

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

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI**

**Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik**



Disusun Oleh :
CANDRA PUTRA ARDI PRATAMA
NIM. 0910620007 – 62

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

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala limpahan berkat dan rahmat-Nya dan Hidayahnya, serta sholawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW. Sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan skripsi dengan judul “Pengaruh Variasi Jumlah 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 Yuliati, ST., MT.,Dr. Eng. selaku Kepala Laboratorium Mesin-mesin Fluida.
8. Orang tua saya, Bapak Sunardi dan Ibu Sri Ujud Mujiati, adik saya Elсандра Putri Ardiyanti. Yang telah memberikan kasih sayang, doa, motivasi, semangat, serta dukungan moral dan materiil.
9. Seluruh Staf Pengajar dan Administrasi Jurusan Teknik Mesin yang telah banyak memberikan ilmu pengetahuan yang sangat mendukung baik dalam perkuliahan maupun selama penyusunan skripsi saya.
10. Asisten-asisten Laboratorium Mesin-mesin Fluida yang telah membantu selama pelaksanaan penelitian.

11. Teman sepenelitian dan sepemikiran Bhirangga, Ardi dos, Danni kurniawan ichwanul, Sulisty, Zendy
12. Afi Khurrotul Aini yang selalu support, menghibur dan banyak bantuan lainnya
13. Sahabat saya Jambul, Tarmen, Zaldy dan member wanderers fc
14. Teman teman kuliah Mesin UB 2009 serta saudara seperjuangan yang telah memberikan doa, semangat, hiburan, serta motivasi dalam menyelesaikan skripsi ini.
15. Seluruh pihak terkait yang telah membantu dan tidak dapat disebutkan satu persatu.

Dalam penyusunan skripsi ini masih belum dari kata sempurna, oleh karena itu penulis bersedia menerima saran dan kritik agar bisa lebih menyempurnakan skripsi ini. Akhirnya penulis berharap semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi semua pihak. Terima kasih

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.....	3
2.2 Angin	3
2.2.1 Proses Terbentuknya Angin.....	3
2.2.2 Energi Angin.....	6
2.3 Turbin Angin.....	7
2.3.1 Klasifikasi Turbin Angin.....	7
2.4 Turbin Angin <i>Darrieus</i>	8
2.4.1 Pengertian Turbin Angin <i>Darrieus</i>	9
2.4.2 Sudu Turbin Angin <i>Darrieus</i>	9
2.4.2.1 Profil <i>Airfoil</i>	9
2.4.2.2 Sudu J (<i>J-Blades</i>).....	10
2.5 Kinerja Turbin Angin <i>Darrieus</i>	11
2.5.1 <i>Brake Horse Power (BHP)</i>	11
2.5.2 Torsi (T).....	14
2.5.3 Efisiensi (η).....	14
2.6 Teori dan persamaan.....	14



2.6.1	Teori Betz	14
2.6.2	Daya pada Turbin Angin <i>Darrieus</i>	16
2.7	Generator	18
2.8	Hipotesa	18

BAB III METODE PENELITIAN

3.1	Tempat dan Waktu Pelaksanaan	19
3.2	Variabel Penelitian	19
3.3	Peralatan Penelitian	19
3.4	Instalasi Penelitian.....	25
3.5	Prosedur Penelitian.....	26
3.6	Metode Pengambilan Data	26
3.7	Diagram Alir Penelitian	28

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1	Hasil	29
4.1.1	Data Hasil Pengujian	29
4.1.2	Pengolahan Data	31
4.2	Pembahasan	34
4.2.1	Hubungan Antara Kecepatan Angin Terhadap Daya Poros (BHP) ..	34
4.2.2	Hubungan Antara Kecepatan Angin Terhadap Torsi (T)	35
4.2.3	Hubungan Antara Kecepatan Angin Terhadap Efisiensi (η)	36
4.2.4	Hubungan Antara Kecepatan Angin Terhadap Daya Poros (BHP) antar turbin	37
4.2.5	Hubungan Antara Kecepatan Angin Terhadap Torsi antar turbin.....	39
4.2.6	Hubungan Antara Kecepatan Angin Terhadap Efisiensi antar turbin	40

BAB V PENUTUP

5.1.	Kesimpulan	41
5.2.	Saran	41

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Skema terjadinya angin.	4
Gambar 2.2	Laju pertumbuhan energi angin tahunan di Dunia.	5
Gambar 2.3	Turbin angin <i>Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)</i>	8
Gambar 2.4	Turbin angin <i>Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)</i> Skema proses	8
Gambar 2.5	NACA <i>Airfoil Geometry</i>	10
Gambar 2.6	Gaya pada <i>Airfoil</i>	10
Gambar 2.7	Ilustrasi gaya-gaya yang bekerja pada Sudu J	11
Gambar 2.8	Perbandingan penampang pada sudu J dengan sudu konvensional	11
Gambar 2.9	Rangkaian Pengukuran Tegangan DC	12
Gambar 2.10	Penunjukkan Pengukuran Tegangan DC	13
Gambar 2.11	Rangkaian Pengukuran Arus DC	13
Gambar 2.12	Penunjukkan Pengukuran Arus DC	13
Gambar 2.13	Aliran Udara Yang Menghasilkan Energi, Berdasarkan Teori Kontinuitas	15
Gambar 2.14	Kinerja utama pada turbin angin konvensional	16
Gambar 3.1	Anemometer	20
Gambar 3.2	<i>Blower</i>	20
Gambar 3.3	<i>Wind tunnel</i>	21
Gambar 3.4	Dimensi <i>Wind Tunnel</i>	21
Gambar 3.5	Rancangan 2D turbin angin <i>Darrieus</i> tipe sudu J	22
Gambar 3.6	Rancangan 3D turbin angin <i>Darrieus</i> tipe sudu J <i>Digital multimeter</i>	22
Gambar 3.7	<i>Digital multimeter</i>	23
Gambar 3.8	<i>Digital tachometer</i>	24
Gambar 3.9	Generator listrik	25
Gambar 3.10	Skema Instalasi Uji	25
Gambar 3.11	Diagram Alir Penelitian	28
Gambar 4.1	Grafik hubungan kecepatan angin terhadap daya poros (BHP)	34
Gambar 4.2	Grafik Hubungan kecepatan angin terhadap torsi (T)	35
Gambar 4.3	Grafik Hubungan kecepatan angin terhadap efisiensi (η)	36

Gambar 4.4	Grafik hubungan kecepatan angin terhadap daya poros (BHP) antar turbin	37
Gambar 4.5	Grafik hubungan kecepatan angin terhadap torsi antar turbin	39
Gambar 4.6	Grafik hubungan kecepatan angin terhadap efisiensi antar turbin	40



DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Pengelompokkan potensi energi angin, pemanfaatan dan lokasi potensial	5
Tabel 4.1	Data pengujian besar tegangan generator listrik (V)	29
Tabel 4.2	Data pengujian kuat arus generator listrik (A)	30
Tabel 4.3	Data pengujian besar putaran poros turbin (RPM)	30
Tabel 4.4	Data hasil perhitungan jumlah sudu 1	33
Tabel 4.5	Data hasil perhitungan jumlah sudu 2	33
Tabel 4.6	Data hasil perhitungan jumlah sudu 3	33



DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 Tabel Viskositas dan Massa Jenis Udara pada Tekanan 1 atm
- Lampiran 2 Model Turbin Angin *Darrieus tipe sudu - J* dengan variasi jumlah sudu yang berbeda



RINGKASAN

Pratama Candra, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Januari 2014, *Pengaruh Varisasi Jumlah Sudu Terhadap Kinerja Turbin Angin Darrieus Tipe Sudu J*. Dosen Pembimbing: Eko Siswanto dan Agustinus Ariseno.

Dalam era dunia global dan teknologi saat ini sumber energi sangat diperlukan dalam jumlah besar. Untuk itu diperlukan sumber energi alternatif guna memenuhi kebutuhan yang terus meningkat, oleh karena itu turbin angin digunakan untuk pembangkit listrik dengan memanfaatkan energi angin. Maka dalam studi eksperimental ini diteliti seberapa besar pengaruh variasi jumlah sudu pada kinerja turbin angin Darrieus tipe sudu-J.

Metode yang digunakan adalah metode penelitian eksperimental nyata (*true experimental research*). Variabel bebas dalam penelitian ini adalah variasi kecepatan angin sebesar 4, 5, 6, dan 7 m/s. Variabel terikat dalam penelitian ini yaitu Daya poros, Torsi, dan Efisiensi yang dihasilkan turbin angin Darrieus. Sedangkan variabel terkontrol dalam penelitian ini adalah panjang sudu 300 mm, lebar sudu 80 mm dan radius depan 15 mm.

Dari hasil pengujian dan pengolahan data menunjukkan jumlah sudu turbin angin Darrieus tipe sudu-J mempengaruhi kinerja dari turbin angin Darrieus tipe sudu-J. Pada pengujian ini daya poros, torsi, dan efisiensi tertinggi tercapai pada jumlah sudu 3 dengan Efisiensi terbesar di peroleh pada sudu 3 pada kecepatan 7 m/s yaitu 4,89617943 %, kemudian daya poros terbesar yang diperoleh pada sudu 3 pada keceotan 7 m/s yaitu 0,33886722 Watt dan torsi tertinggi diperoleh juga oleh sudu 7 m/s yaitu 0,00383146 Nm.

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

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam era dunia global dan teknologi saat ini sumber energi sangat diperlukan dalam jumlah besar. Untuk itu diperlukan sumber energi alternatif yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan yang terus meningkat namun yang ramah lingkungan. Penggunaan energi alternatif merupakan konsep yang jauh dari penyebab pemanasan global yang ramah lingkungan.

Salah satu energi alternatif terbaru yang ramah terhadap lingkungan adalah energi yang berasal dari angin. Dengan jumlah yang tak terbatas angin merupakan sumber energi alternatif yang cocok untuk di terapkan di Indonesia, namun secara keseluruhan potensi energi angin di Indonesia rata-rata tidak besar, tetapi berdasarkan survei dan pengukuran data angin yang telah dilakukan sejak 1979, banyak daerah yang prospektif karena memiliki kecepatan angin rata-rata tahunan sebesar 3.4-4.5 m/detik atau mempunyai energi antara 200 kWh/m sampai 1000 kWh/m. Potensi ini sudah dapat dimanfaatkan untuk pembangkit energi listrik skala kecil sampai 10 kW.

Salah satu cara pemanfaatan energi angin adalah menggunakan turbin. Semenjak dahulu turbin di gunakan untuk membantu pekerjaan manusia, seiring berkembangnya teknologi energi angin di gunakan sebagai energi alternatif untuk menghasilkan listrik untuk memenuhi kebutuhan manusia yang semakin meningkat.

Prinsip kerja dari turbin angin untuk pembangkit listrik adalah mengubah energi kinetik dari angin menjadi energi mekanis pada kincir, sehingga dapat menggerakkan poros yang memutar generator yang akan menghasilkan listrik. Salah satu jenis turbin angin adalah Turbin Angin Sumbu Vertikal/tegak (TASV) memiliki poros/sumbu rotor utama yang disusun tegak lurus. Kelebihan utama susunan ini adalah turbin tidak harus diarahkan ke angin agar menjadi efektif. Kelebihan ini sangat berguna di tempat-tempat yang arah anginnya sangat bervariasi. TASV mampu mendayagunakan angin dari berbagai arah TASV terdiri dari beberapa jenis turbin angin, salah satunya adalah turbin angin *Darrieus*.

Unjuk kerja dari suatu turbin angin dapat dinyatakan dari daya poros, torsi, dan efisiensi turbin yang dihasilkannya. Oleh karena itu dalam studi eksperimental ini dapat diteliti seberapa besar pengaruh pada kinerja turbin angin poros vertikal tipe *Darrieus* tipe sudu-J dengan memvariasikan jumlah sudu.

1.2 Rumusan Masalah

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

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan-batasan masalah pada penelitian ini meliputi:

1. Variasi kecepatan angin pada wind tunnel adalah 4,5,6,7 m/s
2. Sudu turbin terbuat dari plat alumunium dengan poros silinder baja
3. 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 jumlah 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. Mendapatkan hasil dari penelitian pengaruh jumlah sudu terhadap efisiensi turbin angin *Darrieus* tipe sudu J.
2. Mahasiswa maupun masyarakat dapat mengetahui maupun mengembangkan pemanfaatan energi angin dalam hal energi alternatif yang terbarukan.
3. Menambah referensi bagi mahasiswa maupun umum untuk penelitian selanjutnya tentang turbin angin.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Bayu Mahendra (2013), dalam penelitiannya yang berjudul *Pengaruh Jumlah Sudu Terhadap Unjuk Kerja Turbin Angin Savonius tipe L*. Dengan jumlah variasi sudu 2,3,4 dengan variabel bebas kecepatan angin pada wind tunnel dari kecepatan 3, 5, 7 m/s. Didapatkan hasil analisis turbin angin dengan jumlah 3 sudu memiliki unjuk kerja yang paling tinggi di dibandingkan dengan jumlah sudu yang lain, dengan daya poros tertinggi 0,267 watt, torsi 0,00398 Nm pada kecepatan 7 m/s dan efisiensi 10,2 % pada kecepatan 5 m/s

Sulistiyono (2013), dalam penelitiannya yang berjudul *Kinerja Turbin Angin Darrieus tipe sudu – J Dengan Variasi Radius Bagian Depan Sudu*. Dengan variasi radius sudu 5,10,15,20 dengan variabel bebas kecepatan angin pada wind tunnel dari kecepatan 3 m/s sampai 7 m/s. Variabel terikat yang digunakan dalam penelitiannya adalah daya poros, torsi, dan efisiensi. Didapatkan hasil analisis turbin angin Darrieus tipe sudu J memiliki nilai daya poros, torsi, dan efisiensi maksimum pada variasi radius bagian depan 15 mm dengan kecepatan angin 7 m/s. Nilai daya poros tertinggi sebesar 0,32 Watt, nilai torsi tertinggi sebesar 0,029 Nm, dan efisiensi maksimum yang didapatkan sebesar 4,6 %.

2.2 Angin

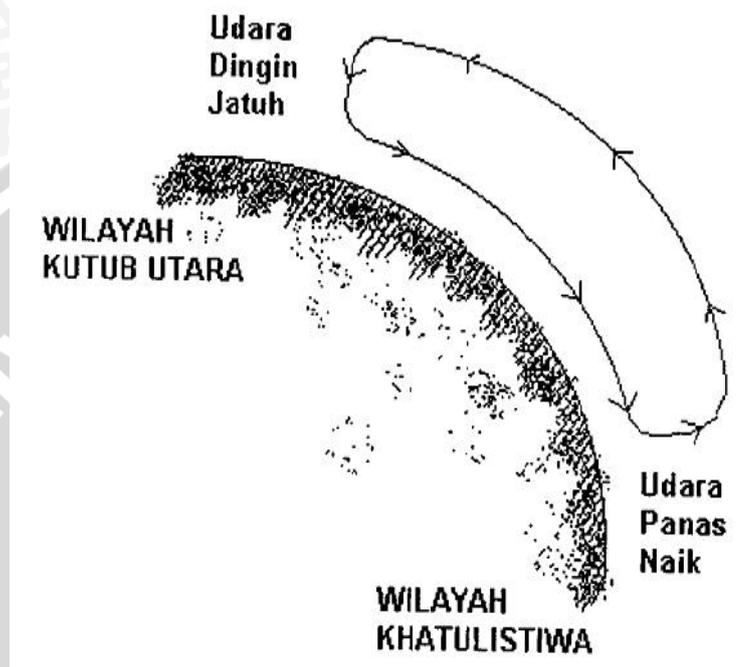
2.2.1 Proses Terbentuknya Angin

Angin merupakan energi alternatif yang mempunyai potensi yang bagus, proses terbentuknya angin adalah udara yang bergerak akibat adanya tekanan udara dengan arah aliran angin dari tempat yang memiliki tekanan lebih tinggi ke tempat yang bertekanan lebih rendah atau dari wilayah yang memiliki suhu/temperatur lebih rendah ke wilayah yang memiliki suhu lebih tinggi.

Pada dasarnya angin terjadi karena ada perbedaan suhu antara panas dan dingin. Daerah yang terkena paparan sinar matahari memiliki suhu yang lebih tinggi dan memiliki tekanan udara yang lebih rendah di sekitar daerah lain, sehingga menyebabkan terjadinya aliran angin. Di daerah khatulistiwa udaranya menjadi panas, mengembang, dan menjadi ringan kemudian naik ke atas dan bergerak menuju daerah yang lebih dingin. Sebaliknya daerah kutub yang dingin, udaranya menjadi dingin dan turun ke

bawah. Dengan demikian terjadi suatu perputaran udara berupa perpindahan udara dari kutub utara ke garis khatulistiwa dan sebaliknya.

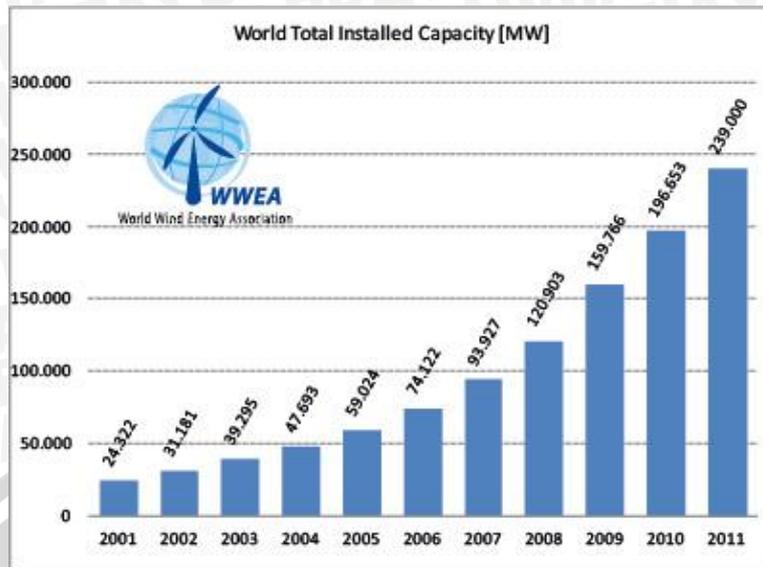
Pada gambar di bawah ini dapat di tunjukan terjadinya angin dimana angin berjalan pada garis khatulistiwa naik ke atas menuju kutub, dari kutub angin turun ke bawah menjadi daerah khatulistiwa dan seterusnya.



Gambar 2.1 Skema terjadinya angin.

Sumber: Kadir, 1996

Dengan semakin banyaknya kebutuhan manusia, kapasitas pembangkitan listrik tenaga angin di dunia juga mengalami perkembangan setiap tahun. Yang pada awalnya pada tahun 2001 hanya sebesar 24.322 MW dan sampai dengan tahun 2011 telah mencapai 239.000 MW per tahun. Selengkapnya dapat di lihat pada gambar 2.2 di bawah



Gambar 2.2 Laju pertumbuhan energi angin tahunan di Dunia.
 Sumber: *World Wind Energy Association, 2011*

Disamping itu hasil pemetaan Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) pada tabel 2.1 ada 120 lokasi menunjukkan beberapa wilayah memiliki kecepatan angin diatas 5 m/s, yaitu Nusa Tenggara Timur, Nusa Tenggara Barat, Sulawesi Selatan, dan Pantai Selatan Jawa. Merupakan 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
Skala Kecil	2,5 - 4,0	< 75	0 s/d 10	Jawa, NTB, NTT, Maluku, Sulawesi
Skala Menengah	4,0 – 5,0	75 -150	10 -100	NTB, NTT, Sulsel, Sultra
Skala Besar	>5,0	> 150	> 100	Sulsel, NTB, NTT, Pantai Selatan Jawa

Sumber: LAPAN, 2006

2.2.2 Energi Angin

Energi kinetik adalah energi gerak yang di peroleh sebagai gerakan getaran, rotasi, translasi dari objek, partikel atau seperangkat partikel. 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)

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

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

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 $A = d \times h$

Keterangan: d = diameter sudu (m)

h = tinggi sudu (m)

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

$$P_{\text{angin}} = \text{Energi} / \text{waktu} \quad (\text{Giancoli; 1995; 157}) \quad (2-3)$$

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

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

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

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

Keterangan:

P_{angin} = daya angin (W)

ρ = kerapatan udara (kg/m^3)

A = luas penampang (m²)
 v = kecepatan angin (m/detik)

2.3 Turbin Angin

Turbin angin adalah salah satu alat yang mekanisme gerakannya memanfaatkan energi angin. Di negara yang mempunyai potensi angin yang baik banyak sekali pemakaian turbin angin yang di gunakan sebagai energi alternatif untuk menghasilkan listrik. Di negara yang sudah maju turbin angin dapat menghasilkan energi listrik yang cukup tinggi hingga mencapai ratusan megawatt, namun di negara berkembang turbin angin masih dalam skala riset karena teknologi yang di gunakan masih dalam tahap pengembangan dan penelitian, untuk itu perlu riset yang lebih lanjut untuk mencari sebuah desain dan analisa untuk membuat turbin angin yang lebih baik dari sebelumnya.

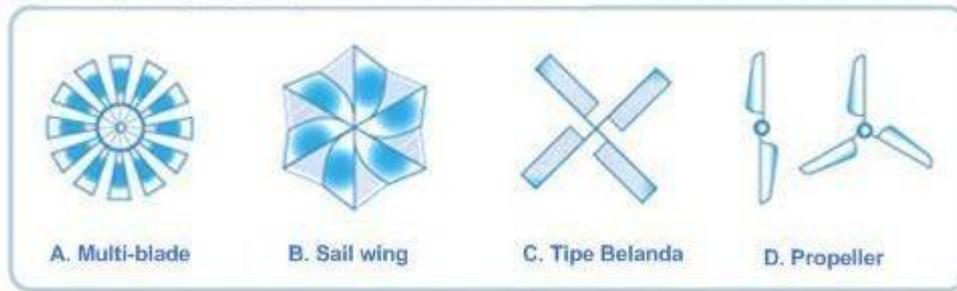
Prinsip kerja turbin angin adalah mengubah energi mekanis dari angin untuk memutar rotor turbin yang kemudian membuat generator berputar sehingga menghasilkan listrik.

2.3.1 Klasifikasi Turbin Angin

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

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

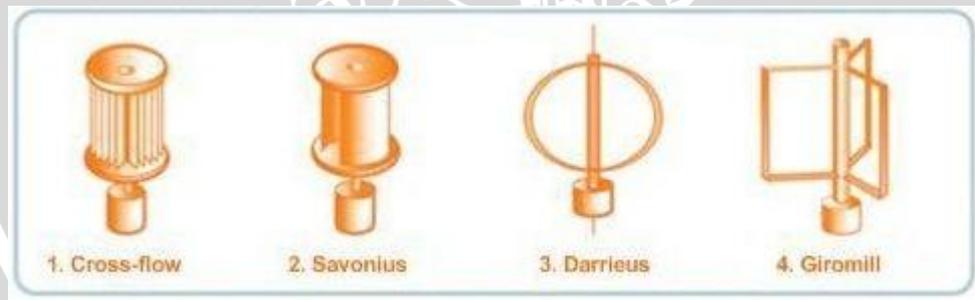
Turbin angin sumbu horizontal merupakan turbin angin yang sumbu rotasi rotornya paralel terhadap permukaan tanah dan memiliki sudu yang berputar pada bidang vertikal layaknya baling-baling pesawat terbang. Turbin ini biasanya memiliki sudu dengan bentuk irisan melintang khusus dimana aliran udara pada salah satu sisinya dapat bergerak lebih cepat dari aliran udara di sisi yang lain ketika melewatinya. Sehingga menimbulkan daerah tekanan rendah pada belakang sudu dan daerah tekanan tinggi pada depan sudu. Perbedaan tekanan ini membentuk gaya yang menyebabkan sudu berputar. Macam – macam bentuk turbin angin sumbu horizontal dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Turbin angin *Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)*
Sumber: Hau E, (2006)

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

Turbin angin sumbu vertikal/tegak memiliki poros/sumbu rotor utama yang disusun tegak lurus terhadap permukaan tanah. Pada umumnya turbin angin jenis ini memiliki putaran awal yang baik, keuntungan dari turbin angin vertikal adalah tidak harus diubah posisinya jika arah angin berubah, tidak seperti turbin angin horizontal yang memerlukan mekanisme tambahan untuk menyesuaikan rotor turbin dengan arah angin sehingga dapat beroperasi walaupun dalam kecepatan angin yang rendah, Tidak membutuhkan struktur menara yang besar, dan Konstruksi turbin sederhana. Namun mempunyai kelemahan torsi yang rendah sehingga memerlukan energi untuk mulai berputar. Macam – macam bentuk turbin angin sumbu horizontal dapat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Turbin angin *Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)*
Sumber: Hau E, (2006)

2.4 Turbin Angin *Darrieus*

2.4.1 Pengertian Turbin Angin *Darrieus*

Turbin angin *Darrieus* merupakan salah satu jenis turbin yang dikembangkan oleh seorang *aeronautical engineer* asal Prancis yang bernama Georges Jean Marie Darrieus pada tahun 1931. Turbin *Darrieus* ini memiliki keunggulan diantaranya tidak terlalu memperhitungkan arah aliran karena bentuknya yang simetri, tekanan gravitasi tidak mampu balik pada bentuk sudunya, mampu beroperasi pada head dan kecepatan

yang rendah, sedangkan kelemahannya adalah ketidak mampuan melakukan *self starting*, dan getaran yang tinggi. (El-Sayed, 1995)

Prinsip kerja turbin *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 mengakibatkan gaya angkat, yang mana mendorong sudu bergerak ke depan. Untuk mendorong turbin, torsi yang disebabkan oleh gaya angkat harus lebih besar dibanding torsi yang dihasilkan oleh gaya hambat (*drag*) sehingga menghasilkan torsi netto. (DeCoste, 2004)

2.4.2 Sudu Turbin Angin Darrieus

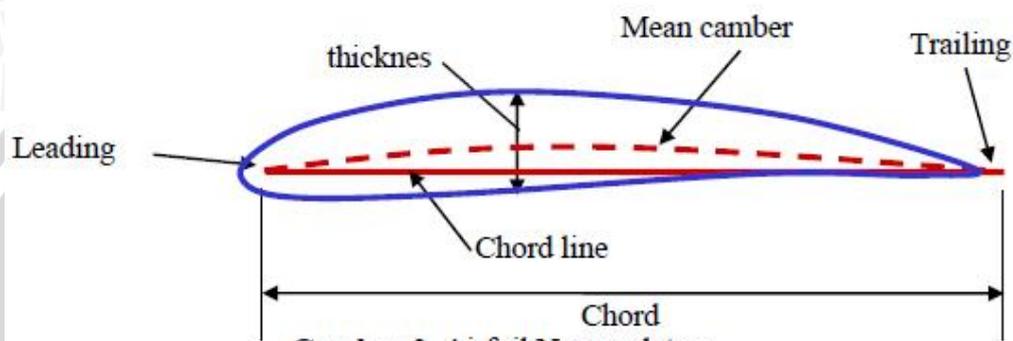
2.4.2.1 Profil *Airfoil*

Profil *airfoil* adalah elemen yang penting dalam konversi energi. Profil *airfoil* memberikan nilai koefisien drag yang kecil jika dibandingkan dengan lift yang di hasilkan. Bentuk *airfoil* pada turbin angin umumnya melengkung pada bagian atas dan lebih datar pada bagian bawah. Bentuk *airfoil* yang demikian menyebabkan kecepatan udara yang melalui sisi atas akan lebih tinggi dari sisi bawah sehingga tekanan udara di bagian atas akan lebih kecil daripada tekanan udara di bagian bawah, dan itu salah satu bentuk bodi aerodinamika sederhana yang berfungsi memberikan gaya angkat tertentu. Geometri *airfoil* memiliki pengaruh besar terhadap karakteristik aerodinamika dengan parameter penting berupa CL, dan kemudian akan terkait dengan lift (gaya angkat yang dihasilkan) (Mulyadi, 2010). Gaya – gaya yang bekerja pada *airfoil* dapat dilihat pada gambar 2.5.

Pengujian yang dilakukan NACA 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)

- Permukaan atas (*Upper Surface*)
- Permukaan bawah (*Lowerer Surface*)

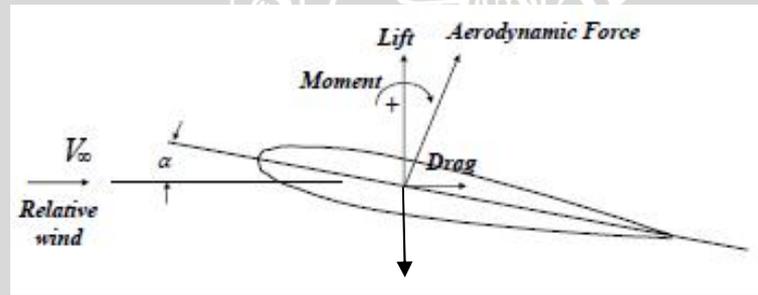
- *Mean camber line* adalah tempat kedudukan titik-titik antara permukaan atas dan bawah *airfoil* yang diukur tegak lurus terhadap *mean camber line* itu sendiri.
- *Leading edge* adalah titik paling depan pada *mean camber line*, biasanya berbentuk lingkaran dengan jari-jari mendekati 2% dari panjang *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. Airfoil Nomenclature

Gambar 2.5 NACA Airfoil Geometry

Sumber : U.S Air force; 2008. Airfoil nomenclature and properties



Aerodynamic centre

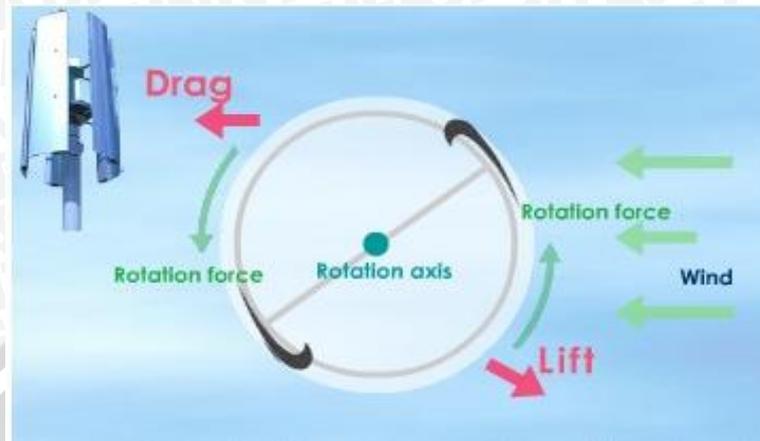
Gambar 2.6 Gaya pada Airfoil

Sumber: U.S Air force, (2008) Airfoil nomenclature and properties

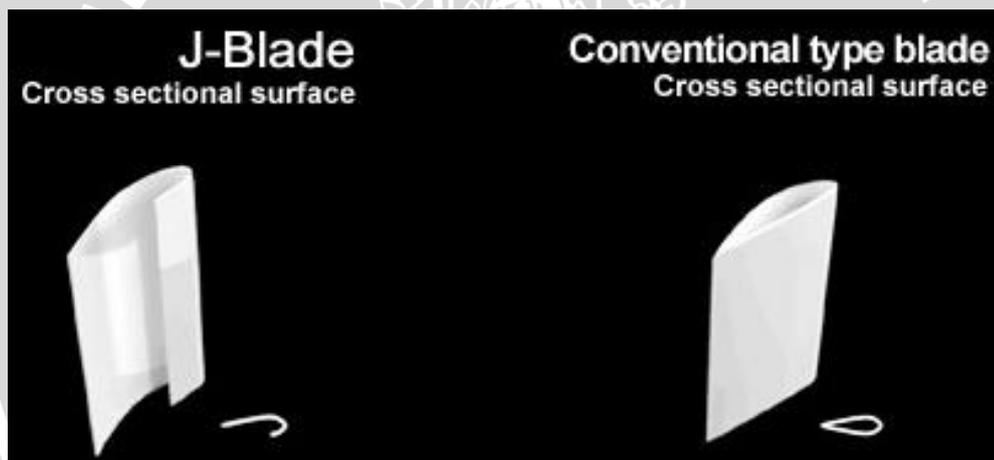
2.4.2.2 Sudu J (*J-Blades*)

Sudu ini diperkenalkan oleh perusahaan Wind-Smile Co., LTD. Tokyo. Sudu-J ini sudah terdaftar dengan hak paten Jepang dengan No. 3451085. Tetapi perusahaan Wind-Smile tidak memberitau lebih lanjut tentang dimensi dari sudu-J tersebut. Perusahaan Wind-Smile menunjukkan ilustrasi gaya – gaya yang bekerja pada sudu-J

pada gambar 2.7 dan menunjukkan perbandingan penampang pada sudu-J dengan sudu konvensional dapat di lihat pada gambar 2.8.



Gambar 2.7 Ilustrasi gaya-gaya yang bekerja pada Sudu J
Sumber: www.wind-smile.com/technology/utilized.html



Gambar 2.8 Perbandingan penampang pada sudu J dengan sudu konvensional
Sumber: www.wind-smile.com/technology/utilized.html

2.5 Kinerja Turbin Angin Darrieus

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

2.5.1 Brake Horse Power (BHP)

Brake Horse Power adalah daya dari turbin yang diukur setelah mengalami kerugian energi. Dalam percobaan nantinya *BHP* dinyatakan dengan menggunakan generator listrik. Dengan mengetahui besar tegangan yang dihasilkan maka bisa diketahui besarnya daya, dengan menggunakan hukum ohm seperti pada rumus 2-6.

$$P_{\text{generator}} = V \times I \quad (2-6)$$

Keterangan:

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

V = Tegangan generator listrik (Volt)

I = Arus listrik (Ampere)

Setelah didapatkan harga P generator maka dapat dihitung dengan persamaan BHP:

$$BHP = \frac{P_{\text{generator}}}{\eta_{\text{generator}}} \quad (2-7)$$

Keterangan:

BHP = Brake Horse Power (watt)

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

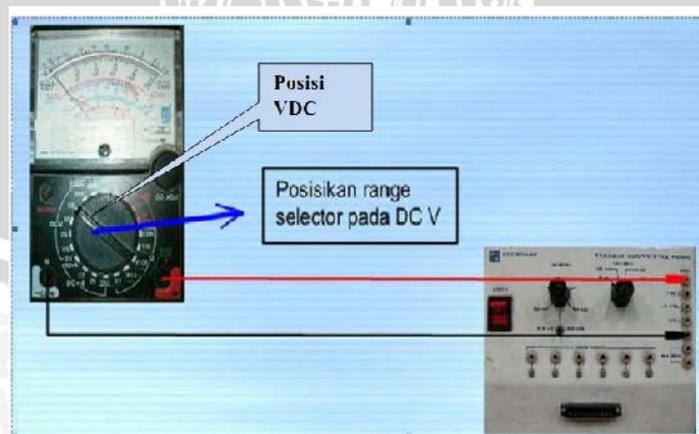
η_{motor} = Efisiensi generator listrik (%)

- Prinsip pengukuran tegangan dan arus DC

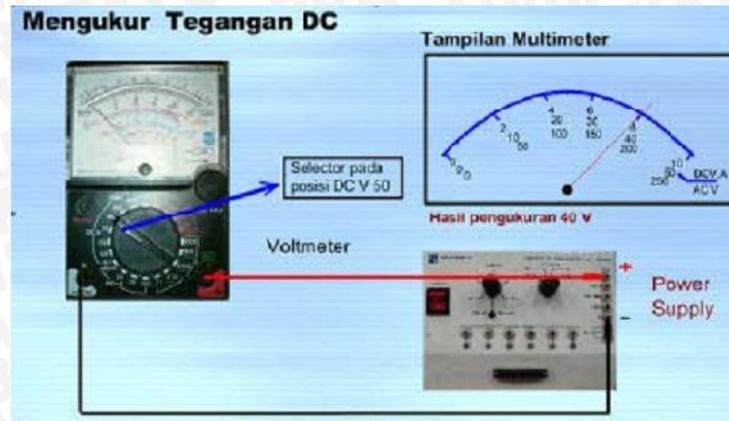
Pengukuran tegangan dan arus dilakukan dengan menggunakan multimeter elektronik dengan cara sebagai berikut:

- Pengukuran tegangan DC

Tegangan DC dapat diukur dengan menggunakan Voltmeter, Prinsip kerjanya semakin tinggi arus listrik yang melewati voltmeter maka semakin besar medan magnet yang dihasilkan, sehingga pembacaan pada layar akan semakin besar pula. Bisa dilihat pada gambar 2.9 di bawah ini.



Gambar 2.9 Rangkaian Pengukuran Tegangan DC
Sumber : Sri (2008 : 78)

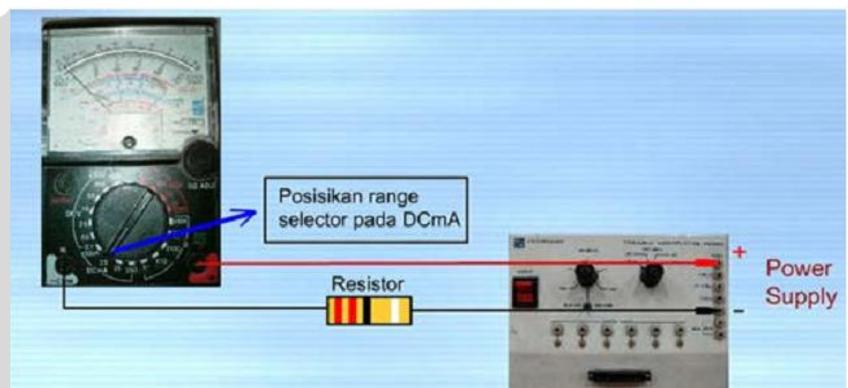


Gambar 2.10 Penunjukkan Pengukuran Tegangan DC
Sumber : Sri (2008 : 78)

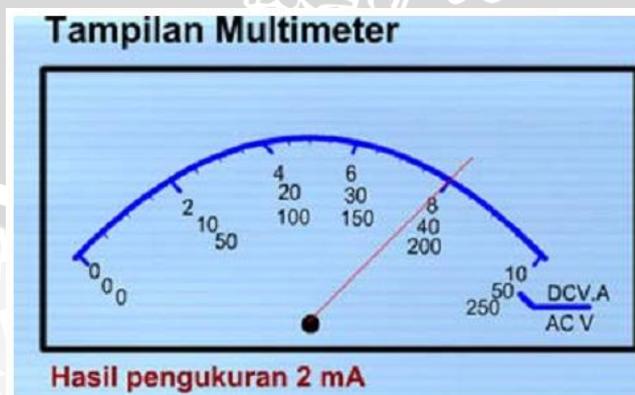
- Prinsip pengukuran arus DC

Pengukuran arus dilakukan dengan menggunakan multimeter elektronik dengan cara sebagai berikut:

Pemasangan meter seri terhadap beban yang akan di ukur arusnya.



Gambar 2.11 Rangkaian Pengukuran Arus DC
Sumber: Sri (2008:85)



Gambar 2.12 Penunjukkan 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 ukuran keefektifan gaya tersebut dalam menghasilkan putaran atau rotasi mengelilingi sumbu tersebut (Bueche, 1988:16). Besar torsi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan rumus 2-8.

$$T = \frac{\text{BHP}}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_{\text{generator}}}{60}} \quad (2-8)$$

Keterangan :

T = Torsi (Nm)

BHP = *Brake Horse Power* (watt)

$n_{\text{generator}}$ = Putaran generator (rpm)

2.5.3 Efisiensi (η)

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

$$\eta = \frac{\text{BHP}}{P_{\text{angin}}} \times 100\% \quad (\text{Fox, 1994 : 570}) \quad (2-9)$$

Keterangan :

η = Efisiensi (%)

BHP = *Brake Horse Power* (Watt)

P_{angin} = Daya angin (Watt)

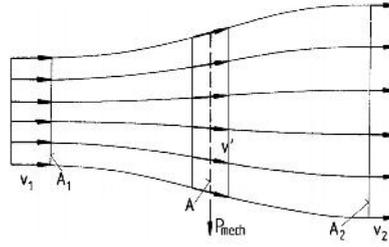
2.6 Teori dan Persamaan

2.6.1 Teori Betz

Teori Betz mengasumsikan bahwa suatu turbin ideal merupakan rotor tanpa naf (hub) dan mempunyai sudu-sudu yang tak terhingga jumlahnya tanpa hambatan (Reksoatmodjo, 2004). Juga diasumsikan bahwa aliran udara didepan dan belakang rotor memiliki kecepatan yang seragam (laminar). Jika V_1 = kecepatan angin didepan rotor, V_2 = kecepatan angin dibelakang rotor, dan V = kecepatan angin ketika melewati rotor, maka berdasarkan persamaan kontinuitas:

$$Q_1 = Q_2 \quad (2-10)$$

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (2-11)$$



Gambar 2.13 Aliran Udara Yang Menghasilkan Energi, Berdasarkan Teori Kontinuitas
Sumber: Hau (2005:82)

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:

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

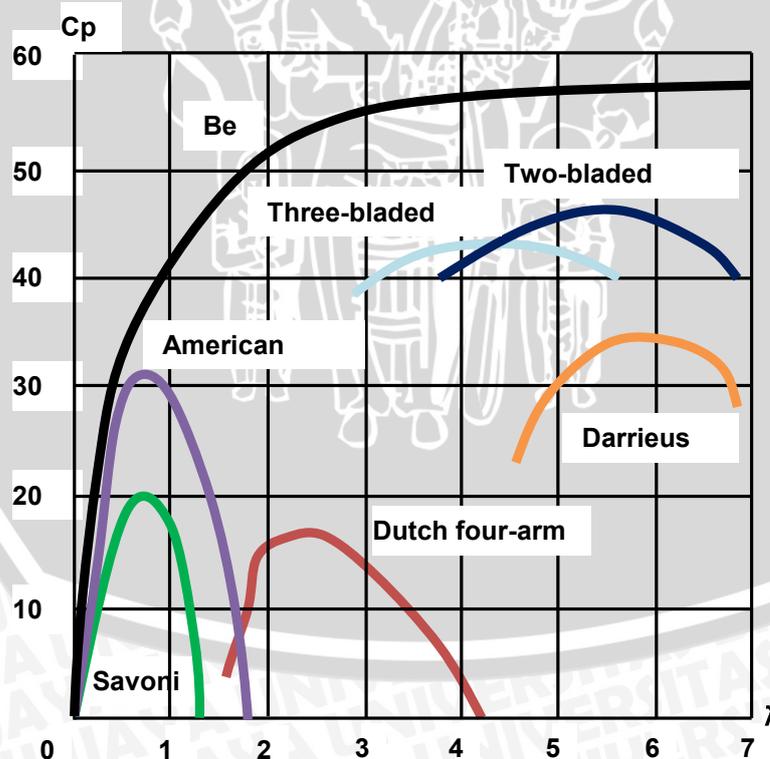
Sehingga efisiensi dapat dicari dengan cara:

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

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 Daya pada Turbin Angin Darrieus

Besar daya yang dapat dibangkitkan dari putaran rotor turbin angin *Darrieus* dapat dihitung melalui pendekatan Betz.



Gambar 2.14 Kinerja utama pada turbin angin konvensional
Sumber: Bouraba (November 2004)

Berdasarkan teori Betz yang divisualisasikan dalam bentuk grafik pada gambar 2.15, menjelaskan ketidakmungkinan suatu desain turbin angin memiliki *coefficient power* (C_p) diatas angka 56%. Hal ini dapat diartikan bahwa desain turbin terbaik tipe apapun tidak akan menghasilkan efisiensi rotor diatas 56%. Nilai efisiensi 56% juga sering disebut sebagai *Betz Limit*. 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*

Nilai C_p untuk satu tipe turbin angin tidak selalu sama karena nilai C_p merupakan fungsi dari *tip speed ratio* atau λ . *Tip speed ratio* merupakan antara perbandingan antara kecepatan tangensial dengan kecepatan angin. Untuk mengetahui nilai C_p maksimal yang mampu dihasilkan oleh sebuah turbin angin, maka perlu diketahui terlebih dahulu berapa nilai *tip speed ratio* yang dihasilkan dengan persamaan 2-21:

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{v} \quad (\text{Fox, 1994: 579}) \quad (2-21)$$

$$\text{Dimana: } \omega \cdot R = v_{\text{tangensial}} \quad (\text{rad.m/s}) \quad (2-22)$$

Keterangan:

$$\omega = \text{kecepatan sudut} = \frac{2\pi n}{60}$$

$$n = \text{putaran} \quad (\text{rpm})$$

$$R = \text{radius rotor} \quad (\text{m})$$

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

Pada turbin angin *Darrieus* dengan tinggi rotor (h) serta jari-jari rotor (r), dikenai aliran berkecepatan (v), maka dayanya adalah:

$$P_{\text{aktual}} = C_p \cdot \rho \cdot r \cdot h \cdot v^3 \quad (2-23)$$

Keterangan:

$$P_{\text{aktual}} = \text{Daya aktual} \quad (\text{Watt})$$

$$C_p = \text{Coefficient of power}$$

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

$$r = \text{Jari-jari sudu} \quad (\text{m})$$

h = Tinggi sudu (m)

v = Kecepatan angin (m/s)

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

$$P_{\text{teoritis}} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (2-24)$$

Keterangan:

P_{teoritis} = daya teoritis (Watt)

ρ = kecepatan udara (kg/m^3)

A = luas penampang (m^2)

v = kecepatan angin (m/s)

2.7 Generator

Turbin angin yang berfungsi untuk menghasilkan listrik membutuhkan alat untuk mengubah gerak rotasi rotor untuk menjadi listrik yaitu dengan menggunakan generator. Berdasarkan arah arus yang dikeluarkan, generator di bagi menjadi 2 jenis yaitu :

1. Generator arus searah (*Direct Current* – DC)
2. Generator arus bolak balik (*Alternating Current* – AC)

Generator arus searah DC menghasilkan tegangan yang searah dan jika di hubungkan dengan beban maka akan menghasilkan arus yang searah pula. Pada umumnya generator jenis DC dapat menghasilkan energi listrik pada putaran tinggi.

Generator arus bolak – balik AC menghasilkan tegangan yang arahnya bolak balik dan jika di hubungkan dengan beban akan menimbulkan arus bolak balik pula. Generator AC dapat menghasilkan daya pada putaran yang bervariasi tergantung pada spesifikasi generator itu sendiri

2.8 Hipotesa

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

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Pelaksanaan

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Fluida, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya pada bulan Oktober 2013 – November 2013.

3.2 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: 4,5,6 dan 7 m/s
- Jumlah sudu: 2, 3 dan 4

2. Variabel terikat

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

- Daya poros dari turbin angin *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 terkontrolnya adalah :

- Panjang sudu 300 mm
- Lebar sudu 80 mm
- Radius radius bagian depan sudu 15 mm

3.3 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Anemometer

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

Dalam penelitian digunakan kecepatan angin dalam satuan m/s.



Gambar 3.1 Anemometer
Sumber: www.indonetwork.co.id

Spesifikasi *Anemometer*:

<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

2. *Blower*

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



Gambar 3.2 *Blower*

Spesifikasi motor *blower*:

Type	: U 7181 No 7076-2977
Model	: 4C 668A
Daya	: 1/6 Hp
Putaran Max	: 1600 RPM

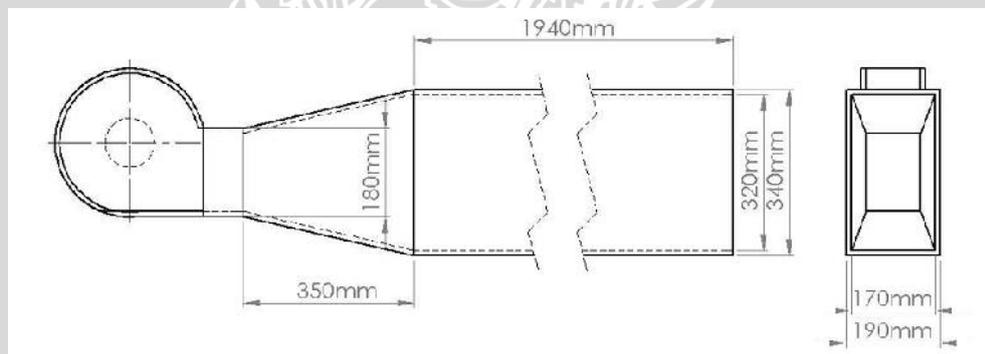
Voltase : 115/230 V
 Ampere : 2,6 _ 1,3 A

3. *Wind tunnel*

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



Gambar 3.3 *Wind tunnel*

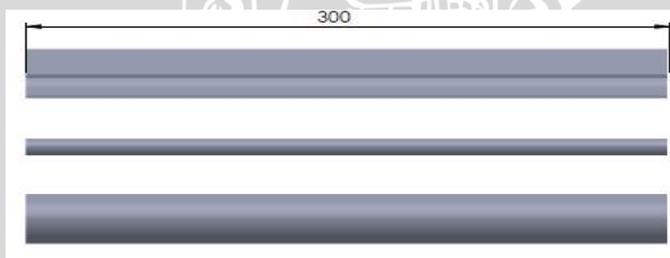
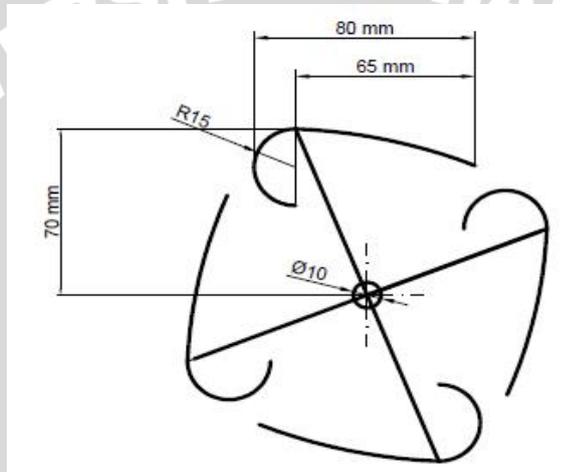
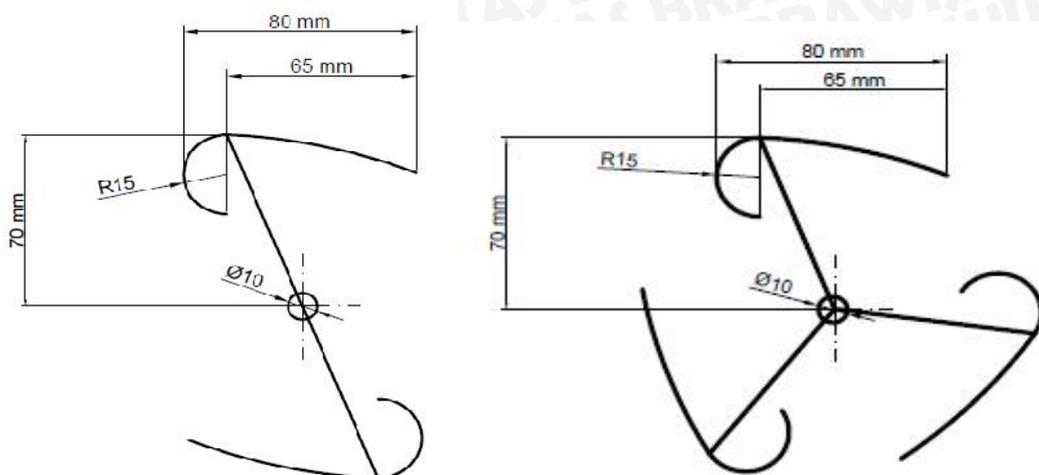


Gambar 3.4 Dimensi *Wind Tunnel*

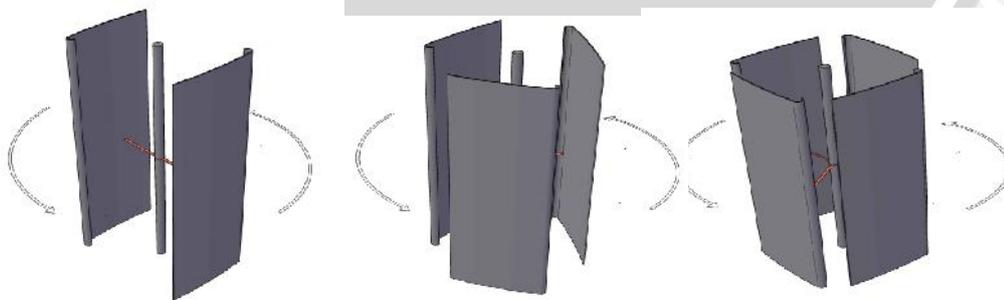
4. *Sudu turbin*

Dalam penelitian ini, sudu turbin terbuat dari plat Aluminium dan poros Baja dengan spesifikasi sudu yang digunakan:

- Panjang lengan sudu 70 mm.
- Diameter poros sudu 10 mm.
- Panjang sudu 300 mm.
- lebar sudu 80 mm
- radius 15 mm
- Sudu dari plat aluminium & poros baja



Gambar 3.5 Rancangan 2D turbin angin *Darrieus* tipe sudu J



Gambar 3.6 Rancangan 3D turbin angin *Darrieus* tipe sudu J

5. Digital Multitester

Multitester digunakan untuk mengukur tegangan yang dihasilkan generator listrik dan mengukur hambatan lampu LED. *Digital multitester* yang digunakan adalah seperti gambar 3.6.



Gambar 3.7 *Digital multitester*
Sumber: *Shanghai MCP Corp.* 2009

Spesifikasi :

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

6. Digital tachometer

Digunakan untuk mengukur kecepatan putar dari poros turbin dalam RPM.



Gambar 3.8 *Digital tachometer*
Sumber: *Weafo instrument Co.,Ltd.* 2010

Spesifikasi *Digital tachometer*:

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

7. Generator Listrik

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



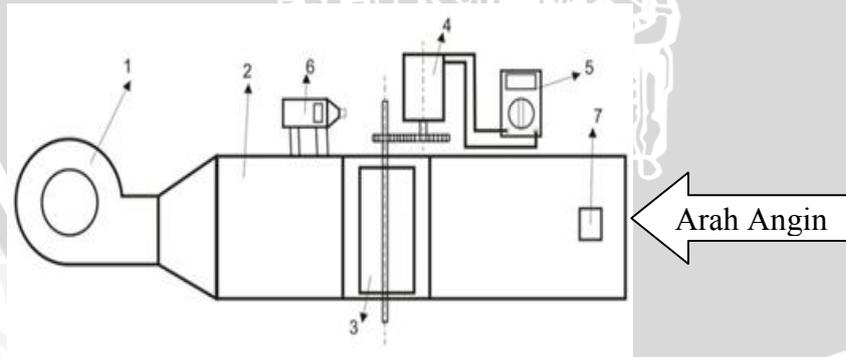
Gambar 3.9 Generator listrik

Spesifikasi:

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

3.4 Instalasi Penelitian

Instalasi penelitian dapat dilihat seperti pada gambar 3.9 berikut



Gambar 3.10 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*

3.5 Prosedur Penelitian

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

1. Studi literatur

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

2. Observasi lapangan

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

3. Pembuatan alat

Pembuatan alat dilakukan dengan mempersiapkan 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 di 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 dan kuat arus listrik serta putaran poros turbin.

6. Analisa

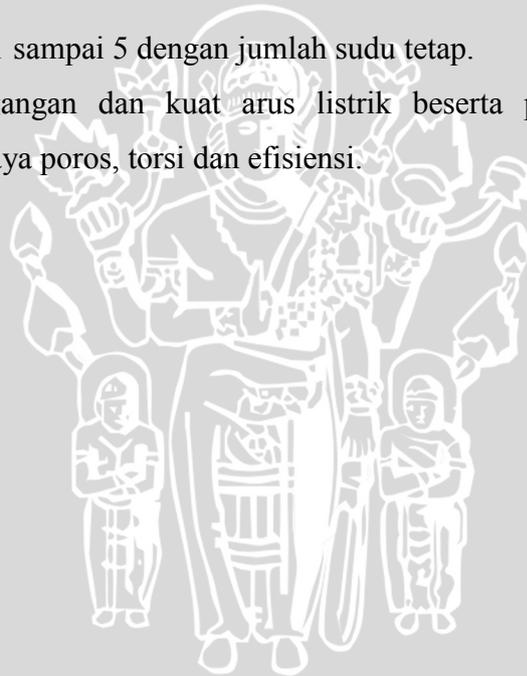
Analisa pengujian dilakukan dengan menghitung data-data menggunakan rumus kemudian ditampilkan dalam bentuk grafik.

3.6 Metode Pengambilan Data

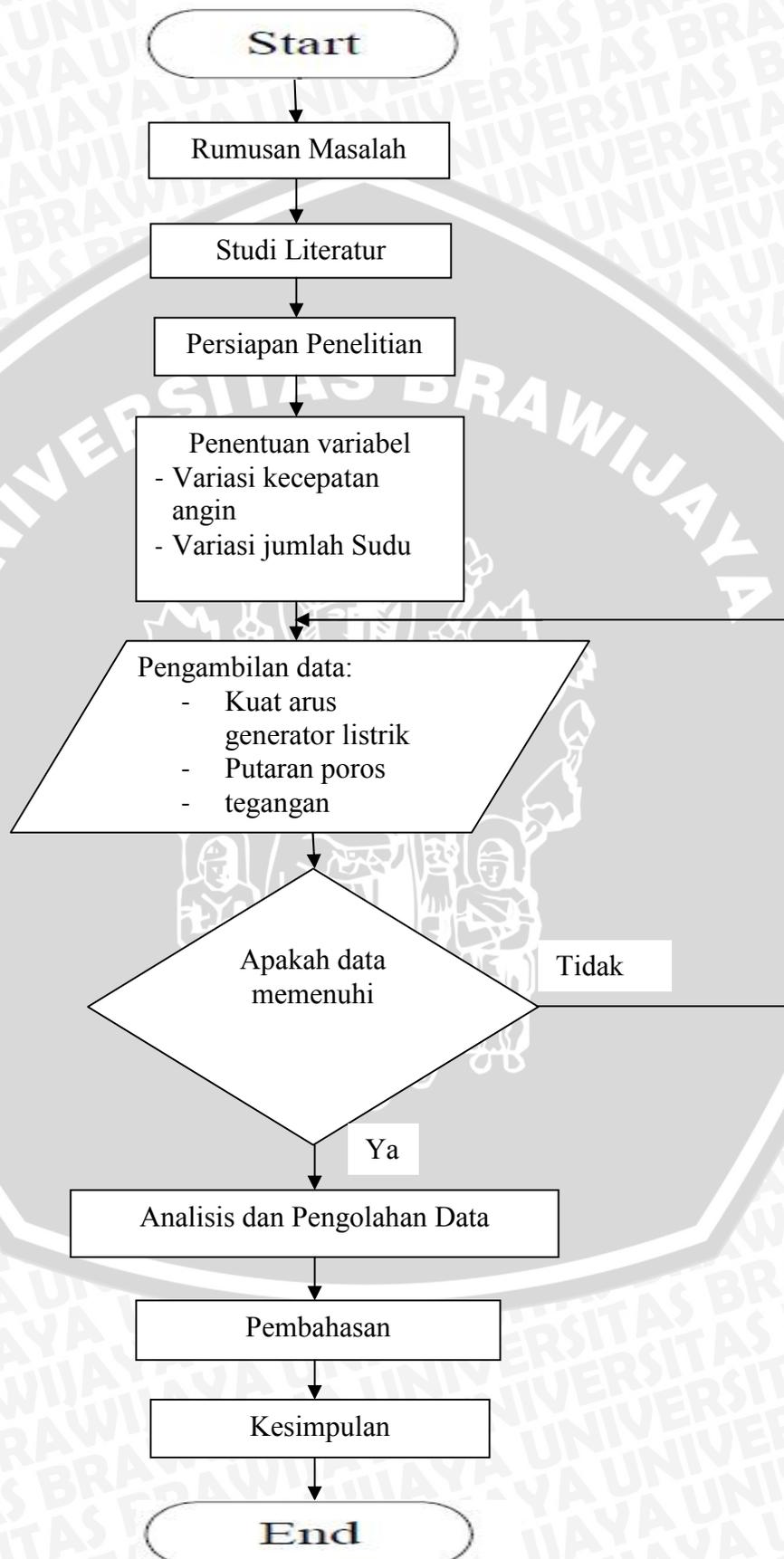
Adapun proses pengambilan data adalah sebagai berikut :

1. Menyiapkan instalasi *wind tunnel* dan turbin angin dengan variasi jumlah sudu yang telah ditentukan, dimulai dengan jumlah 2 sudu hingga 4.

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 4 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 menggunakan *digital multimeter*.
5. Mengulangi langkah 1 sampai 4 sebanyak tiga kali.
6. Mengganti sudu dengan variasi jumlah sudu lain yang diuji selanjutnya (jumlah sudu 3 dan 4).
7. Mengulangi langkah 1 sampai 5 dengan jumlah sudu tetap.
8. Pengolahan data tegangan dan kuat arus listrik beserta putaran poros untuk mendapatkan besar daya poros, torsi dan efisiensi.



3.7 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.11 Diagram Alir Penelitian

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil

4.1.1 Data Hasil Pengujian

Data hasil pengujian kinerja turbin angin *Darrieus* tipe sudu J dengan variasi jumlah sudu.

Tabel 4.1 Data pengujian besar tegangan generator listrik (V)

Jumlah Sudu	Kecepatan Angin (m/s)			
	4	5	6	7
2	1,4	2,2	3,12	4,09
	1,39	2,32	3,09	4,12
	1,44	2,23	3,17	4,15
3	1,9	2,98	3,87	5,2
	1,85	2,97	3,85	5,18
	1,87	2,89	3,91	5,24
4	1,29	1,92	2,71	3,58
	1,2	1,89	2,81	3,64
	1,18	2,01	2,85	3,75

Tabel 4.2 Data pengujian kuat arus generator listrik (A)

Jumlah Sudu	Kecepatan Angin (m/s)			
	4	5	6	7
2	0,014	0,022	0,0312	0,0409
	0,0139	0,0232	0,0309	0,0412
	0,0144	0,0223	0,0317	0,0415
3	0,019	0,0298	0,0387	0,052
	0,0185	0,0297	0,0385	0,0518
	0,0187	0,0289	0,0391	0,0524
4	0,0129	0,0192	0,0271	0,0358
	0,012	0,0189	0,0281	0,0364
	0,0118	0,0201	0,0285	0,0375

Tabel 4.3 Data pengujian besar putaran poros turbin (RPM)

Jumlah Sudu	Kecepatan Angin (m/s)			
	4	5	6	7
2	457	509	630	760
	454	511	628	770
	459	499	629	778
3	548	697	779	843
	560	681	776	841
	543	686	782	851
4	399	489	573	714
	400	480	583	680
	405	475	579	675

4.1.2 Pengolahan Data

Perhitungan data dilakukan untuk mencari nilai daya poros, torsi dan efisiensi turbin angin *Darrieus* tipe sudu-J dengan variasi jumlah sudu. Berikut ini adalah contoh perhitungan data hasil penelitian 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 motor listrik (η) = 80 %
- Kecepatan angin (v) = 4, 5, 6, dan 7 m/s
- Temperatur udara ruangan (T) = 27 °C
- Massa jenis udara (ρ) = 1,18 kg/m³

(berdasar tabel viskositas dan massa jenis udara pada tekanan 1 atm J.P.

Holman, 1997 : 589)

Contoh perhitungan data pada kecepatan angin (v) = 7m/s:

- 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})

$$\begin{aligned} P_{\text{angin}} &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \\ &= \frac{1}{2} \cdot 1,18 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,0342 \text{ m}^2 \cdot (7 \text{ m/s})^3 \\ &= 6,921054 \text{ kg m}^2/\text{s}^3 \end{aligned}$$

- Daya poros (BHP)

Contoh pada sudu 2

Didapatkan:

- Arus listrik (I) = 0,014 Ampere
- Arus Listrik (V) = 0,014 Ampere . 100 Ohm = 1,4 Volt

$$- \eta_{\text{generator}} = 80\%$$

$$BHP = \frac{P_{\text{generator}}}{\eta_{\text{generator}}}$$

$$BHP = \frac{V \cdot I}{\eta_{\text{generator}}}$$

$$= \frac{1,4 \cdot 0,014}{0,8}$$

$$= 0,02485125 \text{ Watt}$$

- Torsi (Nm)

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

$$= \frac{0,02485125}{2 \cdot 3,14 \cdot \frac{457}{60}}$$

$$= 0,00051992 \text{ Nm}$$

- Efisiensi (η)

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

$$= \frac{0,02485125}{6,921054} \cdot 100 \%$$

$$= 1,92437695 \%$$

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

Tabel 4.4 Tabel Data Hasil Perhitungan Jumlah Sudu 2

Kecepatan angin (m/s)	Jumlah sudu			Daya Angin
	2 buah			
	BHP	T	η	
4	0,02485125	0,00051992	1,92437695	1,291392
5	0,06328125	0,00119407	2,50892061	2,52225
6	0,12220056	0,00185615	2,80376307	4,358448
7	0,21218	0,00263501	3,06571803	6,921054

Tabel 4.5 Tabel Data Hasil Perhitungan Jumlah Sudu 3

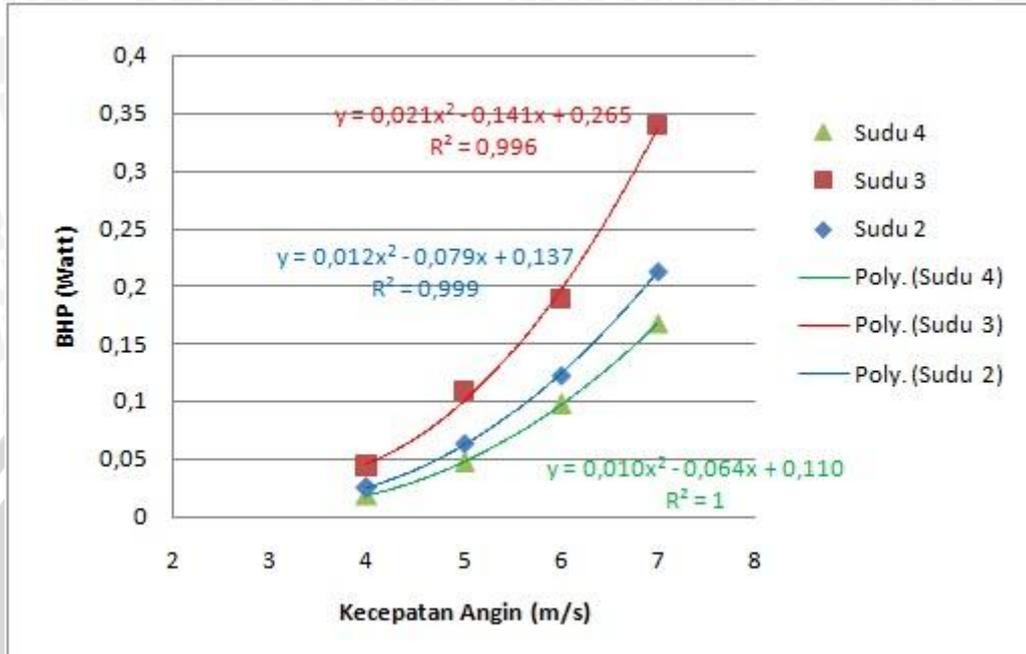
Kecepatan angin (m/s)	Jumlah sudu			Daya Angin
	3 buah			
	BHP	T	η	
4	0,043867722	0,00076156	3,39689438	1,291392
5	0,10853556	0,00150721	4,30312441	2,52225
6	0,18785681	0,00230399	4,31017659	4,358448
7	0,33886722	0,00383146	4,89617943	6,921054

Tabel 4.6 Tabel Data Hasil Perhitungan Jumlah Sudu 4

Kecepatan angin (m/s)	Jumlah sudu			Daya Angin
	4 buah			
	BHP	T	η	
4	0,01870681	0,00044533	1,44857685	1,291392
5	0,047045	0,00093381	1,86519972	2,52225
6	0,09730125	0,00160743	2,23247472	4,358448
7	0,16714014	0,00231544	2,4149521	6,921054

4.2 Pembahasan

4.2.1 Hubungan Antara Kecepatan Angin Terhadap Daya Poros (BHP)



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

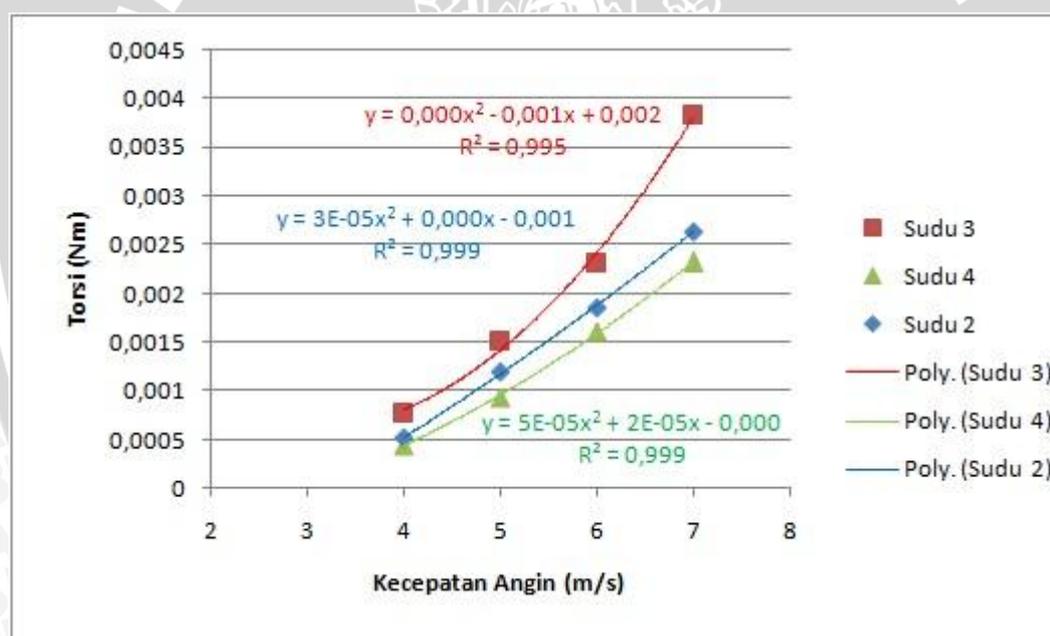
Dari grafik (gambar 4.1) hubungan antara kecepatan angin terhadap daya poros (BHP) dapat dilihat bahwa kecepatan angin berpengaruh terhadap daya poros yang dihasilkan. Pada titik awal sampai akhir grafik hubungan kecepatan angin terhadap daya poros mengalami kecenderungan yang meningkat, semakin meningkatnya kecepatan angin maka akan menyebabkan semakin besar momentum angin yang menumbuk turbin setiap detiknya, maka meningkatnya gaya drag ini menyebabkan meningkatnya pula daya poros turbin.

Dari grafik diatas dapat di lihat BHP tertinggi di peroleh pada 3 sudu kemudian 2 dan yang terendah 4. BHP tertinggi di capai oleh turbin yang mempunyai 3 sudu dengan kecepatan 4 m/s yaitu 0,3388 watt dan 0,0438 watt pada kecepatan 7 m/s hal tersebut di karenakan kerenggangan pada jarak poros turbin yang di miliki 3 sudu menjadikan aliran dapat masuk dan menerpa sudu dibelakang poros dengan baik sehingga dapat meningkatkan gaya dorong turbin. Pada 2 sudu nilai BHP tertinggi di capai pada kecepatan 7 m/s yaitu 0,2121 watt

dan 0,0248 pada kecepatan 4 m/s hal ini daerah terpaan angin yang lebih kecil sehingga gaya dorong sudu 2 lebih rendah dari pada sudu 3. Dan pada 4 sudu mempunyai nilai BHP terkecil dari keseluruhan sudu dengan BHP tertinggi 0,1671 watt pada 7 m/s dan 0,0187 watt pada 4m/s. hal ini di sebabkan karena 4 sudu mempunyai jarak antar celah yang tersempit dari semua sudu sehingga aliran angin yang masuk dan menerpa sudu tidak maksimal sehingga gaya dorong turbin pun semakin rendah.

Semakin tinggi gaya dorong yang di dihasilkan maka akan meningkatkan putaran turbin, sehingga semakin tinggi putaran maka daya motor yang di dihasilkan pun akan semakin besar. Hal tersebut sesuai dengan persamaan (2-7)

4.2.2 Hubungan Antara Kecepatan Angin Terhadap Torsi (T)



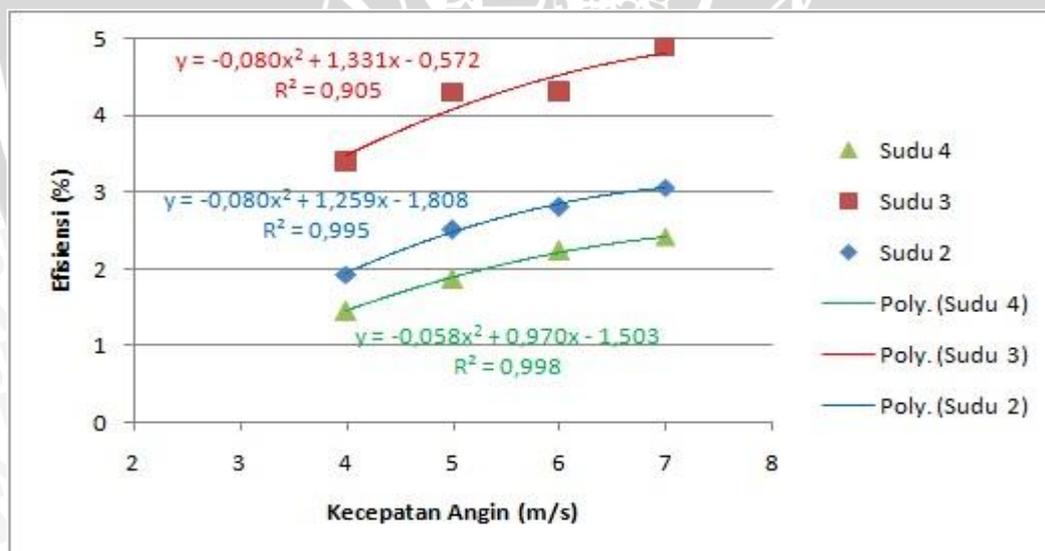
Gambar 4.2 Grafik Hubungan kecepatan angin terhadap torsi (T)

Dari Grafik 4.2 hubungan antara kecepatan angin terhadap torsi (T), pada grafik terlihat pada sudu 2, 3 dan 4 mengalami kecenderungan meningkat, hal ini disebabkan semakin meningkatnya kecepatan angin maka akan menyebabkan semakin besar momentum angin yang menabrak sudu turbin sehingga menyebabkan semakin tinggi pula gaya dorong untuk memutar turbin. Semakin

tinggi putaran maka daya poros pun semakin meningkat, sehingga torsi yang di hasilkan pun semakin besar, hal ini sesuai dengan persamaan (2-8)

Pada grafik hubungan antara kecepatan angin terhadap torsi diatas dapat di lihat bahwa nilai tertinggi di peroleh pada 3 sudu kemudian 2 dan yang terendah 4. Torsi tertinggi di capai oleh turbin yang mempunyai 3 sudu dengan kecepatan 7 m/s yaitu 0,0038 Nm dan terendah 0,0007 Nm pada saat kecepatan 4m/s, hal tersebut di karenakan pada turbin sudu 3 mempunyai daya poros yang lebih tinggi di dibandingkan sudu 2 dan 4 sehingga torsi yang di hasilkan juga semakin tinggi. Pada 2 sudu nilai torsi tertinggi di capai pada kecepatan 7 m/s yaitu 0,0026 Nm dan terendah 0,0005 Nm ini di karenakan pada sudu 2 nilai BHP nya di bawah sudu 3 , kemudian pada 4 sudu mempunyai nilai torsi terendah dari semua turbin yaitu nilai tertinggi yang dapat di capai adalah 0,0023 Nm pada kecepatan 7 m/s dan terendah 0,0004 Nm pada kecepatan 3 m/s hal ini di karenakan pada sudu 4 mempunyai nilai BHP terkecil dari keseluruhan sudu.

4.2.3 Hubungan Antara Kecepatan Angin Terhadap Efisiensi (η)



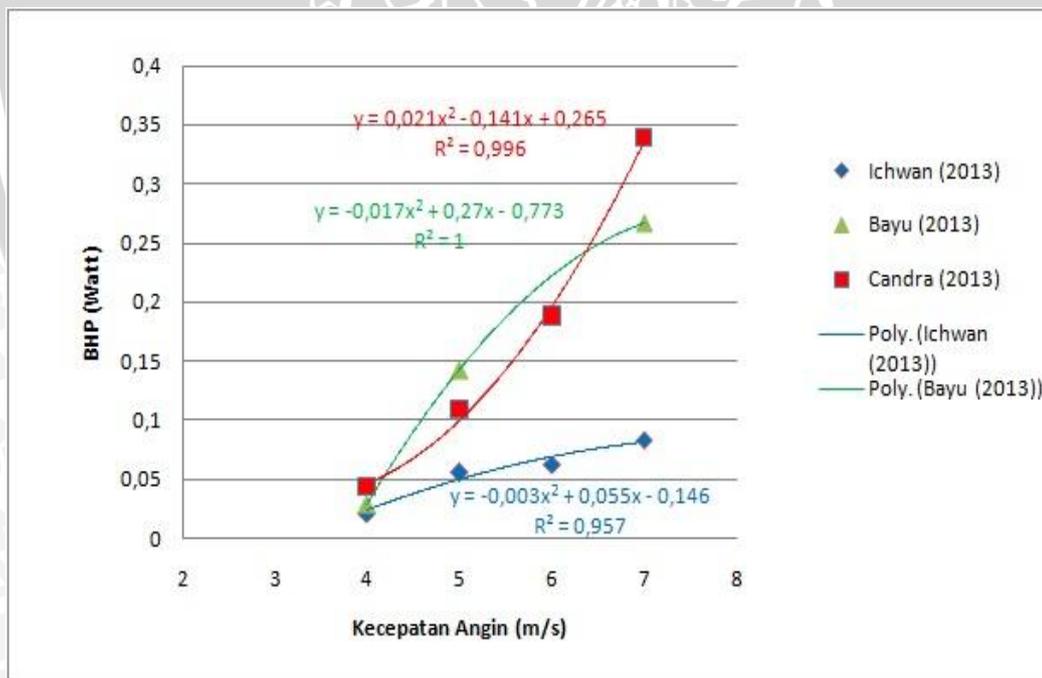
Gambar 4.3 Grafik Hubungan kecepatan angin terhadap efisiensi (η)

Grafik hubungan antara kecepatan angin terhadap efisiensi (η) pada grafik 4.3 dapat dilihat bahwa semakin meningkatnya kecepatan angin maka kenaikan

daya poros akan semakin besar dan efisiensi pun juga akan meningkat, sesuai dengan persamaan (2-9)

Yaitu efisiensi merupakan perbandingan antara daya poros dengan daya angin. Dari grafik diatas dapat di lihat bahwa pada jumlah sudu 3 mempunyai efisiensi paling tinggi pada kecepatan 7 m/s yaitu 4,896 % dan terendah pada 4 m/s yaitu 3,396 % dan pada jumlah sudu 2 efisiensi tertinggi pada kecepatan 7 m/s yaitu 3,065 % dan terendah pada kecepatan 4 m/s yaitu 1,924 % sedangkan pada sudu 4 mempunyai nilai efisiensi terendah dari keseluruhan sudu yaitu 2,414 % di nilai tertinggi pada kecepatan 7 m/s dan 1,448 % pada kecepatan 4 m/s. Selain itu rendahnya efisiensi yang di dihasilkan juga di sebabkan oleh tidak maksimalnya kerja generator, dari spesifikasi generator dapat lihat bahwa putaran maksimumnya pada kecepatan 1500 rpm sedangkan pada kecepatan turbin ini hanya sampai dengan 851 m/s pada kecepatan tertinggi nya.

4.2.4 Hubungan Antara Kecepatan Angin Terhadap BHP Antar Turbin



Gambar 4.4 Grafik hubungan kecepatan angin terhadap daya poros (BHP) antar turbin

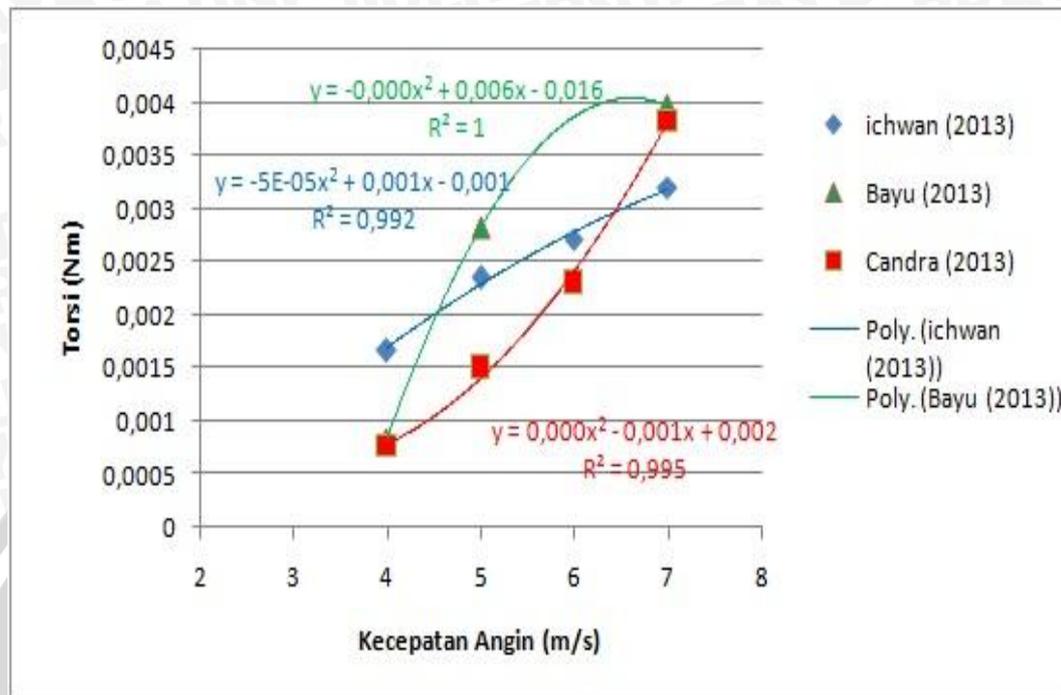
Pada grafik pembahasan 4.4 Hubungan kecepatan angin terhadap daya poros (BHP) antar turbin, dapat di lihat pada turbin darrieus tipe sudu – J nilai

BHP tertinggi yang dilakukan oleh Candra (2013) terdapat pada sudu 3 dengan nilai 0,338 watt pada kecepatan 7 m/s hal ini dikarenakan karena kerenggangan pada jarak poros turbin yang di miliki 3 sudu menjadikan aliran dapat masuk dan menerpa sudu dibelakang poros dengan baik sehingga dapat meningkatkan gaya dorong turbin. Untuk turbin jenis bilah bersirip yang telah dilakukan penelitian oleh ikhwan (2013) di dapatkan bahwa nilai BHP tertinggi terdapat pada bilah 2 dengan nilai 0,082 watt pada kecepatan 7 m/s hal ini di karenakan pada bilah 2 memiliki bilah yang yang paling sedikit sehingga angin yang menumbuk turbin akan lebih mudah untuk memutar bilah, sehingga gaya dorong yng di hasilkan lebih baik. Sementara untuk turbin savonius tipe L yang telah di lakukan penelitian oleh bayu mahenda (2013) di dapatkan bahwa nilai BHP tertinggi terdapat pada sudu 3 dengan nilai 0,267 watt pada kecepatan 7 m/s hal ini di sebabkan pada jumlah sudu 3 mempunyai jarak antara sudu satu dengan yang lain terhadap poros sudu turbin mempunyai kerenggangan yang menjadikan aliran dapat mengalir dan menerpa sudu belakang poros dan hal ini akan meningkatkan gaya dorong.

Berdasarkan grafik yang redapat di atas menunjukan bahwa turbin dengan tipe darrieus sudu – J mempunyai BHP paling tinggi diantara turbin jenis bilah bersirip dan savonius tipe L .



4.2.4 Hubungan Antara Kecepatan Angin Terhadap Torsi Antar Turbin

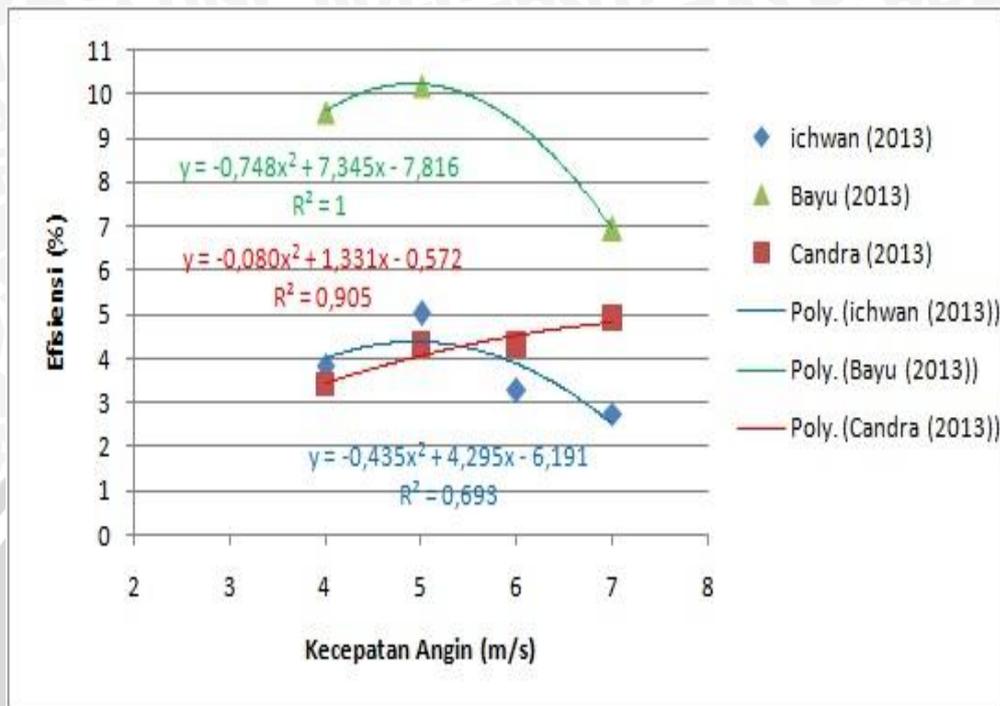


Gambar 4.5 Grafik hubungan kecepatan angin terhadap torsi antar turbin

Pada Grafik 4.5. Hubungan kecepatan angin terhadap torsi antar turbin terlihat bahwa untuk turbin darrieus tipe – J sudu 3 oleh Candra (2013) mempunyai torsi dengan 0,0038 Nm pada kecepatan 7 m/s dan untuk turbin savonius tipe sudu L sudu 3 mempunyai torsi tertinggi dengan 0,0039 Nm pada kecepatan 7 m/s sementara turbin bilah bersirip, bilah 2 mempunyai nilai torsi 0,003 Nm untuk kecepatan 7 m/s, hal tersebut disebabkan semakin meningkatnya kecepatan angin maka akan menyebabkan semakin besar momentum angin yang menabrak sudu turbin sehingga menyebabkan semakin tinggi pula gaya dorong untuk memutar turbin. Semakin tinggi putaran maka daya poros pun semakin meningkat, sehingga torsi yang di hasilkan pun semakin besar, hal ini sesuai dengan persamaan (2-8) yaitu

Semakin besar (BHP) daya poros maka semakin besar juga torsi nya.

4.2.4 Hubungan Antara Kecepatan Angin Terhadap Efisiensi Antar Turbin



Gambar 4.6 Grafik hubungan kecepatan angin terhadap efisiensi antar turbin

Pada Grafik 4.6 Hubungan kecepatan angin terhadap efisiensi antar turbin dapat di lihat bahwa turbin darrieus tipe J sudu 3 mempunyai efisiensi 4,896 % dan turbin bilah bersirip mempunyai nilai efisiensi 5,021 % pada kecepatan 7 m/s hal ini disebabkan bahwa semakin meningkatnya kecepatan angin maka kenaikan daya poros akan semakin besar dan efisiensi pun juga akan meningkat. Efisiensi diperoleh dari perbandingan daya poros dengan daya angin yang sesuai dengan persamaan (2-9)

Namun pada turbin savonius tipe L yang di lakukan penelitian oleh Bayu diperoleh turbin savonius tipe L sudu 3 pada kecepatan 5 m/s mempunyai efisiensi tertinggi dengan 10,2 %. Hal tersebut di sebabkan perbandingan daya poros dan daya angin pada tiap variasi kecepatan berbeda, sehingga nilai kenaikan daya poros dan daya angin mempunyai interval yang berbeda pula.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

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

- Pada jumlah sudu yang sama dan kecepatan angin yang meningkat diperoleh daya poros dan torsi yang meningkat.
- Pada jumlah sudu yang semakin bertambah dan kecepatan angin yang tetap diperoleh unjuk kerja turbin yang meningkat sampai pada jumlah sudu 3 dan menurun saat jumlah 4
- Efisiensi terbesar di peroleh pada sudu 3 pada kecepatan 7 m/s yaitu 4,89617943 %, kemudian daya poros terbesar yang diperoleh pada sudu 3 pada keceootan 7 m/s yaitu 0,33886722 Watt dan torsi tertinggi diperoleh juga oleh sudu 7 m/s yaitu 0,00383146 Nm
- Pada perbandingan antar turbin diperoleh bahwa turbin darrieus tipe sudu – J yang di lakukan penelitian oleh Candra (2013) sudu 3 mempunyai BHP tertinggi dengan 0,33886722 watt, turbin bilah bersirip oleh Ikwan (2013) dengan bilah 2 dengan 0,082990139 watt sementara Bayu (2013) dengan 0,267 watt. untuk turbin darrieus mempunyai torsi 0,00383146 Nm, turbin bilah bersirip dengan 0,003209036 Nm dan turbin savonius tipe L 0,00398 Nm sedangkan efisiensi turbin darrieus dengan 4,89617943 % , turbin bilah bersirip dengan 5,021845574 % dan turbin angin savonius tipe L 10,2 %.

5.2 Saran

Dari penelitian yang telah dilakukan disarankan untuk:

1. Untuk penelitian selanjutnya dapat dilakukan variasi penelitian untuk memperoleh hasil yang lebih optimal yaitu memvariasikan bagian depan sudu, lebar, panjang dan tebal sudu

2. Untuk penelitian selanjutnya dapat mencoba menggunakan bahan dan alat lain untuk memperoleh hasil yang lebih optimal dan mendekati aplikasi nyata.



DAFTAR PUSTAKA

- Bueche, F. J.; 1988: *Fisika*; Erlangga, Jakarta.
- Decosten , Josh; 2004 “*Self-Starting Darrieus Wind Turbine*”. Department of Mechanical Engineering, Dalhousie University
- Daryanto, 2007, “*Kajian Potensi angin Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu*”. Balai PPTAGG-UPT-LAGG, Yogyakarta
- El-Sayed, A. F. dan Abdel Azim. 1995. “*Dynamics of Vertical Axis Wind Turbines(Darrieus Type)*”. Zagazig University.
- Giancoli, Douglas C.; 1995: *Physics Fourth Edition*; Prentice Hall International Inc., New Jersey
- Hau, E. 2006. *Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Applications, Economics 2nd Edition*, Berlin: Springer.
- Hendra, Adiyatma . 2013. *Pengaruh jumlah sudu terhadap unjuk kerja turbin angin savonius*. Malang: Universitas Brawijaya Malang.
- Jean luc Menet dan Nachida Bouraba (5), hal 2
- Kadir, Abdul; 1996: *Energy*; UIP, Jakarta
- Kementrian Riset dan Teknologi. 2010. “*Menggapai Indonesia Bisa*” *Teknologi Listrik Hybrid di Bantul, DIY*. Jakarta: Ristek.
- World Wind Energy Association*, 2011
- LAPAN; 2006
- Menet, Bourabaa. 2004. *Increase in The Savonius Rotors Eficiency Via A Parameterics Investigations*. Prancis: Universite de Valenciennes.
- Mahendra, Bayu . 2013. *Pengaruh jumlah sudu terhadap unjuk kerja turbin angin savonius tipe L*. Malang: Universitas Brawijaya Malang.
- Sunyoto; 2011 *Teknik Mesin Industri Jilid I untuk SMK*
- Sulistiyono. 2013. *Kinerja turbin angin darrieus sudu – J dengan variasi radius bagian depan sudu*. Malang: Universitas Brawijaya Malang.
- U.S Air force; 2008. *Airfoil nomenclature and properties*, USA
- Waluyanti, Sri dkk. 2008. *Alat Ukur dan Teknik Pengukuran Jilid 1*. Jakarta: Departemen Pendidikan Nasional
- WWEA; 2011: 10th *World Wind Energy Conference & Renewable Energy Exhibition*; Worl 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 variasi jumlah sudu yang berbeda

Jumlah sudu 2



Jumlah sudu 3



Jumlah sudu 4

