

**PENGARUH VARIASI BENTUK SUDU TERHADAP KINERJA
TURBIN ANGIN SAVONIUS**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
Memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

**BINTANG ALVINDRA PRADANA
NIM. 1010620011-62**

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

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa, atas berkat dan rahmat-Nya, penyusun dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “Pengaruh Variasi Bentuk Sudu Terhadap Kinerja Turbin Angin Savonius “, yang diajukan untuk memenuhi persyaratan akademik guna memperoleh gelar Sarjana Teknik.

Skripsi ini dapat diselesaikan berkat bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Dan pada kesempatan ini penyusun mengucapkan terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua tercinta yang sudah mendukung saya selama kuliah ini.
2. Bapak Agung Sugeng Widodo ST., MT., Ph.D, selaku Dosen Pembimbing saya yang pertama dan Bapak Ir. Endi Sutikno, MT. Selaku Dosen Pembimbing saya yang kedua. Beliau telah banyak memberikan bimbingan, saran dan ilmu dalam pengerjaan skripsi ini.
3. Bapak Dr. Eng. Nurkholis Hamidi, ST., M.Eng. Selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.
4. Bapak Purnami ST., MT. Selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.
5. Ibu Dr. Eng. Lilis Yuliati, ST., MT. Selaku Kepala Laboratorium Mesin-mesin Fluida.
6. Bapak Dr. Eng. Moch. Agus Choirun, ST., MT. Selaku Kepala Laboratorium Studio Perancangan Rekayasa Sistem.
7. Bapak Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT. Selaku Dosen Pembimbing Akademik.
8. Saudaraku yang jauh di Bukittinggi Galuh Purbaningtyas yang menjadi inspirasi saya.
9. Teman-teman Imortal yang semakin kompak yang sudah menemani perjalanan selama kuliah disini.
10. Serta semua pihak yang telah membantu terselesaikan skripsi ini, yang tidak bisa disebutkan penulis satu-persatu.

Malang, 21 Oktober 2014

Penyusun

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR	iv
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GRAFIK	vi
RINGKASAN	vii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Penelitian Sebelumnya	4
2.2 Angin	
2.2.1 Pengertian Angin	5
2.2.2 Proses Terbentuknya Angin	5
2.2.3 Energi Angin	7
2.3 Tinjauan Umum Turbin Angin	
2.3.1 Pengertian Turbin Angin	9
2.3.2 Klasifikasi Turbin Angin	10
2.4 Turbin Angin Poros Vertikal Tipe Savonius	
2.4.1 Pengertian Turbin Angin Savonius	12
2.4.2 Prinsip Kerja Turbin Angin Savonius	13
2.5 Unjuk Kerja Turbin Angin Savonius	
2.5.1 <i>Brake Horse Power</i>	15
2.5.2 Torsi	15

2.5.3 Efisiensi	16
2.6 Teori dan Persamaan	
2.6.1 Teori Betz	16
2.6.2 Segitiga Kecepatan	19
2.7 CFD (<i>Computational Fluid Dynamic</i>)	20
2.7.1 Software ANSYS	21
2.8 Hipotesa	21

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian	22
3.2 Tempat dan Waktu Pelaksanaan	22
3.3 Variabel Penelitian	22
3.4 Instalasi Penelitian	23
3.5 Peralatan Penelitian	23
3.6 Prosedur Penelitian	27
3.6.1 Metode <i>experimental</i>	27
3.6.2 Metode simulasi	27
3.7 <i>Flowchart</i> Penelitian	37

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil	
4.1.1 Data Hasil Pengujian	39
4.1.2 Pengolahan Data	39
4.2 Pembahasan	
4.2.1 Hubungan Antara Kecepatan Angin Terhadap Daya Poros (BHP) ...	43
4.2.2 Hubungan Antara Kecepatan Angin Terhadap Torsi	44
4.2.3 Hubungan Antara Kecepatan Angin Terhadap Efisiensi	45
4.2.4 Grafik hubungan <i>tip speed ratio</i> dengan <i>coefficient power</i>	46
4.3 Hasil Simulasi	47
4.4 Hasil Persamaan Matematika	50

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan	52
5.2 Saran	52

**DAFTAR PUSTAKA
LAMPIRAN**



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema Terjadinya Angin	6
Gambar 2.2 Laju Pertumbuhan Angin Dunia	8
Gambar 2.3 Skema Turbin Angin	9
Gambar 2.4 Jenis <i>Blade</i> Pada Turbin Angin Horizontal	10
Gambar 2.5 Turbin Angin Sumbu Horizontal	11
Gambar 2.6 Jenis <i>Blade</i> Pada Turbin Angin vertikal	12
Gambar 2.7 Turbin Angin Sumbu Vertikal	12
Gambar 2.8 Turbin Angin Savonius <i>Standard</i>	13
Gambar 2.9 Turbin Angin Savonius Variasi	13
Gambar 2.10 Turbin Angin Tipe Savonius	14
Gambar 2.11 <i>Drag Coefficient</i>	14
Gambar 2.12 Rotor <i>Power Performance vs Tip Speed Ratio</i>	18
Gambar 2.13 Skema Segitiga Kecepatan	19
Gambar 2.14 <i>Project Schematic Software ANSYS</i>	21
Gambar 3.1 Skema Instalasi Penelitian	23
Gambar 3.2 <i>Blower</i>	23
Gambar 3.3 <i>Wind tunnel</i>	24
Gambar 3.4 <i>Digital Multitester</i>	25
Gambar 3.5 <i>Digital Tachometer</i>	26
Gambar 3.6 Generator Listrik	26
Gambar 3.7 <i>Project Schematic Simulasi</i>	28
Gambar 3.8 Pemodelan Geometri Simulasi	29
Gambar 3.9 Meshing Model Simulasi	29
Gambar 3.10 Tampilan <i>General Solution</i>	30
Gambar 3.11 Tampilan <i>Model Simulation</i>	31
Gambar 3.12 Tampilan <i>Material Setup</i>	32
Gambar 3.13 Tampilan <i>Boundry Condition</i>	33
Gambar 3.14 Tampilan <i>Solution Methods</i>	34
Gambar 3.15 Tampilan <i>Solution Control</i>	34
Gambar 3.16 Tampilan <i>Solution Intialize</i>	35
Gambar 3.17 Tampilan Proses Perhitungan	36
Gambar 3.18 Tampilan <i>Result</i>	36

Gambar 4.1 Hasil Simulasi Sudu U	47
Gambar 4.2 Hasil Simulasi Sudu J	48
Gambar 4.3 Hasil Simulasi Sudu Datar	49



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tabel Boufart 6

Tabel 4.1 Data Pengujian Tegangan, Arus listrik dan Putaran 39

Tabel 4.2 Tabel Data Hasil Perhitungan Sudu U 41

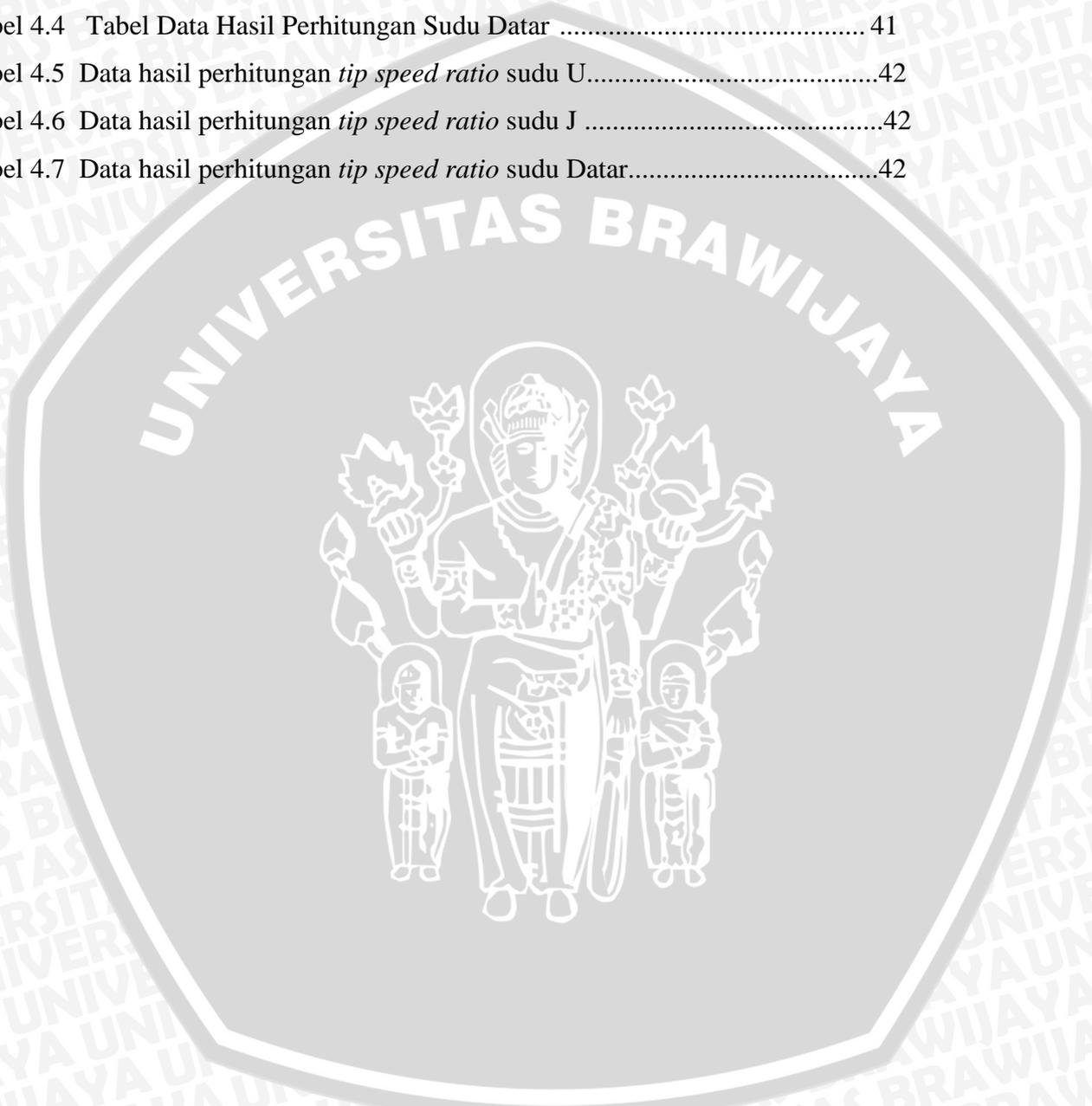
Tabel 4.3 Tabel Data Hasil Perhitungan Sudu J 41

Tabel 4.4 Tabel Data Hasil Perhitungan Sudu Datar 41

Tabel 4.5 Data hasil perhitungan *tip speed ratio* sudu U.....42

Tabel 4.6 Data hasil perhitungan *tip speed ratio* sudu J42

Tabel 4.7 Data hasil perhitungan *tip speed ratio* sudu Datar.....42



DAFTAR GRAFIK

Grafik 4.1 Hubungan Kecepatan Angin Terhadap Daya Poros (BHP)	43
Grafik 4.2 Hubungan Kecepatan Angin Terhadap Torsi	44
Grafik 4.3 Hubungan Kecepatan Angin Terhadap Efisiensi	45
Grafik 4.4 Hubungan <i>Tip Speed Ratio</i> Terhadap <i>Coefficient Power</i>	46
Grafik 4.5 Hubungan Kecepatan Angin dengan Efisiensi	50
Grafik 4.6 Hubungan Bentuk Sudu dengan Efisiensi	51



RINGKASAN

Bintang Alvin Pradana, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, November 2014, *Pengaruh Variasi Bentuk Sudu Terhadap Kinerja Turbin Angin Savonius*.
Dosen Pembimbing : Agung Sugeng Widodo dan Endi Sutikno

Efektifitas penggunaan pembangkit listrik tenaga angin sangat bergantung pada desain turbin angin khususnya desain sudu, karena sudu adalah bagian turbin angin yang akan mengkonversikan energi kinetik angin menjadi energi mekanik pada generator. Untuk itu perlu dilakukan penelitian tentang pengaruh variasi bentuk sudu terhadap kinerja turbin angin Savonius, yaitu dengan variasi sudu U, sudu J dan sudu datar. Turbin angin Savonius memiliki kemampuan *self-starting* yang bagus karena membutuhkan kecepatan angin yang rendah untuk dapat menggerakkan putaran pada rotornya. Dalam proses penelitian ini menggunakan metode *experimental* dan simulasi CFD dengan menggunakan *software* ANSYS Fluent. Pada metode *experimental* dilakukan pada *wind tunnel* dengan variasi kecepatan 4 m/s, 5 m/s, 6 m/s dan 7 m/s. Dan untuk simulasi menggunakan *software* ANSYS. Dari hasil penelitian pada kecepatan angin 7 m/s didapat bahwa kinerja paling tinggi dimiliki oleh sudu U dengan nilai BHP 1,267 watt, nilai torsi 0,0172 Nm. Kemudian sudu J pada kecepatan 7 m/s didapat nilai BHP 1,072 watt, nilai torsi 0,0164 Nm. Dan yang terakhir adalah sudu datar pada kecepatan yang sama didapat nilai BHP 0,549 watt, nilai torsi 0,0127 Nm. Pada analisa aliran fluida, sudu U mempunyai bentuk aerodinamik yang baik karena mempunyai karakteristik mesirkulasi fluida.

Kata kunci : Turbin angin Savonius, Variasi bentuk sudu

BAB I PENDAHULUAN

Salah satu ilmu pengetahuan dalam bidang teknik mesin adalah mekanika fluida, ilmu ini merupakan salah satu ilmu pengetahuan dasar dalam bidang *engineering*, di dalam mekanika fluida dipelajari tentang sifat-sifat aliran fluida, baik itu fluida *compressible* maupun *incompressible*. Udara termasuk fluida *compressible*, dan udara yang bergerak pada lingkungan biasa kita sebut angin. Dan angin ini menyimpan energi kinetik yang dapat kita manfaatkan, salah satu contohnya adalah dengan mengkonversikan energi kinetik angin sebagai penggerak generator untuk di ubah menjadi energi listrik. Karena sifatnya yang dapat diperbarui dan ramah lingkungan maka perlu dikembangkan lebih lanjut lagi.

Dengan semakin menipisnya sumber energi yang tidak dapat terbarukan (*unrenewable*), serta penggunaan bahan bakar yang tidak ramah lingkungan, perlu solusi alternatif guna mengganti sumber energi tersebut dengan sumber energi yang terbarukan (*renewable*). Sumber energi tidak terbarukan yang banyak digunakan saat ini adalah bahan bakar fosil (minyak bumi, gas alam, dan batu bara), dimana cadangan bahan bakar fosil ini semakin lama akan semakin berkurang. Oleh karena itu perlu pengembangan energi alternatif dan ramah lingkungan, salah satu solusinya adalah dengan memanfaatkan angin sebagai sumber energi. Karena angin termasuk salah satu dari sumber daya energi yang terbarukan, dan ramah lingkungan sehingga sangat potensial untuk menggantikan bahan bakar minyak.

Cara pemanfaatan energi angin adalah dengan menggunakan turbin angin. Turbin angin adalah mesin konversi energi yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik, dengan menggerakkan generator sebagai pembangkit tenaga listriknya. Meskipun sampai saat ini pembangunan turbin angin masih belum dapat menyaingi pembangkit listrik konvensional, turbin angin tetap dikembangkan oleh para ilmuwan karena dalam waktu dekat manusia akan dihadapkan dengan masalah kekurangan sumber energi yang tidak dapat diperbarui (*unrenewable*).

Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV) memiliki poros atau sumbu rotor utama yang disusun tegak lurus. Kelebihan utama susunan ini adalah turbin tidak harus diarahkan ke arah angin. Kelebihan ini berguna di tempat-tempat yang arah anginnya sangat bervariasi. TASV mampu memanfaatkan angin dari berbagai arah. Dengan sumbu yang vertikal, generator serta *gearbox* bisa ditempatkan di dekat tanah, jadi tidak perlu menara penyangga sehingga lebih mudah diakses untuk keperluan perawatan. Turbin jenis ini sangat cocok untuk digunakan sebagai pembangkit energi pada rumah tangga dan industri kecil. Dengan adanya turbin angin

yang dapat di pasang di setiap rumah akan menciptakan kemandirian masyarakat dalam menghasilkan listrik, sehingga dapat meminimalkan terjadinya krisis energi.

Dengan dilalukannya penelitian tentang turbin angin, diharapkan mampu menghasilkan pengetahuan baru tentang peningkatan efektifitas turbin angin sebagai pembangkit listrik. Oleh karena itu dalam metode penelitian ini dilakukan penelitian tentang seberapa besar pengaruh bentuk sudu pada sistem turbin angin vertikal tipe Savonius. Dalam penelitian ini variasi bentuk sudu yang digunakan adalah sudu tipe datar, sudu tipe J dan sudu tipe U. Ini perlu dilakukan penelitian karena dari tiap bentuk mempunyai *drag coefficient* yang berbeda-beda, oleh karena itu perlu diketahui seberapa besar pengaruh bentuk sudu terhadap kinerja turbin angin itu sendiri. Dan tiap bentuk sudu, juga mempunyai karakteristik masing-masing. Sudu bentuk U, dengan adanya cekungan maka akan mempengaruhi besar volume angin yang mengenai turbin sehingga bisa mempengaruhi kinerjanya. Oleh karena itu bisa dibandingkan dengan desain sudu yang berbentuk datar. Untuk tipe J sendiri adalah kombinasi antara bentuk datar dan cekungan. Sehingga untuk kedepannya bisa diketahui desain yang cocok untuk dijadikan turbin angin Savonius.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka dapat diambil suatu rumusan masalah yang akan diteliti yaitu :

“Bagaimana pengaruh variasi bentuk sudu terhadap kinerja turbin angin Savonius ?”

1.3 Batasan Masalah

Untuk membatasi agar penelitian ini lebih spesifik dan lebih terarah maka diberikan batasan-batasan masalah sebagai berikut :

1. Fluida kerja yang digunakan adalah udara.
2. Penelitian dilakukan di *wind tunnel* dengan variasi kecepatan angin dan bentuk sudu.
3. Analisa CFD pada sudu turbin untuk mengetahui analisa aerodinamika.
4. Sudu turbin terbuat dari pipa PVC .
5. Turbin angin savonius yang digunakan menggunakan poros.
6. Turbin angin merupakan sebuah model.
7. Kinerja turbin angin Savonius dalam penelitian ini adalah daya poros, torsi, efisiensi.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin diperoleh dari penelitian ini adalah mengetahui kinerja turbin angin Savonius terhadap pengaruh bentuk sudu.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat antara lain :

1. Mahasiswa dapat memahami lebih jauh tentang proses konversi energi dalam hal ini adalah konversi energi kinetik angin menjadi energi listrik.
2. Sebagai referensi dalam pengembangan turbin angin lebih lanjut, guna mengoptimalkan kinerja dari turbin angin.
3. Memanfaatkan energi angin lebih optimal.
4. Mengurangi ketergantungan pada sumber daya energi yang tidak dapat terbarukan.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Hermawan (2010) melakukan variasi terhadap jumlah sudu dan posisi sudut turbin Savonius tipe U. Penelitian ini menggunakan turbin Savonius tipe U tiga sudu. Hasil dari penelitian ini adalah daya maksimum dihasilkan oleh turbin dengan tiga sudu.

Sarjono (2011) melakukan penelitian dengan judul “ Pengaruh perubahan jumlah *blade spiral* terhadap kinerja turbin angin Savonius dengan bentuk *blade spiral* ”. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jumlah *blade* pada kincir angin berpengaruh terhadap besarnya energi kinetik yang dapat di ubah menjadi energi mekanik.

Irsyad (2012) melakukan penelitian dengan judul “Penggunaan bentuk sudu setengah silinder eliptik untuk meningkatkan efisiensi.” Pada penelitian ini turbin angin Savonius yang digunakan berbentuk potongan silinder eliptik dengan rasio L/D sebesar 1/1, 1.25/1, 1.5/1, 1.75/1, 2/1. Dipasang pada *wind tunnel* dengan kecepatan 5 dan 6 m/s. Berdasarkan hasil pengujian dengan variasi sudu pada turbin angin Savonius, diperoleh beberapa kesimpulan bahwa kenaikan rasio L/D sudu dapat meningkatkan kecepatan putar, torsi, daya, dan efisiensi turbin Savonius.

Hendra (2012) melakukan penelitian dengan variasi jumlah sudu 2, 3, dan 4 dengan variabel bebas kecepatan angin pada *wind tunnel* dari 3 m/s sampai 7 m/s. Didapatkan hasil analisis bahwa turbin angin dengan jumlah sudu 3 memiliki unjuk kerja paling tinggi.

Kusbiantoro (2013) melakukan variasi pengaruh panjang lengkung sudu pada turbin angin Savonius. Dari penelitian yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa panjang lengkung sudu berpengaruh terhadap kinerja turbin angin Savonius, dimana hasil terbesar dimiliki oleh turbin angin dengan panjang lengkung sudu 6/12 lingkaran.

Bhirangga (2013) melakukan penelitian dengan variasi panjang sudu turbin angin Darrius tipe J. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah panjang sudu sebesar 200 mm, 250 mm, 300 mm, dan kecepatan angin sebesar 4, 5, 6, dan 7 m/s. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah daya poros, torsi, dan efisiensi yang dihasilkan oleh turbin angin Darrius tipe sudu J. Pada penelitian ini diketahui bahwa panjang sudu 300 mm memiliki kinerja paling baik.

2.2 Angin

2.2.1 Pengertian Angin

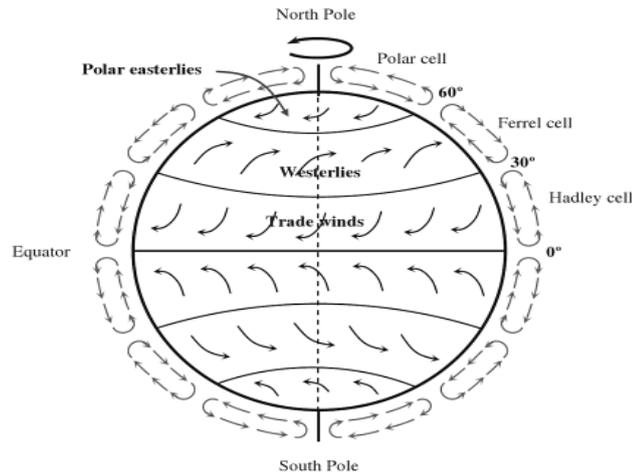
Angin adalah udara yang bergerak yang diakibatkan karena adanya perbedaan tekanan udara di sekitarnya. Angin bergerak dari tempat bertekanan udara tinggi ke bertekanan udara rendah. Prosesnya adalah udara yang telah memuai akibat panas menjadi lebih ringan sehingga bergerak naik, sehingga tekanan udara menjadi turun karena udaranya berkurang. Sehingga udara dingin di sekitarnya mengalir ke tempat yang bertekanan rendah.

Meskipun pada kenyataan angin tidak dapat dilihat bagaimana wujudnya, namun dapat diketahui keberadaannya melalui efek yang ditimbulkan, pada benda – benda yang mendapat hembusan angin. Seperti ketika melihat dahan pohon yang bergerak atau gerakan dari sebuah kincir 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 digunakan untuk mengukur kecepatan angin.
2. *Wind vane*, yaitu alat yang digunakan untuk mengetahui arah angin.
3. *Windsock*, yaitu alat yang digunakan untuk mengetahui arah angin dan memperkirakan besar kecepatan angin, biasanya ditemukan di bandara.

2.2.2 Proses Terbentuknya Angin

Angin memiliki hubungan erat dengan sinar matahari karena daerah yang terkena banyak sinar matahari akan memiliki suhu yang lebih tinggi serta tekanan udara yang lebih rendah dari daerah disekitarnya sehingga menyebabkan terjadinya aliran udara. Dengan demikian akan terjadi suatu perputaran udara dari daerah kutub yang mempunyai tekanan lebih tinggi menuju daerah khatulistiwa. Seperti yang dijelaskan pada gambar 2.1 yang menjelaskan bahwa angin dari tekanan tinggi menuju ke daerah bertekanan rendah. Pada daerah khatulistiwa mempunyai tekanan lebih rendah karena pemuaiian udara akibat panas sehingga udara naik karena menjadi lebih ringan, akibatnya tekanan pada daerah tersebut menjadi turun.



Gambar 2.1 : Skema terjadinya angin
 Sumber : Tong , 2010

Berdasarkan tabel Boufart, angin dapat diklasifikasikan jenisnya berdasarkan kecepatannya karena tiap kecepatan angin mengakibatkan efek yang berbeda. Berikut adalah tabel Boufart yang menjelaskan klasifikasi angin beserta efek yang akan ditimbulkan,

Tabel 2.1 Tabel Boufart, klasifikasi jenis angin

Descriptive term	Beaufort scale number	Mean velocity	Land criterion
		(km/hour)	
Tenang	0	< 2	Tenang, asap mengepul vertical
Teduh	1	2>6	Asap mengepul miring tetapi alat anemometer tidak berputar
Sepoi Lemah	2	7>12	Terpaan angin terasa di muka, anemometer berputar perlahan
Sepoi Lembut	3	13>19	Daun-daun kecil di pohon bergerak, bendera dapat bergerak
Sepoi Sedang	4	20>30	Debu dan kertas dapat terbang, ranting pohon bergerak
Sepoi Segar	5	31>40	Pohon-pohon kecil terlihat condong. Genangan air tanah terlihat mengombak kecil
Sepoi Kuat	6	41>51	Batang pohon terlihat bergerak, suara berdesing dari kawat telepon dapat terdengar, payung dapat terangkat
Angin ribut lemah	7	52>62	Pohon-pohon bergerak, berjalan terasa berat
Angin ribut	8	63>75	Batang pohon dapat tumbang,
Angin ribut kuat	9	76>87	Dapat membuat kerusakan cerobong, pot-pot beterbangan
Badai	10	88>103	Kerusakan lebih besar, tetapi di darat jarang
Badai amuk	11	104>117	Kerusakan berat tetapi sangat jarang terjadi di darat
Topan	12	≥118	Hampir tidak pernah terjadi

Sumber : Hong Kong Observation, 2009

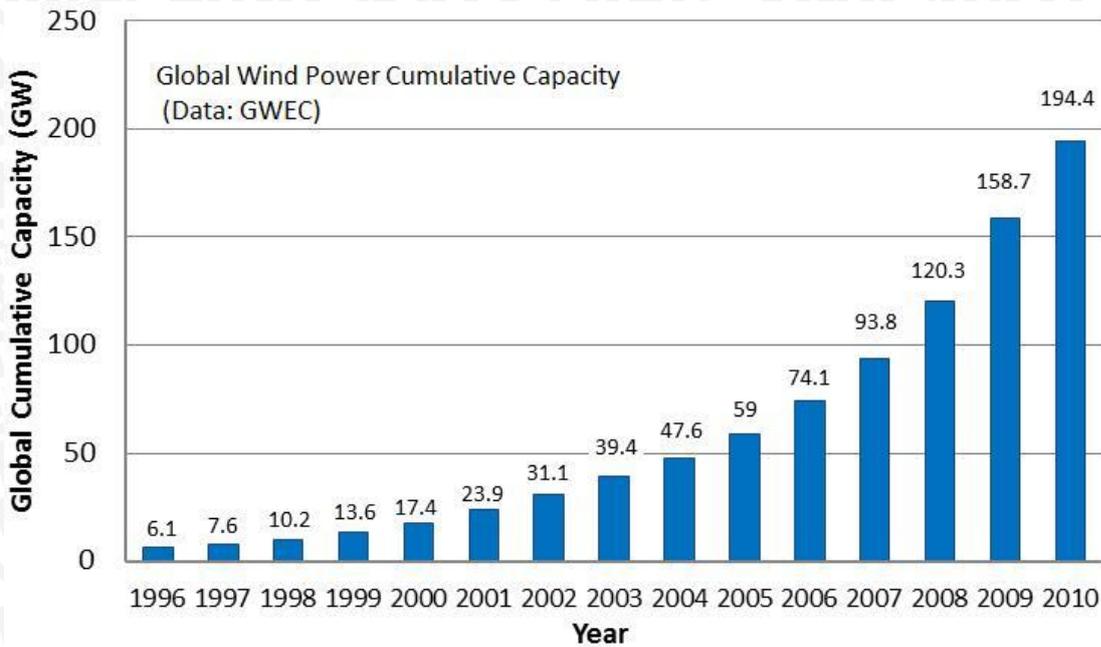
2.2.3 Energi Angin

a. Perkembangan Energi Angin

Energi angin merupakan salah satu *renewable resources* yang berkembang pesat di dunia saat ini. Energi yang dapat dimanfaatkan dari angin adalah energi kinetik yang diubah menjadi energi mekanik. Energi angin juga sangat fleksibel karena dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan, misalnya pemompaan air untuk irigasi, pembangkit listrik, pengering atau pencacah hasil panen.

Selain itu pemanfaatan energi angin dapat dilakukan di mana-mana, baik di daerah pantai maupun dataran tinggi, bahkan dapat diterapkan di laut. Walaupun pemanfaatan energi angin dapat dilakukan dimana saja, daerah-daerah yang memiliki potensi energi angin yang tinggi tetap perlu diidentifikasi agar pemanfaatan energi angin ini lebih kompetitif dibandingkan dengan energi alternatif lainnya. Oleh karena itu studi potensi pemanfaatan energi angin ini sangat tepat dilakukan guna mengidentifikasi daerah-daerah berpotensi. Angin selama ini dipandang sebagai proses alam biasa yang kurang memiliki nilai ekonomis bagi kegiatan produktif masyarakat.

Pada saat ini, sistem pembangkit listrik tenaga angin mendapat perhatian yang cukup besar sebagai sumber energi alternatif yang bersih, aman, serta ramah lingkungan. Turbin angin skala kecil mempunyai peranan penting terutama bagi daerah-daerah yang belum terjangkau oleh jaringan listrik. Pemanfaatan energi angin merupakan pemanfaatan energi terbaru yang paling berkembang saat ini. Berdasarkan data dari WWEA (*World Wind Energy Association*), perkembangan pemanfaatan energi angin secara global dari tahun 1996 sampai tahun 2010 selalu mengalami peningkatan. Pada tahun 1996 energi angin yang sudah dimanfaatkan sebesar 6,1 GW dan mengalami peningkatan tiap tahunnya, sampai pada tahun 2010 energi angin yang sudah dimanfaatkan mencapai 194,4 GW.



Gambar 2.2 : Laju pertumbuhan angin dunia
 Sumber : World Wind Energy Association, 2011

b. Energi Kinetik Angin

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

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

Dimana :

- E = Energi kinetik (Joule)
- m = Massa udara (kg)
- V = Kecepatan angin (m/s)

Jika suatu benda memiliki penampang A dan bergerak dengan kecepatan v , maka jumlah massa yang melewati suatu tempat dapat dilihat pada rumus 2-2 berikut :

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

Dimana :

- \dot{m} = Laju alir massa udara (kg/s)
- ρ = Massa jenis udara (kg/m³)
- v = Kecepatan angin (m/s)
- A = luas penampang (m²)

$$A = d \times h$$



Dimana :

d = Diameter sudu (m)

h = Tinggi sudu (m)

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

$$\text{Power} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (\text{Giancoli, 1995}) \quad (2-3)$$

Dimana :

P = daya angin (W)

E = energi angin (joule)

ρ = massa jenis udara (kg/m^3)

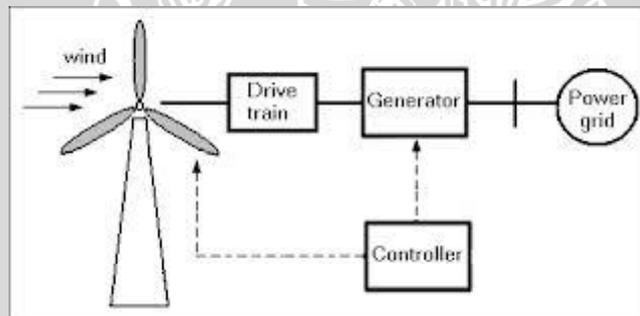
A = luas penampang (m²)

v = kecepatan angin (m/s)

2.3 Tinjauan Umum Turbin Angin

2.3.1 Pengertian Turbin Angin

Turbin angin adalah alat konversi energi yang digunakan untuk mengkonversi energi kinetik angin menjadi energi mekanik pada poros turbin. Energi pada poros turbin ini nantinya digunakan untuk memutar generator yang dapat menghasilkan energi listrik.



Gambar 2.3 : Skema turbin angin

Sumber : [Anonymous](#) 1

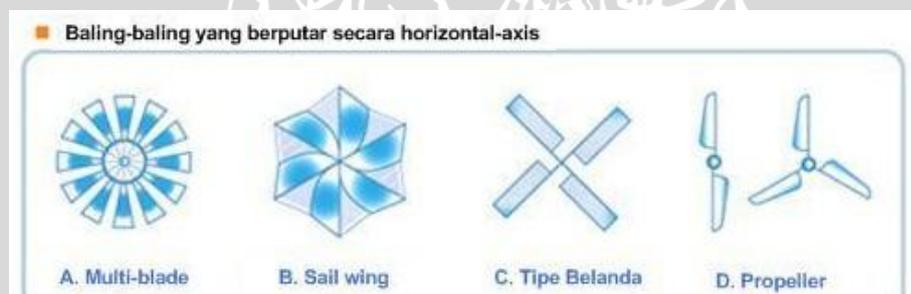
Cara kerja dari pembangkitan listrik tenaga angin ini yaitu awalnya energi angin memutar sudu turbin. Kemudian dikonversikan untuk memutar rotor pada generator di bagian belakang turbin angin sebelum memutar generator putaran akan diatur oleh *drive train*, fungsinya untuk meningkatkan putaran sesuai dengan spesifikasi generator, *drive train* ini adalah sebuah *gearbox* yang fungsinya meningkatkan putaran poros dengan cara perbandingan roda gigi pada *gearbox*. Pada bagian *controller* mempunyai fungsi sebagai pengatur kecepatan putaran, jika putaran terlalu tinggi maka *controller* akan menurunkan putaran tersebut karena untuk menjaga stabilitas generator, karena pada generator mempunyai titik aman maksimal putaran. Selanjutnya setelah putaran generator sesuai

dengan kebutuhan, maka generator akan mengkonversikan putaran menjadi energi listrik. Prinsip kerjanya menggunakan teori medan elektromagnetik, yaitu 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* karena terjadi perubahan *fluks* maka dihasilkan tegangan dan arus listrik.

2.3.2 Klasifikasi Turbin Angin

a. Turbin Angin Sumbu Horizontal

Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH) memiliki sudu yang berputar pada bidang vertikal seperti baling-baling pesawat terbang. Turbin ini biasanya memiliki sudu dengan bentuk irisan melintang 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. Berdasarkan bentuknya turbin angin sumbu horizontal dapat diklasifikasikan menjadi empat jenis, *multi-blade*, *sall wing*, tipe belanda, *propeller*.



Gambar 2.4 : Jenis *blade* pada turbin angin horizontal
Sumber : Hau, 2006

Kelebihan dan kekurangan turbin angin sumbu horizontal

- Kelebihan
 1. Dasar menara yang tinggi dapat diperoleh angin yang lebih kuat.
- Kekurangan
 1. Memerlukan biaya yang mahal untuk membangunnya karena dibutuhkan menara yang tinggi serta bilah yang panjangnya bisa mencapai 90 meter .
 2. Konstruksi menara yang besar dibutuhkan untuk menyangga bilah-bilah yang berat, *gearbox*, dan generator.



Gambar 2.5 : Turbin angin sumbu horizontal
Sumber : [Anonymous](#) 2

b. Turbin Angin Sumbu Vertikal

Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV), memiliki sumbu rotor utama yang disusun tegak lurus terhadap arah angin. Pada umumnya turbin angin jenis ini memiliki putaran awal yang baik, sehingga dapat beroperasi walaupun dalam kecepatan angin yang rendah. Turbin angin ini terdiri dari berbagai jenis, yang dapat dilihat pada gambar 2.6, yaitu : *Cross-flow*, Savonius, Darrieus.



Gambar 2.6 : Jenis blade pada turbin angin vertikal
Sumber : Hau, 2006

.Kelebihan dan kekurangan turbin angin sumbu horizontal,

- Kelebihan
 1. Tidak membutuhkan struktur menara yang besar.
 2. TASV tidak harus diubah posisinya jika arah angin berubah.
 3. Sifatnya yang *portable*, memungkinkan untuk dikembangkan di setiap rumah.
 4. Sebuah TASV bisa diletakkan lebih dekat ke tanah, membuat pemeliharaan bagian - bagiannya yang bergerak jadi lebih mudah.

- Kekurangan :
 1. Kebanyakan TASV memproduksi energi hanya 50 % dari energi TASH .



Gambar 2.7 : Turbin angin sumbu vertikal
 Sumber : World Wind Energy Association, 2011

2.4 Turbin Angin Poros Vertikal Tipe Savonius

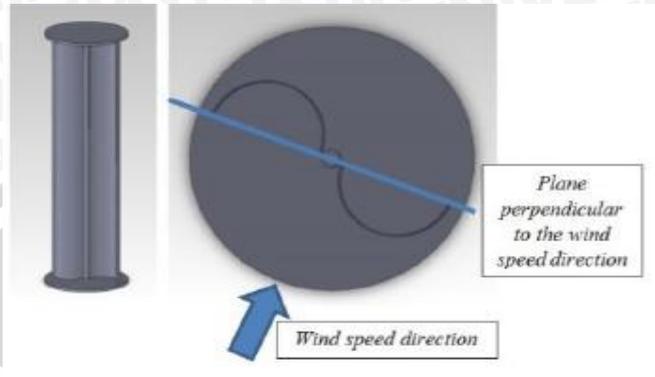
2.4.1 Pengertian Turbin Angin Savonius

Turbin angin Savonius adalah turbin dengan konstruksi sederhana yang ditemukan oleh sarjana Finlandia yang bernama Sigurd J. Savonius. Bentuk dasar rotor turbin ini adalah setengah silinder. Prinsip kerjanya cukup sederhana, yaitu berdasarkan *differential drag windmill*.

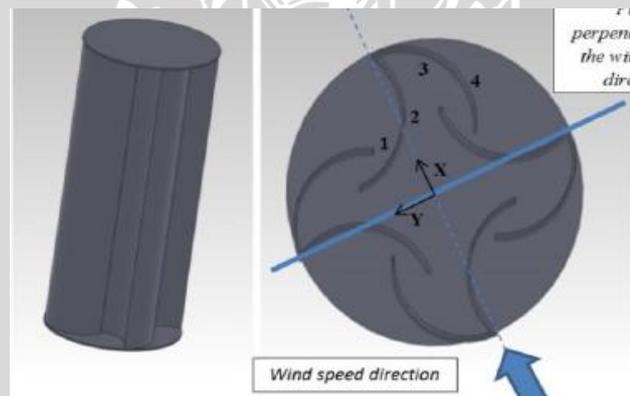
Pada masa awal ditemukannya turbin vertikal tipe Savonius, turbin angin poros horizontal telah banyak dimanfaatkan. Tetapi turbin dengan poros horizontal memiliki desain yang sulit dan biaya operasional yang mahal. Sehingga banyak yang memilih alternatif lain, yaitu turbin angin Savonius. Desain turbin Savonius memiliki beberapa keuntungan daripada turbin angin dengan poros horizontal. Diantaranya adalah, turbin ini dapat beroperasi dengan arah angin yang tidak beraturan. Turbin angin Savonius beroperasi pada kecepatan angin yang rendah, sehingga tidak memerlukan menara penyangga dan dapat ditempatkan di atas permukaan tanah, sehingga mempermudah pemeliharaan. Karena kesederhanaan dari turbin Savonius inilah yang menyebabkan turbin ini banyak dimanfaatkan untuk keperluan rumah tangga dan pembangkit listrik skala kecil.

Salah satu parameter yang mempengaruhi kinerja turbin angin savonius adalah posisi letak sudu. Berikut adalah *study* tentang turbin angin savonius perbandingan posisi sudu. Pada *study* ini turbin savonius divariasikan berdasarkan posisi sudu, karena hal ini akan berpengaruh pada nilai gaya *drag* pada tiap sudunya. Model pertama adalah turbin angin savonius dengan model *standard* dengan dua sudu dan model kedua adalah turbin angin

savonius dengan delapan sudu dengan posisi sudu yang divariasikan hal ini dilakukan guna mengetahui pengaruh yang dihasilkan pada setiap turbin pada perubahan peletakan posisi sudu. Disimpulkan bahwa peletakan sudu berpengaruh pada kinerja turbin angin hal ini disebabkan karena nilai gaya *drag* yang dihasilkan akan berbeda sehingga berpengaruh pada kinerja turbin angin tersebut.



Gambar 2.8 : Turbin angin savonius *standard*
 Sumber : Rezia, Giovanni (2014)



Gambar 2.9 : Turbin angin savonius variasi
 Sumber : Rezia, Giovanni (2014)

2.4.2 Prinsip Kerja Turbin Angin Savonius

Turbin angin memiliki prinsip kerja, sama seperti turbin pada umumnya. Dimulai dari pemanfaatan energi kinetik yang dimiliki oleh angin, yang kemudian dikonversikan oleh sudu menjadi energi mekanik poros.

$$C_d = \frac{Drag}{\frac{1}{2} \rho A V^2} \quad (2-4)$$

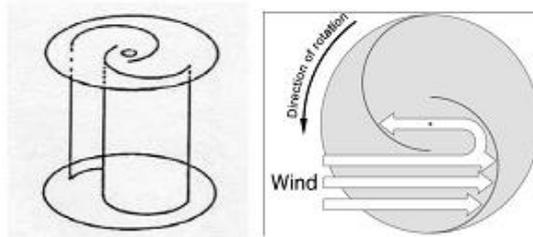
Dimana :

C_d = drag Coefficient

Drag = Gaya drag (kg.m/s²)

ρ = Massa jenis udara (kg/m³)

A = Luas permukaan (m²)
 V = Kecepatan angin (m/s)



Gambar 2.10 : Turbin angin tipe Savonius
 Sumber : Cheremisinoff, 1978

Pada gambar 2.10 dijelaskan tentang prinsip kerja turbin angin savonius, pertama angin yang datang menumbuk sudu akan menyebabkan gaya dorong pada sudu dan akibat dari gaya dorong tersebut maka timbul juga gaya *drag* yang dihasilkan dan menyebabkan benda berputar. Pada gambar 2.11 di tampilkan nilai *drag coefficient* berdasarkan bentuk sudunya, untuk mengetahui besar *drag coefficient* tiap - tiap sudu dapat dilihat pada gambar dibawah ini :

SHAPE	C _D	SHAPE	C _D
1)  STING SUPPORT	0.47	12) 	1.17
2) 	0.38	13) 	1.20
3) 	0.42	14) 	1.16
4) 	0.59	15) 	1.60
5)  CUBE	0.80	16) 	1.55
6)  60°	0.50	17) 	1.55
7)  SEPARATION	1.17	18)  VORTEX STREET	1.98
8)  V	1.17	19)  V	2.00
9) 	1.42	20)  V	2.30
10) 	1.38	21) 	2.20
11)  CUBE	1.05	22) 	2.05

Gambar 2.11 : *Drag coefficient* tiap bentuk sudu
 Sumber : white , 1986

Dari gambar di atas terlihat tiap sudu mempunyai nilai *drag coefficient* berbeda - berbeda berdasarkan bentuk sudunya. Dari perbedaan itu, *drag* yang dihasilkan masing-masing sudu juga akan berbeda, sehingga resultan gaya-gaya yang bekerja akan mengakibatkan rotor berputar.

2.5 Unjuk Kerja Turbin Angin Savonius

Dalam pembahasan kali ini parameter-parameter dari kinerja turbin angin yang dibahas adalah *brake horse power* (BHP), torsi (T) dan efisiensi (η).

2.5.1 Brake Horse Power

Brake horse power adalah daya dari turbin yang diukur setelah mengalami pembebanan yang disebabkan oleh generator, *gearbox*, ataupun perangkat tambahan lainnya. *Brake* yang dimaksud adalah suatu peralatan yang digunakan untuk memberikan beban pada turbin sehingga putarannya dapat terjaga secara konstan. Dalam percobaan nantinya BHP diukur dengan menggunakan generator listrik. Dengan mengukur besarnya tegangan yang dihasilkan , dapat diketahui besarnya daya yang dihasilkan. Seperti pada rumus :

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

Dimana :

$$\begin{aligned} P_{\text{generator}} &= \text{Daya generator listrik (watt)} \\ V &= \text{Tegangan generator listrik (volt)} \\ I &= \text{Arus listrik (Ampere)} \end{aligned}$$

Besarnya BHP dapat dihitung setelah mendapatkan $P_{\text{generator}}$ dengan rumus,

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

Dimana :

$$\begin{aligned} BHP &= \text{Brake horse power (watt)} \\ P_{\text{generator}} &= \text{Daya generator listrik (volt)} \\ \eta &= \text{Efisiensi generator (\%)} \end{aligned}$$

2.5.2 Torsi

Torsi biasa disebut juga momen atau gaya yang menyatakan benda berputar pada sumbu. Torsi juga biasa didefinisikan ukuran keefektifan gaya tersebut dalam menghasilkan putaran atau gaya mengelilingi sumbu tersebut.

$$T = \frac{P_{\text{generator}}}{2 \pi \frac{n_{\text{generator}}}{60}} \quad (2-7)$$

Dimana :

$$\begin{aligned} T &= \text{Torsi (Nm)} \\ P_{\text{generator}} &= \text{Daya generator (watt)} \\ n_{\text{generator}} &= \text{Putaran generator (rpm)} \end{aligned}$$

2.5.3 Efisiensi

Untuk menyatakan kinerja suatu mesin biasanya dinyatakan dalam efisiensi yang merupakan perbandingan antara kerja yang dihasilkan dengan energi yang dibutuhkan. Atau perbandingan antara kerja *input* dengan kerja *output*. Rumus efisiensi adalah sebagai berikut :

$$Efisiensi = \frac{BHP}{P_{angin}} 100 \% \quad (2-8)$$

Dimana :

BHP = Brake horse power (watt)

P_{angin} = Daya angin (watt)

2.6 Teori dan Persamaan

2.6.1 Teori Betz

Teori momentum Betz sederhana berdasarkan pemodelan aliran dua dimensi yang mengenai rotor menjelaskan prinsip konversi energi angin pada turbin angin. Kecepatan aliran udara berkurang dan garis aliran membelok ketika melalui rotor pada satu bidang. Berkurangnya kecepatan aliran udara disebabkan sebagian energi kinetik angin diserap oleh rotor turbin angin. Putaran rotor menghasilkan perubahan kecepatan angin pada arah tangensial yang akibatnya mengurangi jumlah total energi yang dapat diambil dari angin.

Teori elementer Betz ini menjelaskan bagaimana energi angin dapat dikonversikan menjadi bentuk energi lainnya sehingga menghasilkan teori betz *limit* dimana C_p tertinggi turbin angin tidak melebihi 0,59. Langkah pertama dengan menganggap bahwa kecepatan udara yang melalui penampang A adalah sebesar v , maka aliran massa udara yang melalui penampang rotor pada setiap satuan waktu adalah,

$$\dot{m} = \rho v \cdot A$$

Dimana :

\dot{m} = Massa alir udara (m^3/s)

v = Kecepatan angin (m/s)

A = Luas area sapuan motor (m^2)

ρ = Massa jenis udara (kg/m^3)

Persamaan yang menyatakan energi kinetik yang melalui penampang A pada setiap satuan waktu dapat dinyatakan sebagai daya yang melalui A adalah :

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

Dimana :

P = Daya mekanik (watt)

Energi kinetik dapat diambil dari angin dengan mengurangi kecepatannya. Artinya kecepatan udara di belakang rotor akan lebih rendah daripada kecepatan di depan rotor. Energi mekanik yang diambil dari angin setiap satuan waktu didasarkan pada perubahan kecepatan dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$P = \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (v_1)^3 \cdot A_1 \right) - \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (v_2)^3 \cdot A_2 \right) \\ = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1^3 - v_2^3)$$

Dimana :

P = Daya yang dihasilkan

ρ = Massa jenis udara (kg/m³)

A₁ = Luas penampang aliran udara sebelum melalui rotor (m²)

A₂ = Luas penampang aliran udara setelah melalui rotor (m²)

v₁ = Kecepatan aliran udara sebelum melalui rotor (m²)

v₂ = Kecepatan aliran udara setelah melalui rotor (m²)

Dari persamaan diatas dengan asumsi *massa* jenis tidak mengalami perubahan maka sesuai hukum kontinuitas, sehingga menjadi persamaan persamaan $P = \frac{1}{2} \dot{m} (v_1 - v_2)$. Dari persamaan tersebut dapat disimpulkan bahwa daya terbesar yang diambil dari angin adalah jika v₂ bernilai nol yaitu angin berhenti setelah melewati rotor, namun hal ini tidak dapat terjadi karena tidak memenuhi hukum kontinuitas. Sehingga energi angin yang di ubah akan semakin besar jika v₂ semakin kecil, atau dengan rasio v₂/v₁ harus semakin besar. Untuk mengetahui daya dari rotor dapat menggunakan persamaan,

$$P = \frac{1}{4} \rho A (v_1^2 - v_2^2) \cdot (v_1 - v_2)$$

Sedangkan daya yang melewati penampang rotor adalah,

$$P_o = \frac{1}{2} \rho v_1^3 A$$

Perbandingan antara daya keluaran motor terhadap daya total yang melalui penampang rotor adalah C_p,

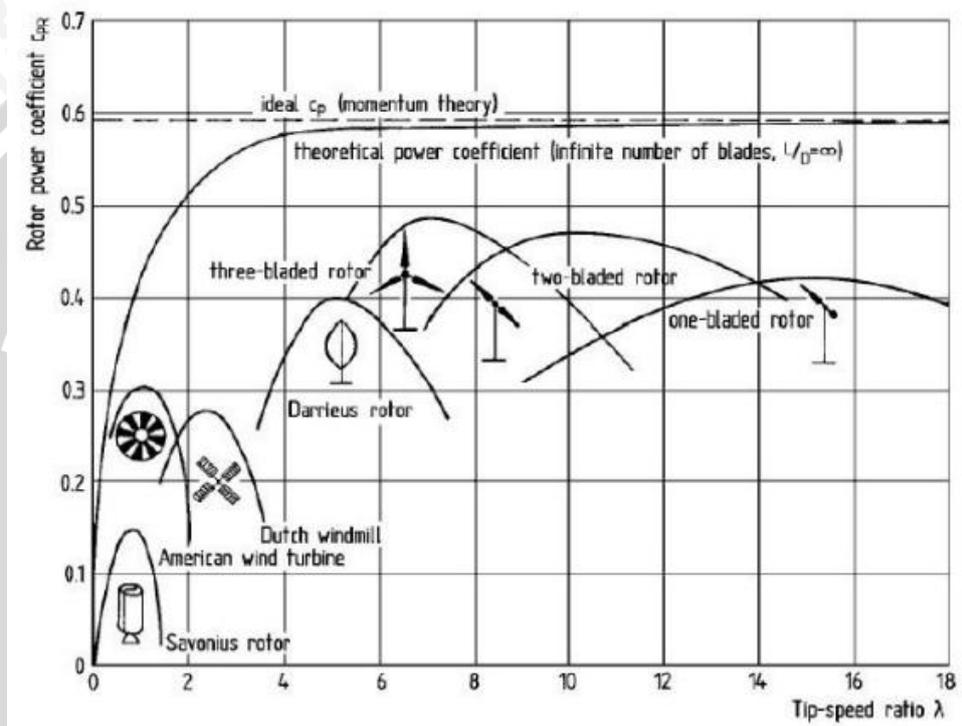
$$C_p = \frac{P}{P_o} \\ = \frac{\frac{1}{4} \rho A (v_1^2 - v_2^2) \cdot (v_1 - v_2)}{\frac{1}{2} \rho v_1^3 A}$$

(Diferensiasi P terhadap V₂ dan menyamakan dengan nol, untuk mendapatkan P maksimum)

$$= \frac{\frac{8}{27} \rho A v_1^3}{\frac{1}{2} \rho v_1^3 A} \\ = 16/27 \\ = 0,59$$

Dari persamaan perbandingan matematis diatas akan didapatkan Betz *limit* dimana nilai koefisien daya tidak melebihi nilai ideal yaitu 0,59.

Besar daya yang dapat dibangkitkan dari putaran rotor turbin angin Savonius dapat dihitung melalui pendekatan Betz. Percobaan Betz dapat dilihat pada gambar berikut yang menjelaskan klasifikasi turbin angin berdasarkan *rotor power coefficient*. Pada gambar 2.12 akan ditampilkan perbandingan tiap jenis turbin angin, mulai dari Savonius, Darrieus, American wind turbine, dutch windmill, three-blade rotor, two-blade rotor, dan one-blade rotor.



Gambar 2.12 : Hubungan *tip speed ratio* dengan *coefficient power*
 Sumber : Hau, 2006

Berdasarkan teori Betz yang divisualisasikan dalam bentuk grafik pada gambar 2.12 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 59 %. Nilai efisiensi 59 % juga sering disebut sebagai *Betz limit*.

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

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \quad (2-10)$$

Dimana :

$$\omega = \frac{2\pi \text{ rpm}}{60} \quad (\text{rad/s})$$

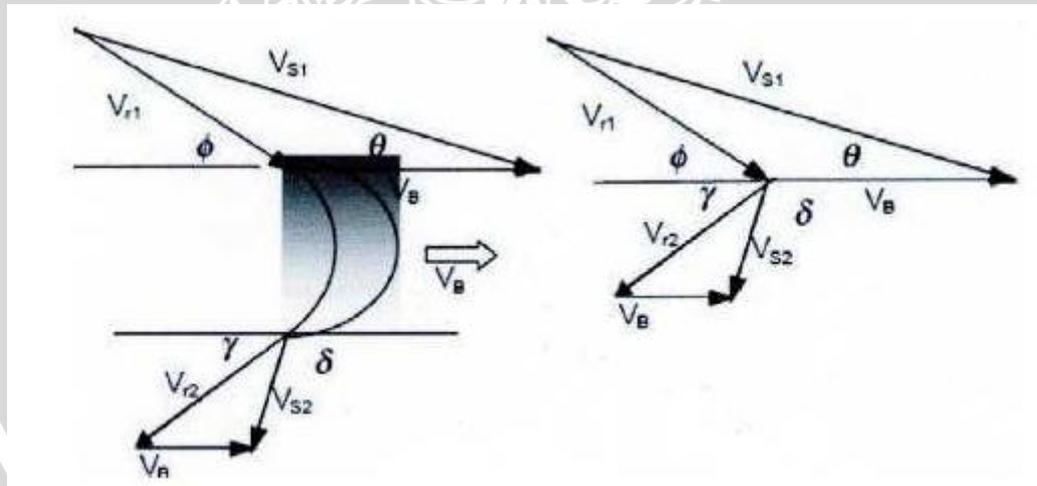
R = Radius rotor (m)

V = Kecepatan angin (m/s)

2.6.2 Segitiga Kecepatan

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

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



Gambar 2.14 : Skema segitiga kecepatan

Sumber : Fox, 2003

V_{s1} = kecepatan absolute fluida meninggalkan nosel

V_B = kecepatan tangensial

V_{r1} = kecepatan relative fluida

V_{r2} = kecepatan relative fluida meninggalkan sudu

V_{s1} = kecepatan absolut fluida meninggalkan sudu

θ = sudut antara sudu dengan fluida yang memasuki sudu

δ = sudut antara sudu dengan fluida yang keluar sudu

ϕ = sudut antara kecepatan relatif fluida dengan sudu pada sisi masuk

γ = sudut antara kecepatan relatif fluida dengan sudu pada sisi keluar

Seperti penjelasan sebelumnya, pada segitiga kecepatan terdiri dari 3 buah vektor kecepatan yaitu kecepatan absolut, kecepatan relatif, dan kecepatan tangensial. Dimana kecepatan absolut merupakan kecepatan suatu fluida ketika menumbuk sudu. Kecepatan relatif merupakan suatu kecepatan yang ditinjau terhadap benda lain yang juga bergerak, yang dalam hal ini merupakan kecepatan angin dengan kecepatan putar sudu. Kecepatan tangensial merupakan kecepatan putar sudu.

Dalam pembuatan segitiga kecepatan, diketahui terlebih dahulu kecepatan putar sudu (V_B) kecepatan masuk fluida (V_{S1}) dan sudut fluida memasuki sudu (θ), sehingga dapat diketahui kecepatan relatif masuk fluida (V_{r1}) dan sudut antara kecepatan relatif fluida dengan sudu pada sisi masuk (ϕ). Sama halnya pada bagian fluida keluar sudu, kecepatan masuk fluida (V_{S1}) akan digunakan untuk menggerakkan sudu ketika fluida menumbuk sudu, sehingga kecepatan fluida tersebut akan berkurang, sehingga dapat diketahui kecepatan fluida ketika keluar dari sudu (V_{S2}), kecepatan relatif fluida ketika keluar sudu (V_{r2}), sudut fluida ketika keluar sudu (δ) dan sudut antara kecepatan relatif fluida dengan sudu pada sisi keluar (γ) yang selanjutnya akan terbentuk 2 buah segitiga, yaitu pada sisi masuk dan pada sisi keluar sudu. Pada segitiga kecepatan juga dapat dilihat bahwa bentuk segitiga pada sisi masuk dimensinya lebih besar dibandingkan dengan sisi keluar, hal ini disebabkan karena kecepatan fluida sebelum menumbuk sudu masih tinggi dan setelah menumbuk sudu kecepatan fluida tersebut akan digunakan untuk menggerakkan sudu sehingga kecepatan fluidanya berkurang sehingga bentuk dimensi segitiga pada sisi keluar lebih kecil dibandingkan dengan sisi masuk.

2.7 CFD (*Computational Fluid Dynamic*)

Pada zaman sekarang terdapat sebuah metode baru yang memberikan solusi dan membahas secara kompleks masalah mekanika fluida biasanya dikenal sebagai komputasi dinamika fluida. Pada komputasi ini, dapat dicapai dengan menggunakan metode persamaan numerik.

Pada perkembangan masa depan kecepatan komputer dan kapasitas memori adalah penentu stimulasi persyaratan CFD untuk memecahkan masalah *engineering*. Penggunaan CFD merupakan bagian rutinitas sehari-hari untuk bidang desain dan analisa aerodinamika.

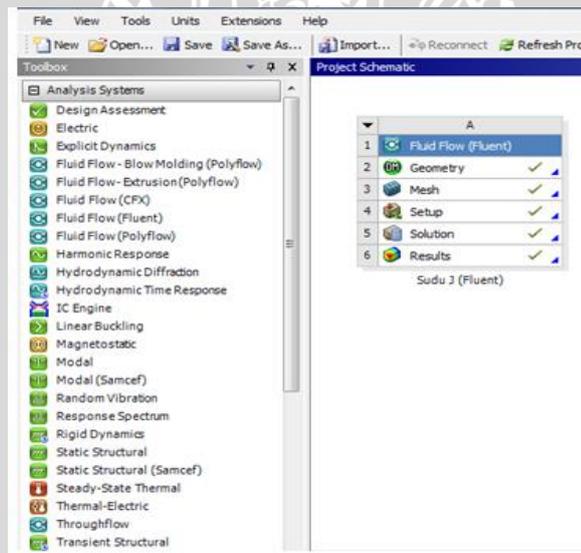
Computational Fluid Dynamic (CFD) adalah ilmu yang digunakan untuk memprediksi aliran fluida, panas, perpindahan panas, reaksi kimia, dan fenomena terkait

dengan penyelesaian analisa numerik dalam persamaan matematika. Hasil analisa CFD dapat digunakan sebagai pemecah masalah dengan metode simulasi.

CFD merupakan metode penghitungan dengan sebuah kontrol dimensi, luas, dan volume dengan memanfaatkan bantuan komputasi komputer untuk melakukan perhitungan pada tiap-tiap elemen pembaginya. Prinsipnya adalah suatu ruang yang berisi fluida yang akan dilakukan perhitungan dibagi menjadi beberapa bagian, hal ini sering disebut sebagai *node* dan prosesnya dinamakan *meshing*. Pada titik kontrol perhitungan akan dilakukan perhitungan oleh aplikasi dengan batasan domain atau *boundry condition* yang telah ditentukan. Prinsip inilah yang banyak dipakai pada proses penghitungan dengan menggunakan bantuan komputasi komputer.

2.7.1 Software ANSYS

ANSYS Workbench merupakan paket program yang digunakan untuk penyelesaian masalah dengan metode numerik. Pada *software* akan dihubungkan dengan setiap sistem, dan sistem akan ditampilkan dalam *project schematic*.



Gambar 2.15 : *Project schematic software ANSYS*

2.8 Hipotesa

Sudu dengan bentuk U mempunyai *drag coefficient* yang besar, maka daya yang dihasilkan akan lebih besar dari dua bentuk sudu lainnya. Peningkatan kecepatan angin akan meningkatkan energi kinetik pada turbin angin, sehingga putaran turbin juga meningkat dan menyebabkan kinerja turbin juga meningkat.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan dua metode, yaitu simulasi dan *experimental*. Metode *experimental* yaitu melakukan pengamatan untuk mencari data sebab-akibat dalam suatu proses melalui eksperimen sehingga dapat mengetahui pengaruh bentuk sudu terhadap kinerja turbin angin Savonius. Untuk simulasi sendiri bertujuan untuk mengetahui aerodinamika angin di sekitaran sudu.

3.2 Tempat dan Waktu Pelaksanaan

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Mesin-mesin Fluida dan Studio Perancangan dan Rekayasa Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

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 : 4, 5, 6, dan 7 m/s
- Bentuk sudu : Tipe-U, Datar, Tipe-J

2. Variabel terikat

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

- Daya poros yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius.
- Efisiensi yang dihasilkan turbin angin Savonius.
- Arus dan tegangan listrik
- Aerodinamika angin pada daerah sudu

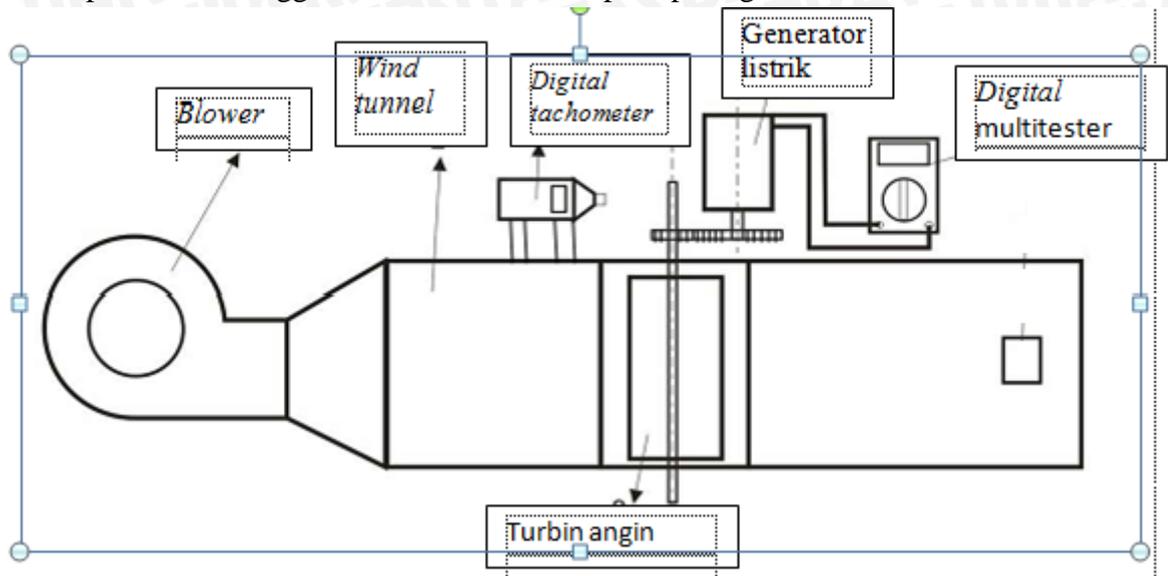
3. Variabel terkontrol

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

- Material sudu : Pipa PVC.
- Luas permukaan sudu : tinggi 25 cm, lebar 9 cm.

3.4 Instalasi Penelitian

Instalasi penelitian menggunakan *wind tunnel*, seperti pada gambar di bawah ini :



Gambar 3.1 : Skema instalasi penelitian

3.5 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain :

1. *Blower*

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



Gambar 3.2 : *Blower*

Spesifikasi :

Tipe : U 718 No 7076-2977

Model : 4C 668A

Daya : 1/6 Hp

Putaran max: 1600 rpm

Voltage : 115/230 V

Ampere : 2,6 – 1,3 A

2. *Wind tunnel*

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

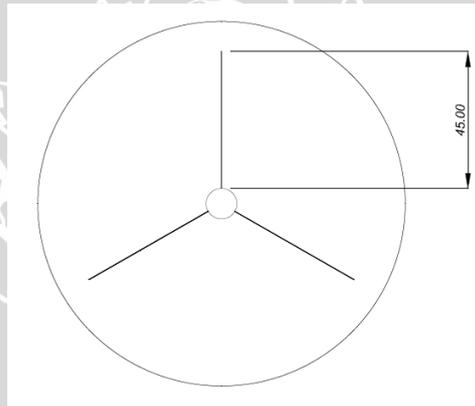


Gambar 3.3 : *Wind tunnel*

3. Turbin angin Savonius

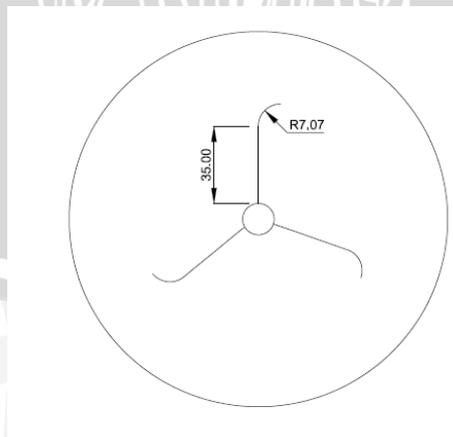
Pada penelitian ini sudu turbin terbuat dari akrilik, dengan 3 bentuk variasi.

a. Sudu tipe datar (*Plate*)



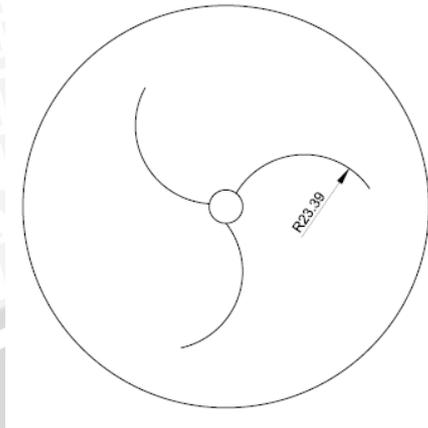
Skala 1 : 2

b. Sudu tipe J



Skala 1 : 2

c. Sudu tipe U



Skala 1 : 2

4. *Digital multimeter*

Multimeter digunakan untuk mengukur tegangan yang dihasilkan motor listrik dan mengukur hambatan lampu *led*. *Digital multimeter* yang digunakan adalah seperti gambar dibawah ini,



Gambar 3.4 : *Digital multimeter*

Spesifikasi *digital multimeter* :

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

5. Digital tachometer

Digunakan untuk mengukur kecepatan putar dari poros turbin dalam rpm.



Gambar 3.5 : Digital tachometer

Spesifikasi Digital tachometer :

<i>Display</i>	: 5 digit 18 mm LCD
<i>Accuracy</i>	: 0.05% + 1digit
<i>Sampling time</i>	: 0.5sec (over 120 rpm)
<i>Resolution</i>	: 0.1 rpm (2.5 ~ 999.9 rpm), 1 rpm (over 1000 rpm)
<i>Detecting distance</i>	: 50 ~5 00 mm
<i>Battery</i>	: 4 x 1.5 V AAA battery

6. Generator listrik

Adalah alat yang digunakan untuk mengkonversikan energi mekanik pada rotor turbin menjadi energi listrik.



Gambar 3.6 : Generator listrik

Spesifikasi generator listrik :

Jenis	: Brushless DC motor
Model	: 6030 s
Voltage	: 6 volt
Operating speed	: High speed
No load speed	: 2000 rpm
Efisiensi max	: 90 %

3.6 Prosedur Penelitian

Penelitian yang dilakukan ada dua macam yaitu metode *experimental* dan selanjutnya dilakukan perbandingan dengan metode simulasi.

3.6.1 Metode *Experimental*

Adapun proses pengambilan data adalah sebagai berikut :

1. Menyiapkan instalasi *wind tunnel* dan turbin angin dengan tinggi dan lebar sudu sebagai variabel terkontrol. Bentuk sudu dan kecepatan angin sebagai variabel bebas.
2. Pengambilan data dimulai setelah mengalirkan fluida dari *wind tunnel* ke seluruh instalasi turbin angin. Kecepatan angin diukur dengan melihat bukaan pada *blower*, dimana kecepatan angin yang tertinggi yaitu 7 m/s dan terendah yaitu 4 m/s. Kecepatan angin diatur dengan mengatur bukaan pada *blower*.
3. Putaran turbin dibaca dengan menggunakan *tachometer*.
4. Pengambilan data baru dilakukan ketika sudah terjadi aliran listrik yang dihasilkan oleh generator. Data yang diambil berupa tegangan dan arus yang dihasilkan generator listrik menggunakan digital *Multitester*.
5. Tiap variasi kecepatan pengambilan data dilakukan sebanyak 3 kali.
6. Mengganti bentuk sudu yang akan diuji selanjutnya.
7. Mengulangi langkah 1 sampai 5 dengan variasi bentuk sudu.
8. Pengolahan data tegangan listrik untuk mendapatkan besar daya poros, torsi dan efisiensi.

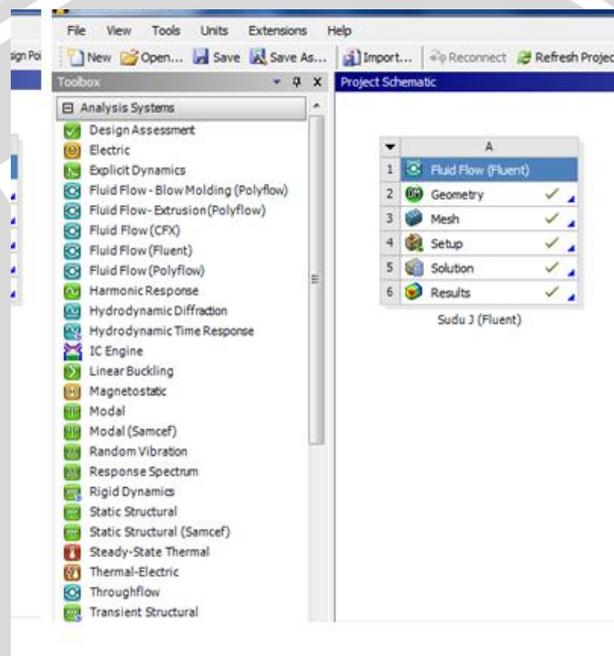
3.6.2 Metode Simulasi

Metode simulasi nantinya akan menggunakan *software* ANSYS, untuk mengetahui aerodinamika angin pada sudu turbin.

Adapun proses pengambilan data simulasi adalah sebagai berikut :

1. Software ANSYS Fluent

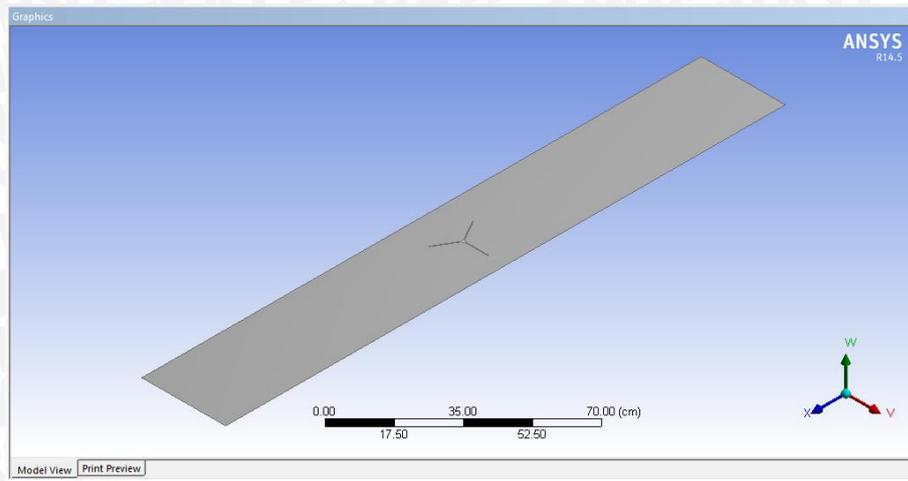
Pada gambar 3.7 adalah tampilan project schematic Fluent, dimana untuk langkah simulasi ada lima tahap diantaranya adalah proses *geometry*, dimana pada proses ini kita akan membuat geometry simulasi. Proses *meshing*, dimana pada proses ini kita akan membagi benda kerja menjadi tiap elemen kecil yang disebut *node*. Proses *setup*, pada proses ini kita akan mengatur kondisi batas simulasi. Proses *solution*, pada proses ini adalah tahap perhitungan simulasi. Proses *result*, pada proses ini akan ditampilkan hasil dari simulasi.



Gambar 3.7 : Project schematic simulasi

2. Membuat *geometry*

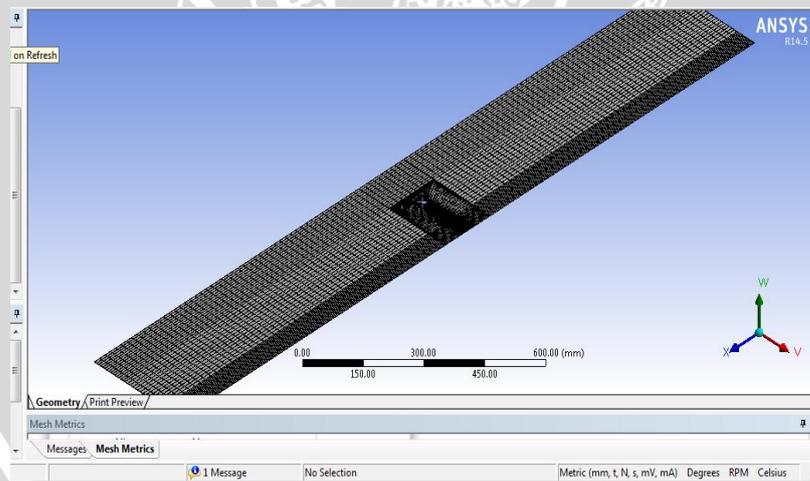
Proses pembuatan geometry dilakukan pada software ANSYS pada perintah project schematic geometry, pada proses simulasi ini menggunakan metode 2D. Pada pembuatan geometri ini nilai dimensinya disesuaikan dengan *windtunnel*, dimana lebarnya adalah 20 cm, panjang 200 cm, dan panjang busur sudu 7 cm.



Gambar 3.8 : Pemodelan geometri simulasi

3. Meshing

Pembuatan *mesh* merupakan pendiskritisasian suatu benda, dimana benda kerja akan terbagi menjadi tiap elemen-elemen kecil yang mana disebut *node*, dimana proses perhitungan nantinya akan terjadi disetiap *node*. Pada pembuatan *mesh* menggunakan metode *edge sizing* dimana tiap geometri dibagi menjadi beberapa bagian untuk menghasilkan *node* yang simetris.

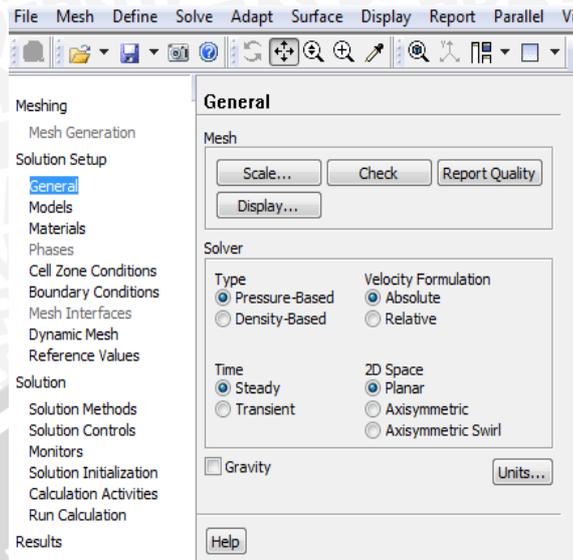


Gambar 3.9 : Meshing model simulasi

4. Setup

Pada langkah ini akan ditentukan batas-batas kondisi yang diperlukan mulai dari jenis fluida, karakteristik fluida dan batas-batas lainnya. Berikut adalah perintah-perintah pada *setup*,

a. Pengaturan *general setup*



Gambar 3.10 : Tampilan *general solution*

- Type : Pressure-based (Ada nilai tekanan yang harus diperhitungkan)
- Velocity formulation : Absolute (Nilai kecepatan konstan)
- Time : Steady (Alirannya konstan terhadap perubahan waktu)
- 2D Space : Planar.

Pada proses *general solution* kita akan menginputkan empat data, diantaranya *type*, *velocity formulation*, *time*, *2D space*. Pada perintah *type* terdapat dua pilihan yaitu *pressure-based* dan *density based*, pada *type* ini memilih *pressure-based* karena ada unsur parameter tekanan yang harus dimasukkan. Untuk perintah *time*, perintah ini untuk menentukan hubungan kondisi simulasi terhadap waktu, pada simulasi ini menggunakan perintah *steady* karena kondisi yang akan disimulasikan kondisi alirannya konstan terhadap perubahan waktu. Untuk proses *velocity formulation*, di pilih *absolute* karena kondisi kecepatan sudah ditetapkan sejak awal ketika fluida memasuki benda kerja. Pada perintah *2D space*, perintah ini keluar ketika menggunakan metode simulasi 2D, dipilih *planar* karena pemecahan masalah meliputi sumbu x, y, z sedangkan pada pilihan *axisymmetric problem* yang dipecahkan hanya pada sumbu x. Pada proses ini persamaan yang digunakan adalah persamaan *pressure-based* dan *velocity formulation* :

$$P_f = 0,5 (P_c + P_e) + d_p$$

Dimana :

P_c = Tekanan dalam ruang

P_e = Tekanan keluar spesifik

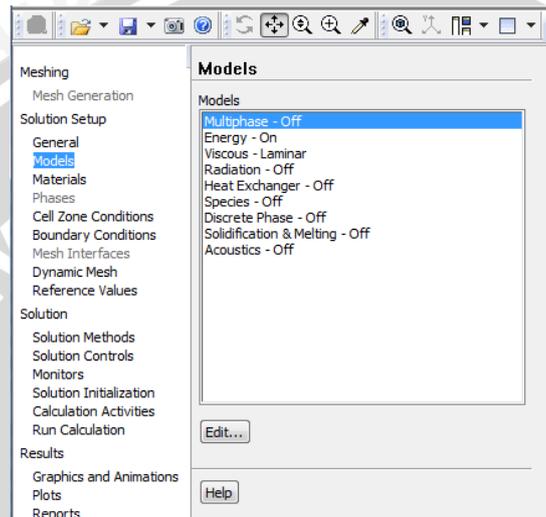
d_p = Perbedaan tekanan antara P_c dengan P_e

$$\dot{m} = \int \rho \cdot v \cdot dA$$

Dimana :

- \dot{m} = Massa alir
- ρ = Massa jenis fluida
- v = kecepatan fluida
- A = Luas daerah yang di lalui fluida

b. Pengaturan *model setup*



Gambar 3.11 : Tampilan *model solution*

- Multiphase : Off (Tidak ada perubahan fasa pada fluida saat simulasi)
- Energy : On (Ada persamaan energi yang harus diperhitungkan)
- Viscous : Laminar (Nilai bilangan reynold kecil)

Pada perintah *models setup* akan diatur karakteristik simulasinya yang meliputi fasa aliran, persamaan energi, bentuk aliran, radiasi, perpindahan panas, perubahan wujud fluida. Dari sekian banyak pilihan ada dua perintah yang diatur, yaitu energi dan jenis aliran. Pada perintah energi diaktifkan karena ada parameter energi yang perlu diperhitungkan. Persamaan energi dan viskositas adalah,

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C_p T_0) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho v_x C_p T_0) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v_y C_p T_0) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z C_p T_0) -$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T_0}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T_0}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T_0}{\partial z} \right) + W^v + E^k + Q_v + \Phi + \frac{\partial P}{\partial t}$$

Dimana :

- C_p = Spesific heat
- T_0 = Total temperature
- K = Thermal conductivity

W^v = Viscous work term
 Q_v = Volumetric heat source
 ϕ = Viscous heat generation
 E^k = kinetic energy

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0$$

Dimana :

V_x, V_y, V_z = Komponen kecepatan pada sumbu x, y, z.

ρ = Massa jenis

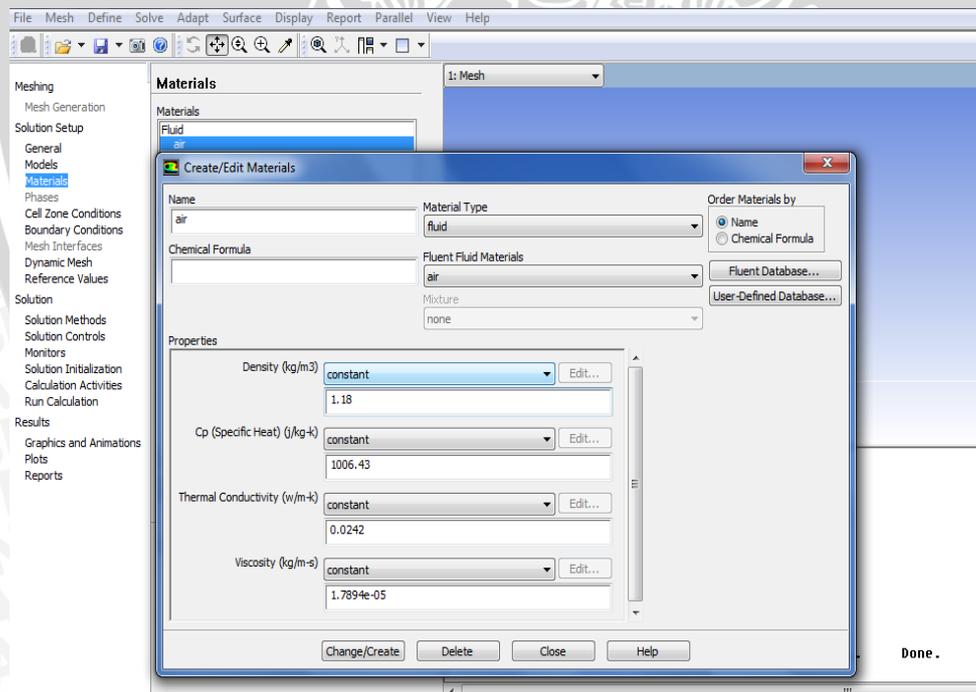
t = Waktu

x, y, z = Koordinat sumbu

Karena alirannya steady maka perubahan waktu terhadap massa jenis nol, sehingga persamaannya menjadi,

$$\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0$$

c. Pengaturan material



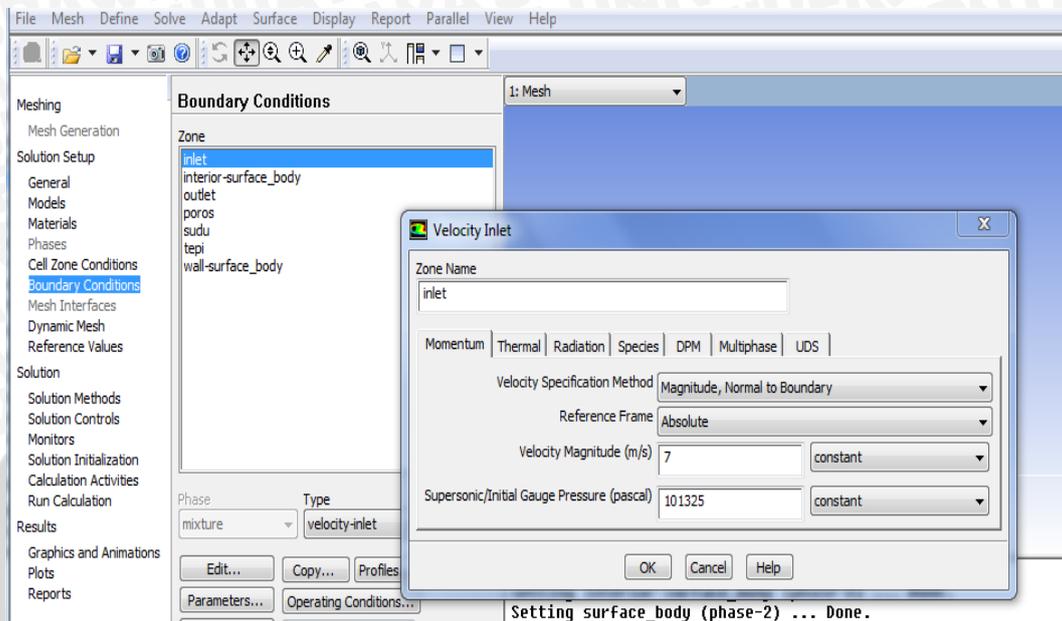
Gambar 3.12 : Tampilan *material setup*

➤ Material > Air > Properties material di input

Pada *material solution*, dilakukan pemilihan jenis fluida yang digunakan dan sekaligus pengaturan karakteristik fluida itu mulai dari massa jenis, *specific heat*, *thermal*

conductivity, viscosity. Pada pengaturan ini jenis fluida yang digunakan adalah udara (air) dengan density $1,18 \text{ Kg/m}^3$, specific heat $1006,43 \text{ J/Kg-K}$, thermal conductivity $0,0242 \text{ W/m-K}$, viscosity $0,178 \text{ Kg/m-s}$.

d. Pengaturan *Boundry condition*



Gambar 3.13 : Tampilan *boundry condition*

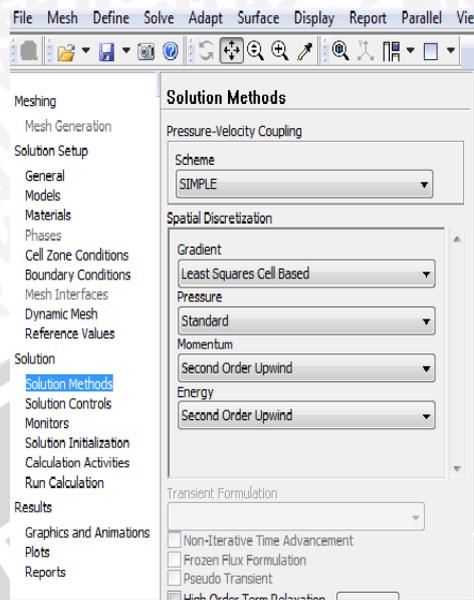
- Inlet > Type : Velocity- inlet > Edit : Boundry condition di inputkan.
- Outlet > Type : Exhaust-fan

Pada proses *boundry condition*, dilakukan pengaturan pada geometri benda kerja. Pada geometri dibagi oleh lima bagian, pada *software* ANSYS disebut *name selection*, diantaranya yaitu bagian *inlet*, *outlet*, poros, sudu, dan tepi. Pada bagian *inlet* adalah tempat aliran fluida memasuki geometri benda kerja, jenis tipenya adalah *velocity-inlet* pada pengaturannya akan diinputkan kecepatan angin 7 m/s . Pada bagian *outlet* adalah tempat keluarnya aliran fluida, jenis tipenya adalah *exhaust-fan*. Pada bagian poros dan sudu adalah bagian dari benda kerja yang berputar, jenis tipenya adalah *wall move rotational*. Pada bagian tepi adalah dinding batas *wind tunnel*, jenis tipenya adalah *wall*.

5. Solution

Pada tahap ini akan mendefinisikan hasil yang akan ditampilkan yang mengacu pada pengaturan kondisi batas sebelumnya.

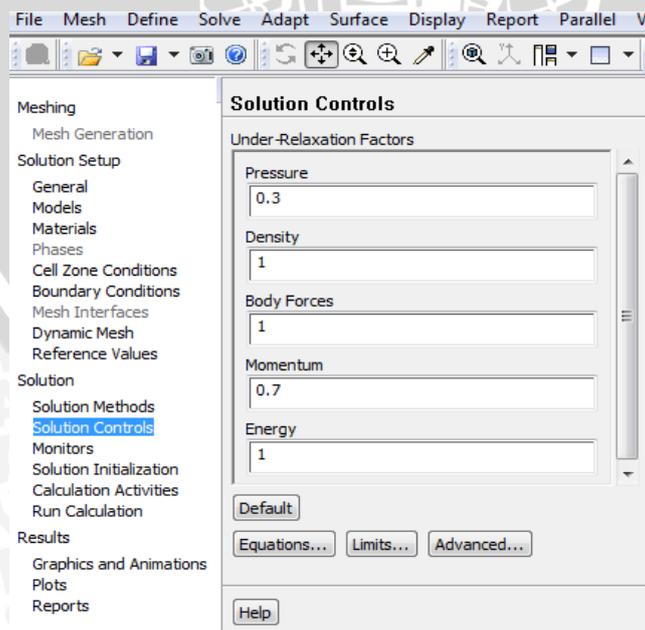
a. *Solution methods*



Gambar 3.14 : Tampilan *solution methods*

Pada tahap *solution methods* ini menampilkan spesifik metode pemecahan masalah pada metode perhitungan nantinya. Pada perintah *scheme* adalah perintah skema penyelesaiannya, pada perintah *simple* digunakan ketika hanya terdapat dua variabel perhitungan yang diinputkan yaitu kecepatan dan tekanan. Pada perintah *gradient* dipilih *least square cell based* karena perhitungan pemecahan masalah mengacu berdasar pendiskritisasian *node mesh*.

b. *Solution control*

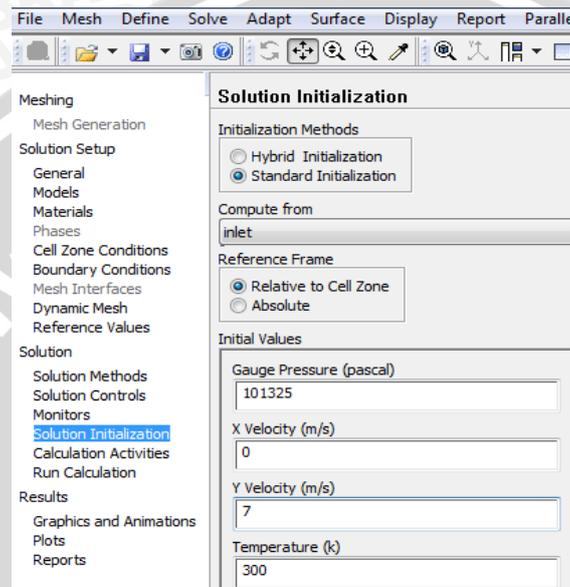


Gambar 3.15 : Tampilan *solution control*

- Under relaxation factor menggunakan pengaturan default.

Solution control adalah perintah control variabel dalam proses perhitungan, parameter yang akan dikontrol pada proses perhitungan diantaranya adalah tekanan, massa jenis, gaya, momentum, dan energi. Untuk nilainya dipilih *default* sehingga program yang akan menentukan variabel perhitungannya.

c. *Solution Intialize*



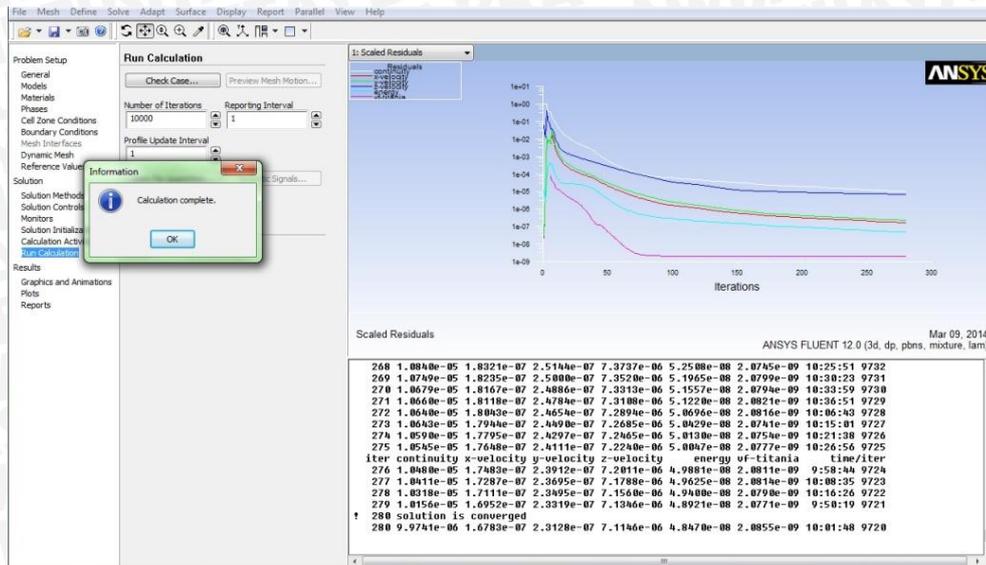
Gambar 3.16 : Tampilan *solution intialize*

- Intialization methods : Standard intialization
- Compute from : Inlet

Solution intialize adalah perintah sebelum kita akan *running* perhitungan, pada bagian ini kita mengatur proses awal perhitungan dimulai, sehingga *compute from* diinputkan *inlet*. Dan selanjutnya mengoreksi nilai tekanan, kecepatan dan temperature yang sudah diinputkan sebelumnya.

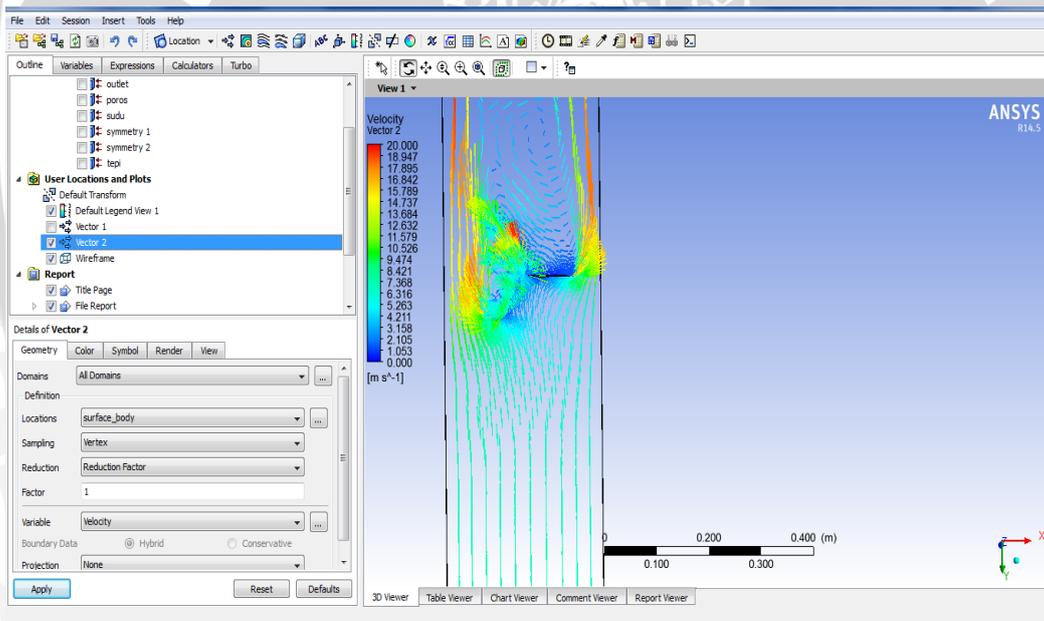
6. *Calculation*

Pada tahap ini adalah proses perhitungan akan dilakukan, proses perhitungan dilakukan berdasarkan data yang sudah diinput dan metode yang sudah diatur pada tahap *solution*. Pada proses perhitungan akan keluar grafik *iteration* dimana pada grafik ini *user* bisa melihat hasil perhitungan apakah sudah konvergen.



Gambar 3.17 : Tampilan proses perhitungan

7. Result

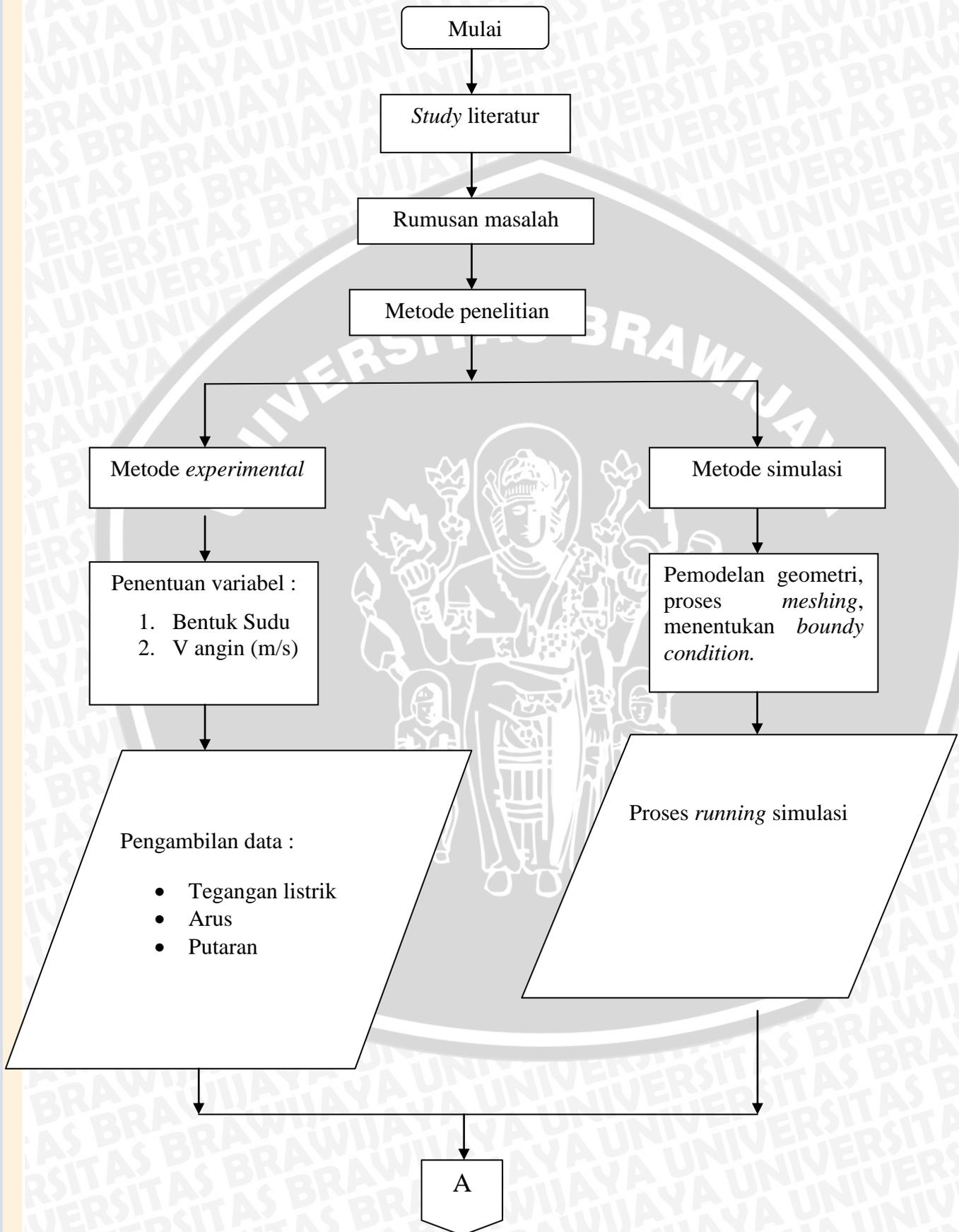


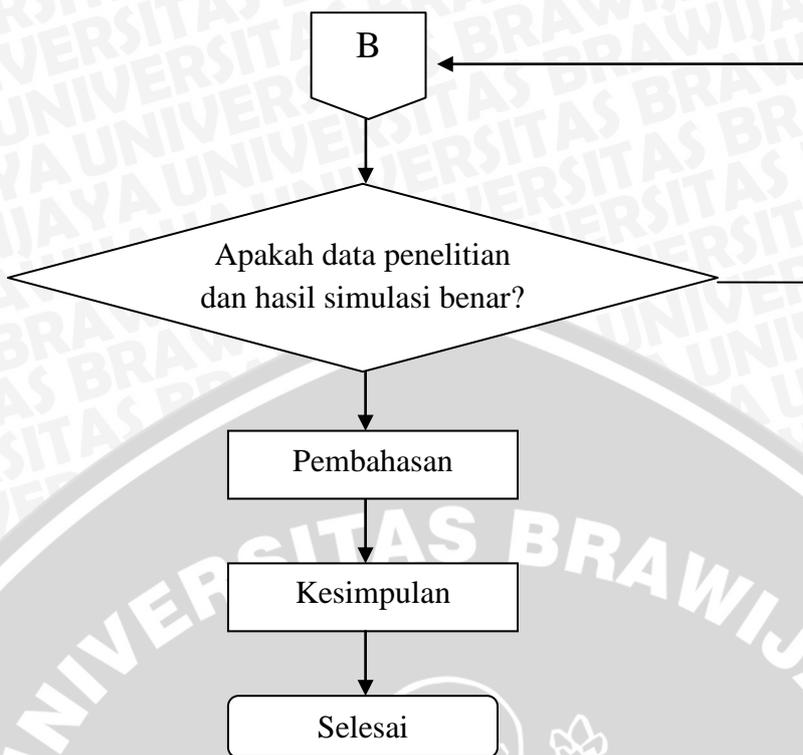
Gambar 3.18 : Tampilan result

Setelah proses perhitungan selesai akan ditampilkan hasil simulasi, pada simulasi ini hasil ditampilkan dalam bentuk vektor karena hasil dalam bentuk vektor sangat cocok ditampilkan untuk mengetahui analisa aerodinamika. Bentuk streamline sering digunakan untuk mengetahui proses perpindahan panas atau distribusi temperature. Sedangkan pada bentuk contour sangat cocok jika hasil yang ditampilkan adalah tegangan.



3.8 Flowchart penelitian





UNIVERSITAS BRAWIJAYA



BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil

4.1.1 Data Hasil Pengujian

Pada hasil penelitian ini nilai yang didapatkan adalah arus listrik, volt, dan rpm yang selanjutnya akan dioalah untuk mendapatkan parameter hasil penelitian berupa daya poros (BHP), torsi, dan efisiensi. Berikut data hasil pengujian pengaruh variasi bentuk sudu terhadap kinerja turbin angin Savonius.

Tabel 4.1 Data pengujian tegangan, arus listrik dan putaran.

Bentuk Sudu	4			5			6			7		
	V (Volt)	I (Ampere)	n (Rpm)	V (Volt)	I (Ampere)	n (Rpm)	V (Volt)	I (Ampere)	n (Rpm)	V (Volt)	I (Ampere)	n (Rpm)
SUDU U	1,273	0,132	248	1,476	0,281	332	1,732	0,477	519	1,975	0,643	702
	1,264	0,130	247	1,491	0,288	337	1,711	0,476	512	1,982	0,643	704
	1,281	0,135	250	1,493	0,288	338	1,735	0,476	515	1,972	0,638	701
Rata-rata	1,273	0,132	248,33	1,487	0,286	335,67	1,726	0,476	515,33	1,976	0,641	702,33
SUDU J	1,142	0,097	229	1,388	0,241	308	1,579	0,394	469	1,764	0,545	621
	1,166	0,102	231	1,394	0,242	310	1,567	0,392	469	1,771	0,549	627
	1,143	0,099	231	1,367	0,241	307	1,521	0,389	468	1,763	0,545	625
Rata-rata	1,150	0,099	230,33	1,383	0,241	308,33	1,556	0,392	468,67	1,766	0,546	624,33
SUDU DATAR	0,685	0,033	165	1,112	0,089	224	1,366	0,235	308	1,502	0,325	410
	0,727	0,037	167	1,091	0,086	220	1,349	0,234	303	1,523	0,327	416
	0,739	0,042	170	1,087	0,086	221	1,337	0,234	299	1,527	0,325	412
Rata-rata	0,717	0,037	167,33	1,097	0,087	221,67	1,351	0,234	303,33	1,517	0,326	412,67

4.1.2 Pengolahan Data

Perhitungan data dilakukan untuk mencari nilai daya poros, torsi dan efisiensi turbin angin Savonius. Berikut ini adalah salah satu contoh perhitungan data hasil penelitian untuk sudu J dan kecepatan angin 7 m/s.

Data yang diperoleh pada saat penelitian adalah sebagai berikut :

- Tinggi turbin (h) = 0,25 m
- Efisiensi motor listrik (η) = 90 %

- Kecepatan angin (v) = 7 m/s
- Massa jenis udara (ρ) = 1,18 kg/m³

Contoh perhitungan data, pada turbin angin sudu J dengan variasi kecepatan angin 7 m/s :

- Luas penampang turbin (A)

Contoh pada diameter sudu (D) = 9 cm = 0,09 m

$$A = D \cdot h$$

$$= 0,09 \text{ m} \cdot 0,25 \text{ m}$$

$$= 0,0225 \text{ m}^2$$

- Daya angin (P_{angin})

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

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

$$= \frac{1}{2} \cdot 1,18 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,0225 \text{ m}^2 \cdot (7 \text{ m/s})^3$$

$$= 4,55 \text{ watt}$$

- Daya poros (BHP)

Contoh pada kecepatan angin (v) = 7 m/s pada sudu J

Didapatkan :

Tegangan listrik (V) = 1,766 Volt ; dan arus (I) = 0,546 Ampere

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

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

$$= \frac{1,776 \cdot 0,546}{0,9}$$

$$= 1,072 \text{ Watt}$$

- Torsi (Nm)

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

$$= \frac{1,072}{2,314 \cdot \frac{624,33}{60}}$$

$$= 0,0164 \text{ Nm}$$

- Efisiensi (η)

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{BHP}{P_{angin}} \cdot 100 \% \\ &= \frac{1,072}{4,55} \cdot 100 \% \\ &= 23,54 \%\end{aligned}$$

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 4.2 sampai dengan 4.4 berikut :

Tabel 4.2 Tabel Data Hasil Perhitungan Sudu U

V angin (m/s)	BHP (Watt)	T (Nm)	η (%)	P_{actual} (Watt)
4	0,168	0,0065	19,82	0,85
5	0,415	0,0118	24,99	1,66
6	0,822	0,0152	28,67	2,87
7	1,267	0,0172	27,84	4,55

Tabel 4.3 Tabel Data Hasil Perhitungan Sudu J

V angin (m/s)	BHP (Watt)	T (Nm)	η (%)	P_{actual} (Watt)
4	0,127	0,0053	14,94	0,85
5	0,371	0,0115	22,35	1,66
6	0,677	0,0138	23,61	2,87
7	1,072	0,0164	23,54	4,55

Tabel 4.4 Tabel Data Hasil Perhitungan Sudu Datar

V angin (m/s)	BHP (Watt)	T (Nm)	η (%)	P_{actual} (Watt)
4	0,030	0,0017	3,50	0,85
5	0,106	0,0046	6,39	1,66
6	0,352	0,0111	12,26	2,87
7	0,549	0,0127	12,06	4,55

Dari data-data hasil penelitian juga dapat diolah untuk mengetahui hubungan *tip speed ratio* dengan *Coefficient power*. Dimana *tip speed ratio* ini adalah perbandingan antara kecepatan tangensial dengan kecepatan angin.

Tabel 4.5 Data hasil perhitungan *tip speed ratio* sudu U

V.angin	ω (rad/s)	R (m)	λ	Cp (%)
4	25,99	0,09	0,58	19,82
5	35,13	0,09	0,63	24,99
6	53,94	0,09	0,81	28,67
7	73,51	0,09	0,95	27,84

Tabel 4.6 Data hasil perhitungan *tip speed ratio* sudu J

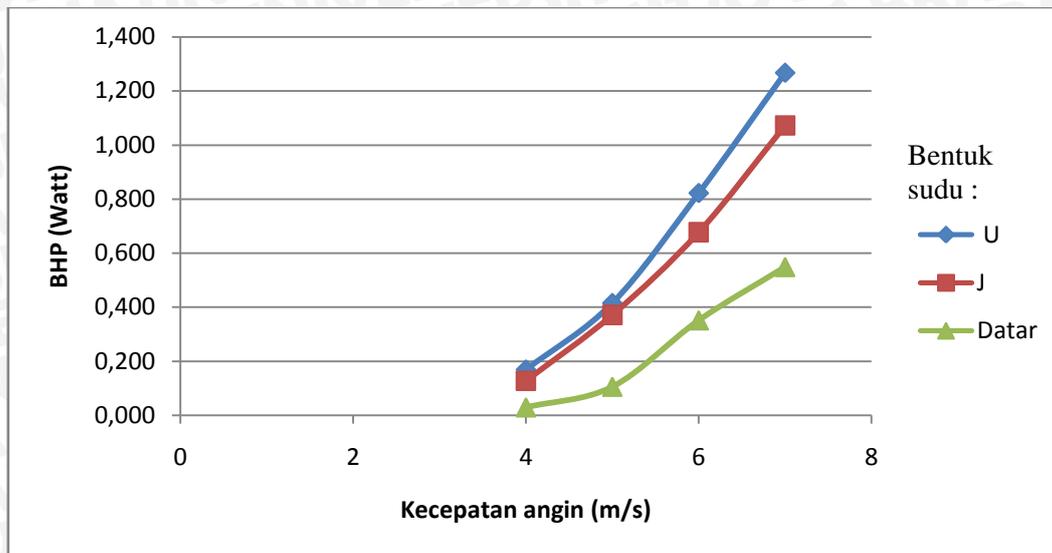
V.angin	ω (rad/s)	R (m)	λ	Cp (%)
4	24,11	0,09	0,54	14,94
5	32,27	0,09	0,58	22,35
6	49,05	0,09	0,74	23,61
7	65,35	0,09	0,84	23,54

Tabel 4.6 Data hasil perhitungan *tip speed ratio* sudu datar

V.angin	ω (rad/s)	R (m)	λ	Cp (%)
4	17,51	0,09	0,39	3,50
5	23,20	0,09	0,42	6,39
6	31,75	0,09	0,48	12,26
7	43,19	0,09	0,56	12,06

4.2 Pembahasan

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



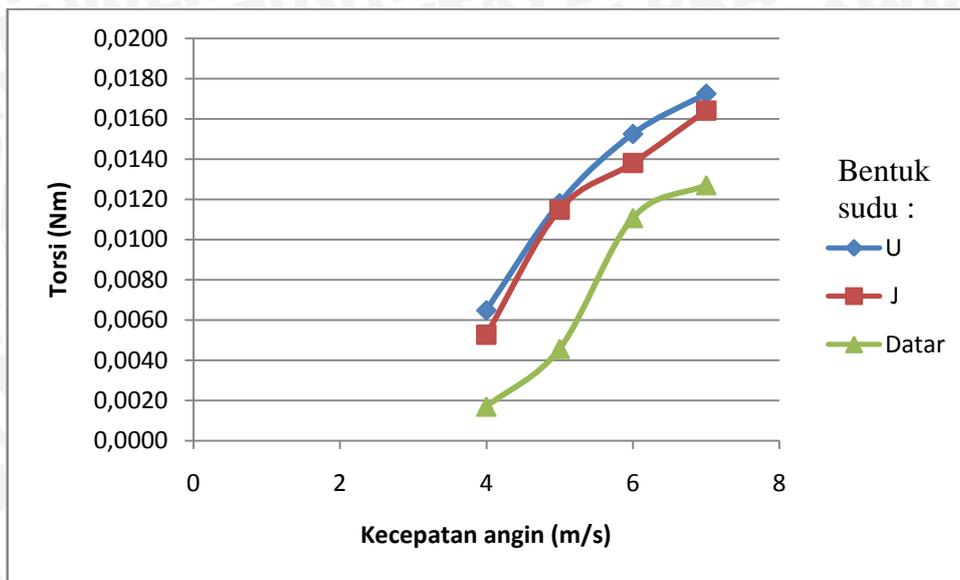
Grafik 4.1 : Grafik hubungan antara kecepatan angin terhadap daya poros (BHP)

Dari grafik 4.1 dapat diketahui bahwa kecepatan angin berpengaruh terhadap daya poros yang dihasilkan. Pada awal sampai akhir grafik hubungan antara kecepatan angin terhadap daya poros pada variasi bentuk sudu mengalami kecenderungan yang meningkat. Semakin meningkatnya kecepatan angin akan menyebabkan semakin besar momentum angin yang menumbuk turbin, sehingga gaya dorong yang dihasilkan semakin meningkat pula. Akibat dari peningkatan gaya dorong ini akan menyebabkan peningkatan dari daya poros turbin itu sendiri. Hal itu dapat disebabkan karena semakin tinggi gaya dorong yang dihasilkan, juga akan meningkatkan putaran dari turbin. Semakin tinggi putaran maka daya motor yang dihasilkan akan semakin meningkat pula. Hal ini sesuai dengan persamaan BHP

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

Dari grafik dapat diketahui bahwa daya poros (BHP) paling besar diperoleh dari sudu U, karena berdasarkan tabel *drag coefficient*, geometri U memiliki nilai koefisien yang paling besar dari bentuk lainnya yaitu bentuk sudu J atau sudu datar. Dan juga karena geometri sudu U mempunyai kemampuan mensirkulasikan fluida dengan baik sehingga tangkapan energi kinetik yang dibawa oleh angin dapat dengan optimal dikonversikan oleh sudu U.

4.2.2 Grafik Hubungan Antara Kecepatan Angin Terhadap Torsi



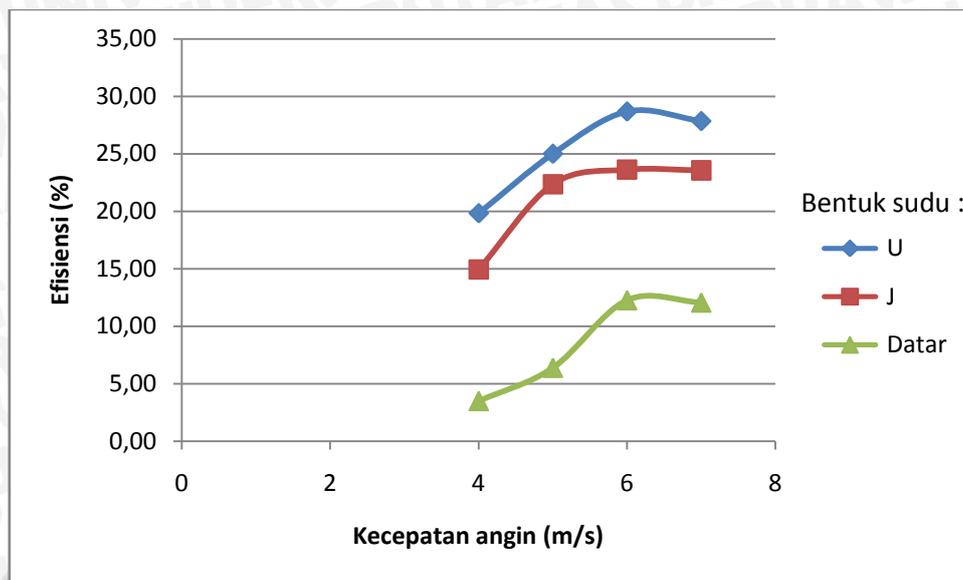
Grafik 4.2 : Grafik hubungan antara kecepatan angin terhadap torsi

Pada grafik 4.2 grafik hubungan antara kecepatan angin terhadap torsi pada variasi bentuk sudu. Semakin meningkatnya kecepatan angin akan menyebabkan semakin besar nilai torsinya, hal ini karena adanya hubungan gaya dorong dengan torsi. Karena semakin tinggi kecepatan angin akan semakin tinggi pula gaya dorong yang dihasilkan yang akan meningkatkan putaran dari turbin. Semakin tinggi putaran maka daya motor yang dihasilkan akan semakin meningkat pula. Dengan demikian torsi yang dihasilkan besar. Hal ini sesuai dengan persamaan torsi.

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

Pada grafik hubungan antara kecepatan angin terhadap torsi dapat kita lihat bahwa turbin sudu U mempunyai torsi paling besar dengan nilai torsi 0,0174 Nm pada kecepatan angin 7 m/s. Sedangkan pada sudu J mempunyai torsi 0,0162 Nm pada kecepatan 7 m/s dan sudu datar mempunyai torsi 0,0112 Nm pada kecepatan yang sama.

4.2.3 Grafik Hubungan Antara Kecepatan Angin Terhadap Efisiensi



Grafik 4.3 : Grafik hubungan antara kecepatan angin terhadap efisiensi

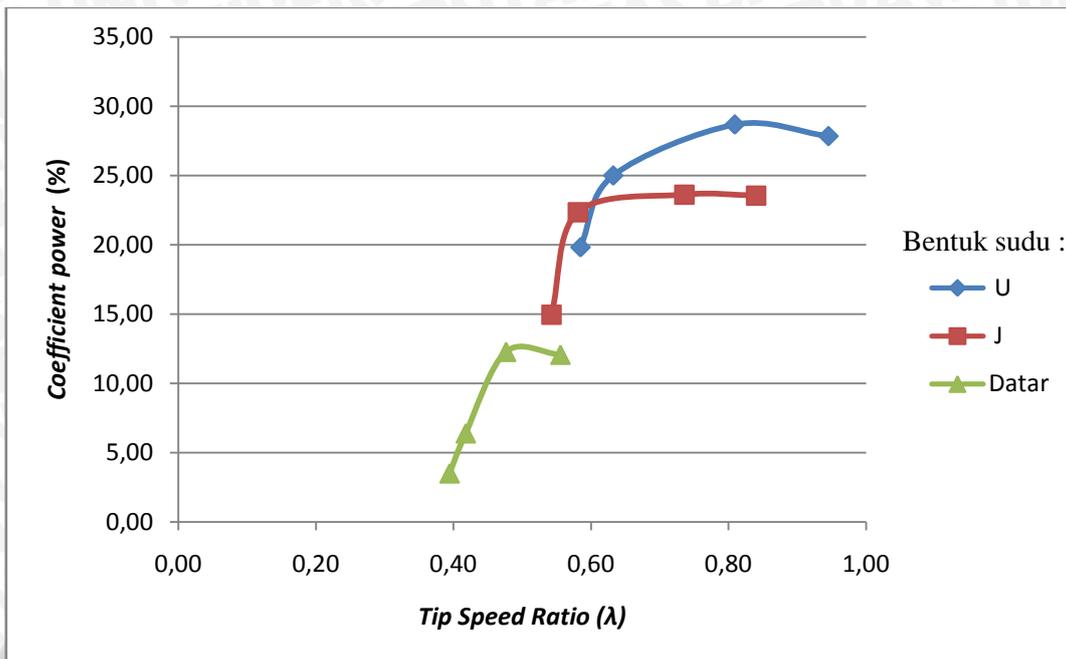
Hubungan antara kecepatan angin terhadap efisiensi, dapat dilihat bahwa semakin meningkatnya kecepatan angin maka kenaikan daya poros semakin besar. Hal ini dikarenakan efisiensi merupakan perbandingan antara daya poros dengan daya angin, seperti yang telah dijelaskan pada pembahasan grafik (4.1) sehingga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

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

Pada grafik 4.3 hubungan antara kecepatan angin terhadap efisiensi mengalami jenis grafik berbentuk parabolik, dimana efisiensi optimum diperoleh pada saat kecepatan angin tidak maksimum yaitu 7 m/s. Hal ini dikarenakan, peningkatan daya poros tidak sebanding dengan peningkatan daya angin yang semakin besar seiring dengan bertambahnya kecepatan angin.

Pada grafik 4.3 dapat dilihat bahwa efisiensi paling tinggi dimiliki oleh sudu U, hal ini dikarenakan energi angin yang dikonversikan oleh sudu U menjadi daya poros juga tinggi. Karena geometri sudu U mempunyai kemampuan mensirkulasikan fluida dengan baik sehingga tangkapan energi kinetik yang dibawa oleh angin dapat dengan optimal dikonversikan oleh sudu U.

4.2.4 Grafik Hubungan *Tip speed ratio* Terhadap *Coefficient power*

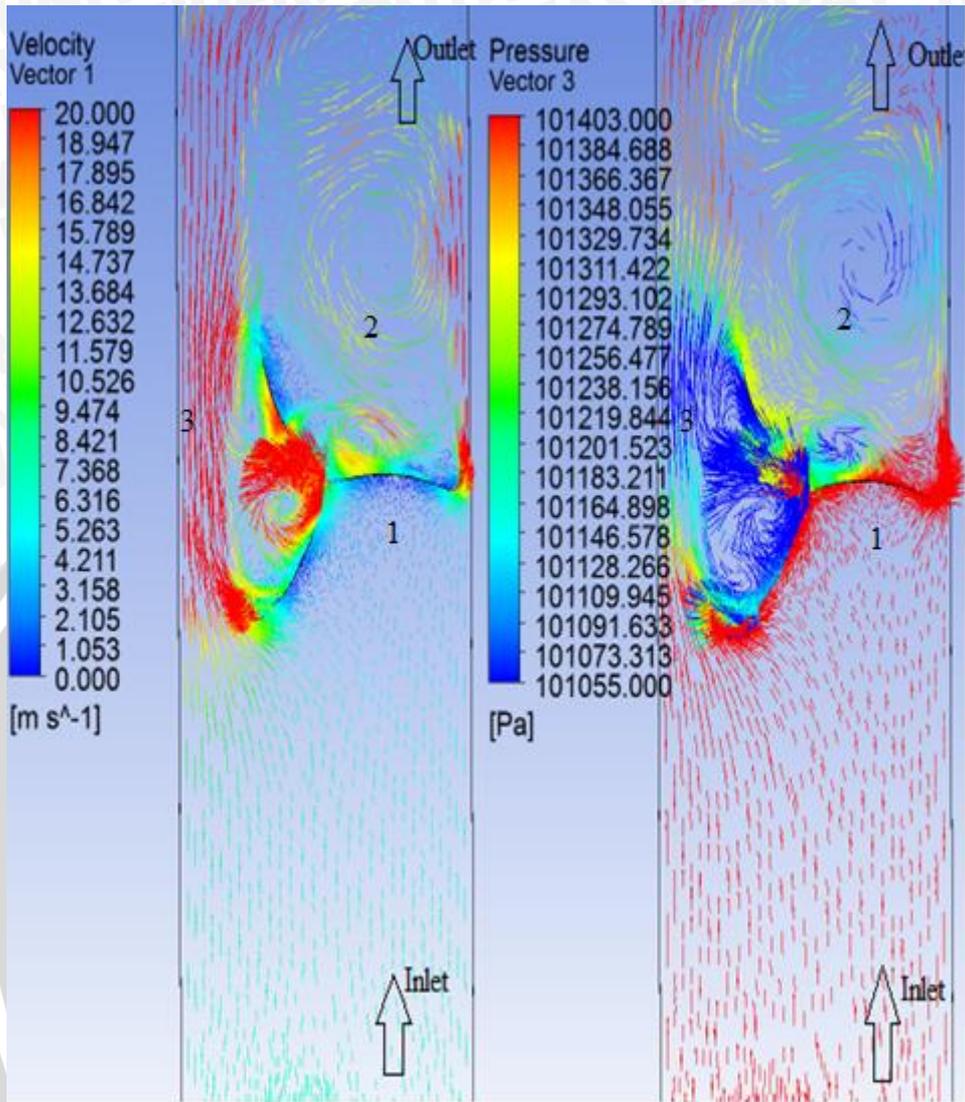


Grafik 4.4 : Grafik Hubungan *Tip speed ratio* Terhadap *Coefficient power*

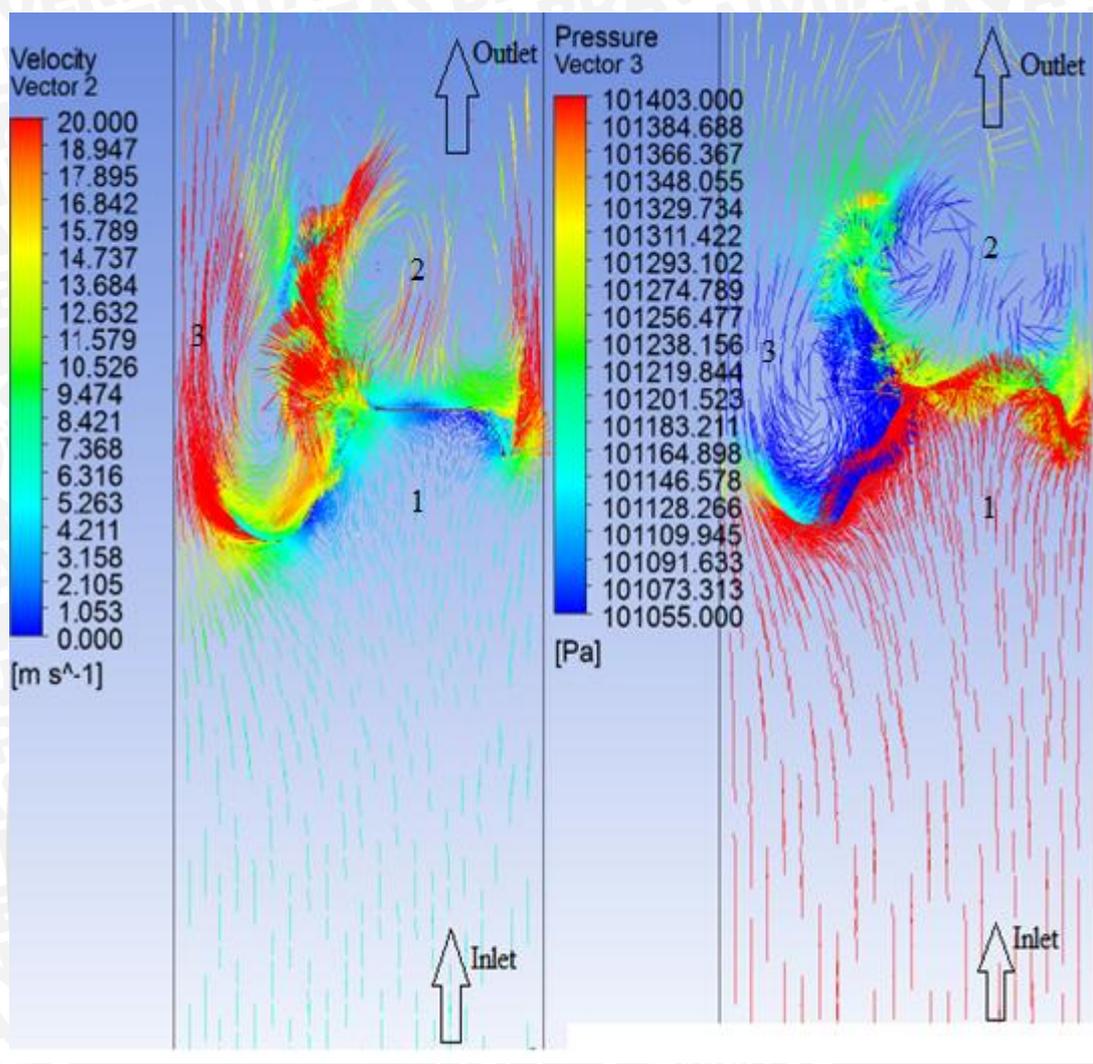
Dari grafik 4.4 dapat diketahui bahwa *tip speed ratio* berpengaruh terhadap *coefficient power*. *Tip speed ratio* disini adalah perbandingan kecepatan tangensial dengan kecepatan angin, dan *coefficient power* adalah perbandingan daya aktual yang dihasilkan turbin dengan daya yang dihasilkan angin. Hubungan *tip speed ratio* terhadap *coefficient power* mengalami kecenderungan peningkatan tetapi setelah titik puncak grafik mengalami kecenderungan penurunan. Hal ini di karenakan pada *coefficient power*, peningkatan daya angin tidak sebanding dengan daya yang dihasilkan oleh turbin.

Dari grafik diketahui bahwa sudu U mempunyai kinerja paling baik diantara sudu lainnya, karena *coefficient power* yang dimiliki oleh sudu U nilainya selalu diatas sudu J dan sudu datar. Dari grafik juga dapat diketahui bahwa nilai *tip speed ratio* paling tinggi didapat pada turbin angin sudu u pada kecepatan angin 7 m/s, dimana nilai *tip speed ratio* adalah 0,95. Sedangkan nilai *tip speed ratio* paling kecil didapat pada turbin angin sudu datar pada kecepatan angin 4 m/s, dimana nilai *tip speed ratio* adalah 0,39.

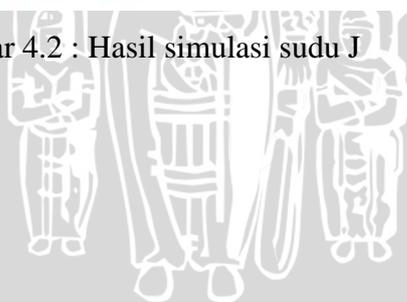
4.3 Hasil Simulasi

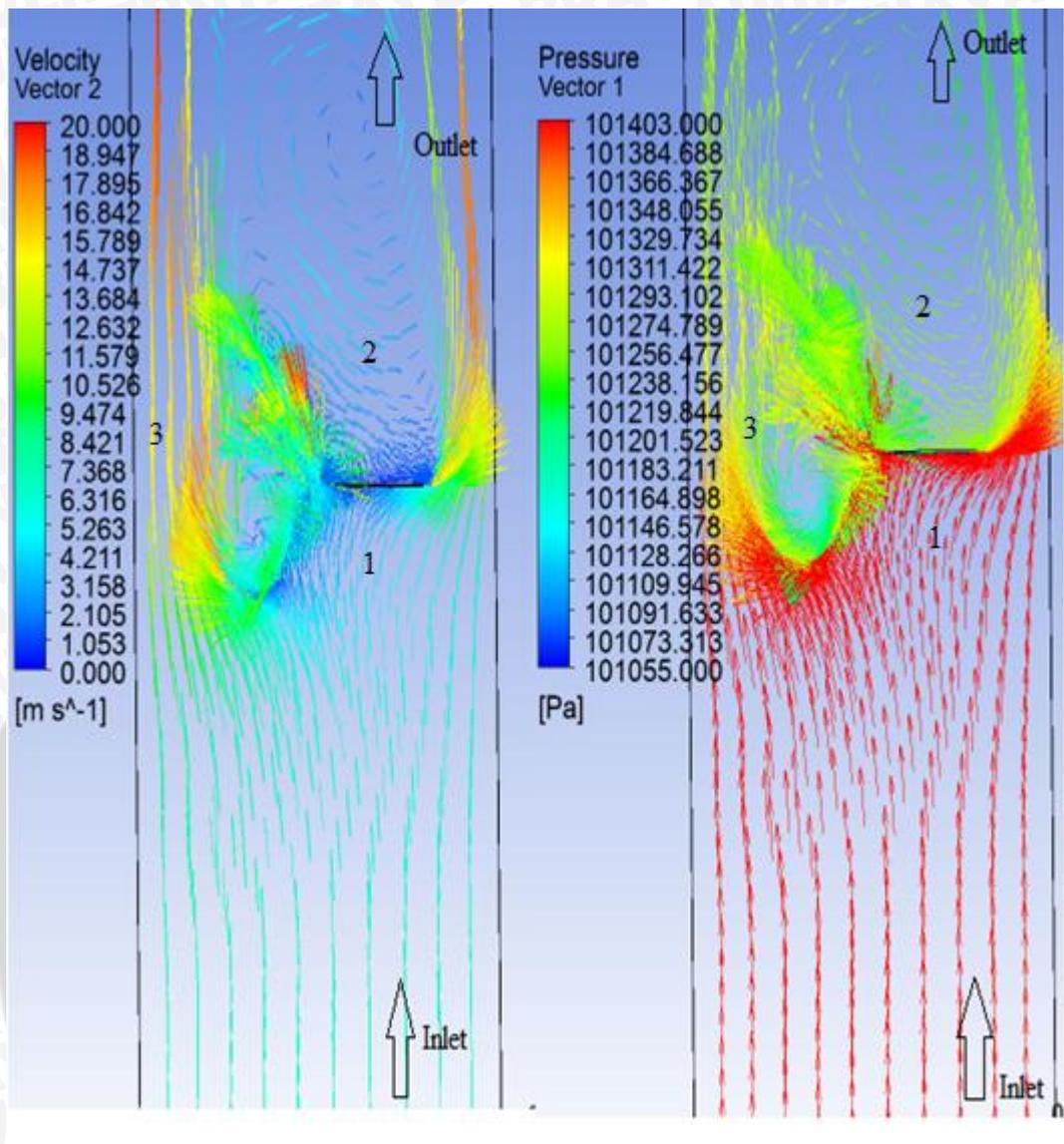


Gambar 4.1 : Hasil Simulasi sudu U



Gambar 4.2 : Hasil simulasi sudu J





Gambar 4.3 : Hasil simulasi sudu datar

Gambar diatas menunjukkan hasil simulasi *velocity* dan *pressure* dari sudu U, J, dan datar pada turbin angin Savonius dengan kecepatan angin 7 m/s. Dari gambar diatas kita bisa menganalisa kecepatan, tekanan, dan bentuk aliran pada tiap sudu. Untuk profil kecepatan dan tekanan, warna merah menunjukkan nilai tertinggi sedangkan warna biru menunjukkan nilai terendah. Pada daerah nomer 1 daerah yang berhadapan langsung dengan aliran udara mempunyai kecepatan paling rendah dan tekanan paling tinggi, hal ini berkaitan dengan persamaan Bernoulli dimana kecepatan berbanding terbalik dengan tekanan. Pada daerah nomer 2, terjadi sirkulasi udara karena adanya perbedaan tekanan antara di depan sudu dengan dibelakang sudu. Pada daerah nomer 3, pada *profile* kecepatan menunjukkan adanya kenaikan kecepatan dikarenakan adanya hembusan dari sudu yang berputar.

Dari gambar diatas, perbedaan mencolok terjadi pada daerah nomer 2. Dimana pada daerah tersebut tiap sudu mempunyai bentuk aerodinamika yang berbeda-beda. Pada sudu U, aerodinamika yang dihasilkan cenderung lebih mengarah untuk menumbuk sudu lainnya, hal ini dikarenakan cekungan pada belakang sudu U dapat mengarahkan udara dengan baik. Pada Sudu J, aerodinamika yang dihasilkan menyebabkan turbulensi hal ini dikarenakan bentuk sudu J lebih condong untuk menyebarkan aliran udara ketika terjadi tumbukan sesaat. Pada Sudu datar, aerodinamika yang dihasilkan menyebabkan aliran udara yang menyebar kesegala arah karena bentuk datar cenderung menghambat aliran.

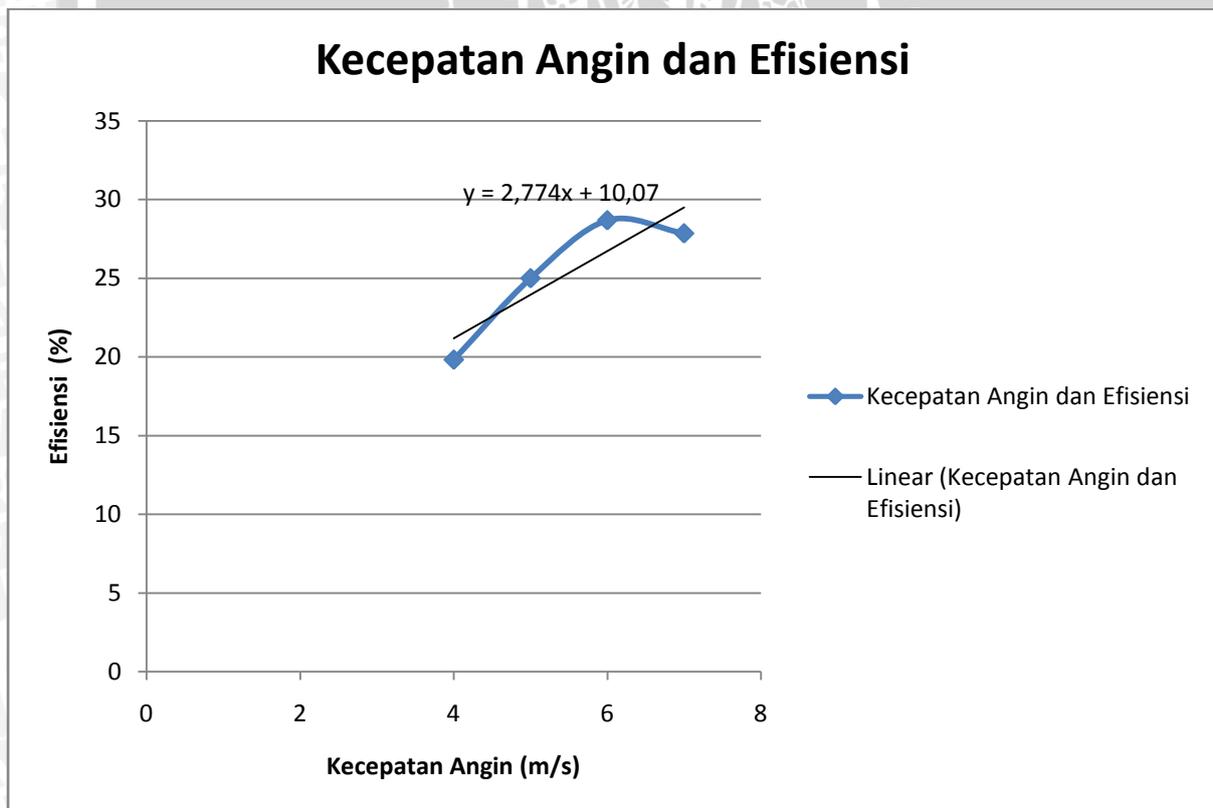
4.4 Hasil Persamaan Matematika

Persamaan Matematika

Proses Input : Kecepatan Angin (v), Bentuk Sudu (z)

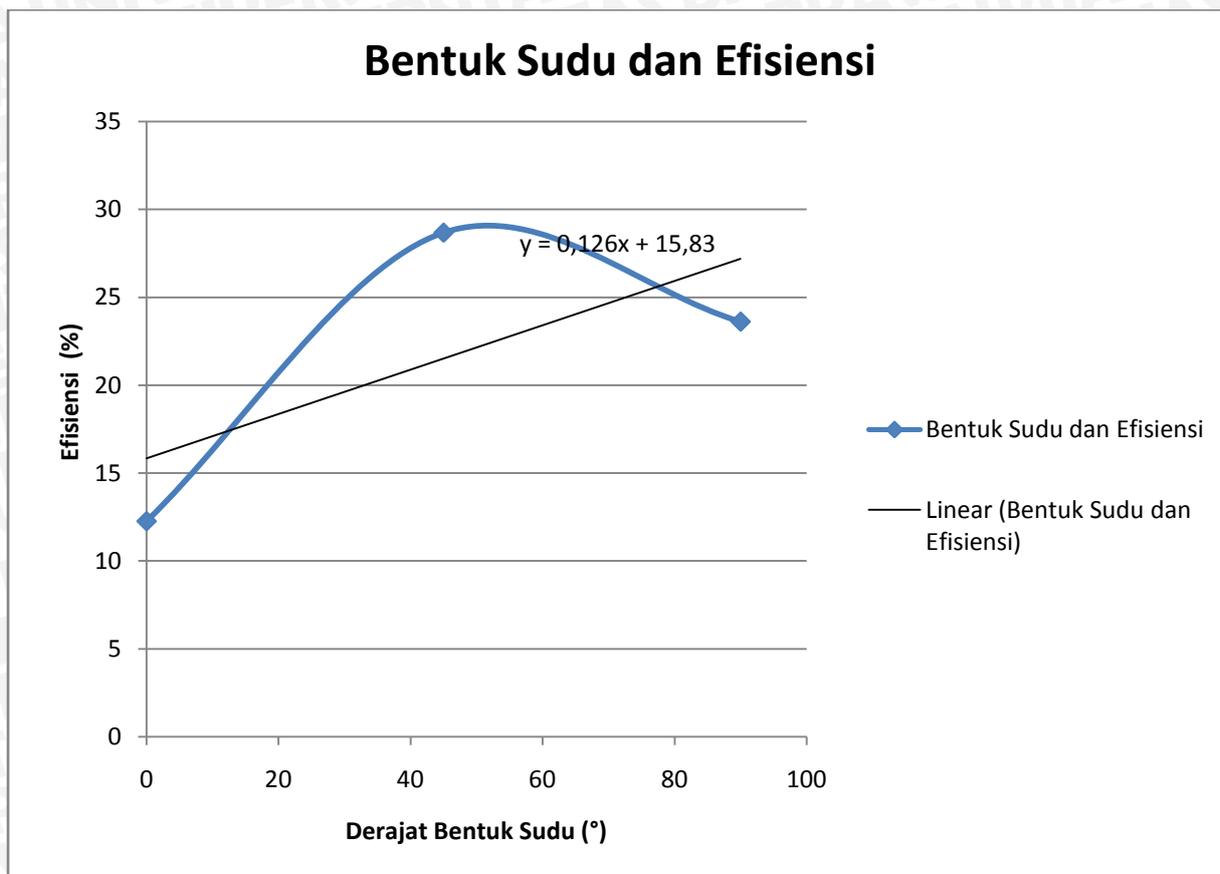
→ Fungsi (x)

Proses Ouput : Efisiensi (η) → Fungsi (y)



Grafik 4.5 : Hubungan Kecepatan Angin dengan Efisiensi

Persamaan : $y = 2,774v + 10,7$ (1)



Grafik 4.6 : Hubungan Bentuk Sudu dengan Efisiensi

Persamaan : $y = 0,126z + 15,83$ (2)

Proses Ouput : Efisiensi (η) \rightarrow Fungsi (y)

Sehingga dijumlahkan persamaan (1) dan (2) :

$$y = 2,774v + 10,7$$

$$y = 0,126z + 15,83 \quad +$$

$$2y = 2,774v + 0,126z + 26,53$$

$$y = \frac{2,774v + 0,126z + 26,53}{2}$$

$$y = 1,387v + 0,063z + 13,265$$



BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa variasi bentuk sudu dan kecepatan angin berpengaruh terhadap kinerja turbin angin Savonius, dimana :

1. Dengan variabel jumlah sudu, ukuran geometri dan kecepatan angin yang sama sudu U mempunyai kinerja paling baik diantara sudu J dan sudu datar, karena sudu U mempunyai nilai daya poros (Watt), torsi (Nm), efisiensi (%) paling tinggi diantara sudu yang lain.
2. Sehingga untuk urutan kinerja variasi bentuk sudu dari tertinggi ke terendah pada kecepatan 7 m/s adalah sudu U (1,267 Watt) ,sudu J (1,072 Watt), sudu datar (0,549 Watt)
3. Efisiensi terbesar adalah 28,67 % pada sudu U ketika kecepatan angin 5 m/s, dan efisiensi terendah adalah 3,50 % pada sudu datar ketika kecepatan angin 4 m/s.
4. Pada penelitian juga diketahui hubungan *tip speed ratio* dengan *coefficient power*, diperoleh bahwa *tip speed ratio* paling tinggi adalah 0,95 dengan nilai *coefficient power* 27,84 %.
5. Pada analisa aliran fluida, sudu U mempunyai bentuk aerodinamik yang baik karena mempunyai karakteristik mesirkulasi fluida.
6. Dari hasil penelitian di dapat persamaan matematikanya adalah $y = 1,387v + 0,063z + 13,265$

5.2 Saran

Dari penelitian yang telah dilakukan disarankan untuk:

1. Dilakukan penelitian lebih lanjut tentang pengaruh panjang jari-jari sudu U terhadap unjuk kerja turbin angin Savonius.
2. Dilakukan penelitian lebih lanjut tentang analisa aerodinamika pada jumlah sudu turbin angin Savonius tipe U.