$$T = \frac{\text{BHP}}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_{\text{turbin}}}{60}} \quad (2-7)$$

Keterangan :

T	: Torsi (Nm)
BHP	: Brake Horse Power (watt)
n_{turbin}	: Putaran turbin (rpm)

2.5.3 Efisiensi (η)

Untuk menyatakan performa suatu mesin biasanya dinyatakan dalam efisiensi yang merupakan perbandingan antara efek manfaat yang diperoleh dengan pengorbanan yang dilakukan. Rumus efisiensi adalah sebagai berikut :

$$\eta = \frac{\text{BHP}}{P_{\text{angin}}} \times 100\% \quad (\text{Fox, 1994 : 570}) \quad (2-8)$$

Keterangan :

η	= Efisiensi	(%)
BHP	= <i>Brake Horse Power</i>	(Watt)
P_{angin}	= Daya angin	(Watt)

2.6 Teori dan Persamaan

2.6.1 Teori Betz

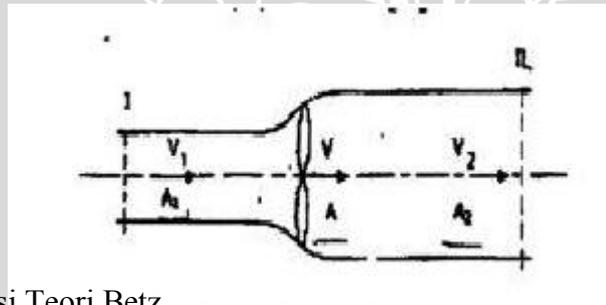
Betz dianggap sebagai sarjana yang pertama kali memperkenalkan teori tentang turbin angin. Betz mengasumsikan bahwa suatu turbin ideal merupakan rotor tanpa naf (hub) dan mempunyai sudu-sudu yang tak terhingga jumlahnya tanpa hambatan (Reksoatmojo, 2005). Juga diasumsikan bahwa aliran udara di depan dan di belakang rotor memiliki kecepatan yang seragam (laminar). Jika v_1 = kecepatan angin di depan rotor, v_2 = kecepatan angin di belakang rotor dan v = kecepatan angin pada saat melalui rotor, maka berdasarkan persamaan kontinuitas:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (\text{Reksoatmojo; 2005:65}) \quad (2-9)$$

dimana:

A = luas penampang (m^2)

v = kecepatan angin (m/s)



Gambar 2.13 Asumsi Teori Betz

Sumber: Reksoatmojo (2005)

Selanjutnya berdasarkan teorema daya mekanik pada turbin:

$$P_T = \frac{1}{2} \rho A_1 v_1^3 - \frac{1}{2} \rho A_2 v_2^3 \quad (\text{Dewi; 2010: 6}) \quad (2-10)$$

$$= \frac{1}{2} \rho (A_1 v_1^3 - A_2 v_2^3)$$

Dimana:

F = gaya yang bekerja pada rotor (N)

ρ = massa jenis udara (kg/m^3)

A = luas permukaan (m^2)

v = kecepatan angin (m/s)

Dari persamaan kontinuitas akan diperoleh:

$$P_T = \frac{1}{2} \rho A_1 v_1 (v_1^2 - v_2^2) \quad (\text{Dewi; 2010: 6}) \quad (2-11)$$

Untuk mendapatkan daya mekanik maksimum, maka v_2 harus bernilai nol, tetapi hal tersebut tidak mungkin tercapai. Maka dari itu untuk mengetahui daya maksimum yang dapat dihasilkan oleh turbin angin perlu diketahui nilai perbandingan antara v_1 dan v_2 .

Gaya yang bekerja pada turbin adalah:

$$F_t = \dot{m} (v_1 - v_2) \quad (\text{Dewi; 2010: 6}) \quad (2-12)$$

Maka daya turbin adalah sebesar:

$$P_t = F_t \cdot v = \dot{m} (v_1 - v_2) \cdot v \quad (\text{Dewi; 2010: 6}) \quad (2-13)$$

Dari persamaan (2-11) dan (2-13) didapatkan:

$$\frac{1}{2} \rho A_1 v_1 (v_1^2 - v_2^2) = \dot{m} (v_1 - v_2) \cdot v \quad (\text{Dewi; 2010: 6}) \quad (2-14)$$

$$\frac{1}{2} \rho A_1 v_1 (v_1 + v_2) (v_1 - v_2) = \dot{m} (v_1 - v_2) \cdot v$$

$$v = \frac{\frac{1}{2} \rho A_1 v_1 (v_1 + v_2) (v_1 - v_2)}{\dot{m} (v_1 - v_2)}$$

$$v = \frac{1}{2} (v_1 + v_2) \quad (\text{Dewi; 2010: 6}) \quad (2-15)$$

Sehingga kecepatan aliran udara pada turbin sebanding dengan nilai v_1 dan v_2 :

$$\dot{m} = \rho A v = \rho A \left(\frac{1}{2} (v_1 + v_2) \right)$$

Daya mekanik turbin menjadi:

$$\begin{aligned} P_t &= \frac{1}{2} \dot{m} (v_1^2 - v_2^2) \\ &= \frac{1}{2} \rho A \left(\frac{1}{2} (v_1 + v_2) \right) (v_1^2 - v_2^2) \\ &= \frac{1}{4} \rho A (v_1 + v_2) (v_1^2 - v_2^2) \end{aligned}$$

Sehingga efisiensi dapat dicari dengan cara:

$$C_p = \frac{\frac{1}{4} \rho A (v_1 + v_2) (v_1^2 - v_2^2)}{\frac{1}{2} \rho A \cdot v^3} \quad (\text{Dewi; 2010: 6}) \quad (2-16)$$

C_p maksimum diperoleh pada perbandingan kecepatan $v_1 : v_2 = 1 : 3$ yang menghasilkan nilai terbesar yaitu 0,593. Hal ini menunjukkan nilai efisiensi maksimal dengan asumsi kondisi ideal yang bisa dihasilkan oleh turbin angin adalah sebesar 59,3% dari daya angin. Angka ini kemudian disebut dengan *Betz Limit*.

2.6.2 Tip Speed Ratio

Tip speed ratio merupakan perbandingan antara kecepatan tangensial terhadap kecepatan angin yang melalui rotor. Rasio kecepatan tangensial memiliki nilai nominal

yang berubah-ubah terhadap perubahan kecepatan angin. *Tip speed ratio* λ dihitung dengan persamaan:

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{v} \quad (\text{Fox, 1994: 579}) \quad (2-24)$$

Dimana: $\omega \cdot R = v_{\text{tangensial}}$ (rad.m/s) (2-25)

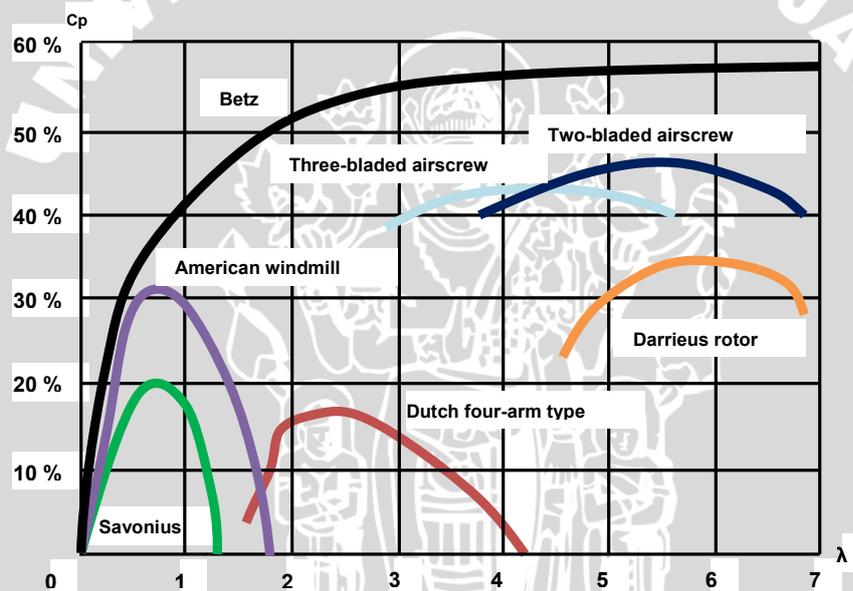
Keterangan:

ω = kecepatan sudut = $\frac{2\pi \cdot n}{60}$

n = putaran (rpm)

R = radius rotor (m)

v = kecepatan angin (m/s)



Gambar 2.14 Variasi *tip speed ratio* dan koefisien daya C_p pada berbagai jenis turbin angin

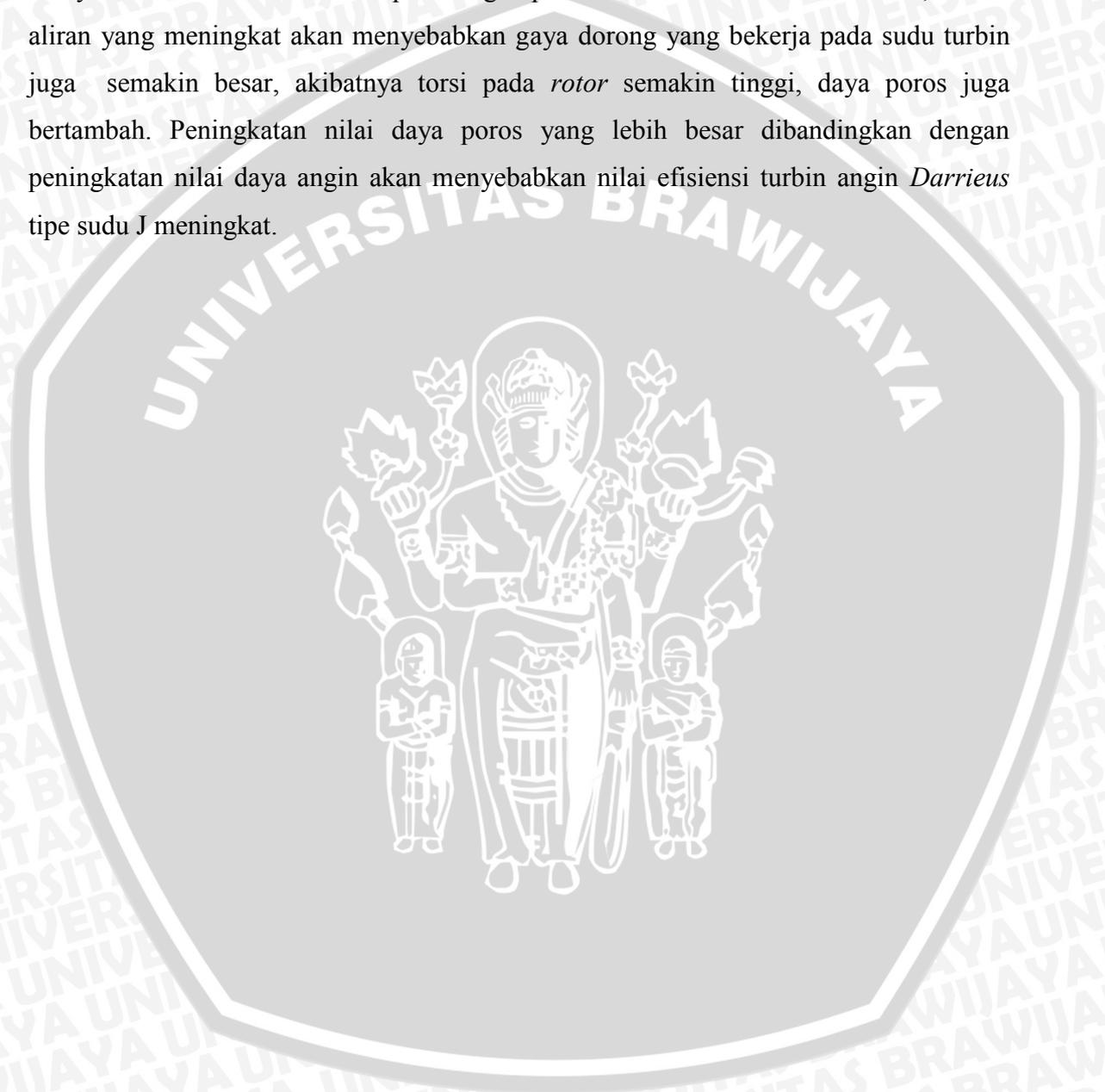
Sumber: Bouraba (2004)

Berdasarkan teori Betz yang divisualisasikan dalam bentuk grafik pada gambar 2.14, menjelaskan ketidakmungkinan suatu desain turbin angin memiliki *coefficient of power* (C_p) di atas angka 0,593. Hal ini dapat diartikan bahwa desain turbin terbaik tipe apapun tidak akan menghasilkan efisiensi rotor di atas 59,3% (*Betz limit*). Turbin angin jenis *drag* seperti turbin angin *savonius* dan *American windmill* umumnya memiliki koefisien daya yang relatif rendah karena banyak terjadi rugi-rugi yang ditimbulkan oleh turbulensi yang terjadi. Kecepatan putar rotornya juga relatif rendah. Turbin angin

jenis *lift* seperti turbin angin *Darrieus* memiliki koefisien daya yang relatif besar dan kecepatan rotor yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan turbin angin jenis *drag*.

2.7 Hipotesa

Semakin besar nilai panjang sudu turbin angin *Darrieus* tipe sudu J akan menyebabkan luas daerah terpaan angin pada sudu turbin akan bertambah, massa aliran yang meningkat akan menyebabkan gaya dorong yang bekerja pada sudu turbin juga semakin besar, akibatnya torsi pada *rotor* semakin tinggi, daya poros juga bertambah. Peningkatan nilai daya poros yang lebih besar dibandingkan dengan peningkatan nilai daya angin akan menyebabkan nilai efisiensi turbin angin *Darrieus* tipe sudu J meningkat.



BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode penelitian eksperimental, yaitu melakukan pengamatan untuk mencari data sebab-akibat dalam suatu proses melalui eksperimen sehingga dapat mengetahui kinerja turbin angin *Darrieus* tipe sudu-J dengan variasi panjang sudu.

3.2 Tempat dan Waktu Pelaksanaan

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Fluida, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya pada bulan November 2013 - 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:

- Kecepatan angin: 3; 4; 5; 6; dan 7 m/s
- Panjang sudu: 200; 250 dan 300 mm

2. Variabel terikat

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

- Daya poros yang dihasilkan turbin angin *Darrieus*.
- Torsi yang dihasilkan oleh turbin angin *Darrieus*.
- Efisiensi yang dihasilkan turbin angin *Darrieus*.

3. Variabel terkontrol

Variabel terkontrol adalah variabel yang nilainya dijaga konstan selama pengujian berlangsung. Variabel terkontrol dalam penelitian ini adalah:

- Jumlah sudu 3 buah.

3.4 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Anemometer

Anemometer digunakan untuk mengetahui kecepatan angin dari *wind tunnel*.

Dalam penelitian ini kecepatan angin dinyatakan dalam satuan m/s.

2. *Blower*

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



Gambar 3.1 *Blower*

Spesifikasi motor *blower*:

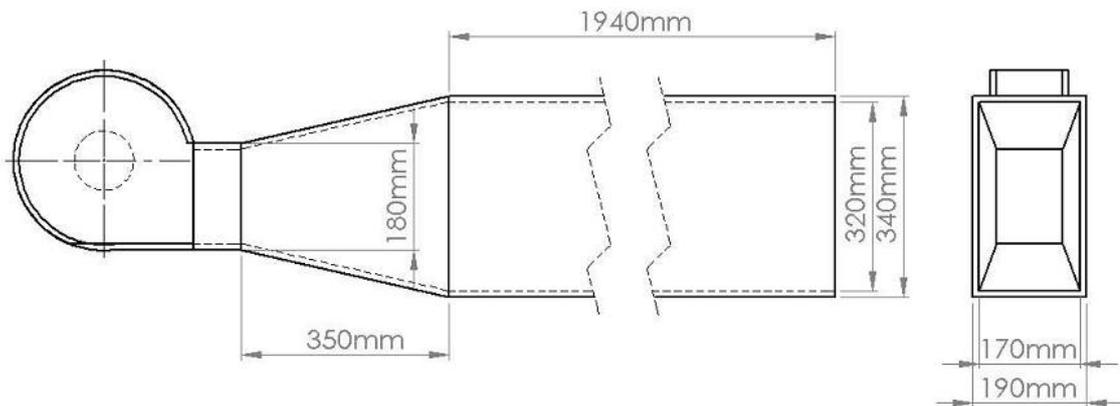
Tipe	: U 7181 No 7076-2977
Model	: 4C 668A
Daya	: 1/6 HP
Putaran Max	: 1600 RPM
Voltase	: 115 / 230 V
Ampere	: 2,6 / 1,3 A

3. Wind tunnel

Wind tunnel digunakan sebagai terowongan angin yaitu angin yang dari *blower* menuju turbin.



Gambar 3.2 *Wind tunnel*



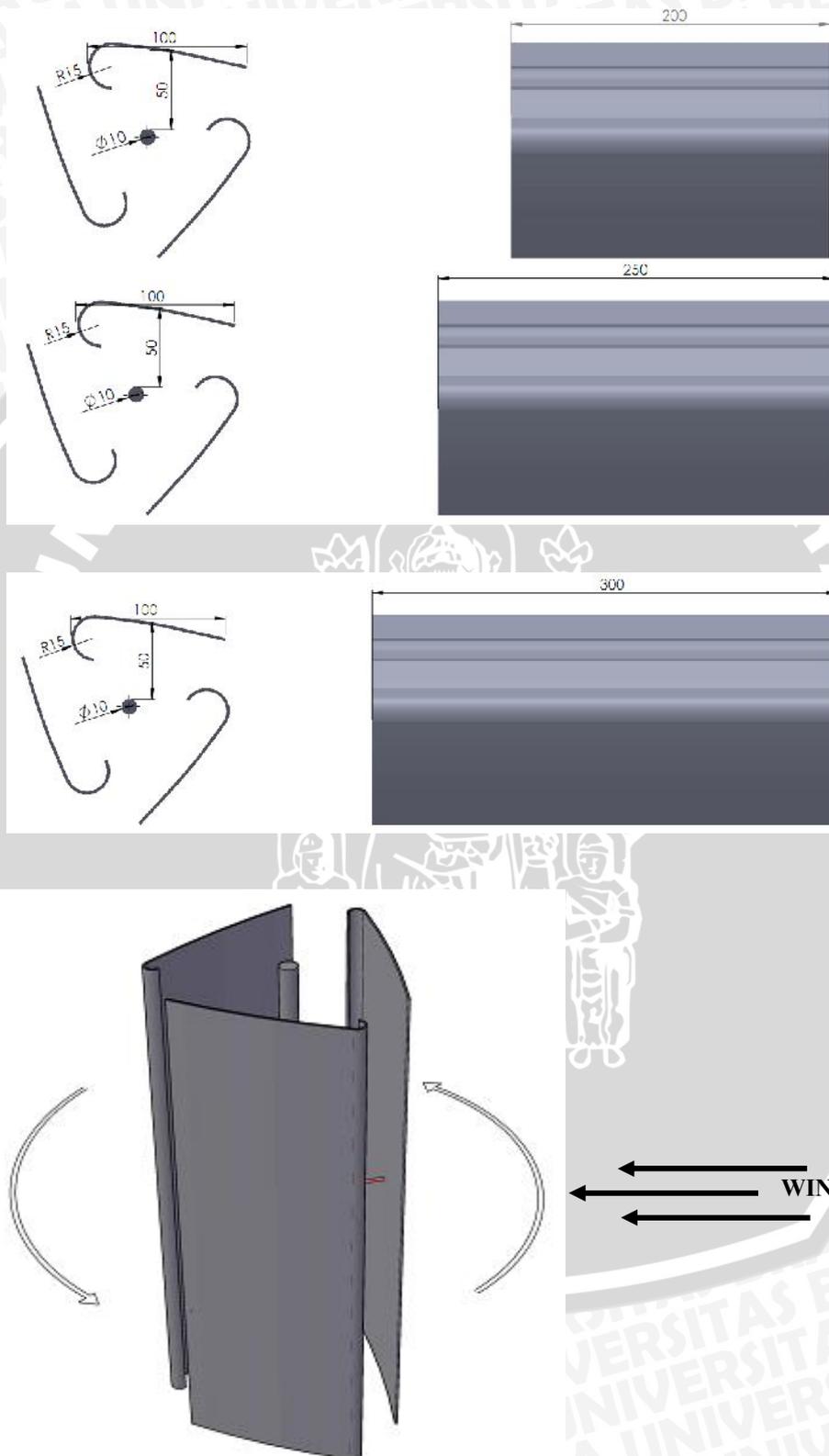
Gambar 3.3 Dimensi *Wind Tunnel*

4. Sudu turbin

Dalam penelitian ini, sudu turbin terbuat dari plat aluminium dan poros baja dengan spesifikasi sudu yang digunakan sebagai berikut:

- Jumlah sudu 3 buah.
- Panjang lengan sudu 50 mm.

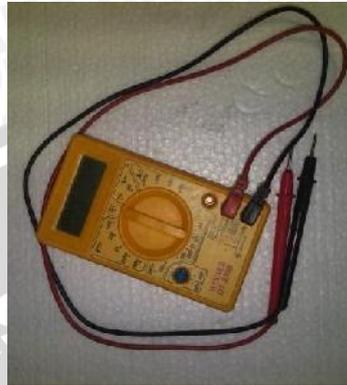
- Diameter poros sudu 10 mm.
- Radius bagian depan sudu 15 mm.



Gambar 3.4 Rancangan Model Turbin Angin *Darrieus* Tipe Sudu J

5. Digital Multitester

Digital Multitester digunakan untuk mengukur tegangan yang dihasilkan motor listrik dan mengukur hambatan lampu LED. *Digital multitester* yang digunakan adalah seperti gambar 3.5.



Gambar 3.5 *Digital multitester*

Spesifikasi :

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

6. Digital Tachometer

Digunakan untuk mengukur kecepatan putar dari poros turbin dalam RPM.

7. Generator Listrik

Generator listrik adalah alat yang digunakan untuk mengkonversikan energi mekanik pada rotor turbin menjadi energi listrik, yang kemudian *output* listriknya diukur dengan *Digital Multitester*.



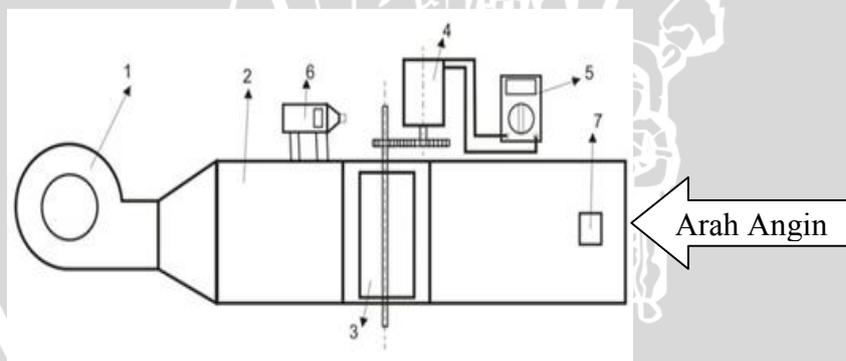
Gambar 3.6 Generator listrik

Spesifikasi:

Tipe	: A – 130
RPM with load	: 1500
Voltage	: 9 V DC
Efisiensi	: 80 %

3.5 Instalasi Penelitian

Instalasi penelitian dapat dilihat seperti pada gambar 3.9 berikut:



Gambar 3.7 Skema Instalasi Uji

Keterangan gambar:

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

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 dibutuhkan dalam penelitian.

3. Pembuatan alat

Pembuatan alat dilakukan dengan mempersiapkan plat Aluminium untuk pembuatan sudu turbin dan silinder Aluminium sebagai poros dari turbin.

4. Perancangan instalasi

Perancangan instalasi dimulai dengan membuat sudu dari plat Aluminium, pemasangan sudu pada poros, dan penempatan turbin.

5. Pengujian dan pengambilan data

Pengujian dilakukan pada instalasi *wind tunnel* dan pengambilan data yang diperlukan dalam penelitian ini adalah tegangan, kuat arus listrik, dan putaran poros dari turbin.

6. Analisa

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

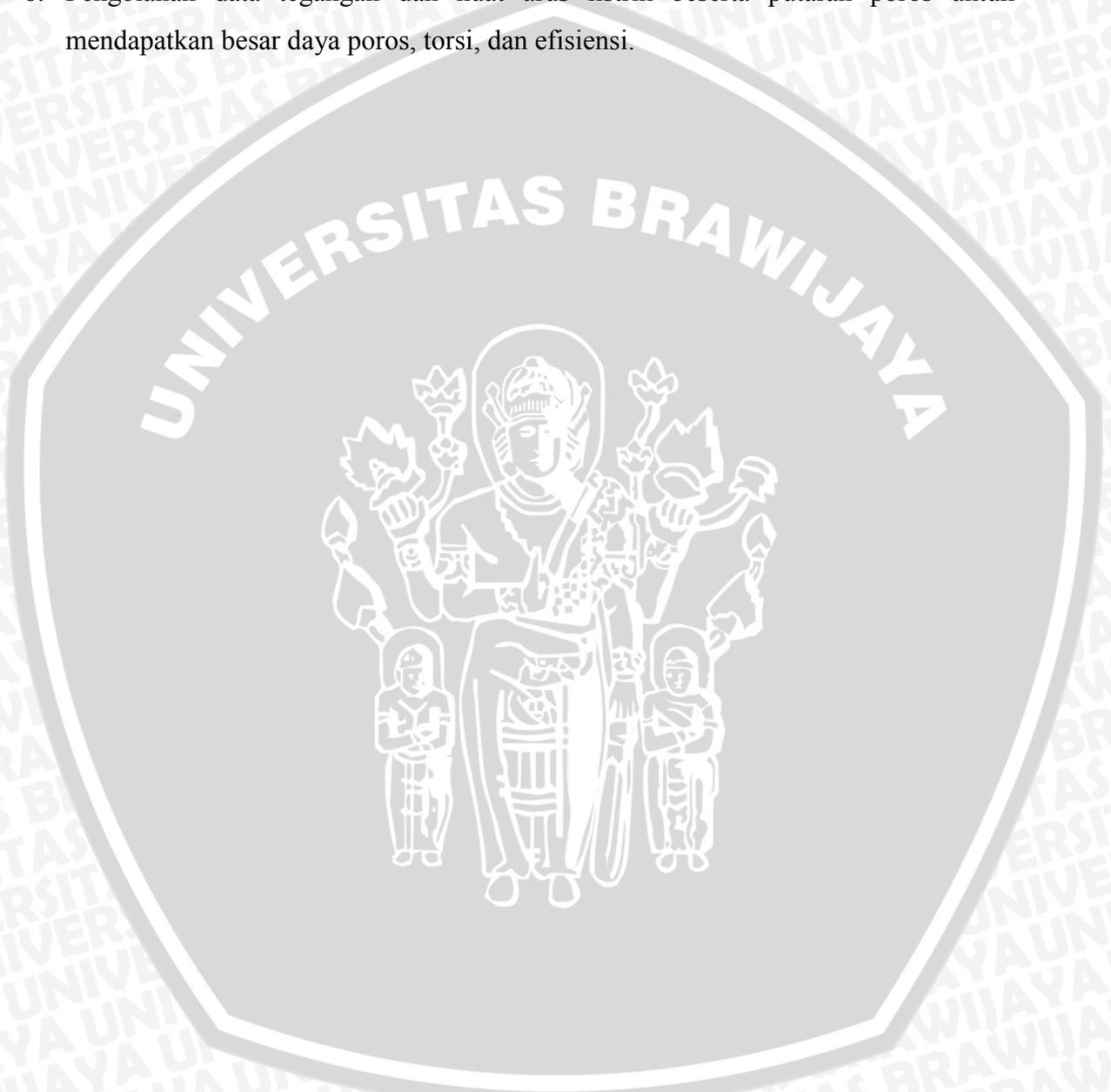
3.7 Metode Pengambilan Data

Adapun proses pengambilan data adalah sebagai berikut :

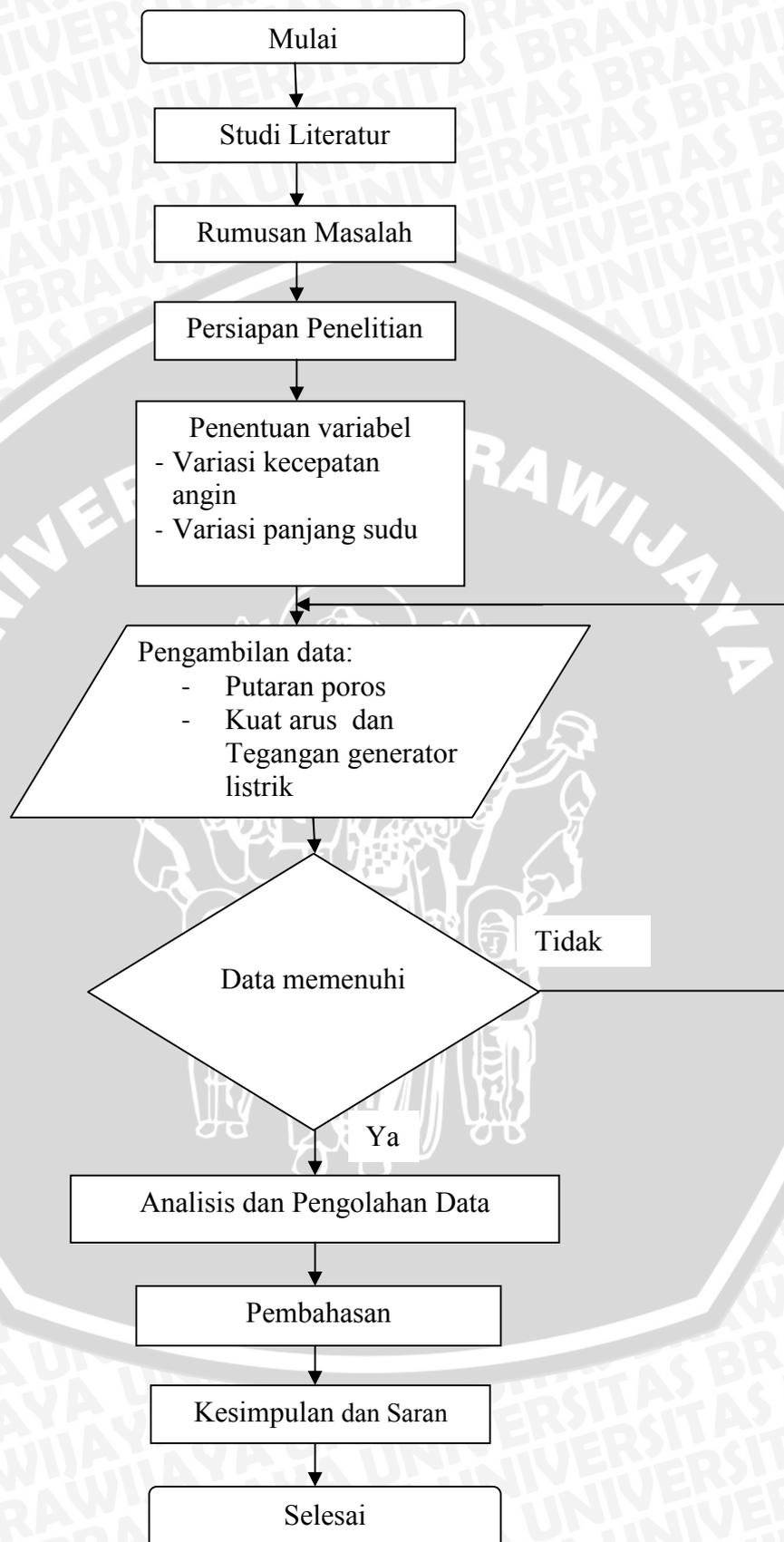
1. Menyiapkan instalasi *wind tunnel* dan turbin angin dengan variasi panjang sudu yang telah ditentukan, dimulai dengan variasi panjang sudu 200 mm.
2. Pengambilan data dimulai setelah mengalirkan fluida dari *wind tunnel* ke seluruh instalasi turbin angin. Kecepatan angin diatur dengan melihat *anemometer*, 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 kuat arus dan tegangan listrik yang dihasilkan generator

listrik dengan menggunakan *digital multimeter*.

5. Mengulangi langkah 1 sampai 4 sebanyak tiga kali.
6. Mengganti sudu dengan variasi panjang sudu lain yang diuji selanjutnya (variasi panjang sudu 250 dan 300 mm).
7. Mengulangi langkah 1 sampai 5 dengan variasi panjang 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 3.8 Diagram Alir Penelitian

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil

4.1.1 Data Hasil Pengujian

Data hasil pengujian pengaruh panjang sudu terhadap kinerja turbin angin *Darrieus* tipe sudu J.

- Tabel 4.1 Data hasil pengujian tegangan generator listrik (V)

		Kecepatan Angin (m/s)				
		3	4	5	6	7
PANJANG SUDU	200 mm	0,77	1,22	1,74	2,4	3,12
		0,74	1,25	1,76	2,37	3,09
		0,80	1,19	1,77	2,46	3,06
	Rata - rata	0,77	1,22	1,76	2,41	3,09
	250 mm	0,99	1,57	2,31	3,12	4,09
		0,96	1,59	2,35	3,14	4,13
		0,97	1,63	2,29	3,18	4,15
	Rata - rata	0,97	1,59	2,32	3,15	4,12
	300 mm	1,25	2,01	2,99	4,09	5,24
		1,28	2,11	2,96	4,04	5,26
		1,29	2,04	3,01	4,12	5,29
	Rata - rata	1,27	2,05	2,99	4,08	5,26

- Tabel 4.2 Data hasil pengujian kuat arus generator listrik (A)

		Kecepatan Angin (m/s)				
		3	4	5	6	7
PANJANG SUDU	200 mm	0,0077	0,0122	0,0174	0,024	0,0312
		0,0080	0,0125	0,0176	0,0237	0,0309
		0,0074	0,0119	0,0177	0,0246	0,0306
	Rata - rata	0,0077	0,0122	0,0176	0,0241	0,0309
	250 mm	0,0099	0,0157	0,0231	0,0312	0,0409
		0,0096	0,0159	0,0235	0,0314	0,0413
		0,0097	0,0163	0,0229	0,0318	0,0415
	Rata - rata	0,0097	0,0159	0,0232	0,0315	0,0412
	300 mm	0,0125	0,0201	0,0299	0,0409	0,0524
		0,0128	0,0211	0,0296	0,0404	0,0526
		0,0129	0,0204	0,0301	0,0412	0,0529
	Rata - rata	0,0127	0,0205	0,0299	0,0408	0,0526



- Tabel 4.3 Data hasil pengujian putaran poros turbin (rpm)

		Kecepatan Angin (m/s)				
		3	4	5	6	7
PANJANG SUDU	200 mm	299,3	400,6	552,7	698,8	804,3
		301,9	397,7	561,8	679,3	811,8
		288,5	399,2	548,9	684,6	824,7
	Rata - rata	296,6	399,2	554,5	687,6	813,6
	250 mm	345,8	429,1	621,2	711,6	841,1
		339,5	432,9	623,4	715,8	843,3
		342,6	434,7	620,3	709,4	845,8
	Rata - rata	342,6	432,2	621,6	712,3	843,4
	300 mm	397,9	586,1	661,2	761,5	871,7
		389,1	590,3	656,1	770,6	869,9
		391,4	579,4	649,6	773,3	858,4
	Rata - rata	392,8	585,3	655,6	768,5	866,7

4.1.2 Pengolahan Data

Perhitungan data dilakukan untuk mencari nilai daya poros, torsi dan efisiensi turbin angin *Darrieus* tipe sudu-J dengan variasi panjang sudu. Berikut ini adalah contoh perhitungan data hasil penelitian untuk panjang sudu 300 mm dan bukaan katup kecepatan angin 7 m/s. Contoh perhitungan:

Data yang diperoleh pada saat penelitian adalah sebagai berikut:

- Tinggi turbin (h) = 30 cm = 0,3 m
- Diameter turbin (d) = 11,4 cm = 0,114 m
- Hambatan (Ω) = 100 Ohm
- Efisiensi generator listrik (η) = 80 %
- Kecepatan angin (v) = 3, 4, 5, 6, dan 7 m/s
- Temperatur ruangan = 27 °C

- Massa jenis udara (ρ) = $1,18 \text{ kg/m}^3$
(berdasar tabel viskositas dan massa jenis udara pada tekanan 1 atm J.P. Holman, 1997 : 589)

Contoh perhitungan data:

- Luas penampang turbin (A)

$$\begin{aligned} A &= d \cdot h \\ &= 0,114 \text{ m} \cdot 0,3 \text{ m} \\ &= 0,0342 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

- Daya angin (P_{angin})

$$\begin{aligned} P_{\text{angin}} &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \\ &= \frac{1}{2} \cdot 1,18 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,0342 \text{ m}^2 \cdot (7 \text{ m/s})^3 \\ &= 6,9211 \text{ kg m}^2/\text{s}^3 \\ &= 6,9211 \text{ Watt} \end{aligned}$$

- Daya poros (BHP)

Contoh pada panjang sudu 300 mm. Didapatkan:

- Arus listrik (I) = 0,0526 Ampere
- Tegangan Listrik (V) = 0,0526 Ampere \cdot 100 Ohm = 5,26 Volt
- $\eta_{\text{generator}} = 80\%$

$$\begin{aligned} BHP &= \frac{P_{\text{generator}}}{\eta_{\text{generator}}} \\ BHP &= \frac{V \cdot I}{\eta_{\text{generator}}} \\ &= \frac{5,26 \cdot 0,0526}{0,8} \\ &= 0,3463 \text{ Watt} \end{aligned}$$

- Torsi (Nm)

$$T = \frac{BHP}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_{\text{turbin}}}{60}}$$

$$= \frac{0,3463}{2,3,14 \cdot \frac{866,7}{60}}$$

$$T = 0,0038 \text{ Nm}$$

- Efisiensi (η)

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

$$= \frac{0,3463}{6,9211} \cdot 100 \%$$

$$= 5,0033 \%$$

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

Tabel 4.4 Data Hasil Perhitungan Panjang Sudu 200 mm

KECEPATAN ANGIN (m/s)	Panjang Sudu			Daya Angin (Watt)
	200 mm			
	Daya Poros (Watt)	Torsi (Nm)	Efisiensi (%)	
3	0,0074	0,0002	2,0405	0,3632
4	0,0186	0,0004	2,1610	0,8609
5	0,0386	0,0007	2,2939	1,6815
6	0,0726	0,0010	2,4986	2,9056
7	0,1194	0,0014	2,5867	4,6140

Tabel 4.5 Data Hasil Perhitungan Panjang Sudu 250 mm

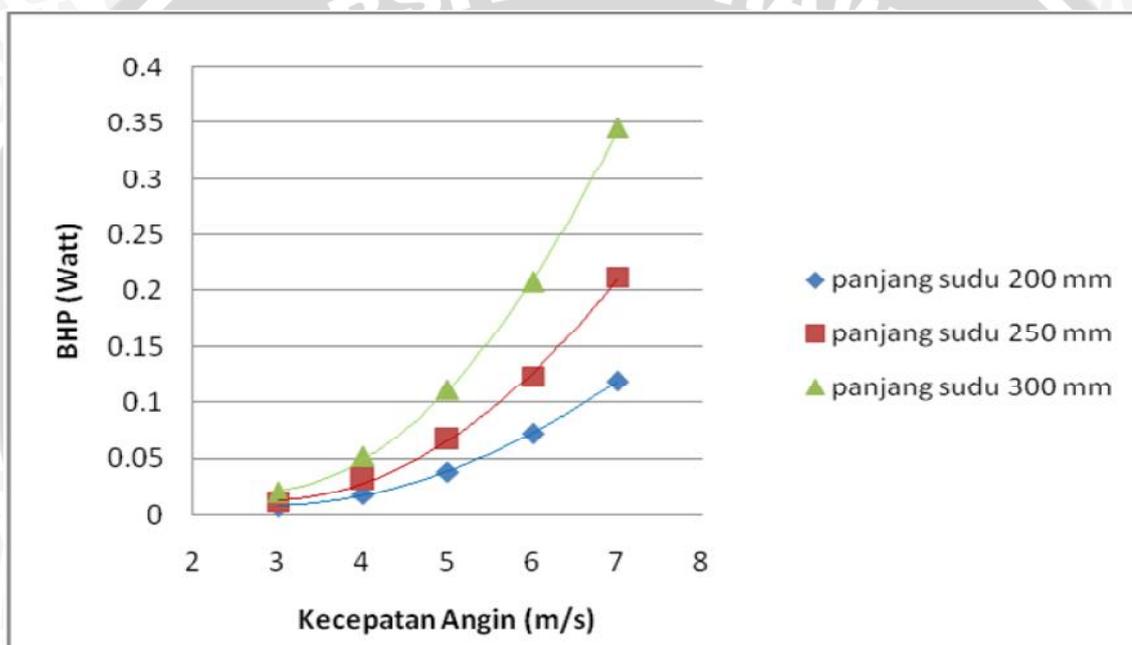
KECEPATAN ANGIN (m/s)	Panjang Sudu			Daya Angin (Watt)
	250 mm			
	Daya Poros (Watt)	Torsi (Nm)	Efisiensi (%)	
3	0,0118	0,0003	2,6084	0,4540
4	0,0319	0,0007	2,9612	1,0761
5	0,0671	0,0010	3,1918	2,1019
6	0,1238	0,0017	3,4077	3,6320
7	0,2125	0,0024	3,6848	5,7675

Tabel 4.6 Data Hasil Perhitungan Panjang Sudu 300 mm

KECEPATAN ANGIN (m/s)	Panjang Sudu			Daya Angin (Watt)
	300 mm			
	Daya Poros (Watt)	Torsi (Nm)	Efisiensi (%)	
3	0,0203	0,0005	3,7201	0,5448
4	0,0527	0,0009	4,0810	1,2914
5	0,1115	0,0016	4,4207	2,5223
6	0,2084	0,0026	4,7819	4,3584
7	0,3463	0,0038	5,0033	6,9211

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 di atas dapat kita ketahui bahwa kecepatan angin berpengaruh terhadap daya poros yang dihasilkan. Pada awal sampai akhir grafik hubungan antara kecepatan angin terhadap daya poros pada panjang sudu yang sama mengalami kecenderungan yang meningkat. Semakin meningkatnya kecepatan angin akan menyebabkan semakin besar momentum angin yang menumbuk sudu turbin setiap detiknya, sehingga gaya dorong yang dihasilkan semakin meningkat pula, dimana gaya dorong berbanding lurus dengan torsi.

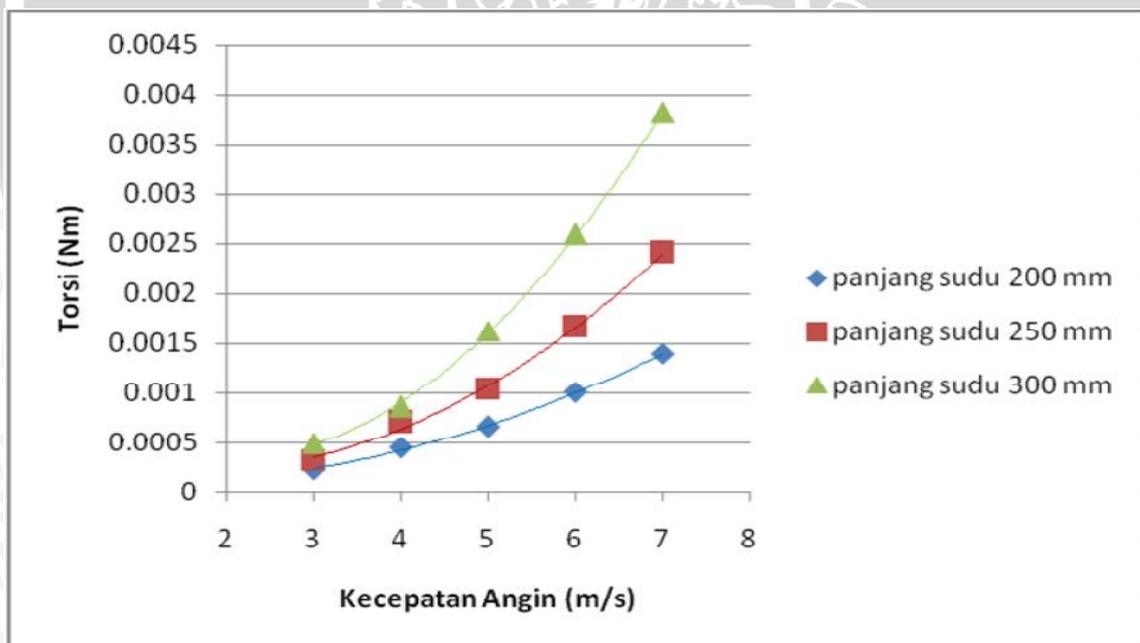
$$T = F.R$$

Dari persamaan diatas kita dapat melihat bahwa semakin meningkatnya gaya mengakibatkan torsinya juga akan semakin meningkat, dan meningkatnya torsi juga akan meningkatkan BHP, dimana:

$$\text{BHP} = \omega.T$$

Pada kecepatan angin yang sama, semakin panjang sudu turbin maka luas bidang tangkapnya semakin luas sehingga daya poros yang dihasilkan juga akan semakin besar. Dari grafik dapat dilihat bahwa BHP yang paling tinggi diperoleh turbin angin *Darrieus* tipe sudu J dengan panjang sudu 300 mm, yaitu sebesar 0,3463 Watt. Sedangkan pada panjang sudu 250 mm diperoleh BHP tertinggi sebesar 0,2125 Watt, dan pada panjang sudu 200 mm diperoleh BHP tertinggi sebesar 0,1194 Watt. Daya poros atau BHP tertinggi yang dicapai oleh masing-masing panjang sudu terjadi pada kondisi kecepatan angin 7 m/s.

4.2.2 Hubungan Antara Kecepatan Angin terhadap Torsi



Gambar 4.2 Grafik Hubungan antara Kecepatan Angin terhadap Torsi

Dari grafik di atas dapat kita ketahui bahwa kecepatan angin berpengaruh terhadap Torsi yang dihasilkan. Pada awal sampai akhir grafik hubungan antara kecepatan angin terhadap torsi pada panjang sudu yang sama mengalami kecenderungan yang meningkat. Semakin meningkatnya kecepatan angin akan menyebabkan semakin

besar momentum angin yang menumbuk sudu turbin setiap detiknya, sehingga gaya dorong yang dihasilkan semakin meningkat pula, dimana gaya dorong berbanding lurus dengan torsi. Hal ini sesuai dengan persamaan berikut:

$$T = F.R$$

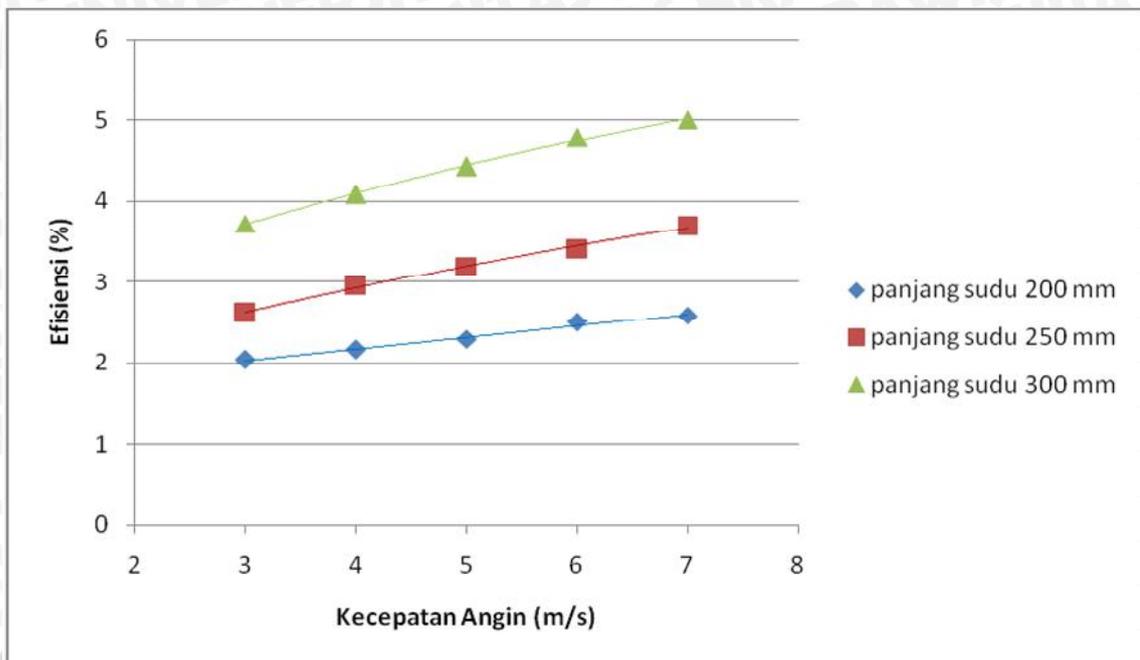
Dari persamaan diatas kita dapat melihat bahwa semakin meningkatnya gaya dorong mengakibatkan torsinya juga akan semakin meningkat. Selain itu meningkatnya nilai torsi yang dihasilkan juga dikarenakan semakin tingginya putaran yang mengakibatkan daya poros yang dihasilkan akan meningkat pula. Dengan demikian torsi yang dihasilkan juga meningkat. Hal ini sesuai dengan persamaan di bawah ini:

$$T = \frac{BHP}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_{generator}}{60}}$$

Pada grafik hubungan antara kecepatan angin terhadap torsi dapat dilihat bahwa pada kecepatan angin 3-7 m/s turbin dengan panjang sudu 300 mm cenderung memiliki torsi yang lebih besar dibandingkan panjang sudu yang lain. Hal ini dikarenakan pada turbin dengan panjang sudu 300 mm memiliki daerah tangkap angin yang lebih luas daripada pada turbin dengan panjang sudu 250 mm dan 200 mm, sehingga gaya dorong yang bekerja pada sudu pun akan menjadi besar pula yang mengakibatkan nilai torsi pada poros turbin juga semakin tinggi.

Torsi tertinggi dicapai oleh turbin dengan panjang sudu 300 mm yaitu sebesar 0,0038 Nm, diikuti panjang sudu 250 mm sebesar 0,0024 Nm, dan selanjutnya panjang sudu 200 mm sebesar 0,0014 Nm . Torsi tertinggi dari masing-masing sudu dicapai pada kecepatan angin 7 m/s.

4.2.3 Hubungan Antara Kecepatan Angin terhadap Efisiensi



Gambar 4.3 Grafik Hubungan Antara Kecepatan Angin terhadap Efisiensi

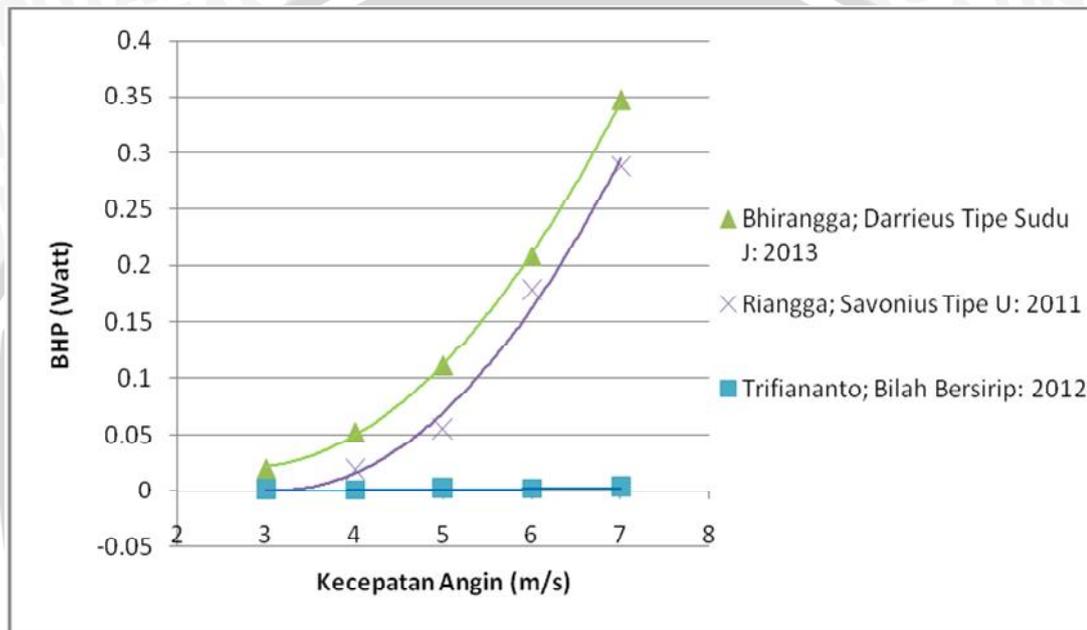
Dari grafik hubungan antara kecepatan angin terhadap efisiensi, dapat dilihat bahwa dengan semakin meningkatnya kecepatan angin akan menyebabkan semakin besar momentum angin yang menumbuk sudu turbin setiap detiknya, sehingga gaya dorong yang bekerja pada sudu turbin semakin meningkat pula, dimana gaya dorong berbanding lurus dengan torsi. Semakin meningkatnya gaya dorong mengakibatkan torsinya juga akan semakin meningkat, dan meningkatnya torsi juga akan mengakibatkan nilai daya poros semakin besar. Peningkatan nilai daya poros (BHP) yang lebih besar dari nilai daya angin akan menyebabkan nilai efisiensi yang dihasilkan semakin meningkat. Hal tersebut dikarenakan efisiensi merupakan perbandingan antara daya poros (BHP) dengan daya angin (P_{angin}). Hal ini sesuai dengan persamaan berikut ini:

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

Berdasarkan grafik di atas dapat diketahui bahwa turbin angin *Darrieus* dengan variasi panjang sudu 300 mm memiliki nilai efisiensi yang paling tinggi jika dibandingkan dengan panjang sudu yang lainnya. Nilai efisiensi tertinggi dihasilkan oleh sudu dengan panjang 300 mm pada kecepatan angin 7 m/s, yaitu dengan efisiensi sebesar 5,0033 %. Pada kecepatan angin yang sama, semakin panjang sudu turbin maka

daya poros yang dihasilkan juga akan semakin besar karena luas bidang tangkapnya yang semakin luas. Hal inilah yang menyebabkan nilai efisiensi yang dihasilkan oleh turbin angin *Darrieus* dengan panjang sudu 300 mm cenderung lebih besar daripada efisiensi yang dihasilkan oleh turbin angin *Darrieus* dengan variasi panjang sudu 250 mm dan 200 mm.

4.2.4 Perbandingan Daya Poros (BHP) yang Dihasilkan Antar Turbin

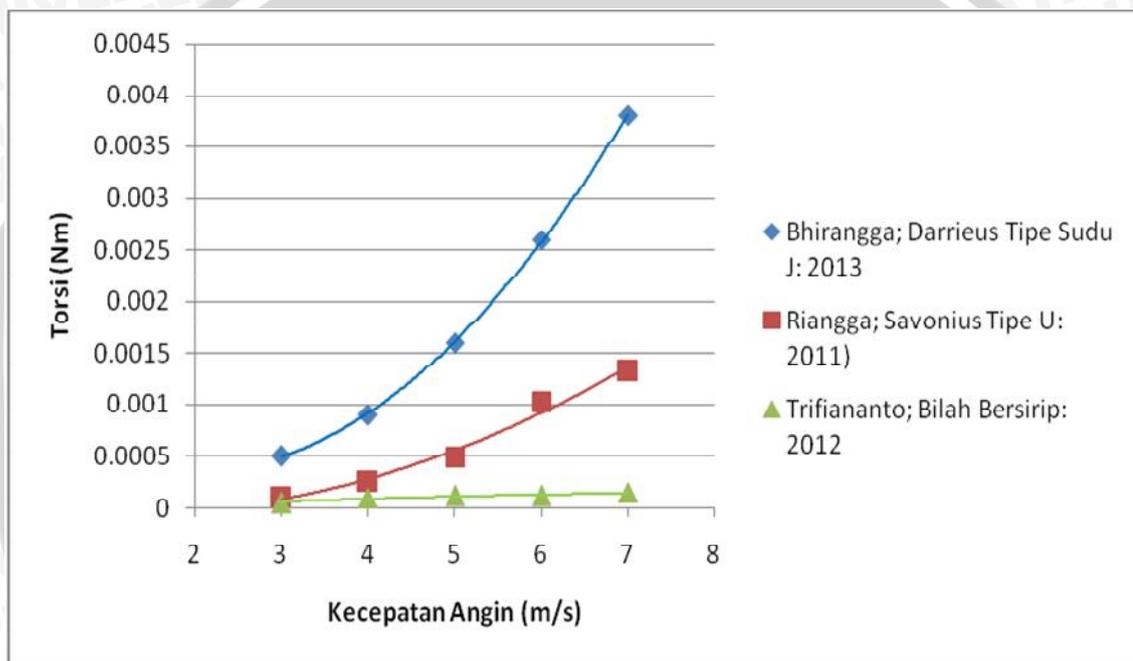


Gambar 4.4 Grafik Perbandingan Daya Poros (BHP) yang Dihasilkan Antar Turbin

Dari grafik diatas dapat dilihat perbandingan daya poros (BHP) yang dihasilkan antar turbin. Dari gambar 4.4 diketahui bahwa nilai daya poros (BHP) yang dihasilkan oleh turbin angin *Darrieus* tipe sudu J lebih tinggi jika dibandingkan dengan turbin angin Savonius tipe U yang telah diteliti oleh Riangga (2011) dan turbin angin tipe bilah bersirip yang telah diteliti oleh Trifiananto (2012). BHP tertinggi dihasilkan oleh turbin angin *Darrieus* tipe sudu J dengan variasi panjang sudu 300 mm pada kecepatan 7 m/s, yaitu sebesar 0,3463 Watt. Nilai daya poros (BHP) tersebut lebih tinggi daripada nilai daya poros (BHP) maksimum yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius* tipe U pada variasi panjang sudu 250 mm dengan kecepatan angin 7 m/s sebesar 0,2886 Watt, dan turbin angin tipe bilah bersirip pada variasi panjang bilah 250 mm dengan kecepatan 7 m/s sebesar 0.0031 Watt.

Pada kecepatan angin yang sama, daya poros yang paling tinggi dihasilkan oleh turbin angin *Darrieus* tipe sudu J. Hal ini dikarenakan turbin angin *Darrieus* tipe sudu J memiliki luas bidang tangkap angin yang lebih besar dibandingkan turbin angin *Savonius* tipe U dan turbin angin tipe bilah bersirip, sehingga gaya dorong yang bekerja pada turbin pun semakin besar, yang mengakibatkan nilai torsi juga meningkat. Semakin meningkatnya nilai torsi, maka akan menyebabkan nilai daya poros yang dihasilkan juga meningkat.

4.2.5 Perbandingan Torsi yang Dihasilkan Antar Turbin

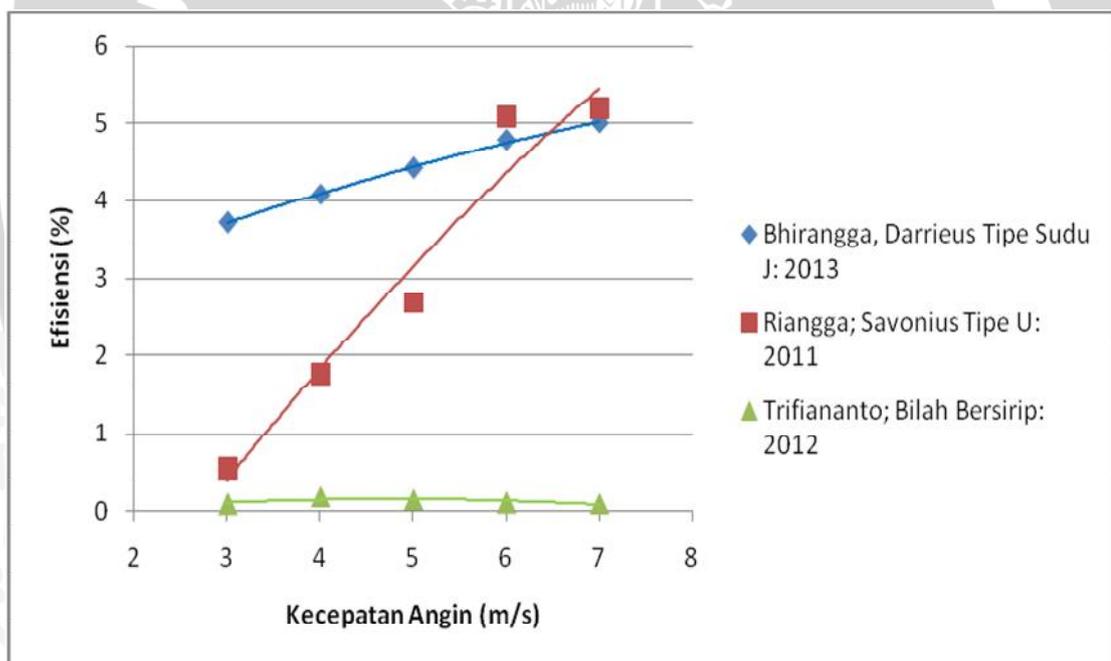


Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Torsi yang Dihasilkan Antar Turbin

Dari grafik perbandingan torsi yang dihasilkan antar turbin (gambar 4.5) diketahui bahwa torsi tertinggi dihasilkan oleh turbin angin *Darrieus* tipe sudu J dengan variasi panjang sudu 300 mm pada kecepatan angin 7 m/s, yaitu sebesar 0,0038 Nm. Nilai torsi tersebut lebih tinggi jika dibandingkan dengan nilai torsi tertinggi yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius* tipe U yang telah diteliti oleh Riangga (2011) dengan variasi panjang sudu 250 mm pada kecepatan angin 7 m/s yaitu sebesar 0,0013 Nm, dan turbin angin tipe bilah bersirip yang telah diteliti oleh Trifiananto (2012) dengan variasi panjang sudu 250 mm pada kecepatan angin 7 m/s yaitu sebesar 0,00015 Nm.

Pada kecepatan angin yang sama, nilai torsi yang dihasilkan turbin angin *Darrieus* tipe sudu J lebih tinggi daripada nilai torsi yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius* tipe U dan turbin angin tipe bilah bersirip. Hal ini dikarenakan turbin angin *Darrieus* tipe sudu J memiliki luas daerah tangkap yang lebih besar dibandingkan turbin angin *Savonius* tipe U dan turbin angin tipe bilah bersirip. Sehingga gaya dorong yang bekerja semakin besar, dan torsi yang dihasilkan pun akan meningkat. Meningkatnya nilai torsi juga akan menyebabkan nilai daya poros yang dihasilkan meningkat. Selain itu nilai daya poros yang dihasilkan turbin angin *Darrieus* tipe sudu J juga lebih besar daripada turbin angin *Savonius* tipe U maupun turbin angin tipe bilah bersirip, hal ini menyebabkan nilai torsi yang dihasilkan oleh turbin angin *Darrieus* tipe sudu J juga lebih besar dibandingkan torsi yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius* tipe U dan turbin angin tipe bilah bersirip.

4.2.6 Perbandingan Efisiensi yang Dihasilkan Antar Turbin



Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Efisiensi yang Dihasilkan Antar Turbin

Pada gambar 4.6 dapat dilihat bahwa efisiensi tertinggi dihasilkan oleh turbin angin *Savonius* tipe U yang telah diteliti oleh Riangga (2011) dengan variasi panjang sudu 250 mm yaitu sebesar 5,17 % pada kecepatan angin 7 m/s. Nilai efisiensi tersebut merupakan nilai efisiensi tertinggi jika dibandingkan dengan nilai efisiensi yang dihasilkan oleh turbin angin *Darrieus* tipe sudu J dan turbin angin tipe bilah bersirip

yang telah diteliti Trifiananto (2012). Hal ini dikarenakan pada turbin angin *Savonius* tipe U mengalami peningkatan daya angin yang tidak sebanding dengan peningkatan daya poros (BHP) yang dihasilkan. Efisiensi merupakan perbandingan antara daya poros (BHP) dengan daya angin. Semakin besar nilai daya poros (BHP), dan nilai daya angin yang kecil akan menyebabkan nilai efisiensinya yang dihasilkan menjadi semakin besar juga.

Pada turbin angin *Darrieus* tipe sudu J dengan variasi panjang sudu 300 mm pada kecepatan angin 7 m/s dihasilkan efisiensi tertinggi, yaitu sebesar 5,0033 %. Sedangkan pada turbin angin tipe bilah bersirip dengan variasi panjang sudu 250 mm pada kecepatan angin 4 m/s dihasilkan efisiensi tertinggi, yaitu sebesar 0,1839 %. Nilai efisiensi yang rendah ini dikarenakan bentuk desain sudu atau bilah dari masing-masing turbin yang dipakai merupakan model dari turbin angin pada aplikasi nyata di lapangan. Sehingga desain sudu yang dibuat kurang optimal dalam memanfaatkan energi angin yang akan dikonversikan menjadi energi listrik oleh generator. Serta pemakaian generator yang kurang tepat pada ketiga penelitian tersebut juga menyebabkan nilai efisiensi yang dihasilkan oleh ketiga turbin rendah.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat diperoleh kesimpulan seperti yang dijelaskan di bawah ini:

1. Hasil pengolahan dan pengujian data menunjukkan bahwa panjang sudu berpengaruh terhadap kinerja turbin angin *Darrieus* tipe sudu J.
2. Daya poros atau BHP akan semakin meningkat seiring meningkatnya kecepatan angin karena momentum angin yang menumbuk sudu semakin besar.
3. Torsi yang dihasilkan turbin angin *Darrieus* tipe sudu J semakin meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan angin yang menumbuk sudu turbin.
4. Efisiensi tertinggi yang diperoleh adalah sebesar 5,0033 % pada kecepatan angin 7 m/s dengan panjang sudu 300 mm.

5.2 SARAN

Dari penelitian yang telah dilakukan tentang kinerja turbin angin *Darrieus* tipe sudu J, maka penulis menyarankan untuk:

- Dilakukan penelitian lebih lanjut tentang pengaruh variasi tebal dan lebar sudu terhadap kinerja turbin angin *Darrieus* tipe sudu J.
- Dilakukan penelitian lebih lanjut dengan penggunaan generator yang sesuai, sehingga kinerja dari turbin menjadi maksimal.
- Dilakukan penelitian lebih lanjut tentang kinerja turbin angin *Darrieus* tipe sudu-J yang dilakukan dengan kondisi datangnya arah angin dari berbagai arah, sehingga dapat mendekati kondisi nyata di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonymous_1.<http://jendeladenngabei.blogspot.com/2012/11/alatukurangin.html>
(diakses 4 September 2013)
- Anonymous_2.www.wind-smile.com/technology/utilized.html
(diakses 4 September 2013)
- Bueche, F. J. 1988. *Fisika*. Jakarta: Erlangga.
- Daryanto. 2007. *Kajian Potensi Angin Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu*. Yogyakarta: BALAI PPTAGG.
- Decoste, Josh. 2004. *Self Starting Darrieus Wind Turbine*. Departement of Mechanical Engineering, Dalhousie University.
- Dewi, M. L.; 2010 : *Analisis Kinerja Turbin Angin Poros Vertikal dengan Modifikasi Rotor Savonius L untuk Optimasi Kinerja Turbin* :UNS, Surakarta
- El-Sayed, A. F. dan Abdel Azim. 1995. Dynamics of Vertical Axis Wind Turbines (Darrieus Type). Zagazig University.
- Fox, Robert W. and McDonald, Alan T. 1994. *Introduction to Fluid Mechanics*. New York: John Wiley and Sons Inc.
- Giancoli, Douglas C. 1995. *Physics Fourth Edition*. New Jersey: Prentice Hall International Inc.,
- Holman, J.P. 1997. *Perpindahan Kalor*. Jakarta: Erlangga.
- Hau, E. 2006. *Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Applications, Economics 2nd Edition*, Berlin: Springer.
- Kadir, Abdul. 1996. *Energi*. Jakarta: UPI
- Kementerian Riset dan Teknologi. 2010. "Menggapai Indonesia Bisa" *Teknologi Energi Listrik Hybrid di Bantul, DIY*. Jakarta: Ristek
- Marnoto, Tjukup. 2010. *Perancangan Kincir Angin Axis Vertikal Type Baru untuk Generator Listrik Tenaga Angin*. Jogjakarta: Universitas Pembangunan Nasional Veteran.
- Menet, Bourabaa. 2004. *Increase In The Darrieus Rotors Efficiency Via A Parametric Investigation*. Prancis: Université de Valenciennes.
- Prasetyo, Riangga Aji. *Pengaruh Variasi Tinggi Sudu terhadap Performansi Vertical Axis Wind Turbine Jenis Savonius Type-U*. Malang: Universitas Brawijaya.
- Reksoatmodjo, Tedjo Narsoyo. 2004. *Vertical Axis-Differential Dragmill*. Semarang: UNJANI.
- Sargolzaei, J. 2007. *Prediction of The Power Ratio in Wind Turbine Savonius Rotors Using Artificial Neural Networks*. Zahedan: Baluchestan University.

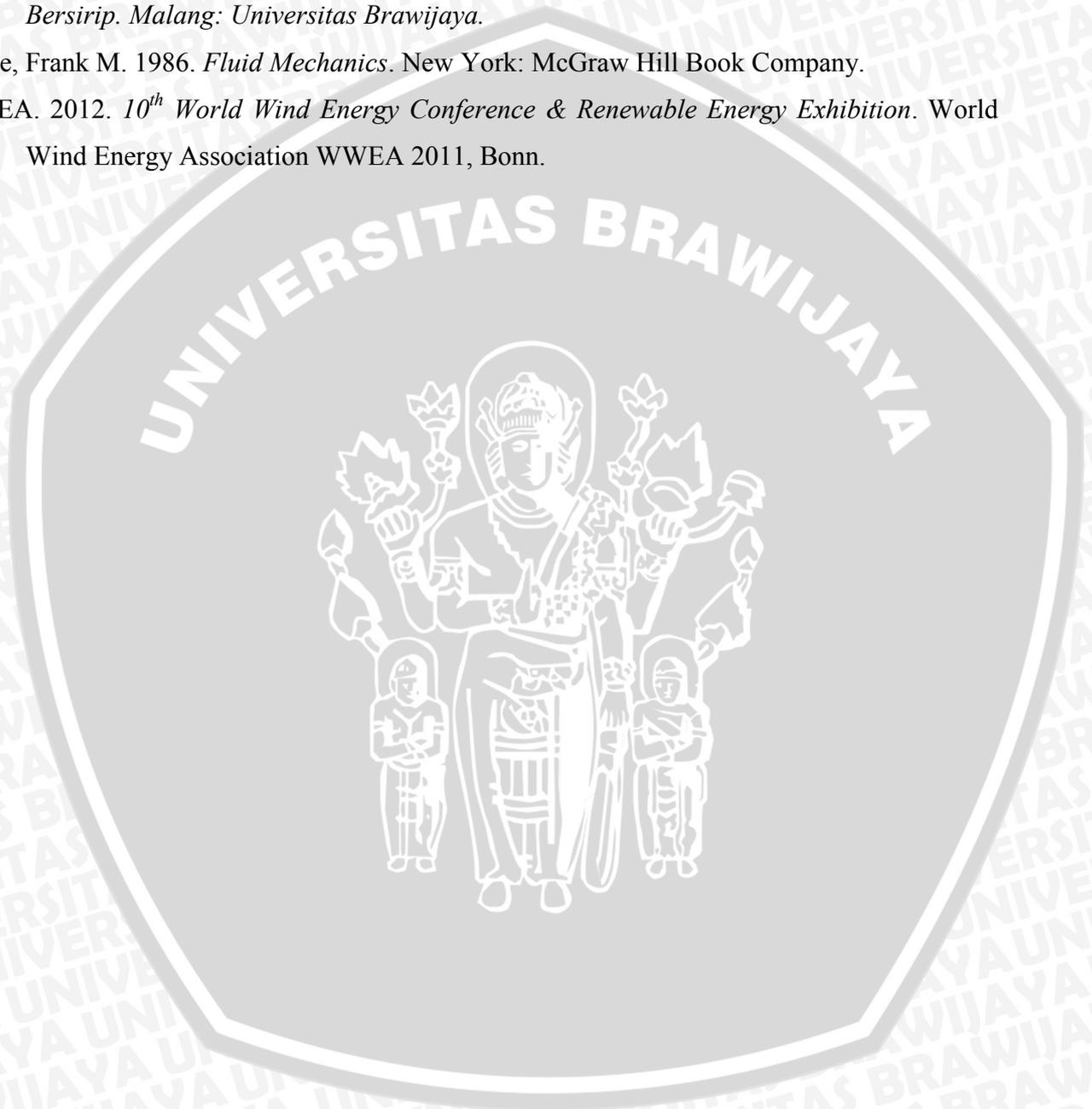
Sri Waluyanti, dkk. 2008. *Alat Ukur dan Teknik Pengukuran Jilid 1*. Jakarta: Departemen Pendidikan Nasional.

Sulistiyono. 2013. *Kinerja Turbin Angin Darrieus Tipe Sudu J dengan Variasi Radius Bagian Depan Sudu*. Malang: Universitas Brawijaya.

Trifiananto, M. 2012. *Pengaruh Panjang Bilah terhadap Unjuk Kerja Turbin Angin Tipe Bilah Bersirip*. Malang: Universitas Brawijaya.

White, Frank M. 1986. *Fluid Mechanics*. New York: McGraw Hill Book Company.

WWEA. 2012. *10th 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 μ , k , c_p , dan Pr tidak terlalu bergantung pada tekanan dan dapat digunakan untuk rentang tekanan yang cukup luas.

T, K	ρ kg/m ³	c_p , kJ/kg · °C	μ , kg/m · s × 10 ⁵	ν , m ² /s × 10 ⁶	k , W/m · °C	α , m ² /s × 10 ⁴	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 *Darrieus* Tipe Sudu J dengan Panjang Sudu yang Berbeda

Panjang Sudu 200 mm



Panjang Sudu 250 mm



Panjang Sudu 300 mm

