



**TUGAS AKHIR
TM 145502**

**STUDI NUMERIK PENGARUH SUDUT BLADE
TERHADAP KARAKTERISTIK ALIRAN FLUIDA
TURBIN SAVONIUS SUMBU VERTIKAL TIPE-L**

**NURIS TRI HARDHYANTO
NRP. 2112 030 054**

**Dosen Pembimbing
GIRI NUGROHO, ST, MSc
19791029 201212 1 002**

**PROGRAM STUDI DIPLOMA III
JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2016**



**FINAL PROJECT
TM 145502**

**NUMERICAL STUDY OF BLADE ANGLE
INFLUENCE TO THE FLUID FLOW
CHARACTERISTIC OF SAVONIUS TURBINE IN
VERTICAL AXIS TYPE-L**

**NURIS TRI HARDHYANTO
NRP. 2112 030 054**

**Counselor Lecturer
GIRI NUGROHO, ST, MSc
19791029 201212 1 002**

**DIPLOMA III STUDY PROGRAM
MECHANICAL ENGINEERING DEPARTEMENT
Faculty Of Industrial Technology
Institute Technology Of Sepuluh Nopember
Surabaya
2016**

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI NUMERIK PENGARUH SUDUT BLADE TERHADAP KARAKTERISTIK ALIRAN FLUIDA TURBIN SAVONIUS SUMBU VERTIKAL TIPE-L

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Ahli Madya Teknik Mesin
Pada

Bidang Studi Konversi Energi
Program Studi Diploma III Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya

Oleh :

NURIS TRI HARDHYANTO

NRP. 2112 030 054

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir :

I. Giri Nugroho ST, MSc (Pembimbing)

SURABAYA
Januari 2016

STUDI NUMERIK PENGARUH SUDUT BLADE TERHADAP KARAKTERISTIK ALIRAN FLUIDA TURBIN SAVONIUS SUMBU VERTIKAL TIPE-L

Nama Mahasiswa : Nuris Tri Hardhyanto
NRP : 2112 030 054
Jurusan : D3 Teknik Mesin FTI ITS
Dosen Pembimbing : Giri Nugroho ST, MSc

Abstrak

Penggunaan besar-besaran bahan bakar minyak dan dampak yang ditimbulkannya terhadap lingkungan serta perubahan iklim dunia dalam proses produksi menuntut beberapa pihak berpikir ulang dalam menggunakan bahan bakar minyak. Upaya untuk mengatasi masalah tersebut adalah dengan mengkonversikan bahan bakar fosil ke sumber energi alternatif lain, salah satunya adalah energi angin. Tugas akhir ini dilakukan penelitian turbin angin savonius sumbu vertikal tipe-L.

Tujuan tugas akhir ini untuk mengetahui karakteristik aliran dan unjuk kerja turbin angin savonius dengan memvariasikan posisi sudut kemiringan turbin 0° , 30° , 60° , 90° , 120° , dan 150° . Pengujian dilakukan melalui pemodelan numerik dengan menggunakan software fluent 6.3.26 secara dua dimensi. Karakteristik aliran dinyatakan dalam distribusi kecepatan dan distribusi tekanan disekitar sudu.

Dari hasil pengujian terlihat di setiap posisi sudut kemiringan yang berbeda, turbin juga memiliki distribusi tekanan dan distribusi kecepatan yang berbeda. Turbin savonius pada posisi sudut kemiringan 30° memiliki performa yang paling baik, yakni dengan torsi 0,351 Nm dan daya maksimal 9,237 watt.

Kata Kunci : Turbin angin sumbu vertikal, savonius tipe-L, posisi sudut kemiringan, pemodelan numerik 2D

NUMERICAL STUDY OF BLADE ANGLE INFLUENCE TO THE FLUID FLOW CHARACTERISTIC OF SAVONIUS TURBINE IN VERTICAL AXIS TYPE-L

Name : Nuris Tri Hardhyanto
NRP : 2112 030 054
Major : D3 Mechanical Engineering FTI-ITS
Counselor Lecturer : Giri Nugroho, ST, MSc

Abstract

The massive use of fossil fuels and their impact on the environment and climate change in the production process requires several parties to re-think the use of fuel oil. An attempt to resolve this problem is to convert fossil fuels to alternative energy sources; one of them is wind energy. This final project will research about savonius wind turbines in vertical axis type-L.

The purpose of this final project is to determine flow characteristics and performance of savonius wind turbines by varying the position of the tilt angle of the turbine 0° , 30° , 60° , 90° , 120° , and 150° . The testing is done with numerical modeling using software fluent 6.3.26 in two dimensions. Flow characteristics are expressed in velocity distribution and pressure distribution around the angle.

The test results show that in every different angle position, the turbine also has different pressure distribution and velocity distribution. Savonius turbine at position 30° tilt angle has the best performance with torque of 0,351 Nm and maximum power of 9,237 watts.

Keywords : wind turbine in vertical axis, savonius type-L, position of the tilt angle, numerical modeling in 2D

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah memberikan segala rahmat dan hidayah-Nya hingga penulis dengan segala keterbatasannya dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik. Dalam terselesaikannya tugas akhir ini, penulis ingin menyampaikan terimakasih kepada seluruh pihak yang telah membantu secara moral maupun materi, yakni:

1. **Bapak Giri Nugroho ST, MSc** sebagai dosen pembimbing tugas akhir yang telah banyak memberikan bimbingan dan ilmu mengenai mekanika fluida yang terkait dengan tugas akhir.
2. **Bapak Ir. Suhariyanto, MT** selaku Ketua Program Studi Diploma III Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.
3. **Ibu Liza Rusdiyana, ST, MT** selaku Koordinator Tugas Akhir D3 Teknik Mesin FTI-ITS.
4. **Para Dosen Penguji** selaku dosen yang memberikan kritik, saran, serta masukan yang sangat bermanfaat untuk penyempurnaan Tugas Akhir ini.
5. **Seluruh Dosen dan karyawan** yang telah banyak membimbing penulis dalam menggali ilmu di D3 Teknik Mesin ITS.
6. **Bapak dan ibu** tercinta yang selalu memberikan do'a dan motivasinya. Tanpa do'a dan motivasi, penulis tidak bisa menyelesaikan tugas akhir dengan baik.
7. **Mas Eko dan Mas Ayok** saudara tercinta yang selalu memberikan do'a dan motivasi.
8. **Edwin Johan** atas kerja samanya dalam mengerjakan dan menjadi partner yang baik dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
9. **Farich Firmansyah Halwan, Wahyu Indrawan, dan Anang Firmansyah** yang telah meluangkan waktunya membimbing, mengajari cara mengaplikasikan *software Fluent dan Gambit*.
10. **Yhogie Yhumanta, Bangkit Budiarto, Bagas Marcelyan, Hanif Uchiha** teman kos yang selalu membantu dan memberikan semangat kepada penulis.

Terimakasih atas segala kritik dan saran serta motivasi yang telah kalian berikan.

11. **Seluruh teman-teman angkatan 2012** yang selalu membantu dan memberikan semangat kepada penulis. Terimakasih atas segala kritik dan saran serta motivasi yang telah kalian berikan.

12. Seluruh pihak yang belum disebutkan di atas yang telah memberikan do'a, bantuan, dan dukungannya bagi penulis hingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik dan tepat waktu.

Penulis mengharapkan kritik dan saran demi kesempurnaan tugas akhir ini. Penulis juga berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan di masa depan.

Surabaya, Januari 2016

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii

BAB I

PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan	3
1.4. Batasan Masalah	3
1.5. Manfaat	3
1.6. Sistematika Penulisan	4

BAB II

DASAR TEORI	5
2.1. Profil Kecepatan Angin di Indonesia	5
2.2. Turbin Angin Sumbu Horizontal	6
2.3. Turbin Angin Sumbu Vertikal	8
2.4. Turbin Angin Savonius	11
2.5. Udara dan Sifat - sifatnya	13
2.5.1. Udara	13
2.5.2. Sifat-sifat Fluida	14
2.5.2.1. Viskositas	14
2.5.2.2. Densitas	14
2.5.2.3. Bilangan <i>Reynolds</i>	15
2.6. Tekanan Statis, Stagnasi, dan Dinamis	16
2.7. Aliran Eksternal	20
2.7.1. Aliran <i>Nonviscous</i> dan <i>Viscous</i>	20
2.7.2. <i>Boundary Layer Development</i>	21
2.7.3. Separasi Aliran	23
2.7.3.1. Separasi Aliran 2D	26
2.8. CFD (<i>Computational Fluid Dynamics</i>)	27

2.8.1 GAMBIT (<i>Geometry and Mesh Building Intelligent Toolkit</i>).....	27
2.8.2 FLUENT	28
2.8.2.1. Grid Independensi	28
2.8.2.2. Formulasi <i>Solver</i>	29
2.8.2.3. Penentuan Model	29
2.8.2.4. Penentuan Kondisi Batas	31
BAB III	
METODOLOGI PENELITIAN	35
3.1. Diagram Alir Penelitian	35
3.2. <i>Preprocessing</i>	37
3.2.1. Geometri Turbin Angin Savonius Tipe L	37
3.2.2. Pemodelan Dua Dimensi	38
3.2.3. Parameter Pemodelan	43
3.3. <i>Processing</i> atau <i>Solving</i>	50
3.4. <i>Postprocessing</i>	50
BAB IV	
ANALISA DAN PEMBAHASAN	51
4.1. Analisa Grid Independensi	51
4.2. Analisa Distribusi Tekanan	52
4.2.1. Savonius Dengan Sudut Kemiringan 0°.....	52
4.2.2. Savonius Dengan Sudut Kemiringan 30°.....	56
4.2.3. Savonius Dengan Sudut Kemiringan 60°	60
4.2.4. Savonius Dengan Sudut Kemiringan 90°	64
4.2.5. Savonius Dengan Sudut Kemiringan 120°	68
4.2.6. Savonius Dengan Sudut Kemiringan 150°	72
4.3. Analisa Distribusi Kecepatan.....	76
4.4. Pembahasan	79
BAB V	
PENUTUP	81
5.1. Kesimpulan	81
5.2. Saran	81

DAFTAR PUSTAKA
LAMPIRAN

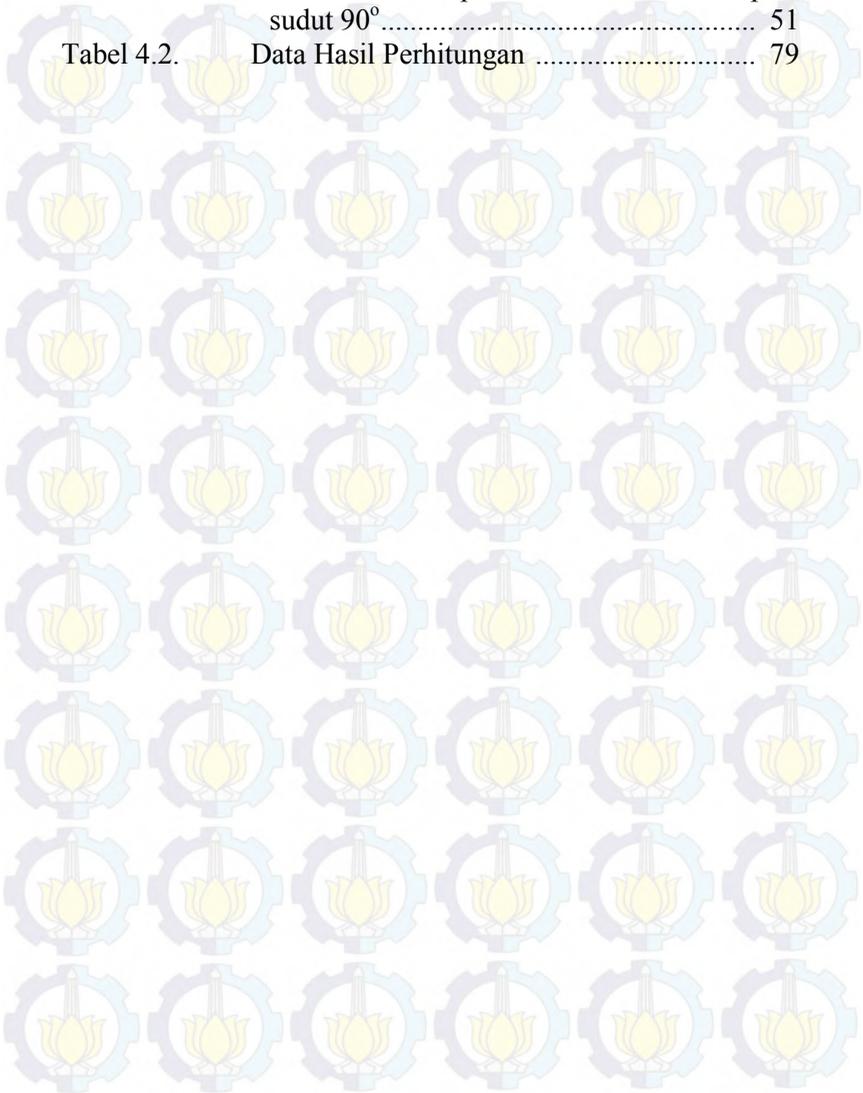
DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Peta persebaran kecepatan angin di Indonesia.	6
Gambar 2.2.	Desain Rotor TASH.....	8
Gambar 2.3.	Desain Rotor TASV.....	11
Gambar 2.4.	Tipe rotor savonius	12
Gambar 2.5.	Prinsip kerja turbin angin <i>savonius type L</i>	13
Gambar 2.6.	Pengukuran tekanan statis	17
Gambar 2.7.	Pengukuran tekanan stagnasi.....	19
Gambar 2.8.	Pengukuran tekanan stagnasi dan statis.....	19
Gambar 2.9.	Perbedaan antara fluida ideal dan <i>viscous</i>	21
Gambar 2.10.	<i>Boundary layer</i> pada plat datar.....	22
Gambar 2.11.	<i>Boundary layer flow</i> dengan <i>pressure gradient</i>	23
Gambar 2.12.	(a) <i>invisid flow</i> dan <i>viscous flow</i> pada lintasan berbentuk sphere.....	24
Gambar 2.13.	Separasi aliran melewati benda <i>streamline</i>	25
Gambar 2.14.	<i>Details Viscous flow</i> pada sekitar <i>airfoil</i>	27
Gambar 3.1.	Diagram alir penelitian	37
Gambar 3.2.	Dimensi savonius.....	38
Gambar 3.3.	Domain pemodelan savonius & <i>boundary</i> batas	39
Gambar 3.4.	Meshing domain	40
Gambar 3.5.	Daerah batas sisi sudu atas dan bawah	41
Gambar 3.6.	Daerah batas fluida udara	42
Gambar 3.7.	Meng- <i>export file</i> ke <i>type</i> : <i>.msh</i>	42
Gambar 3.8.	Menu-bar pada <i>start up software Fluent</i>	43
Gambar 3.9.	Meng- <i>import grid</i> pada <i>Fluent 6.3.26</i>	44
Gambar 3.10.	Merubah skala satuan pada <i>Fluent</i>	44
Gambar 3.11.	Pemilihan <i>models</i> pada <i>Fluent 6.3.26</i>	45
Gambar 3.12.	Penentuan <i>materials</i> pada <i>Fluent 6.3.26</i>	46
Gambar 3.13.	Penentuan <i>operating conditions</i> pada <i>Fluent</i>	46
Gambar 3.14.	<i>Boundary conditions</i> pada <i>Fluent 6.3.26</i>	47
Gambar 3.15.	Pemilihan <i>solution</i> pada <i>Fluent 6.3.26</i>	48
Gambar 3.16.	<i>Initialize</i> pada <i>Fluent 6.3.26</i>	48

Gambar 3.17.	<i>Monitor Residual</i> pada <i>Fluent 6.3.26</i>	49
Gambar 3.18.	Iterasi pada <i>Fluent 6.3.26</i>	50
Gambar 4.1.	Distribusi tekanan statis pada savonius dengan sudut 0°	52
Gambar 4.2.	Plot distribusi tekanan statis pada savonius dengan sudut 0°	53
Gambar 4.3.	Distribusi tekanan statis pada savonius dengan sudut 30°	56
Gambar 4.4.	Plot distribusi tekanan statis pada savonius dengan sudut 30°	57
Gambar 4.5.	Distribusi tekanan statis pada savonius dengan sudut 60°	60
Gambar 4.6.	Plot distribusi tekanan statis pada savonius dengan sudut 60°	61
Gambar 4.7.	Distribusi tekanan statis pada savonius dengan sudut 90°	64
Gambar 4.8.	Plot distribusi tekanan statis pada savonius dengan sudut 90°	65
Gambar 4.9.	Distribusi tekanan statis pada savonius dengan sudut 120°	68
Gambar 4.10.	Plot distribusi tekanan statis pada savonius dengan sudut 120°	69
Gambar 4.11.	Distribusi tekanan statis pada savonius dengan sudut 150°	72
Gambar 4.12.	Plot distribusi tekanan statis pada savonius dengan sudut 150°	73
Gambar 4.13.	<i>Pathline velocity</i> pada posisi sudut 0°	76
Gambar 4.14.	<i>Pathline velocity</i> pada posisi sudut 30°	76
Gambar 4.15.	<i>Pathline velocity</i> pada posisi sudut 60°	77
Gambar 4.16.	<i>Pathline velocity</i> pada posisi sudut 90°	77
Gambar 4.17.	<i>Pathline velocity</i> pada posisi sudut 120°	77
Gambar 4.18.	<i>Pathline velocity</i> pada posisi sudut 150°	78
Gambar 4.19.	Grafik tekanan total dan gaya	79
Gambar 4.20.	Grafik torsi dan daya maksimal	80

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1.	Analisa Grid Independensi Tekanan Total pada sudut 90°	51
Tabel 4.2.	Data Hasil Perhitungan	79



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penggunaan besar-besaran bahan bakar minyak dan dampak yang ditimbulkannya terhadap lingkungan serta perubahan iklim dunia dalam proses produksi yang terlihat saat ini seperti pembangkit listrik menuntut beberapa pihak supaya berpikir ulang dalam menggunakan bahan bakar minyak. Berdasarkan data Kementerian ESDM tahun 2012, cadangan minyak bumi sebesar 3,74 miliar dan akan habis dalam waktu beberapa belas tahun dengan asumsi tingkat produksi konstan, sedangkan gas bumi sebesar 103,35 TCF dan batubara sebesar 28,9 miliar ton (ESDM,2012). Upaya untuk mengatasi masalah tersebut adalah dengan mengkonversi bahan bakar fosil ke sumber energi lain. Salah satu jenis energi alternatif yang patut untuk mendapatkan perhatian adalah energi angin.

Angin termasuk salah satu dari sumber daya energi yang terbarukan dan ramah lingkungan sehingga sangat potensial untuk mengurangi ketergantungan terhadap penggunaan energi bahan bakar minyak. Energi angin dapat dikonversikan ke dalam bentuk energi lain seperti listrik atau mekanik dengan menggunakan turbin angin. Indonesia memiliki profil kecepatan angin yang terbilang rendah. Berdasarkan peta kelas kecepatan angin Indonesia dari Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN), Indonesia memiliki kecepatan angin yang berkisar antara 0-5,6 m/s. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan teknologi Sistem Konversi Energi Angin (SKEA) yang sesuai dengan profil kecepatan angin yang rendah.

Soelaiman (dkk) 2007 melakukan beberapa penelitian tentang beberapa macam blade, yaitu savonius dengan blade tipe-U dan savonius dengan blade tipe-L. Dari penelitian, mereka

menyimpulkan bahwa blade savonius tipe L menghasilkan unjuk kerja yang paling baik dibandingkan dengan tipe yang lain.

Hendra A. (2012), melakukan penelitian Pengaruh Jumlah Sudu Terhadap Unjuk Kerja Turbin Angin Savonius. Menggunakan metode penelitian eksperimental dengan variasi jumlah sudu : 2, 3, dan 4 buah dengan variabel bebas kecepatan angin pada *wind tunnel* dari kecepatan 3 m/s sampai 7 m/s. Didapatkan hasil analisa bahwa turbin angin dengan jumlah sudu 3 buah memiliki unjuk kerja yang tinggi dibandingkan dengan jumlah sudu yang lain.

Edwin J. (2015), melakukan Analisis Pengaruh Overlap Ratio Pada Turbin Angin Savonius Sumbu Vertikal Tipe-L Menggunakan Perangkat Lunak Fluent 6.3.26. Dengan overlap ratio : 0; 0,04; 0,08; 0,12; dan overlap ratio 0,16. Didapatkan hasil analisis bahwa turbin angin savonius tipe-L overlap 0 memiliki unjuk kerja yang tinggi dibandingkan dengan overlap lainnya.

Pada tugas akhir ini mengembangkan tugas akhir sebelumnya yang sudah ada, yakni milik saudara Edwin Johan tanpa merubah variabel komponen turbin seperti panjang rotor dan jumlah *blade* pada sistem turbin angin savonius tipe-L yang sama, dengan memvariasikan posisi sudut 0^0 , 30^0 , 60^0 , 90^0 , 120^0 , dan 150^0 terhadap turbin angin savonius tipe-L dengan ratio overlap 0. Turbin angin savonius ini akan disimulasikan pada *Computational Fluid Dynamics (CFD)* yang nantinya diharapkan dapat mengetahui karakteristik aliran fluida dan unjuk kerja tubin disetiap variasi posisi sudut.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana distribusi kecepatan pada daerah sekeliling sudu VAWT savonius?
2. Bagaimana distribusi tekanan pada daerah sekeliling sudu VAWT Savonius?
3. Bagaimana pengaruh posisi sudut terhadap performa VAWT Savonius ?
4. Manakah posisi sudut yang dapat menghasilkan daya, torsi, dan rpm yang lebih besar?

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui distribusi kecepatan pada daerah sekeliling sudu VAWT Savonius.
2. Mengetahui distribusi tekanan pada daerah di sekeliling sudu VAWT Savonius.
3. Menganalisa pengaruh posisi sudut terhadap performa VAWT savonius.
4. Mengetahui posisi sudut yang efektif menghasilkan torsi dan daya yang lebih besar.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian dengan menggunakan perangkat lunak *Fluent 6.3.26* ini antara lain :

1. Kondisi *steady state*, aliran *incompressible*.
2. Analisa menggunakan 2D menggunakan turbulen $k - \epsilon$, *boundary condition* untuk *inlet* adalah *velocity inlet* dengan kecepatan udara masuk sebesar 5 m/s.
3. Menggunakan perangkat lunak *Fluent 6.3.26*.
4. Data yang diamati pada *Fluent* hanya pada distribusi tekanan pada *blade*.
5. Posisi *inlet* dalam simulasi terletak pada sebelah kiri dari domain.

1.5 Manfaat

Manfaat dari penelitian tugas akhir ini adalah

1. Mampu mengetahui distribusi kecepatan pada daerah sekeliling sudu VAWT Savonius.
2. Mampu mengetahui distribusi tekanan pada daerah sekeliling sudu VAWT Savonius.
3. Dapat menganalisa pengaruh posisi sudut terhadap performa VAWT savonius.
4. Mengetahui posisi sudut mana yang dapat menghasilkan daya, torsi, dan rpm yang lebih besar.

1.6 Sistematika Penulisan

BAB I PENDAHULUAN

Berisikan tentang latar belakang penulisan, perumusan masalah yang dipilih, tujuan penulisan, batasan permasalahan, manfaat penulisan dan sistematika penulisan.

BAB II DASAR TEORI

Berisikan tentang persamaan - persamaan yang mendasari perumusan masalah, teori *external flow*, dan pengenalan *software FLUENT 6.3.26*.

BAB III METODE PENELITIAN

Berisikan tentang penjelasan langkah - langkah pemodelan melalui diagram alir, serta menguraikan pemodelan numerik yang dilakukan, mulai dari pembuatan geometri model uji, diskretisasi daerah analisa (*meshing*), pemodelan *FLUENT 6.3.26*.

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

Berisikan tentang uraian data yang diperoleh saat simulasi dilakukan yaitu berupa hasil *contour* tekanan, distribusi tekanan, dan distribusi kecepatan sepanjang *blade* serta pembahasan data yang dihasilkan dari *blade savonius* selama percobaan dilakukan.

BAB V PENUTUP

Berisikan tentang pemaparkan kesimpulan yang diperoleh selama pembuatan tugas akhir ini yang merupakan ringkasan jawaban dari permasalahan yang dipilih. Serta berisikan saran - saran dari penulis.

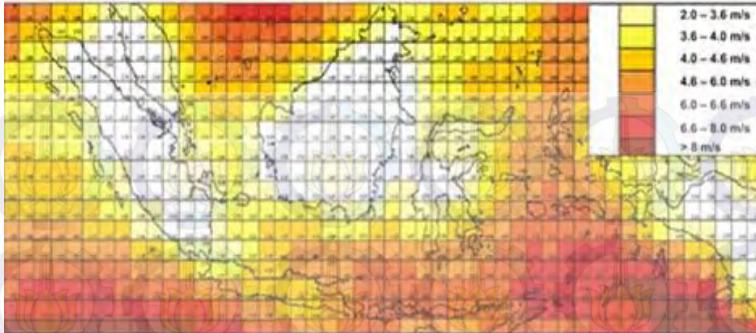
BAB II

DASAR TEORI

2.1 Profil Kecepatan Angin di Indonesia

Angin adalah udara yang bergerak yang diakibatkan oleh rotasi bumi dan juga karena adanya perbedaan tekanan udara disekitarnya. Angin bergerak dari tempat bertekanan udara tinggi ke bertekanan udara rendah. Udara yang terkena radiasi matahari akan memuai. Daerah yang menerima lebih banyak penyinaran matahari akan memiliki suhu yang lebih tinggi dibandingkan dengan daerah lainnya sehingga menyebabkan udara di daerah tersebut memuai dan massa jenisnya menjadi lebih ringan sehingga udara bergerak naik. Apabila hal ini terjadi, tekanan udara turun. Udara disekitarnya mengalir ke tempat yang bertekanan rendah. Udara menyusut menjadi lebih berat dan turun ke tanah. Di atas tanah udara menjadi panas lagi dan naik kembali.

Indonesia merupakan negara kepulauan yang terletak antara 11° Lintang Utara (LU) sampai 6° Lintang Selatan (LS) dan 96° Bujur Barat (BB) sampai 141° Bujur Timur (BT). Berdasarkan letak astronomis tersebut wilayah Indonesia dilewati oleh garis khatulistiwa yang menyebabkan Indonesia mempunyai iklim tropis dan mendapatkan sinar matahari sepanjang tahun. Kecepatan angin daerah beriklim tropis lebih rendah dibanding daerah yang beriklim subtropis, dikarenakan angin yang berasal dari belahan bumi utara dan belahan bumi selatan bertemu di garis khatulistiwa sehingga momentumnya mendekati nol. Gambar dibawah ini merupakan peta persebaran kecepatan angin di Indonesia.



Gambar 2.1 Peta persebaran kecepatan angin di Indonesia

Dari data Blueprint Energi Nasional, Departemen ESDM RI dapat dilihat bahwa potensi PLTB di Indonesia sangat menarik untuk dikembangkan karena dari potensi sebesar 9,29 GW, baru sekitar 0,5 GW yang dikembangkan, yang berarti baru sekitar 5,38%. Dari peta persebaran diatas dapat dilihat bahwa di daerah sepanjang garis khatulistiwa memiliki kecepatan angin yang rendah dibanding daerah NTT dan Lombok. Iklim tropis ini menyebabkan Indonesia memiliki kecepatan angin yang rendah karena memiliki suhu yang tinggi. Akibatnya potensi angin pada daerah khatulistiwa sangat kecil. Hal ini menjadi masalah bagi pengembangan pembangkit energi angin di Indonesia yaitu pengembangan tidak bisa dilakukan secara optimal.

2.2 Turbin Angin Sumbu Horizontal

Turbin angin sumbu horizontal (TASH) memiliki poros rotor utama dan generator listrik di puncak menara. Turbin berukuran kecil diarahkan oleh sebuah baling-baling angin (baling-baling cuaca) yang sederhana, sedangkan turbin berukuran besar pada umumnya menggunakan sebuah sensor angin yang digandengkan ke sebuah servo motor. Sebagian besar memiliki sebuah *gearbox* yang mengubah perputaran kincir yang pelan menjadi lebih cepat berputar.

Karena sebuah menara menghasilkan turbulensi di belakangnya, turbin biasanya diarahkan melawan arah anginnya menara. Bilah-bilah turbin dibuat kaku agar mereka tidak

terdorong menuju menara oleh angin berkecepatan tinggi. Sebagai tambahan, bilah-bilah itu diletakkan di depan menara pada jarak tertentu dan sedikit dimiringkan.

Karena turbulensi menyebabkan kerusakan struktur menara, dan realibilitas begitu penting, sebagian besar TASH merupakan mesin *upwind* (melawan arah angin). Meski memiliki permasalahan turbulensi, mesin *downwind* (menurut arah angin) dibuat karena tidak memerlukan mekanisme tambahan agar mereka tetap sejalan dengan angin, dan karena di saat angin berhembus sangat kencang, bilah-bilahnya bisa ditekuk sehingga mengurangi wilayah tiupan mereka dan dengan demikian juga mengurangi resintensi angin dari bilah-bilah itu.

Kelebihan TASH :

- Dasar menara yang tinggi membolehkan akses ke angin yang lebih kuat di tempat-tempat yang memiliki geseran angin (perbedaan antara laju dan arah angin antara dua titik yang jaraknya relatif dekat di dalam atmosfer bumi. Di sejumlah lokasi geseran angin, setiap sepuluh meter ke atas, kecepatan angin meningkat sebesar 20%.

Kekurangan TASH :

- Menara yang tinggi serta bilah yang panjangnya bisa mencapai 90 meter sulit diangkut. Diperkirakan besar biaya transportasi bisa mencapai 20% dari seluruh biaya peralatan turbin angin.
- TASH yang tinggi sulit dipasang, membutuhkan derek yang sangat tinggi dan mahal serta para operator yang tampil.
- Konstruksi menara yang besar dibutuhkan untuk menyangga bilah-bilah yang berat, *gearbox*, dan generator.
- TASH yang tinggi bisa memengaruhi radar *airport*.
- Ukurannya yang tinggi merintangi jangkauan pandangan dan mengganggu penampilan lansekap.
- Berbagai varian *downwind* menderita kerusakan struktur yang disebabkan oleh turbulensi.
- TASH membutuhkan mekanisme kontrol *yaw* tambahan untuk membelokkan kincir ke arah angin.



Gambar 2.2 Desain rotor TASH

2.3 Turbin Angin Sumbu Vertikal

Turbin angin sumbu vertikal/tegak (atau 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. VAWT mampu mendayagunakan angin dari berbagai arah.

Dengan sumbu yang vertikal, generator serta *gearbox* bisa ditempatkan di dekat tanah, jadi menara tidak perlu menyokongnya dan lebih mudah diakses untuk keperluan perawatan. Tapi ini menyebabkan sejumlah desain menghasilkan tenaga putaran yang berdenyut. *Drag* (gaya yang menahan pergerakan sebuah benda padat melalui fluida (zat cair atau gas) bisa saja tercipta saat kincir berputar.

Karena sulit dipasang di atas menara, turbin sumbu tegak sering dipasang lebih dekat ke dasar tempat ia diletakkan, seperti tanah atau puncak atap sebuah bangunan. Kecepatan angin lebih pelan pada ketinggian yang rendah, sehingga yang tersedia adalah energi angin yang sedikit. Aliran udara di dekat tanah dan obyek yang lain mampu menciptakan aliran yang bergolak, yang bisa menyebabkan berbagai permasalahan yang berkaitan dengan getaran, diantaranya kebisingan dan *bearing wear* yang akan meningkatkan biaya pemeliharaan atau mempersingkat umur turbin angin. Jika tinggi puncak atap yang dipasangi menara turbin kira-kira 50% dari tinggi bangunan, ini merupakan titik optimal bagi energi angin yang maksimal dan turbulensi angin yang minimal.

Kelebihan TASV :

- Tidak membutuhkan struktur menara yang besar.
- Karena bilah-bilah rotornya vertikal, tidak dibutuhkan mekanisme yaw.
- Sebuah TASV bisa diletakkan lebih dekat ke tanah, membuat pemeliharaan bagian-bagiannya yang bergerak jadi lebih mudah.
- TASV memiliki sudut *airfoil* (bentuk bilah sebuah baling-baling yang terlihat secara melintang) yang lebih tinggi, memberikan keaerodinamisan yang tinggi sembari mengurangi *drag* pada tekanan yang rendah dan tinggi.
- Desain TASV berbilah lurus dengan potongan melintang berbentuk kotak atau empat persegi panjang memiliki wilayah tiupan yang lebih besar untuk diameter tertentu daripada wilayah tiupan berbentuk lingkarannya TASH.
- TASV memiliki kecepatan awal angin yang lebih rendah daripada TASH. Biasanya TASV mulai menghasilkan listrik pada 10 km/jam (6 m.p.h.)
- TASV biasanya memiliki *tip speed ratio* (perbandingan antara kecepatan putaran dari ujung sebuah bilah dengan laju sebenarnya angin) yang lebih rendah sehingga lebih kecil kemungkinannya rusak di saat angin berhembus sangat kencang.
- TASV bisa didirikan pada lokasi-lokasi dimana struktur yang lebih tinggi dilarang dibangun.
- TASV yang ditempatkan di dekat tanah bisa mengambil keuntungan dari berbagai lokasi yang menyalurkan angin serta meningkatkan laju angin (seperti gunung atau bukit yang puncaknya datar dan puncak bukit),
- TASV tidak harus diubah posisinya jika arah angin berubah.
- Kincir pada TASV mudah dilihat dan dihindari burung.

Kekurangan TASV :

- Kebanyakan TASV memproduksi energi hanya 50% dari efisiensi TASH karena drag tambahan yang dimilikinya saat kincir berputar.

- TASV tidak mengambil keuntungan dari angin yang melaju lebih kencang di elevasi yang lebih tinggi.
- Kebanyakan TASV mempunyai torsi awal yang rendah, dan membutuhkan energi untuk mulai berputar.
- Sebuah TASV yang menggunakan kabel untuk menyanggahnya memberi tekanan pada bantalan dasar karena semua berat rotor dibebankan pada bantalan. Kabel yang dikaitkan ke puncak bantalan meningkatkan daya dorong ke bawah saat angin bertiup.

Terdapat 3 macam desain turbin angin sumbu vertikal, yaitu :

1. Darrius

Turbin angin Darrius merupakan salah satu tipe turbin angin poros tegak yang menggunakan sudu profil propeller. Dalam aplikasinya turbin angin darrius pada umumnya memerlukan kecepatan angin awal yang lebih tinggi untuk start up. Dengan kondisi demikian, seringkali tipe turbin angin darrius memerlukan penggerak mula (prime mover) untuk start up, dan penggerak mula aka berhenti setelah dicapai batas minimum untuk menggerakkan turbin secara mandiri.

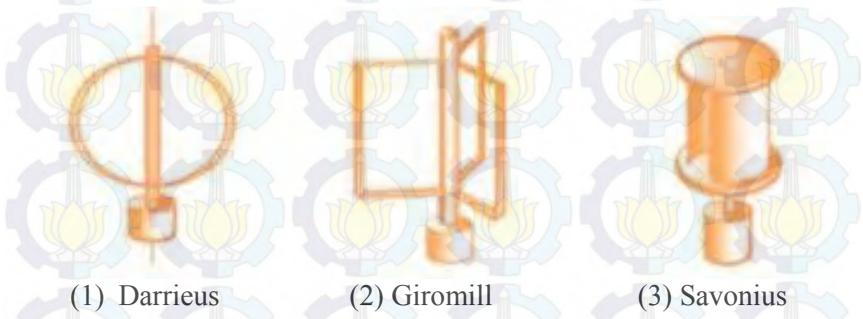
2. Giromill

Turbin angin Girromill mempunyai konstruksi dan karakteristik yang mirip dengan tipe Darrius, bedanya hanya pada posisi rotor dimana untuk turbin angin Giromill, sudu sama – sama menggunakan profil propeller dan dipasang tegak sejajar dengan poros. Sedangkan pada tipe darrius , sudu propeller dipasangkan melengkung . Keduanya dalam aplikasinya turbin angin darrius pada umumnya memerlukan kecepatan angin awal yang lebih tinggi untuk start up dan kadang memerlukan penggerak mula (prime mover) untuk start up, dan penggerak mula aka berhenti setelah dicapai batas minimum untuk menggerakkan turbin secara mandiri.

3. Savonius

Turbin angin poros tegak tipe savonius , kebanyakan menggunakan sudu tipe pelat lengkung . Berbagai model

pelat lengkung untuk sudu tipe turbin angin savonius telah banyak dikembangkan dan diujicobakan. Sejauh ini, kapasitas turbin angin tipe savonius baru dikembangkan untuk skala 10 an kilowatt . Untuk membuat prototype dengan kapasitas yang besar diperlukan material yang lebih besar dibandingkan dengan tipe poros datar. Namun kelebihannya, bahwa tipe turbin angin ini tidak memerlukan sistem geeng (yaw system) dan dapat beroperasi pada lokasi yang kondisinya tidak laminar.



(1) Darrieus

(2) Giromill

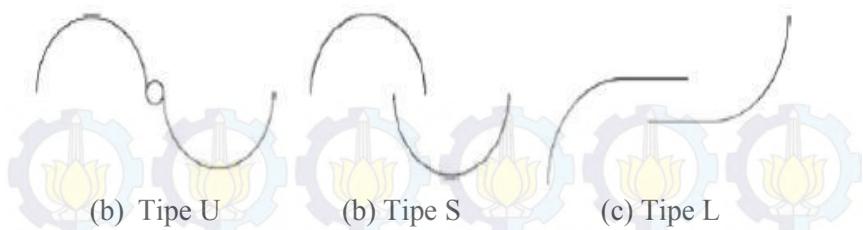
(3) Savonius

Gambar 2.3 Desain rotor TASV

2.4 Turbin Angin Savonius

Turbin angin savonius pertama kali diperkenalkan oleh Sigurd Johannes Savonius pada tahun 1922. turbin angin savonius bekerja karena adanya gaya *drag* dari angin, satu sisi memiliki gaya *drag* yang lebih besar dari pada sisi yang lainnya sehingga terjadi perputaran. Tipe turbin savonius memiliki efisiensi yang rendah karena gaya angin yang mengenai sebuah bidang sudu ditransformasikan menjadi gaya *drag* yang lebih besar daripada gaya lift. Turbin angin savonius merupakan jenis turbin angin yang paling sederhana.

Dalam perkembangannya rotor Savonius mengalami perubahan bentuk rotor, seperti gambar dibawah ini :



Gambar 2.4 Tipe rotor savonius

Keunggulan dari ketiga rotor diatas adalah :

b. Rotor tipe-U

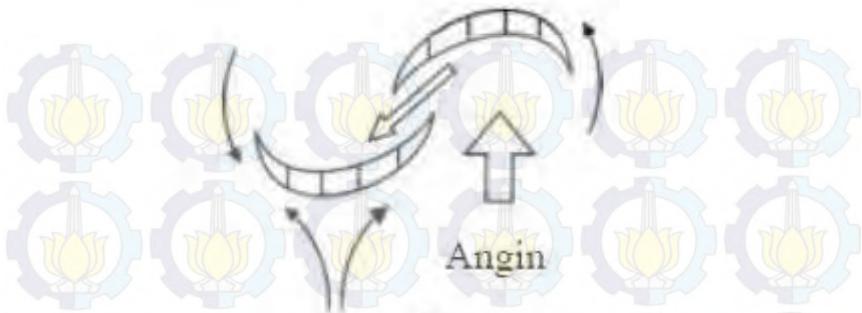
Memiliki kecepatan putar tinggi karena angin dapat disirkulasikan terpusat di tengah atau pusat batang, tetapi kurang efisien dibandingkan dua tipe lainnya.

c. Rotor tipe-S

Dapat dirancang dengan mudah dari drum. Desain ini lebih efisien dari Savonius U karena beberapa aliran udara dibelokkan oleh kedua sudu lalu keluar pada salah satu sisinya dengan kata lain aliran udara sama besar pada kedua bilah sudu.

d. Rotor tipe-L

Turbिन angin savonius tipe L merupakan desain yang paling efisien dari turbिन angin savonius. Turbin savonius tipe L tidak hanya memiliki keunggulan dari udara yang dibelokkan menjadi dua kali tetapi juga sebagai *vanes* bertindak seperti airfoil ketika berada di tepi, membuat efek gaya angkat menjadi kecil sehingga meningkatkan efisiensi. Selain itu, aliran udara pada sisi yang lurus lebih besar daripada sisi lengkungnya (Soelaiman, 2006).



Gambar 2.5 Prinsip kerja turbin angin savonius type L

2.5 Udara dan Sifat-sifatnya

2.5.1 Udara

Udara adalah fluida yang memiliki densitas dan viskositas. Densitas (ρ) didefinisikan sebagai massa persatuan volume. Properti ini tergantung pada tekanan (P) dan temperatur (T). Kendaraan di jalan pada umumnya berjalan dengan kecepatan dibawah sepertiga kecepatan suara. Pada batas kecepatan tersebut harga variasi tekanan dan temperatur dalam aliran dengan harga *freestream* sangat kecil, oleh karena itu perubahan pada densitas dapat diabaikan. Dengan demikian aliran udara yang mengalir di sekeliling kendaraan dapat dikategorikan sebagai aliran fluida *incompressible*. Untuk kondisi standar, P = 1 atm dan T = 288 K, harga densitas atau $\rho = 1,2250 \text{ kg/m}^3$.

Properti lainnya dari udara adalah viskositas. Properti ini disebabkan oleh gesekan molekuler antara partikel-partikel fluida. Gesekan ini berhubungan dengan fluks momentum karena *gradient* kecepatan. Untuk fluida *incompressible*, properti ini bergantung pada temperatur. Pada kondisi standar viskositas $\mu = 1,7894 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$ dan $\nu = 1,4607 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Viskositas yang dimiliki fluida ini menyebabkan terjadinya *friction drag* sehingga timbul gradien kecepatan pada dinding.

2.5.2 Sifat-sifat Udara

2.5.2.1 Viskositas

Properti ini disebabkan oleh gesekan molekuler antara partikel-partikel fluida. Gesekan ini berhubungan dengan fluks momentum karena *gradient* kecepatan. Untuk fluida *incompressible*, properti ini bergantung pada temperatur. Viskositas dinyatakan dalam dua bentuk yaitu:

1) Viskositas Dinamis (μ)

Merupakan perbandingan tegangan geser dengan laju perubahannya, besarnya viskositas udara bervariasi dan dipengaruhi oleh temperatur. Pada kondisi standar (temperatur kamar 20°C) besar viskositas dinamik adalah $\mu_{\text{udara}} = 1,81 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$

2) Viskositas Kinematik (ν)

Merupakan perbandingan viskositas dinamik (μ) terhadap kerapatan densitas (ρ):

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.1)$$

Viskositas kinematik muncul dalam banyak terapan, misalnya dalam bilangan *reynold* yang tanpa dimensi. ν_{udara} pada temperatur kamar 20°C adalah $1,50 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

2.5.2.2 Densitas

Udara adalah fluida yang memiliki densitas dan viskositas. Densitas (ρ) didefinisikan sebagai massa persatuan volume. Properti ini tergantung pada tekanan (P) dan temperatur (T). Densitas dapat dinyatakan dalam tiga bentuk, yaitu:

1) Densitas Massa

Merupakan perbandingan jumlah massa dengan jumlah volume. Densitas massa dapat dirumuskan dalam bentuk persamaan:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.2)$$

Dimana: m = massa (kg)

V = volume (m^3)

ρ = massa jenis (kg/m^3)

Pada temperatur $20^\circ C$ densitas udara adalah $1,21 kg/m^3$.

2) *Berat Spesifik*

Didefinisikan sebagai densitas massa dikalikan dengan gravitasi dan dapat dirumuskan dengan

$$\gamma = \rho g \quad (2.3)$$

Dimana unit berat spesifik N/m^3 . Untuk $\gamma_{\text{udara}} = 11,87 N/m^3$.

3) *Densitas Relatif (Specific Gravity)*

Densitas relatif disebut juga *specific gravity* (SG) yaitu perbandingan antara berat spesifik suatu zat dengan berat spesifik air pada temperatur $4^\circ C$. Densitas relatif tidak memiliki satuan.

$$SG = \frac{\gamma_{\text{zat}}}{\gamma_{\text{air}}} \quad (2.4)$$

2.5.2.3 Bilangan Reynolds

Kondisi aliran *laminar* atau *turbulent* dapat dinyatakan dengan bilangan *Reynolds* untuk aliran *incompressible*. Jenis lapis batas yang terjadi pada aliran udara yang mengalir suatu obyek juga sangat ditentukan oleh bilangan *Reynolds* (Re). Hal ini dapat dijelaskan bahwa dalam lapis batas gaya geseran gaya inersia sangat penting, sementara bilangan *reynolds* sendiri menggambarkan perbandingan antara gaya inersia terhadap gaya geser.

$$Re = \frac{\text{Gaya inersia}}{\text{Gaya geser}} \quad (2.5)$$

dimana : Gaya Inersia $= \rho \times A = \rho \cdot U_\infty^2 \cdot L^2$

$$\text{GayaGeser} = \tau \times A = \left(\frac{\mu U_{\infty}}{L} \right) \cdot L^2$$

Sehingga,

- Untuk aliran eksternal

$$Re = \frac{\rho U_{\infty}^2 L^2}{\left(\frac{\mu U_{\infty}}{L} \right) L^2} = \frac{\rho U_{\infty} L}{\mu} \quad (2.6)$$

dimana : ρ : Densitas fluida

U_{∞} : Kecepatan aliran *free stream* fluida

L : Panjang karakteristik yang diukur pada medan aliran, dalam kasus ini digunakan diameter hidrolis, yaitu D_h

μ : Viskositasdinamis fluida

- Untuk aliran internal

Diameter hidrolis (D_h) digunakan untuk perhitungan saluran tak bundar. Diameter hidrolis dapat didefinisikan sebagai

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (2.7)$$

Dimana : A = Luas penampang

P = keliling penampang

Sehingga,

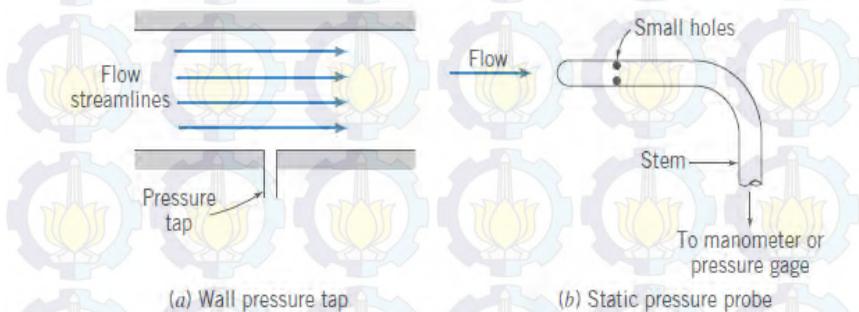
$$Re_h = \frac{\rho U_{\infty} \cdot D_h}{\mu} \quad (2.8)$$

2.6 Tekanan Statis, Stagnasi, dan Dinamis

Tekanan P yang digunakan pada persamaan Bernoulli adalah tekanan termodinamis atau lebih dikenal dengan tekanan statis. Tekanan statis adalah tekanan yang diukur oleh alat ukur yang bergerak bersama-sama aliran dengan kecepatan yang sama. Bagaimanapun juga cara pengukuran yang demikian sangat sulit

dilakukan. Oleh karena itu perlu ada cara yang praktis untuk mengukurnya.

Fluida yang mengalir lurus akan mempunyai *streamlines* lurus pula dan tidak mempunyai variasi tekanan ke arah normal dari aliran *streamlines* tersebut. Kenyataan ini memungkinkan untuk melakukan pengukuran tekanan statis dengan menggunakan *wall pressure tap* yang ditempatkan di daerah dimana aliran *streamlines* lurus, seperti yang terlihat pada gambar 2.3a.



Gambar 2.6 Pengukuran tekanan statis
(Fox and McDonald's, 8th edition)

Pressure tap adalah sebuah lubang kecil yang dibuat pada dinding dimana axisnya tegak lurus terhadap permukaan dinding. Apabila lubang tersebut tegak lurus terhadap dinding suatu saluran dan bebas dari kotoran, akurasi pengukuran tekanan statis akan dapat diperoleh dengan menghubungkan *pressure tap* dengan suatu alat ukur yang sesuai. Apabila fluida mengalir jauh dari dinding atau bila *streamlines*-nya berbentuk kurva, akurasi pengukuran tekanan statis dapat diperoleh dengan menggunakan *pressure probe*, seperti yang terlihat pada gambar 2.3b. Tekanan stagnasi adalah tekanan yang dapat diukur bila aliran diperlambat sampai kecepatannya sama dengan nol dengan proses tanpa gesekan. Pada aliran *incompressible*, persamaan Bernoulli dapat digunakan sehubungan dengan perubahan kecepatan dan tekanan

sepanjang *streamlines*. Dengan mengabaikan diferensial elevasi, persamaan Bernoulli menjadi :

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} = \text{konstan} \quad (2.9)$$

Bila tekanan statis p pada suatu titik dalam suatu aliran dimana kecepatannya adalah V , maka tekanan stagnasi p_o , dimana kecepatan stagnasi V_o adalah nol, maka :

$$\frac{p_o}{\rho} + \frac{V_o^2}{2} = \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} \quad (2.10)$$

dimana $V_o = 0$, sehingga :

$$\frac{p_o}{\rho} = \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} \quad (2.11)$$

atau,

$$p_o = p + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (2.12)$$

Persamaan di atas adalah kalimat matematis dari defenisi tekanan stagnasi, yang *valid* untuk aliran *incompressible*. Bentuk $\frac{1}{2} \rho V^2$ umumnya disebut tekanan dinamis. Jadi persamaan tekanan dinamis adalah :

$$\frac{1}{2} \rho V^2 = p_o - p \quad (2.13)$$

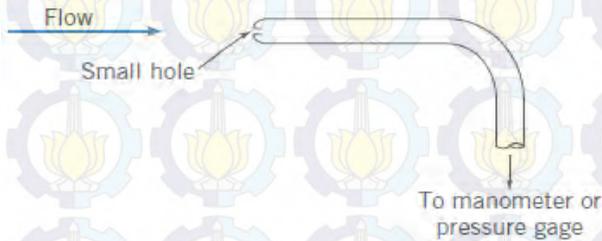
dan kecepatannya adalah :

$$V = \sqrt{\frac{2(p_o - p)}{\rho}} \quad (2.14)$$

(Fox, and Mc. Donald, 8th edition)

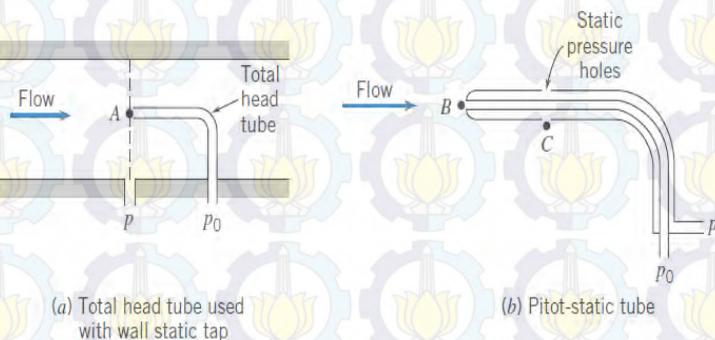
Jadi, bila tekanan stagnasi dan tekanan statis diukur pada suatu titik, maka persamaan kecepatan diatas akan menghasilkan kecepatan aliran lokal.

Tekanan stagnasi dapat diukur dengan menggunakan sebuah *probe* dimana lubangnya langsung berhadapan dengan aliran seperti terlihat pada gambar 2.4. *Probe* ini dikenal dengan nama *stagnation pressure probe* atau *pitot tube*. Daerah pengukurannya juga harus sejajar dengan arah aliran lokal.



Gambar 2.7 Pengukuran tekanan stagnasi
(Fox, and Mc. Donald, 8th edition)

Pada gambar 2.5 terlihat bahwa tekanan statis yang sejajar dengan garis di titik A dapat dibaca dari *wall static pressure tap*. Sedangkan tekanan stagnasi dapat diukur langsung pada titik A dengan menggunakan *total head tube*.



Gambar 2.8 Pengukuran Tekanan Stagnasi dan Statis
(Fox, and Mc. Donald, 8th edition)

Terkadang dua buah *probe* dapat dikombinasikan seperti pada *pitot-static tube*. Tabung bagian dalam digunakan untuk mengukur tekanan stagnasi pada titik B, sedangkan tekanan statis pada titik C dibaca melalui lubang-lubang kecil pada tabung bagian luar. Pada daerah aliran dimana variasi tekanan statis dalam arah *streamwise*-nya kecil, *pitot-static tube* dapat digunakan untuk mencari kecepatan pada titik B, dengan menggunakan persamaan kecepatan di atas dan mengasumsikan $p_b = p_c$.

Perbedaan antara tekanan lokal statik pada setiap titik dalam aliran dengan tekanan statik pada *freestream* bergantung langsung dengan tekanan dinamik pada *freestream*, dan perbandingan ini yang disebut dengan koefisien tekanan atau *pressure coefficient* (C_p).

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (2.15)$$

(Fluid Mechanics, Fifth Edition, Pijush K.Kundu)

Dimana : P = tekanan *local static* atau tekanan pada kontur

P_∞ = tekanan statik *freestream*

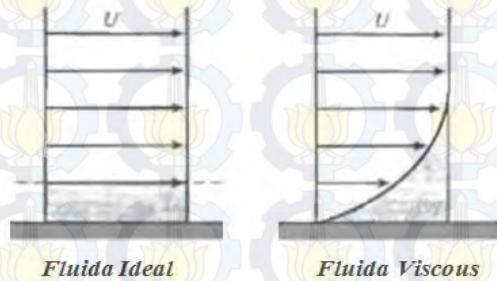
U = kecepatan *freestream*

2.7 Aliran Eksternal

2.7.1 Aliran *Nonviscous* dan *Viscous*

Pada dasarnya aliran terbagi atas dua jenis yaitu aliran *viscous* dan aliran *non viscous*. Aliran *non viscous* bukan berarti bahwa aliran tidak mempunyai viskositas atau $\mu = 0$, karena setiap fluida pasti akan mempunyai viskositas tertentu. Pengertian aliran *non viscous* adalah aliran yang mempunyai gradien kecepatan mendekati nol atau tegangan gesernya mendekati nol. Sedangkan untuk aliran *viscous*, efek dari viskositasnya akan mengikutkan tegangan geser antara partikel fluida dengan permukaan padat yang dilaluinya.

Pada aliran fluida ideal, semua partikel akan bergerak pada kecepatan yang sama, tetapi pada aliran *viscous* yang mengikutkan tegangan geser akan menjadikan profil kecepatan fluidanya akan menjadi tidak seragam seperti gambar 2.6 dibawah ini.



Gambar 2.9 Perbedaan antara fluida ideal dan *viscous* (Fox, and Mc. Donald, 8th edition)

Untuk aliran *viscous*, kecepatan fluida tepat diatas permukaan padat sama dengan nol. Semakin jauh dari permukaan padat, secara berangsur-angsur tegangan geser yang terjadi semakin berkurang, sehingga berangsur-angsur pula kecepatan aliran akan membesar. Dan pada suatu titik tertentu pengaruh tegangan geser terhadap aliran akan hilang sehingga kecepatan aliran akan mencapai harga yang sama dengan aliran bebasnya.

2.7.2 Boundary Layer Development

Suatu aliran disebut sebagai aliran eksternal bila aliran tersebut melewati suatu *contour body* yang berada pada aliran fluida tanpa batas. Contoh aliran eksternal adalah aliran fluida yang melewati sisi luar dari permukaan lengkung dan pelat datar (*semi-infinite flat plate*).

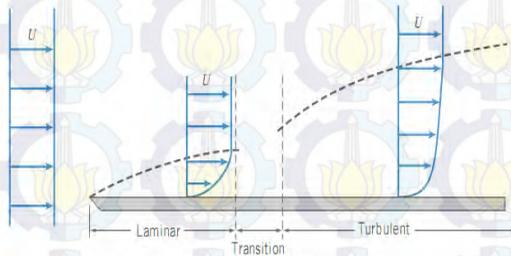
Boundary layer (lapis batas) merupakan lapisan tipis pada *solid surface* yang terbatas daerah sangat sempit dekat permukaan kontur dengan kecepatan fluida tidak *uniform* dikarenakan tegangan geser yang muncul akibat viskositas.

Dari penjelasan di atas, aliran melintasi suatu kontur diklasifikasikan menjadi dua daerah yaitu :

1. Daerah di dalam lapis batas (dekat permukaan kontur) dengan efek viskositas yang sangat berpengaruh (*viscous flow*).
2. Daerah di luar lapis batas dengan efek viskositas diabaikan (*nonviscous flow*).

Struktur *boundary layer flow* dapat digambarkan dengan mengamati gerakan partikel fluida. Saat mengalir diluar *boundary layer*, partikel mempertahankan bentuk asalnya sambil bergerak translasi namun tidak berotasi dan efek *viscosity* dapat diabaikan. Kondisi dengan *zero vorticity* ini dinamakan *irrotational*.

Gangguan mulai terjadi saat partikel memasuki *boundary layer* karena adanya *velocity gradient* dan efek *viscosity*. Akibatnya, selama bergerak translasi, partikel fluida juga bergerak rotasi. Dengan demikian *vorticity*-nya tidak sama dengan nol (*non zero vorticity*). Kondisi ini dinamakan *rotational*.



Gambar 2.10 *Boundary layer* pada pelat datar (Fox dan Mc. Donald, 8th edition)

Gambar di atas menunjukkan suatu pengembangan *boundary layer* sepanjang permukaan pelat. Pada daerah ini terjadi dua bentuk aliran. Awalnya aliran adalah *laminar* sepanjang jarak tertentu dari *leading edge*, kemudian terjadi suatu transisi aliran yang akhirnya akan berubah menjadi *turbulent*. Untuk aliran *incompressible* melewati *smooth flate plate* (*zero pressure gradient*), perubahan dari *laminar* ke *turbulent* dapat dipengaruhi oleh *Reynolds number*,

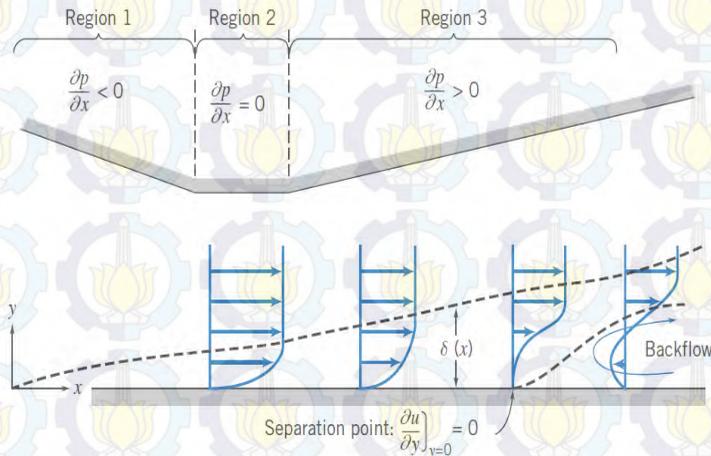
$$\text{Re}_x \equiv \frac{Ux}{\nu}$$

(2.16)

(Fluid Mechanics, Fifth Edition, Pijush K.Kundu)

2.7.3 Separasi Aliran

Setiap aliran fluida terutama aliran *viscous*, apabila menemui suatu gangguan berupa benda atau *solid surface*, alirannya akan mengalami separasi karena *vorticity* yang terjadi besar sehingga energi yang ada atau momentum yang ada tidak bisa mengatasi *adverse pressure gradient* dan pengaruh gesekan yang terjadi pada *solid surface* tersebut.

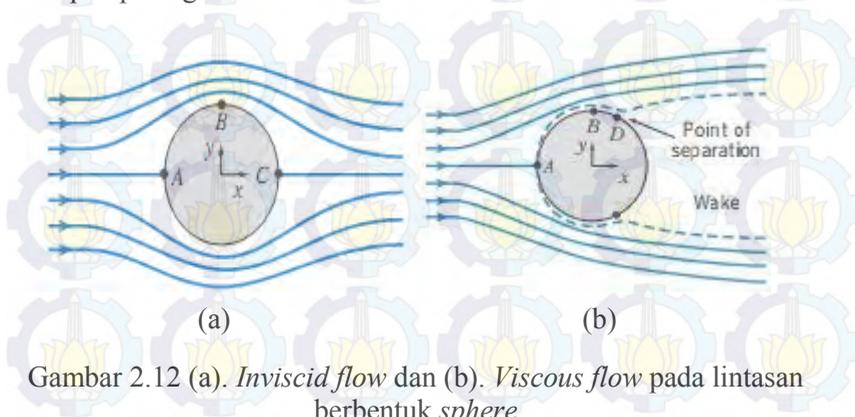


Gambar 2.11 *Boundary layerflow dengan pressure gradient.*
(Fox, and Mc. Donald, 8th edition)

Separasi aliran fluida dua dimensi membawa kerugian pada aliran *laminar* atau aliran yang dalam kondisi paralel. Aliran *laminar* dua dimensi tersebut akan dirusak oleh efek friksi dan adanya *adverse pressure gradient* pada permukaan dari solid. Separasi ini dimulai pada titik dimana perubahan kecepatan ke arah y sama dengan nol.

Vorticity yang terjadi pada titik ini sangat besar sehingga momentum yang ada mulai dirusak *vorticity* tersebut dan terjadilah *vortex*. *Vortex* merupakan daerah di belakang daerah separasi. Ada dua daerah yang ada pada daerah separasi ini yaitu daerah *laminar* yang terseparasi dan daerah resirkulasi. Daerah separasi tersebut semakin ke belakang semakin besar sampai pada suatu titik dimana alirannya sudah kembali ke kondisi paralel (alirannya sudah paralel), dan hal ini dikenal dengan *reattachment*. Pada titik ini energi yang terdapat di dalam aliran fluida ini sudah dapat mengatasi *adverse pressure gradient* yang terjadi sebelumnya atau dengan kata lain energi yang momentumnya sudah mendapatkan tambahan kembali dari kondisi *freestream* -nya. Namun aliran ini sudah berubah menjadi aliran yang *turbulent* karena penambahan momentum yang ada tersebut melebihi dari kondisi *laminarnya*. Aliran yang *turbulent* ini baik sekali untuk mengatasi *adverse pressure gradient*.

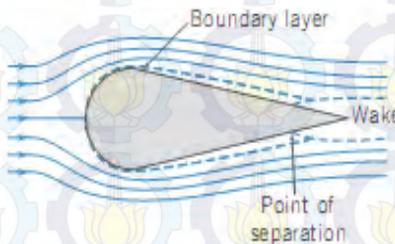
Pada aliran fluida yang melintasi suatu permukaan berbentuk kurva (melengkung) maka distribusi tekanan dan distribusi kecepatan akan mengalami perubahan. Pada sebuah sirkular silinder yang dilalui oleh aliran fluida dalam sebuah medan aliran *incompressible* diasumsikan sebagai aliran *inviscid* sehingga aliran tampak simetris baik ke arah y maupun x . Seperti tampak pada gambar 2.9a dibawah ini :



Gambar 2.12 (a). *Inviscid flow* dan (b). *Viscous flow* pada lintasan berbentuk *sphere*

(Fox, and Mc. Donald, 8th edition)

Kecepatan yang mengelilingi silinder meningkat sampai suatu titik maksimum D dan kemudian berkurang saat bergerak lebih jauh kebelakang dari titik D. Titik D disebut titik separasi (*separation point*), dimana partikel fluida mendorong objek dan menyebabkan terjadinya *wake*. Pada suatu aliran *inviscid* peningkatan distribusi kecepatan dihubungkan oleh pengurangan distribusi tekanan pada aliran yang melintasi profil silinder tersebut. Sehingga pada suatu aliran *incompressible inviscid flow* yang melintasi silinder, distribusi tekanan disepanjang permukaan dari silinder berkurang saat berjalan dari A-D dan akan meningkat lagi saat bergerak dari D-E. Pada aliran *viscous steady incompressible* bentuk aliran akan tampak seperti gambar 2.9b di atas.



Gambar 2.13 Separasi aliran melewati benda *streamline*
(Fox, and Mc. Donald, 8th edition)

Pada gambar 2.10 bagaimana bentuk *streamline* bekerja. Gaya *drag* pada kebanyakan aerodinamik karena tekanan rendah pada *wake*, jika *wake* dapat dikurangi atau dihapus, *drag* akan dapat banyak dikurangi. Pada gambar 2.10 *streamline* terbuka, dan tekanan akan meningkat dengan pelan, seperti memperpanjang aliran sehingga partikel aliran tidak didorong untuk memisahkan dari objek sampai mencapai akhir dari objek. *Wake* yang terjadi lebih kecil, sehingga mengurangi tekanan *drag*. Hanya satu aspek negatif dari *streamline* ini adalah luas permukaan total dengan gesekan terjadi lebih besar, sehingga *drag* karena gesekan akan sedikit berkurang.

Namun pada aliran setelah titik B tekanan akan meningkat dalam arah aliran sehingga pada beberapa titik momentum aliran dari fluida didalam *boundary layer* tidak cukup untuk membawa elemen jauh kedalam daerah peningkatan tekanan sehingga aliran fluida yang berdekatan pada permukaan akan mengalami pemecahan ke arah balik dan aliran akan terseparasi dari permukaan. Hasil dari separasi *boundary layer* pada daerah relative tekanan rendah dibelakang body yang mana momentum alirannya tidak mencukupi disebut *wake*.

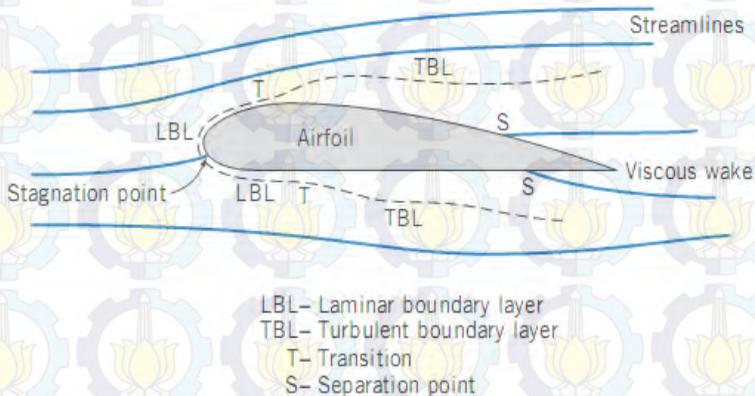
2.7.3.1 Separasi Aliran 2D

Separasi aliran sangat rentan terjadi pada aliran laminer. Hal ini disebabkan oleh momentum yang dimilikinya cukup besar untuk mengatasi efek komulatif *adverse pressure* dan *shear stress*. Mulainya separasi aliran ditandai dengan $(\partial u/\partial y)_{y=0} = 0$. Aliran yang terseparasi dapat dibagi menjadi dua daerah, yaitu: daerah laminer terseparasi (*separated laminer flow*), dekat batas aliran *nonviscous*, dan pada daerah resirkulasi, disekitar permukaan kontur. Selama berlangsungnya peristiwa separasi, muncul interaksi antara aliran *nonviscous* dengan *boundary layer*, sehingga terjadi *supply energy* atau momentum dari *nonviscous* ke *boundary layer* terseparasi. Proses ini disebut *entrainment*.

Dengan demikian ada kemungkinan aliran sehat kembali asalkan jumlah komulatif momentum aliran dapat mengatasi efek tekanan balik (*adverse pressure gradient*) sebelum mencapai *trailing edge*. Ketika aliran sehat kembali, karakternya adalah *turbulent*, ini berarti peristiwa separasi adalah terjadinya perubahan karakteristik aliran dari laminer, transisi, kemudian *turbulent* yang dikenal sebagai pembentukan *bubble*.

Pada aliran fluida yang melewati *streamlining body*, dimana tekanan dan efek *viscous* sangat penting. Bentuk *streamlining body* akan mengurangi besarnya *adverse pressure gradient* karena adanya penyebaran kenaikan tekanan pada jarak yang cukup panjang. Bodi seperti ini juga membuat penundaan separasi aliran sehingga secara signifikan gaya *drag* menjadi berkurang. Pada daerah *upstream* awalnya aliran adalah *laminar* dengan membentuk *laminar boundary layer* kemudian setelah

mengenai *leading edge* terjadi transisi aliran pada titik T kondisi aliran berubah menjadi *turbulent* dan lapisan batas yang terbentuk adalah *turbulent boundary layer*. Karena *streamline* tidak bisa mengikuti kontur profil maka aliran terseparasi dan membentuk daerah bertekanan rendah dibelakang *airfoil*, daerah ini disebut *wake*. Visualisasi aliran dapat dilihat pada gambar 2.11.



Gambar 2.14 Details Viscousflow pada sekitar airfoil.
(Fox, and Mc. Donald, 8th edition)

2.8 CFD (Computational Fluid Dynamics)

Dengan menggunakan salah satu *software CFD* dapat dibuat *virtual prototype* dari sebuah sistem atau alat yang ingin dianalisis dengan menerapkan kondisi nyata di lapangan.

Software CFD akan memberikan data-data, gambar-gambar, atau kurva-kurva yang menunjukkan prediksi dari performansi keandalan sistem yang telah didesain tersebut. Hasil analisis *CFD* bisa menyajikan prediksi kualitatif dan kuantitatif dari berbagai persoalan dinamika fluida.

2.8.1 GAMBIT (Geometry and Mesh Building Intelligent Toolkit)

Software gambit ini dapat membuat geometri dan membuat *meshing* untuk berbagai macam bentuk, termasuk bentuk-bentuk yang rumit dan tidak beraturan. Pembuatan

geometri yang digunakan dalam *software* ini adalah koordinat (x,y). *Meshing* merupakan proses selanjutnya setelah menggambar geometri dimana *meshing* dapat dilakukan dengan berbagai macam bentuk *mesh*, yaitu *mesh* heksahedral terstruktur dan tidak terstruktur, tetrahedral, piramid, dan prisma. Selain itu, pada *software Gambit* ini juga dapat dilakukan pengecekan kualitas *mesh* sesuai dengan standar yang kita inginkan. Semakin kecil kualitas *meshing* yang dibuat maka semakin akurat data yang di peroleh. Tahap pemodelan terakhir pada *Gambit* adalah proses penentuan jenis kondisi batas. *Mesh* yang telah dibuat pada *Gambit* dapat diekspor ke semua *solver Fluent*. *Software* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Gambit 2.2.30*.

2.8.2 FLUENT

Fluent adalah satu jenis program *CFD* yang menggunakan metode volume hingga (*finite volume*). *Fluent* menyediakan fleksibilitas *mesh* yang lengkap, sehingga dapat menyelesaikan kasus aliran fluida dengan *mesh (grid)* yang tidak terstruktur sekalipun dengan cara yang relatif mudah. Jenis *mesh* yang didukung oleh *Fluent* adalah tipe 2D (*two dimension*) *triangular-quadrilaterall*, 3D (*three-dimension*) *tetrahedral-hexahedral-pyramid-wedge*, dan *mesh* campuran (*hybrid*). *Fluent* juga memungkinkan penggunaanya untuk memperhalus atau memperbesar *mesh* yang sudah ada. Beberapa kelebihan *Fluent* yaitu mudah untuk digunakan, model yang realistis (tersedia berbagai pilihan *solver*), diskritisasi atau *meshing* model yang efisien (dalam *Gambit*), cepat dalam penyajian hasil (bisa dengan paralel komputer), dan visualisasi yang mudah untuk dimengerti. Aplikasi *Fluent* di dalam dunia industri, sering digunakan untuk desain dari suatu sistem fluida, dan juga untuk mencari sumber atau analisis kegagalan suatu sistem fluida. *Software* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Fluent 6.3.26*.

2.8.2.1 Grid Independensi

Dari penelitian terdahulu agar melakukan *CFD* simulasi dengan sukses perlu memperhatikan *grid independensi*. Salah

satu cara agar dapat menguji *grid* independensi adalah dengan melakukan *adapt*. *Grid* independensi sendiri adalah solusi yang konvergen yang ditentukan dari perhitungan *CFD* yang tidak dipengaruhi oleh besar kecilnya *grid*. Apabila dengan meningkatkan jumlah dari sel maka kemungkinan tidak akan mengubah *flow-field solution* dan *integrated quantities*. Didalam prakteknya *grid* independensi diindikasikan dengan menghaluskan *mesh* sehingga hal tersebut dapat mengubah solusi numerik. Oleh karena itu dengan *adapt* dapat kita ketahui beberapa bagian *mesh* saja yang harus lebih dihaluskan agar tidak mengubah solusi numerik.

2.8.2.2 Formulasi Solver

Di dalam *Fluent* tersedia tiga formulasi *solver*, yaitu *segregated*, *coupledimplisit*, dan *coupledeksplisit*. Ketiga formulasi tersebut menghasilkan solusi yang akurat untuk berbagai jenis kasus, tetapi pada beberapa kasus tertentu salah satu formulasi mungkin dapat menghasilkan solusi yang lebih cepat daripada yang lain.

Formulasi *solver segregated* menyelesaikan persamaan-persamaan pada suatu kasus secara bertahap, sedangkan pada *solver coupled* menyelesaikan semua persamaan secara bersamaan. Kedua formulasi *solver* tersebut menyelesaikan persamaan untuk besaran-besaran tambahan (misalnya, radiasi, turbulensi) secara bertahap. *Solver coupled* implisit dan eksplisit mempunyai perbedaan pada cara melinierkan persamaan-persamaan yang akan diselesaikan.

Secara umum, *solver segregated* banyak digunakan untuk kasus dengan fluida inkompresibel dan kompresibel dengan kecepatan aliran rendah sampai menengah (bilangan $Mach < 1$). Adapun *solver coupled* pada dasarnya didesain untuk kasus fluida kompresibel dengan kecepatan tinggi (bilangan $Mach \geq 1$).

2.8.2.3 Penentuan Model

Pada *Fluent* terdapat beberapa model dan persamaan dasar yang dapat dipilih sesuai dengan kasus yang akan dianalisis. Persamaan-persamaan tersebut meliputi model multifasa,

persamaan energi, model viskos, model spesies *transport* dan reaksi, model fasa diskrit, model pembekuan dan peleburan, dan model akustik. Pada topik kali ini akan dibahas lebih lanjut mengenai persamaan energi dan model viskos.

Secara garis besar, model *turbulent* dapat didekati dengan dua pendekatan, yaitu berdasarkan *Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS)* dan berdasarkan *Large Eddy Simulation (LES)*. Sebelum menentukan model viskos, harus ditentukan terlebih dahulu apakah aliran fluida yang akan disimulasikan termasuk dalam aliran *laminar* atau *turbulent* dengan menghitung bilangan *Reynolds* terlebih dahulu. Apabila termasuk aliran *turbulen*, maka *Fluent* menyediakan beberapa model turbulensi, yaitu model *Spalart - Allmaras*, model *k-epsilon (k - ε) Standart*, *k - ε Renormalization group (RNG k - ε)*, *k - ε Realizable*, model *k - ω Standart*, *k-ω Shear Stress Transport (SST)*, model *Reynoldsstress (RSM)*, dan model *Large Eddy Simulation (LES)* khusus 3D.

Dari pemodelan-pemodelan tersebut, pemodelan turbulensi yang baik dalam memprediksi tekanan statis dinding adalah pemodelan *k - ε Realizable*. Hal ini dikarenakan *error* yang terjadi pada model tersebut adalah paling kecil, sehingga dapat dikatakan lebih akurat dibandingkan pemodelan lain untuk mendeskripsikan tekanan statis. Model *realizable k-epsilon* merupakan pengembangan model yang relatif baru dan berbeda dengan model *k-epsilon* dalam dua hal, yaitu:

- Pada model *realizable k-epsilon* terdapat formulasi baru untuk memodelkan viskositas *turbulen*.
- Sebuah persamaan untuk *epsilon* telah diturunkan dari persamaan untuk menghitung fluktuasi vortisitas rata-rata.

Istilah *realizable* mempunyai arti bahwa model tersebut memenuhi beberapa batasan matematis pada bilangan *Reynolds*, konsisten dengan bentuk fisik aliran *turbulen*. Kelebihan dari model *realizable k-epsilon* adalah lebih akurat untuk memprediksikan laju penyebaran fluida dari pancaran jet/nozel. Model ini juga memberikan performa yang bagus untuk aliran yang melibatkan putaran, lapisan batas yang mempunyai gradien

tekanan yang besar, separasi, dan resirkulasi. Salah satu keterbatasan model *realizable k-epsilon* ialah terbentuknya viskositas *turbulen* non fisik pada kasus dimana domain perhitungan mengandung zona fluida yang diam dan berputar (*multiple reference frame, sliding mesh*).

2.8.2.4 Penentuan Kondisi Batas

Untuk mendefinisikan suatu kasus, harus dimasukkan informasi pada variabel aliran pada domain kasus tersebut, antara lain fluks massa, momentum, energi, dan lain-lain. Informasi tersebut salah satunya harus dimasukkan dalam kondisi batas (*boundary condition*). Penentuan kondisi batas melibatkan beberapa hal, yaitu:

- mengidentifikasi lokasi kondisi batas, misalnya sisi masuk, sisi keluar, dinding, dan lain-lain;
- memasukkan informasi/data pada batas yang telah ditentukan.

Data yang diperlukan (*input*) pada kondisi batas merupakan data yang sudah diketahui atau data yang dapat diasumsikan. Tetapi asumsi data tersebut harus diperkirakan mendekati yang sebenarnya. *Input* data yang salah pada kondisi batas akan sangat berpengaruh terhadap hasil simulasi. Kondisi batas yang terdapat pada *Fluent* sebagai berikut:

- Umum: *pressure inlet, pressure outlet*
- Aliran inkompresibel: *velocity inlet, outflow*
- Aliran kompresibel: *mass flow inlet, pressure far-field*
- Spesial: *inlet vent, outlet vent, intake fan, exhaust fan*
- Sisi ganda (*doublesided*): *fan, interior, porous jump, radiator*
- Lain-lain: *wall, symmetry, periodic, axis*

Pada pembahasan kali ini akan dibahas lebih lanjut mengenai *velocity inlet, outflow, dan wall*.

a) *Velocity Inlet*

Kondisi batas *velocity inlet* digunakan untuk mendefinisikan kecepatan aliran dan besaran skalar lainnya pada sisi masuk aliran. Kondisi batas ini hanya digunakan untuk aliran

inkompresibel. Metode spesifikasi kecepatan yang ada pada kondisi batas ini adalah:

- Komponen (*Components*)
- Besar/nilai kecepatan, tegak lurus terhadap batas (*Magnitude, normal to boundary*)
- Besar/nilai kecepatan dan arah (*Magnitude & direction*)

b) *Outflow*

Kondisi batas ini digunakan apabila data aliran pada sisi keluar tidak diketahui sama sekali. Data pada sisi keluar diekstrapolasi dari data yang ada pada aliran sebelum mencapai sisi keluar. Tidak perlu dimasukkan data apapun pada kondisi batas ini. Keterbatasan kondisi batas *outflow* adalah:

- Hanya dapat dipakai jika aliran pada sisi keluar adalah aliran berkembang penuh (*fully developed*).
- Hanya dapat dipakai untuk aliran inkompresibel.
- Tidak dapat digunakan bersamaan dengan kondisi batas *pressure inlet*, harus menggunakan kondisi batas *velocity inlet* pada sisi masuk.
- Tidak dapat digunakan untuk aliran transien dan massa jenis yang tidak konstan sepanjang aliran.
- Tidak dapat digunakan untuk kasus yang mengalami aliran balik pada sisi keluarnya, karena persamaan yang digunakan untuk mengekstrapolasi data pada aliran mengasumsikan aliran yang terjadi pada sisi keluar adalah aliran berkembang penuh yang tidak mungkin terjadi aliran balik. Oleh karena itu apabila hendak dipakai kondisi batas *outflow*, harus dipastikan terlebih dahulu bahwa lokasi kondisi batas tersebut telah berada pada daerah aliran berkembang penuh

c) *Wall*

Kondisi batas ini digunakan sebagai dinding untuk aliran fluida dalam saluran atau dapat disebut juga sebagai dinding saluran. Kondisi batas ini digunakan juga sebagai pembatas antara daerah fluida (cair dan gas) dan padatan. Pada aliran viskos, kondisi *no slip* yang terjadi pada dinding sebagai berikut:

- Kecepatan tangensial fluida pada dinding sama dengan kecepatan dinding, jadi apabila dindingnya tidak bergerak maka kecepatan tangensial fluida pada dinding sama dengan nol.
- Komponen arah normal kecepatan fluida pada dinding sama dengan nol.
- Tegangan geser yang terjadi antara dinding dan fluida dapat ditentukan.

Apabila persamaan energi diaktifkan, maka pada dinding terdapat beberapa tipe fungsi kondisi termal antara lain *heatflux*, temperatur, konveksi, dan radiasi. Kekasaran permukaan dinding dapat ditentukan apabila menggunakan model viskos *turbulent*. Dinding juga dapat dibuat bergerak secara translasi atau berputar dengan menentukan kecepatan putar atau translasi dinding.

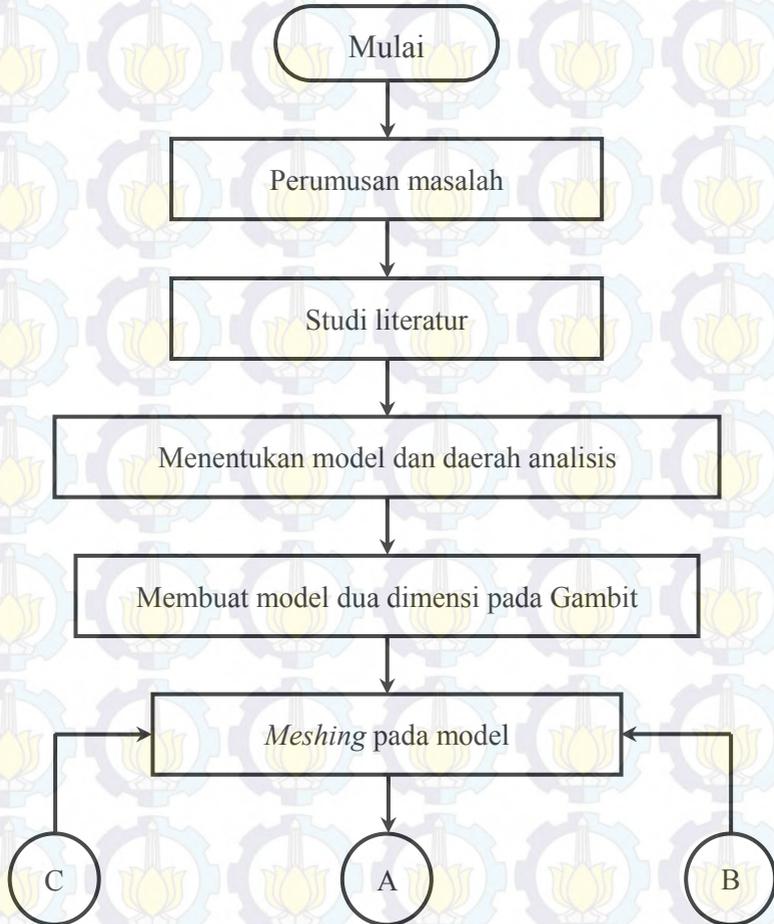


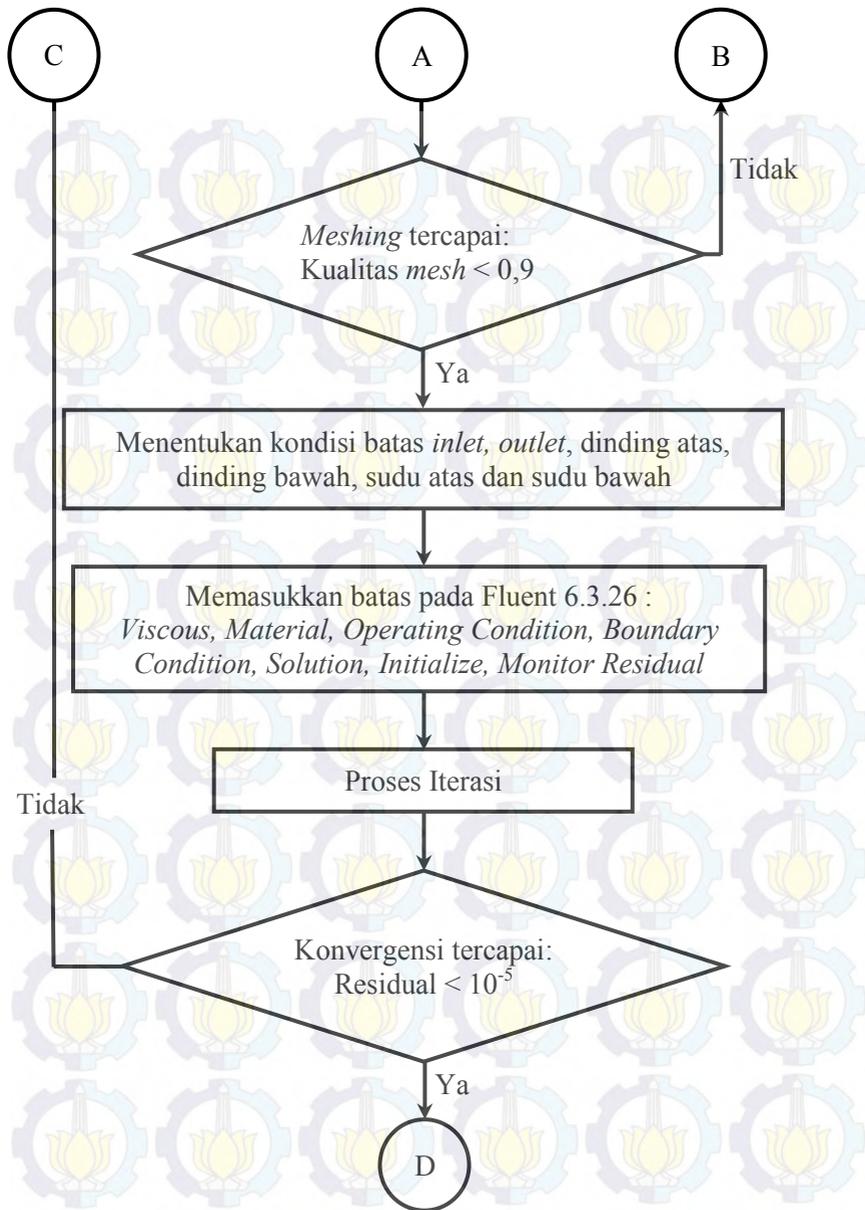
Halaman ini sengaja dikosongkan

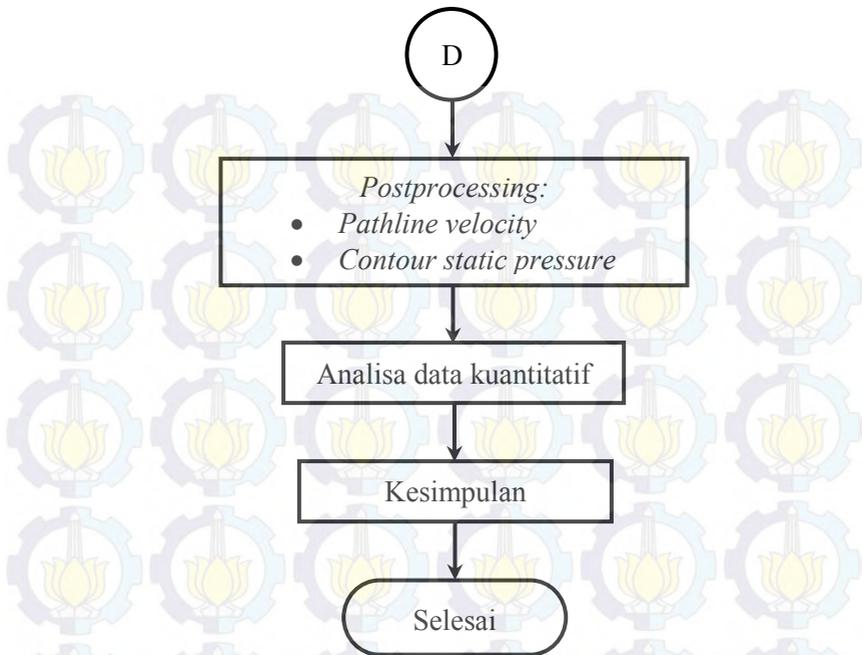
BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Langkah- langkah yang perlu dilakukan dalam penelitian tugas akhir ini dilakukan dalam beberapa tahap yang dipresentasikan dalam diagram alir dibawah ini:







Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

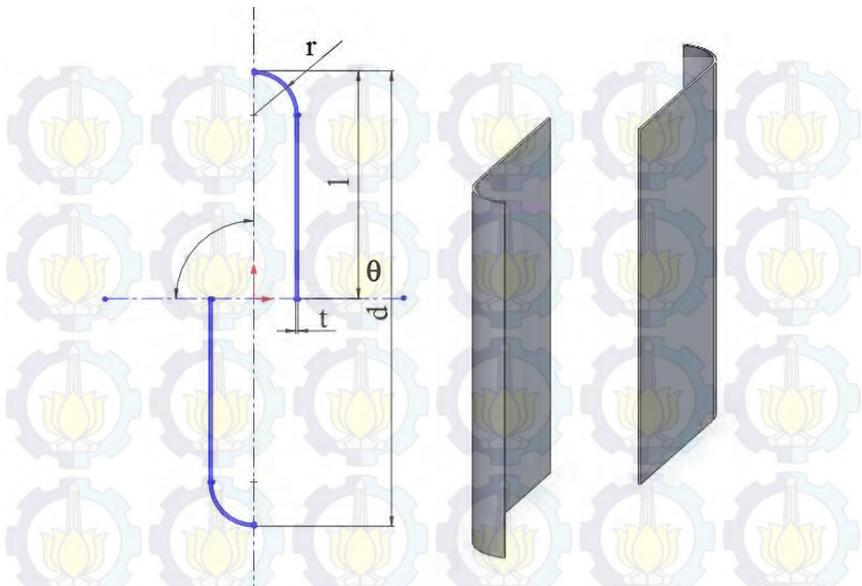
3.2 Preprocessing

Preprocessing merupakan langkah pertama dalam membangun dan menganalisa sebuah model komputasi (*CFD*). Tahapan ini meliputi beberapa sub-tahapan antara lain: pembuatan geometri, penentuan domain, pembuatan *meshing* dan penentuan parameter-parameter yang digunakan.

3.2.1 Geometri Turbin Angin Savonius tipe L

Pembuatan geometri savonius ini menggunakan *software Gambit*. Adapun geometri dan dimensi adalah sebagai berikut :

Diameter luar savonius blade (d)	: 380 mm
Panjang lengan sudu (l)	: 190 mm
Jari-jari lengkung sudu (r)	: 35 mm
Tebal savonius blade (t)	: 2 mm



Gambar 3.2 Dimensi savonius

3.2.2 Pemodelan Dua Dimensi

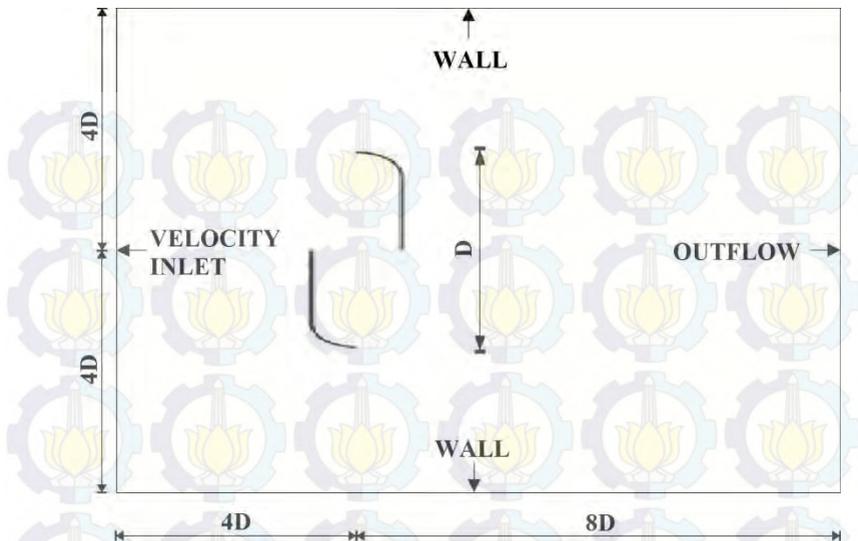
Proses pembuatan model sudu dua dimensi ini dilakukan menggunakan *software Gambit 2.2.30*, berikut adalah langkah-langkah yang dilakukan pada *software* tersebut.

a. Membuat model geometri

Menggambar model uji berupa sudu VAWT tipe savonius dengan variasi sudut kemiringan (θ) yaitu 0° , 30° , 60° , 90° , 120° dan 150° .

b. Membuat model domain

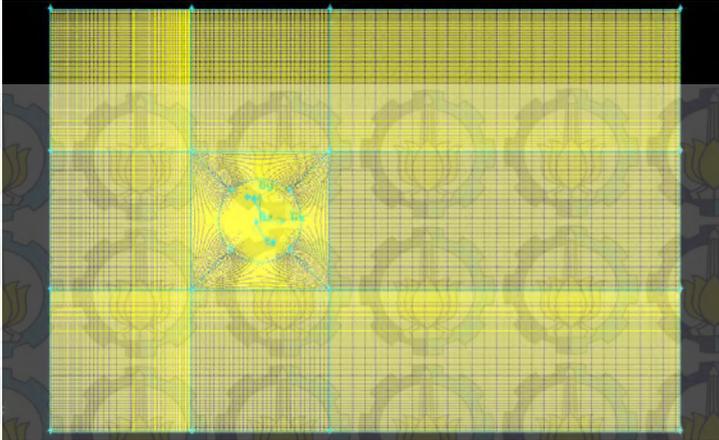
Menentukan dimensi domain dalam pemodelan *numeric* yang nantinya menjadi batasan pada *software fluent 6.3.26*. Berikut adalah gambar domain yang digunakan untuk pemodelan:



Gambar 3.3 Domain pemodelan savonius & boundary batas

c. *Meshing*

Setiap model geometri yang sudah dibuat akan dibagi menjadi elemen-elemen kecil. Bentuk, jumlah dan ukuran elemen yang diperlukan ditentukan sesuai dengan kebutuhan supaya didapatkan hasil yang akurat dan baik. Pada pembuatan *mesh* ini dipilih *Quad Map* pada daerah luar sudu dan dipilih tipe *Quad Pave* untuk daerah disekitar sudu. *Meshing* dilakukan disekitar sudu dan di luar sudu sehingga diharapkan turbin savonius tipe L berada dalam kondisi di dalam sebuah lorong angin.



Gambar 3.4 *Meshing domain*

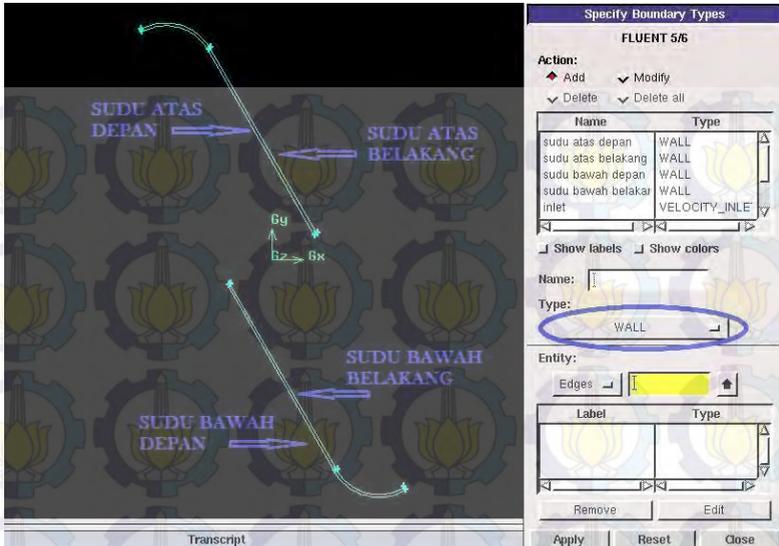
d. Menentukan kualitas *meshing* pada model uji

Kualitas *mesh* yang rendah akan menghasilkan solusi yang kurang akurat dan/atau waktu konvergensi yang lama.

Untuk menjaga kualitas *mesh* yang baik, ada beberapa hal yang harus dilakukan yaitu memperkecil *EquiAngel Skew* tidak lebih dari 0,9 dan meminimalkan perubahan ukuran *mesh* yang ekstrim (Firman Tuakia, 2008).

e. Pemberian kondisi batas

Pemberian kondisi batas model ini dibagi menjadi delapan kondisi batas yaitu sudu atas depan savonius, sudu atas belakang savonius, sudu bawah depan savonius, sudu bawah belakang savonius, *inlet* sebagai daerah *input properties* kecepatan awal, *outlet* sebagai batas analisa *control surface* pada model uji, serta pemberian batas atas dan batas bawah sebagai *wall*. Pada saat memasukkan batas masukan nama pada kolom *name*. Pada kolom *edge* tentukan garis yang ingin dijadikan batas dengan meng-klik garis tersebut hingga berwarna merah muda ataupun merah

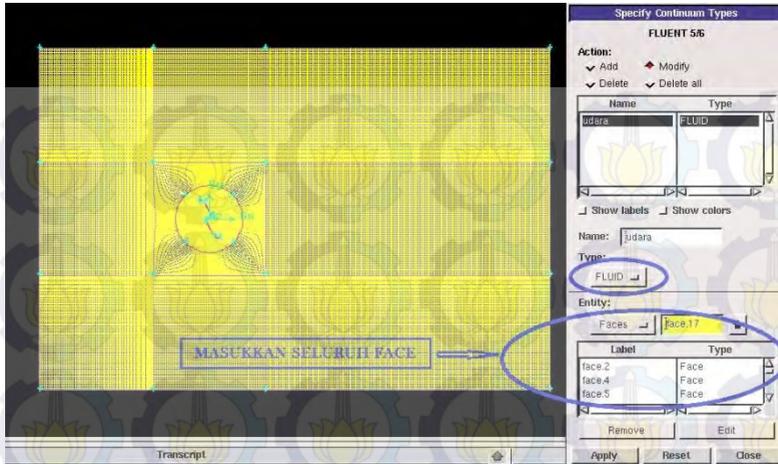


Gambar 3.5 Daerah batas sisi sudu atas dan bawah

Penggunaan tipe *wall* pada batas dinding atas dan bawah serta sisi sudu atas dan bawah karena diharapkan kecepatan aliran fluida dengan arah *streamline* pada batas tersebut nantinya menjadi nol.

f. Pemberian kondisi batas area fluida

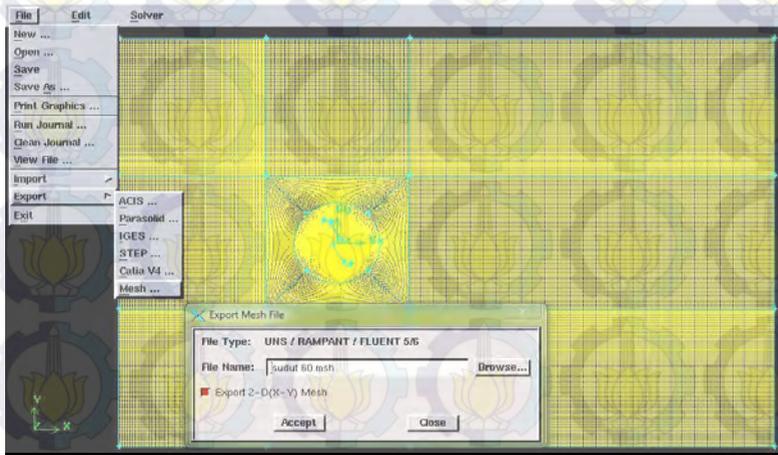
Pendefinisian ini dilakukan karena *meshing* pada semua bidang akan disimulasikan sebagai fluida udara yang mengalir arah kordinat Y positif menuju kordinat Y negatif. Serta akan mempermudah analisa *software Fluent* saat di operasikan model uji tersebut. Berikut merupakan langkah membuat model uji yang mendefinisikan kondisi batas bidang *mesh* sebagai fluida udara.



Gambar 3.6 Daerah batas fluida udara

g. Meng-export file kerja GAMBIT

Langkah ini dimaksudkan agar bentuk geometri *meshing* yang telah dibuat pada *software GAMBIT* dapat dioperasikan oleh *software Fluent*. Untuk itu file tersebut harus di *eksport* ke file type : *.msh*.



Gambar 3.7 Meng-export file ke type : .msh

3.2.3 Parameter Pemodelan

Pada pemodelan karakteristik fluida ini akan menggunakan salah satu *software* analisis komputasi fluida dinamik atau *Computational Fluid Dynamic (CFD)*. *Gambit 2.2.30* dan *Fluent 6.3.26* merupakan salah satu program dari *CFD*.

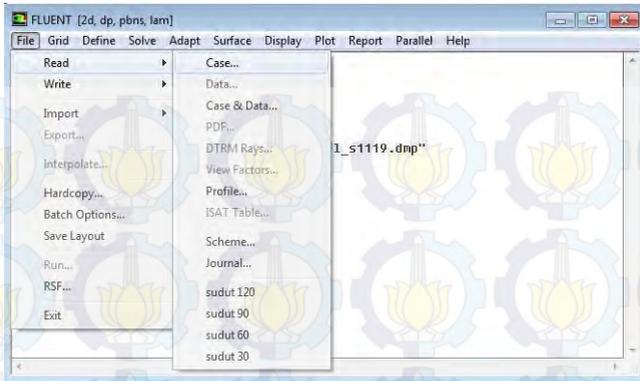


Gambar 3.8 Menu bar pada *start-up software Fluent*

Langkah-langkah pemodelan numerik menggunakan *software Fluent 6.3.26* :

1. *Grid*

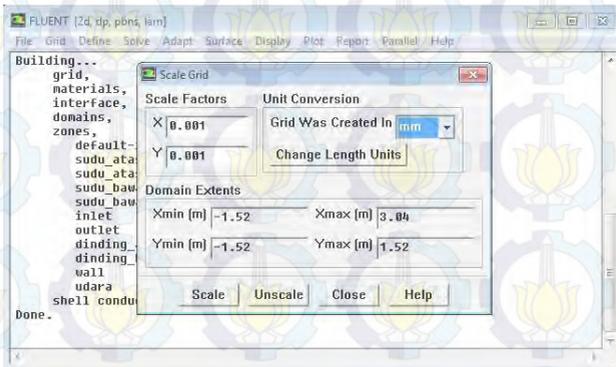
Langkah ini dilakukan dengan mengimport *grid* yang telah dibuat pada *software Gambit 2.2.30*



Gambar 3.9 Meng-import grid pada *Fluent 6.3.26*

2. Scale

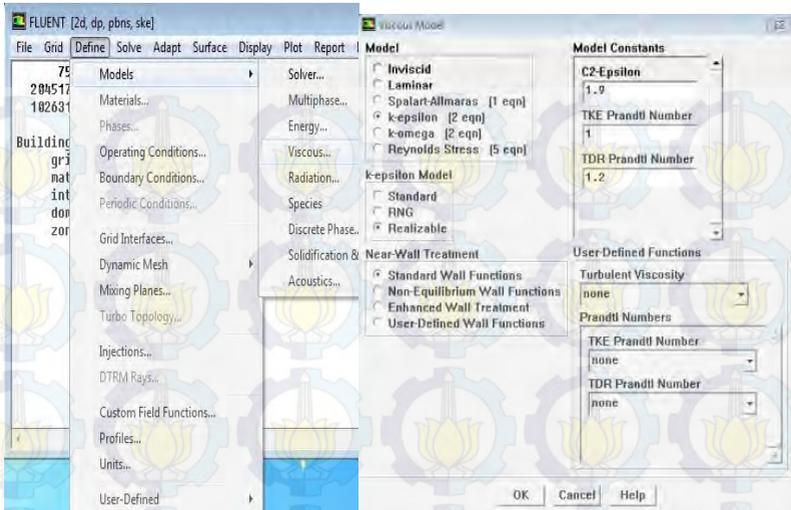
Merubah skala dimensi model dari *Gambit* ke mm.



Gambar 3.10 Merubah skala satuan pada *Fluent*

3. Models

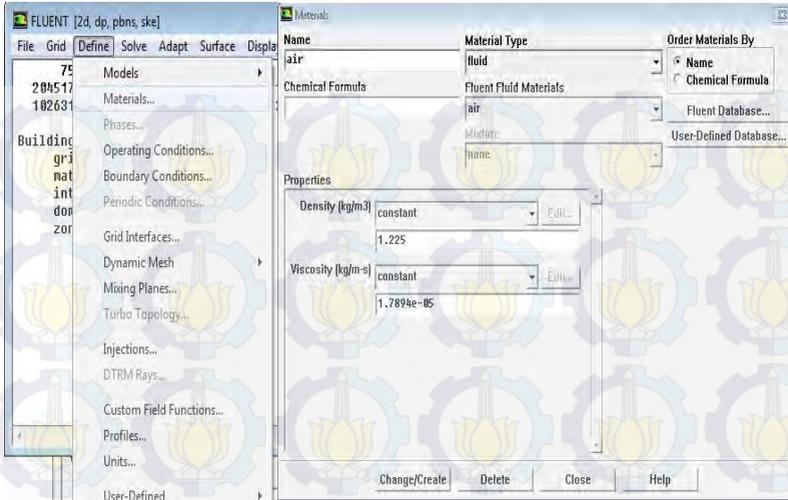
Sebelum menentukan model *viscous*, harus ditentukan terlebih dahulu apakah aliran yang disimulasikan termasuk aliran laminar atau turbulen. Dalam kasus ini digunakan model *k-epsilon* dengan *Realizeable* karena diharapkan hasil yang diperoleh akurat dalam memprediksi laju penyebaran fluida.



Gambar 3.11 Pemilihan *models* pada *Fluent 6.3.26*

4. *Materials*

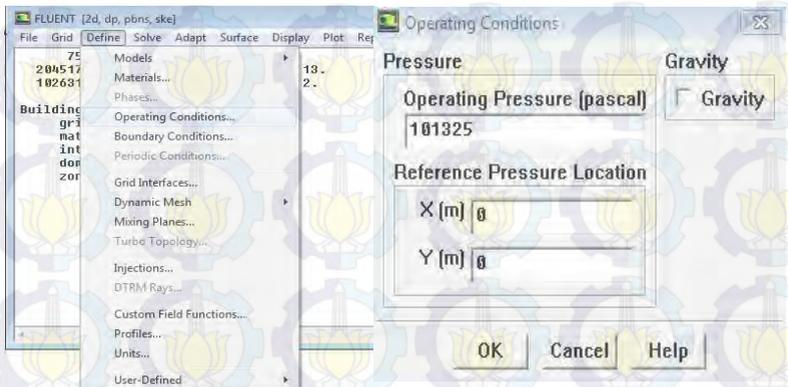
Langkah yang paling penting dalam pemodelan di *Fluent 6.3.26* adalah mendefinisikan sifat fisik material. Pada *form material* terdapat data-data properti dan material yang harus dimasukkan. Dalam hal ini material yang digunakan adalah udara dengan *density* $1,225 \text{ kg/m}^3$ dan *viscosity* $1,7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$.



Gambar 3.12 Penentuan *materials* pada *Fluent* 6.3.26

5. Operating Conditions

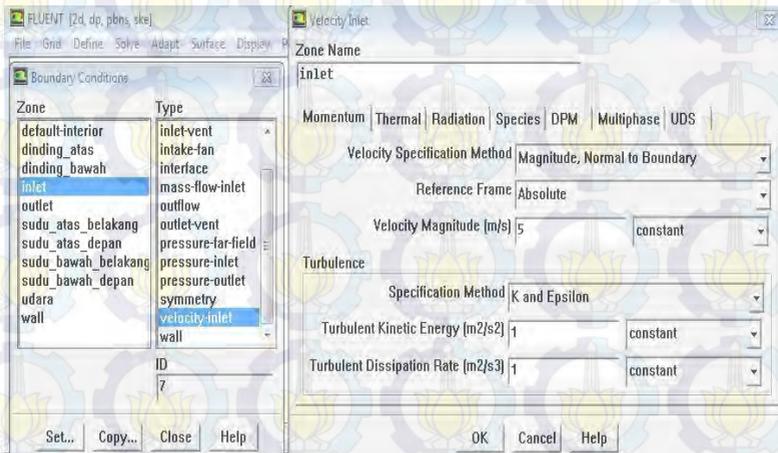
Merupakan perkiraan kondisi yang diberikan pada kondisi pengoperasian STP (Standart, Temperature and Pressure) berupa tekanan di sekitar turbin savonius yaitu 101325 Pa.



Gambar 3.13 Penentuan *operating conditions* pada *Fluent*

6. Boundary Conditions

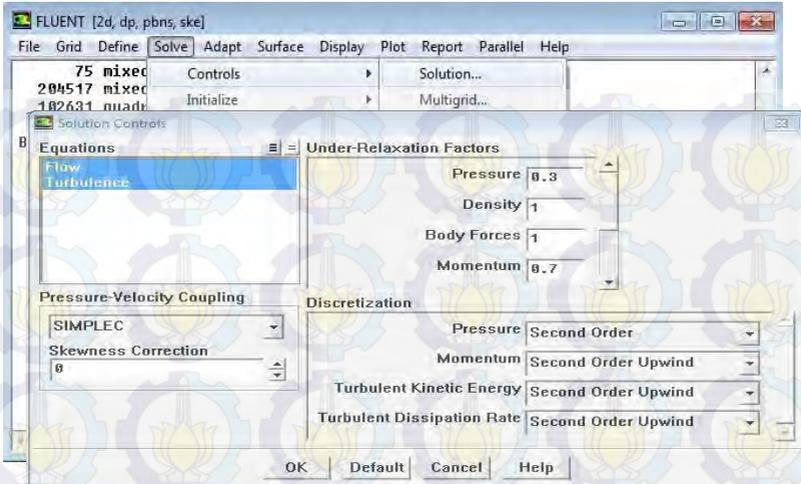
Merupakan penentuan kondisi batas melibatkan beberapa hal, yaitu dengan pemberian beban kecepatan, tekanan maupun pemberian kondisi batas turbulensi pada *inlet*, *outlet* serta kondisi pada *wall*. Pada kondisi batas *inlet* adalah kecepatan sebesar 5 m/s dan pada kondisi batas *outlet* adalah *outflow*. Kondisi pada batas dinding atas dan bawah adalah *wall* termasuk seluruh sudu dari turbin savonius L.



Gambar 3.14 Boundary condition pada Fluent 6.3.26

7. Solution

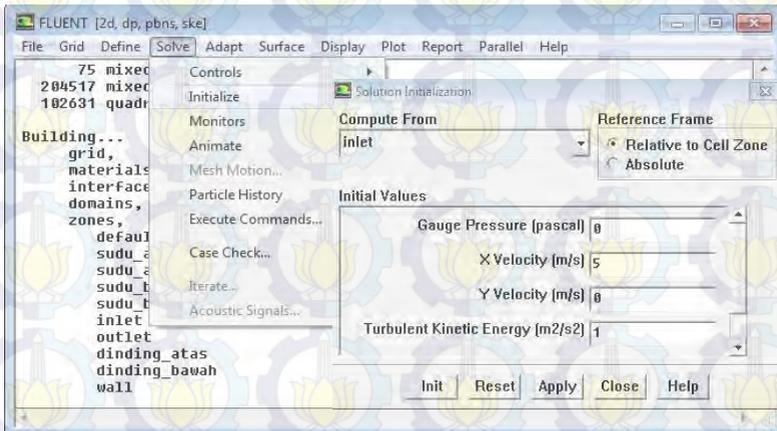
Solusi pada pemodelan ini adalah menggunakan *simplec* (karena dapat mempercepat konvergensi untuk kasus yang sederhana) dan diskritisasinya menggunakan *second order*, *second order upwind*.



Gambar 3.15 Pemilihan *solution* pada *Fluent 6.3.26*

8. *Initialize*

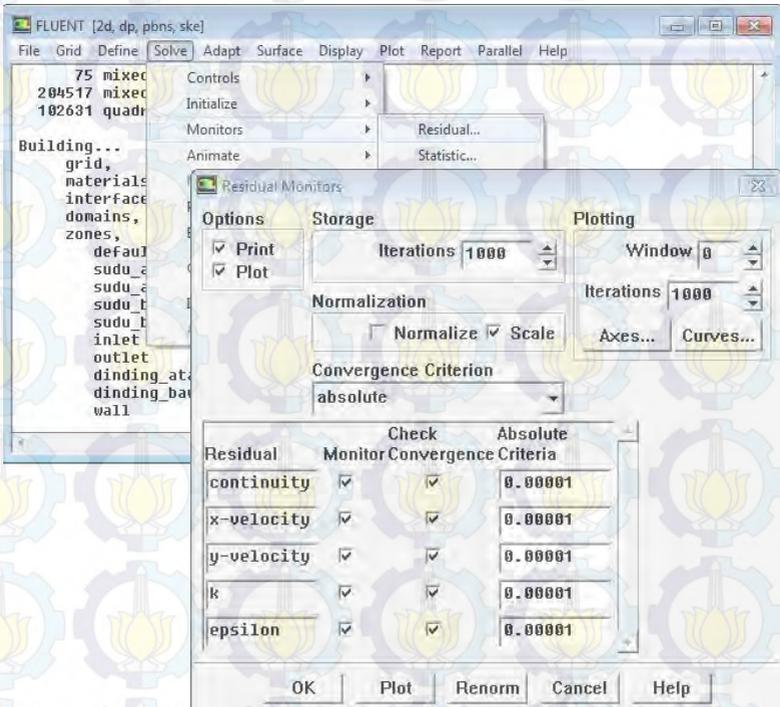
Proses *iterate* memerlukan *initialize* (tebakan awal) sebelum memulai perhitungan agar memudahkan konvergen.



Gambar 3.16 *Initialize* pada *Fluent 6.3.26*

9. Monitor Residual

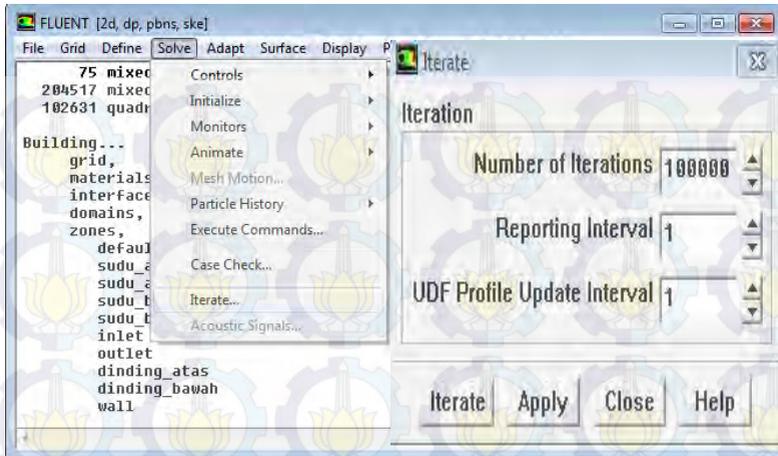
Menentukan kriteria konvergensi, dalam hal ini iterasi hingga mencapai harga 10^{-5} , artinya *convergence criterion* yang diinginkan. *Convergence criterion* ditetapkan sebesar proses iterasi dinyatakan telah konvergen setelah residualnya mencapai harga di bawah 10^{-5} .



Gambar 3.17 Monitor residual pada *Fluent* 6.3.26

10. Iterasi

Menentukan kriteria konvergensi (tebakan awal dari hasil iterasi) pada *Fluent* 6.3.26.



Gambar 3.18 Iterasi pada *Fluent 6.3.26*

3.3 *Processing atau Solving*

Dengan bantuan *software fluent 6.3.26*, kondisi-kondisi yang telah ditetapkan pada saat *preprocessing* akan dihitung (diiterasi). Jika kriteria konvergensi tercapai dengan kriteria konvergensi 10^{-5} , maka tahapan dilanjutkan pada *postprocessing* dan jika tidak tercapai tahapan akan mundur ke belakang pada tahapan pembuatan *meshing*.

3.4 *Postprocessing*

Postprocessing merupakan penampilan hasil serta analisa terhadap hasil yang telah diperoleh berupa data kualitatif dan data kuantitatif. Data kuantitatif berupa distribusi tekanan. Sedangkan data kualitatif berupa visualisasi aliran dengan menampilkan *contours static pressure* dan *pathlines velocity magnitude*.

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini dibahas analisa hasil simulasi numerik, proses pengamatan dilakukan pada karakteristik aliran fluida yang melintasi sudu kincir angin savonius tipe L dengan kemiringan sudut 0° , 30° , 60° , 90° , 120° , dan 150° . Analisa karakteristik aliran fluida dilakukan melalui pemodelan numerik 2D dengan menggunakan *software Fluent 6.3.26*, untuk mendapatkan *pathline* kecepatan, *contour* tekanan, dan plot grafik distribusi tekanan. Sehingga dapat dilakukan analisa tekanan, analisa distribusi kecepatan, dan perhitungan daya.

4.1 Analisa Grid Independensi

Dalam studi numerik menggunakan *software Fluent 6.6.26* diperlukan keakuratan data, baik pada langkah *post processing* maupun *pre processing*-nya. Hal itu dilakukan agar data yang diperoleh dapat divalidasi pada aplikasi sebenarnya. Untuk itu diperlukan langkah grid independensi untuk menentukan tingkat serta struktur grid terbaik agar hasil pemodelan mendekati sebenarnya.

Tabel 4.1 Analisa Grid Independensi tekanan total pada sudut 90°

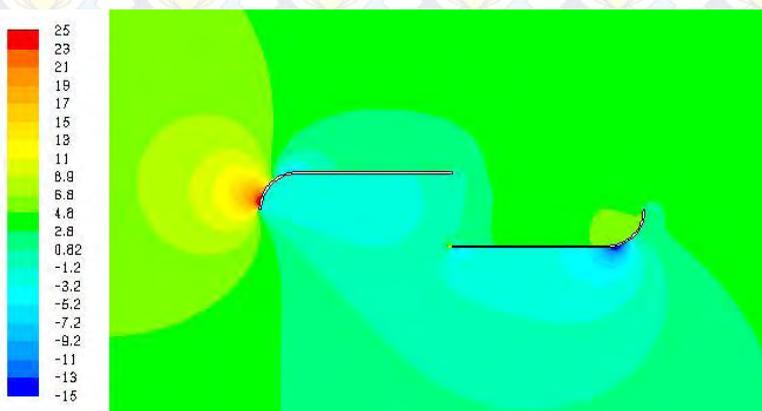
Grid	Faces	Kualitas Mesh	Tekanan Total
A	87323	0,5	12,0244
B	95373	0,5	12,0291
C	102273	0,5	12,0293
D	110623	0,5	12,0123

Tabel 4.1 menunjukkan variasi *meshing* model uji pada pemodelan 2D turbin savonius. *Meshing* A merupakan *meshing* paling renggang dengan jumlah *faces* 87323, sedangkan *meshing* D adalah *meshing* yang paling rapat dengan jumlah *faces* 110623. Dari tabel 4.1 dapat dilihat bahwa pada *mesh* B dan C dengan variasi *meshing* yang berbeda, ternyata menghasilkan nilai tekanan total yang hampir sama. Oleh karena itu, pada variasi *meshing* B dan C dapat disimpulkan bahwa dengan *mesh* yang

berbeda tersebut ternyata memiliki tingkat grid independensi yang dilakukan oleh solusi secara numerik, meskipun kedua variasi *meshing* tersebut memiliki selisih *face* yang cukup jauh, tekanan total yang dihasilkan relatif sama. Selanjutnya akan digunakan variasi *meshing* C untuk melakukan simulasi numerik pada pemodelan *fluent*.

4.2 Analisa Distribusi Tekanan

4.2.1 Savonius Dengan Sudut Kemiringan 0°

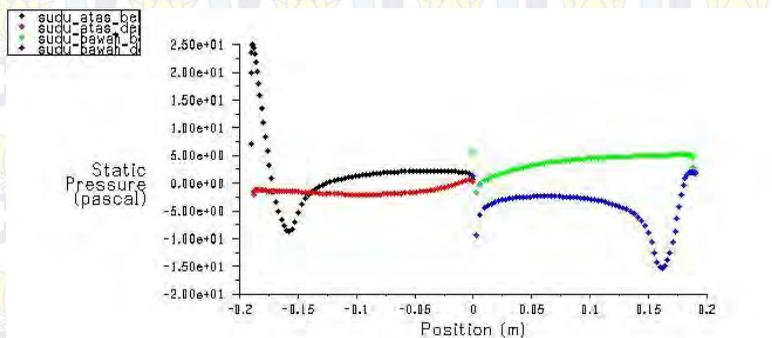


Gambar 4.1 Distribusi tekanan statis pada savonius dengan sudut 0°

Berdasarkan gambar 4.1 aliran udara dari *free stream* mengalir dari kiri menuju sudu savonius dan terjadi tumbukan dengan dinding sudu savonius yang ditandai dengan berbagai warna. Di sisi kiri gambar terdapat kategori warna dan nilai tekanan yang melewati savonius tersebut. Pada saat fluida menumbuk sudu savonius, maka seolah-olah aliran fluida akan berhenti dan tekanan dibagian sudu savonius akan semakin tinggi. Selanjutnya udara yang menumbuk sudu tersebut akan menyebar pada bodi savonius yang akan memberikan tekanan dan membuat sudu savonius akan bergerak. Tekanan yang besar terjadi pada bagian atas belakang dari sudu savonius sebelah atas (*advancing blade*) yang ditandai dengan warna merah. Udara akan menyebar

sepanjang sudu savonius termasuk sudu savonius sebelah bawah (*returning blade*).

Pada gambar 4.1 diperlihatkan bahwa bagian depan *advancing blade* ditandai dengan warna biru muda yang berarti tidak ada tekanan yang melewati bagian depan *advancing blade*. Setelah fluida melewati *advancing blade*, fluida tersebut mengalir ke *returning blade*. Pada bagian depan *returning blade* tekanan fluida sangatlah kecil ditandai dengan warna biru tua.



Gambar 4.2 Plot distribusi tekanan statis pada savonius dengan sudut 0°

Gambar 4.2 merupakan tampilan dari tekanan yang terjadi pada seluruh bagian sudu savonius. Pada sumbu x, data yang diberikan adalah panjang dari sudu savonius sedangkan sumbu y adalah nilai tekanan yang diterima sudu savonius. Sehingga dapat dibaca dengan jelas tekanan yang terjadi pada setiap panjang sudu savonius. Supaya analisa distribusi tekanan pada sudu semakin jelas maka plot distribusi tekanan diatas ditampilkan dalam bentuk tabel yang terlampir dibelakang.

Syarat agar sudu savonius dapat berputar adalah gaya yang diterima harus searah pada kedua sudu atau gaya pada salah satu sudu harus lebih besar ketika gaya yang diterima sudu berlawanan.

Menghitung tekanan total pada sudu :

$$P_{total} = P_1 - P_2$$

Dimana

$$\begin{aligned} P_1 &= P_{\text{atas depan}} + P_{\text{bawah belakang}} \\ &= -1,447 + 3,992 \\ &= 2,545 \text{ Pa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_2 &= P_{\text{atas belakang}} + P_{\text{bawah depan}} \\ &= 3,464 + (-3,917) \\ &= -0,453 \text{ Pa} \end{aligned}$$

Sehingga

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} &= P_1 - P_2 \\ &= 2,545 - (-0,453) \\ &= 2,998 \text{ Pa} \end{aligned}$$

Untuk mengetahui gaya yang dihasilkan dapat diperoleh dari tekanan total dikalikan frontal area dari sudu turbin yang tegak lurus terhadap aliran udara :

$$\begin{aligned} F_R &= P_{\text{total}} \times A \\ &= 2,998 \text{ Pa} \times 0,37 \text{ m} \times 1 \text{ m} \\ &= 1,109 \text{ N} \end{aligned}$$

Sebelum menghitung torsi maka harus ditentukan titik tangkap gaya yang terjadi melalui :

$$\begin{aligned} y' &= \frac{1}{F_R} \int_A y p dA \\ &= \frac{1}{F_R} \int_0^L y p z dy \\ &= \frac{p.z}{F_R} \int_0^L y dy \\ &= \frac{p.z}{F_R} \left[\frac{1}{2} y^2 \right]_0^L \\ y' &= \frac{p.z}{F_R} \left[\frac{1}{2} L^2 \right] \quad \text{dimana } L = 0,37 \text{ m} \end{aligned}$$

Maka,

$$l = y' = \frac{2,998 \text{ Pa} \times 1 \text{ m}}{1,109 \text{ N}} \left[\frac{1}{2} 0,37^2 \text{ m}^2 \right]$$
$$= 0,185 \text{ m}$$

Untuk dapat mengetahui torsi yang dihasilkan oleh kincir angin dapat dihasilkan pada saat pertama kali berputar yaitu melalui:

$$\tau = F \sin \theta \times l$$
$$= 1,109 \text{ N} \times \sin 0^\circ \times 0,185 \text{ m}$$
$$= 0 \text{ Nm}$$

Putaran yang dihasilkan kincir angin adalah:

$$\omega = \frac{v}{r}$$
$$\omega = \frac{5}{0,19} = \mathbf{26,316 \text{ rad/s}}$$
$$\omega = \frac{2 \text{ n}}{60}$$
$$n = \frac{60 \omega}{2} = \frac{60 \times 26,316}{2}$$
$$n = \mathbf{251 \text{ rpm}}$$

Daya maksimum yang dapat dihasilkan oleh kincir angin yaitu:

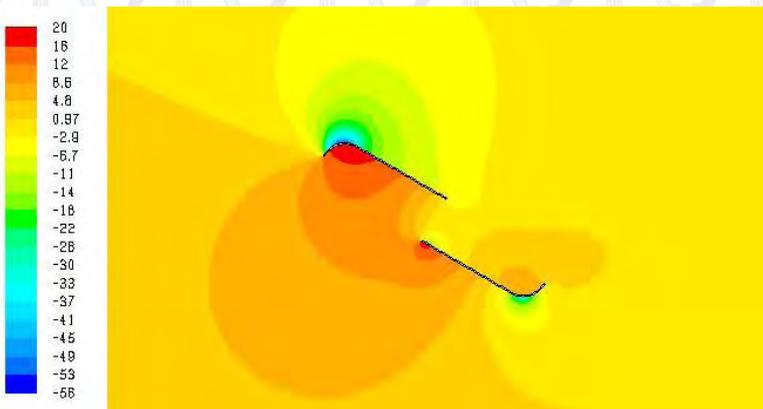
$$W \text{ maks} = \tau \times \omega$$
$$= 0 \text{ Nm} \times 26,316 \text{ rad/s}$$
$$= \mathbf{0 \text{ watt}}$$

Sehingga dapat dijelaskan bahwa kincir angin savonius pada posisi sudut 0° diatas dapat diperoleh tekanan total sebesar 2,998 Pa. Dari tekanan di setiap sudu yang dihasilkan lalu menghasilkan gaya total sebesar 1,109 N dan menghasilkan torsi sebesar 0 Nm. Kecepatan sudut dari turbin adalah 26,316 rad/s maka dapat menghasilkan putaran sebanyak 251 rpm. Dari torsi

dan kecepatan sudut yang sudah dihitung didapatkan daya sebesar 0 watt.

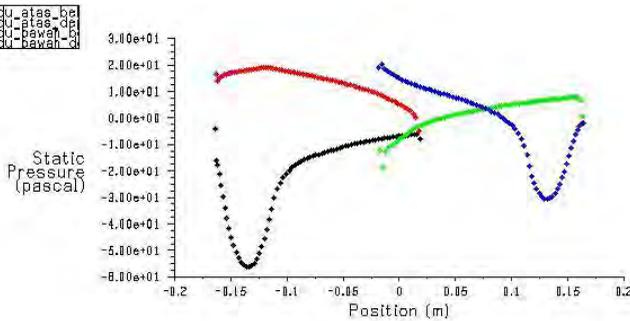
4.2.2 Savonius dengan sudut kemiringan 30°

Berdasarkan gambar 4.3 aliran udara dari *free stream* mengalir dari kiri menuju sudu savonius dan terjadi tumbukan dengan bagian depan sudu, sehingga aliran udara mengalami perlambatan. Aliran mengalami stagnasi pada daerah atas depan *advancing blade* dan daerah atas depan *returning blade*, pada daerah tersebut memiliki tekanan yang paling tinggi ditandai dengan warna merah. Penumpukan aliran fluida paling banyak terjadi pada *advancing blade* bagian depan sehingga memiliki tekanan yang paling besar dibandingkan pada *advancing blade* bagian belakang yang memiliki tekanan yang sangat kecil ditandai dengan warna biru tua.



Gambar 4.3 Distribusi tekanan statis pada savonius dengan sudut 30°

Fluida udara akan menyebar sepanjang sudu termasuk *returning blade*, pada *returning blade* tekanan di bagian belakang lebih besar daripada bagian depan sehingga tidak terdapat gaya yang dapat melawan putaran turbin. Kondisi tersebut membantu turbin mendapatkan gaya yang besar untuk berputar.



Gambar 4.4 Plot distribusi tekanan statis pada savonius dengan sudut 30°

Gambar 4.4 merupakan tampilan dari tekanan yang terjadi pada seluruh bagian sudu savonius. Pada sumbu x, data yang diberikan adalah panjang dari sudu savonius sedangkan sumbu y adalah nilai tekanan yang diterima sudu savonius. Sehingga dapat dibaca dengan jelas tekanan yang terjadi pada setiap panjang sudu savonius. Supaya analisa distribusi tekanan pada sudu semakin jelas maka plot distribusi tekanan diatas ditampilkan dalam bentuk tabel yang terlampir dibelakang.

Syarat agar sudu savonius dapat berputar adalah gaya yang diterima harus searah pada kedua sudu atau gaya pada salah satu sudu harus lebih besar ketika gaya yang diterima sudu berlawanan.

Menghitung tekanan total pada sudu :

$$P_{\text{total}} = P_1 - P_2$$

Dimana

$$\begin{aligned} P_1 &= P_{\text{atas depan}} + P_{\text{bawah belakang}} \\ &= 13,583 + 1,730 \\ &= 15,313 \text{ Pa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_2 &= P_{\text{atas belakang}} + P_{\text{bawah depan}} \\
 &= -22,154 + (-1,433) \\
 &= -23,587 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

Sehingga

$$\begin{aligned}
 P_{\text{total}} &= P_1 - P_2 \\
 &= 15,313 - (-23,587) \\
 &= 38,900 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

Untuk mengetahui gaya yang dihasilkan dapat diperoleh dari tekanan total dikalikan frontal area dari sudu turbin yang tegak lurus terhadap aliran udara :

$$\begin{aligned}
 F_R &= P_{\text{total}} \times A \\
 &= 38,900 \text{ Pa} \times 0,095 \text{ m} \times 1 \text{ m} \\
 &= 3,695 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Sebelum menghitung torsi maka harus ditentukan titik tangkap gaya yang terjadi melalui :

$$\begin{aligned}
 y' &= \frac{1}{F_R} \int_A y p dA \\
 &= \frac{1}{F_R} \int_0^L y p z dy \\
 &= \frac{p \cdot z}{F_R} \int_0^L y dy \\
 &= \frac{p \cdot z}{F_R} \left[\frac{1}{2} y^2 \right]_0^L \\
 y' &= \frac{p \cdot z}{F_R} \left[\frac{1}{2} L^2 \right] \quad \text{dimana } L = 0,19 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Maka,

$$\begin{aligned}
 l = y' &= \frac{38,900 \text{ Pa} \times 1 \text{ m}}{3,695 \text{ N}} \left[\frac{1}{2} 0,19^2 \text{ m}^2 \right] \\
 &= 0,19 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Untuk dapat mengetahui torsi yang dihasilkan oleh kincir angin dapat dihasilkan pada saat pertama kali berputar yaitu melalui:

$$\begin{aligned}\tau &= F \sin \theta \times l \\ &= 3,695 \text{ N} \times \sin 30^\circ \times 0,19 \text{ m} \\ &= 0,351 \text{ Nm}\end{aligned}$$

Putaran yang dihasilkan kincir angin adalah:

$$\begin{aligned}\omega &= \frac{v}{r} \\ \omega &= \frac{5}{0,19} = \mathbf{26,316 \text{ rad/s}} \\ \omega &= \frac{2 \pi n}{60} \\ n &= \frac{60 \omega}{2} = \frac{60 \times 26,316}{2} \\ n &= \mathbf{251 \text{ rpm}}\end{aligned}$$

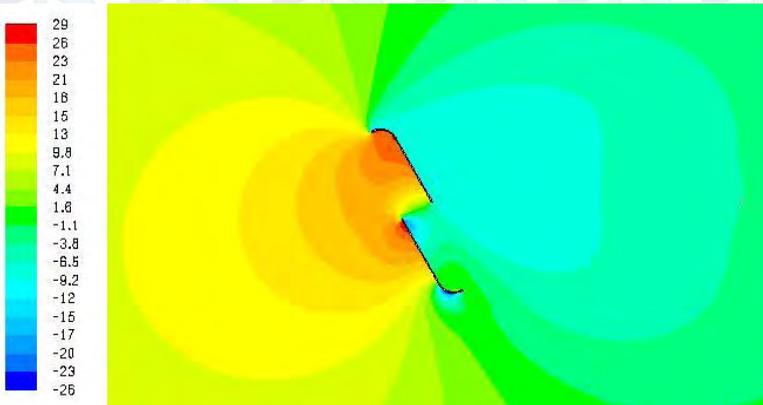
Daya maksimum yang dapat dihasilkan oleh kincir angin yaitu:

$$\begin{aligned}W_{\text{maks}} &= \tau \times \omega \\ &= 0,351 \text{ Nm} \times 26,316 \text{ rad/s} \\ &= \mathbf{9,237 \text{ watt}}\end{aligned}$$

Sehingga dapat dijelaskan bahwa kincir angin savonius pada posisi sudut 30° diatas dapat diperoleh tekanan total sebesar 38,900 Pa. Dari tekanan di setiap sudu yang dihasilkan lalu menghasilkan gaya total sebesar 3,695 N dan menghasilkan torsi sebesar 0,351 Nm. Kecepatan sudut dari turbin adalah 26,316 rad/s maka dapat menghasilkan putaran sebanyak 251 rpm. Dari torsi dan kecepatan sudut yang sudah dihitung didapatkan daya sebesar 9,237 watt.

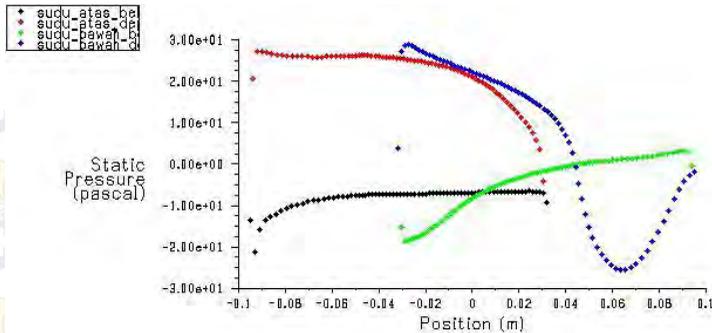
4.2.3 Savonius Dengan Sudut Kemiringan 60°

Berdasarkan gambar 4.5 aliran udara dari *free stream* mengalir dari kiri menuju sudu savonius dan terjadi tumbukan dengan bagian depan sudu, sehingga aliran udara mengalami perlambatan. Aliran mengalami stagnasi pada daerah atas depan *advancing blade* dan daerah atas depan *returning blade*, pada daerah tersebut memiliki tekanan yang paling tinggi ditandai dengan warna merah. Penumpukan aliran fluida paling banyak terjadi pada *advancing blade* bagian depan sehingga memiliki tekanan yang paling besar dibandingkan pada *advancing blade* bagian belakang yang memiliki tekanan yang sangat kecil ditandai dengan warna biru. Fluida udara akan menyebar sepanjang sudu termasuk *returning blade*, pada *returning blade* tekanan di bagian depan lebih besar daripada bagian belakang sehingga terdapat gaya yang dapat melawan putaran turbin.



Gambar 4.5 Distribusi tekanan statis pada savonius dengan sudut 60°

Kondisi tersebut membuat gaya turbin yang besar dari *advancing blade* berkurang karena adanya gaya yang melawan putaran dari *returning blade*.



Gambar 4.6 Plot distribusi tekanan statis pada savonius dengan sudut 60°

Gambar 4.6 merupakan tampilan dari tekanan yang terjadi pada seluruh bagian sudu savonius. Pada sumbu x, data yang diberikan adalah panjang dari sudu savonius sedangkan sumbu y adalah nilai tekanan yang diterima sudu savonius. Sehingga dapat dibaca dengan jelas tekanan yang terjadi pada setiap panjang sudu savonius. Supaya analisa distribusi tekanan pada sudu semakin jelas maka plot distribusi tekanan diatas ditampilkan dalam bentuk tabel yang terlampir dibelakang.

Syarat agar sudu savonius dapat berputar adalah gaya yang diterima harus searah pada kedua sudu atau gaya pada salah satu sudu harus lebih besar ketika gaya yang diterima sudu berlawanan.

Menghitung tekanan total pada sudu :

$$P_{\text{total}} = P_1 - P_2$$

Dimana

$$\begin{aligned} P_1 &= P_{\text{atas depan}} + P_{\text{bawah belakang}} \\ &= 21,989 + (-4,616) \\ &= 17,373 \text{ Pa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_2 &= P_{\text{atas belakang}} + P_{\text{bawah depan}} \\
 &= -8,026 + 7,514 \\
 &= -0,512 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

Sehingga

$$\begin{aligned}
 P_{\text{total}} &= P_1 - P_2 \\
 &= 17,373 - (-0,512) \\
 &= 17,885 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

Untuk mengetahui gaya yang dihasilkan dapat diperoleh dari tekanan total dikalikan frontal area dari sudu turbin yang tegak lurus terhadap aliran udara :

$$\begin{aligned}
 F_R &= P_{\text{total}} \times A \\
 &= 17,885 \text{ Pa} \times 0,164 \text{ m} \times 1 \text{ m} \\
 &= 2,933 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Sebelum menghitung torsi maka harus ditentukan titik tangkap gaya yang terjadi melalui :

$$\begin{aligned}
 y' &= \frac{1}{F_R} \int_A y p dA \\
 &= \frac{1}{F_R} \int_0^L y p z dy \\
 &= \frac{p \cdot z}{F_R} \int_0^L y dy \\
 &= \frac{p \cdot z}{F_R} \left[\frac{1}{2} y^2 \right]_0^L \\
 y' &= \frac{p \cdot z}{F_R} \left[\frac{1}{2} L^2 \right] \quad \text{dimana } L = 0,19 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Maka,

$$\begin{aligned}
 l = y' &= \frac{17,885 \text{ Pa} \times 1 \text{ m}}{2,933 \text{ N}} \left[\frac{1}{2} 0,19^2 \text{ m}^2 \right] \\
 &= 0,11 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Untuk dapat mengetahui torsi yang dihasilkan oleh kincir angin dapat dihasilkan pada saat pertama kali berputar yaitu melalui:

$$\begin{aligned}\tau &= F \sin \theta \times l \\ &= 2,933 \text{ N} \times \sin 60^\circ \times 0,11 \text{ m} \\ &= 0,279 \text{ Nm}\end{aligned}$$

Putaran yang dihasilkan kincir angin adalah:

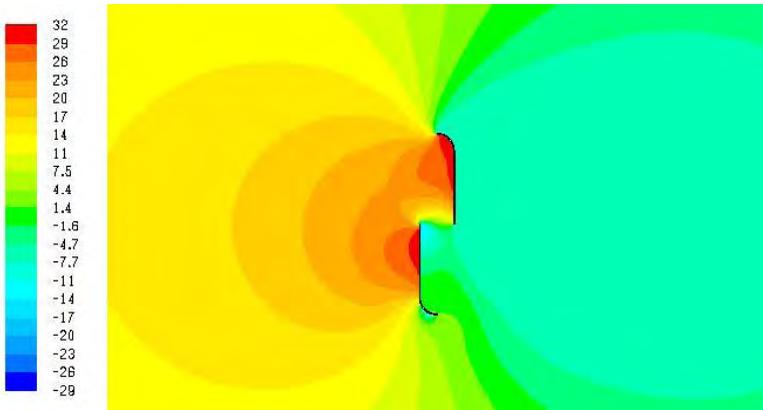
$$\begin{aligned}\omega &= \frac{v}{r} \\ \omega &= \frac{5}{0,19} = \mathbf{26,316 \text{ rad/s}} \\ \omega &= \frac{2 \text{ n}}{60} \\ n &= \frac{60 \omega}{2} = \frac{60 \times 26,316}{2} \\ n &= \mathbf{251 \text{ rpm}}\end{aligned}$$

Daya maksimum yang dapat dihasilkan oleh kincir angin yaitu:

$$\begin{aligned}W \text{ maks} &= \tau \times \omega \\ &= 0,279 \text{ Nm} \times 26,316 \text{ rad/s} \\ &= \mathbf{7,342 \text{ watt}}\end{aligned}$$

Sehingga dapat dijelaskan bahwa kincir angin savonius pada posisi sudut 60° diatas dapat diperoleh tekanan total sebesar 17,885 Pa. Dari tekanan di setiap sudu yang dihasilkan lalu menghasilkan gaya total sebesar 2,933 N dan menghasilkan torsi sebesar 0,279 Nm. Kecepatan sudut dari turbin adalah 26,316 rad/s maka dapat menghasilkan putaran sebanyak 251 rpm. Dari torsi dan kecepatan sudut yang sudah dihitung didapatkan daya sebesar 7,342 watt.

4.2.4 Savonius Dengan Sudut Kemiringan 90°

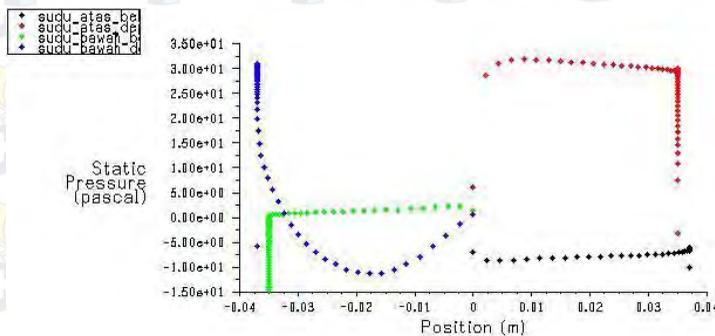


Gambar 4.7 Distribusi tekanan statis pada savonius dengan sudut 90°

Berdasarkan gambar 4.7 aliran udara dari *free stream* mengalir dari kiri menuju sudu savonius dan terjadi tumbukan dengan bagian depan sudu, sehingga aliran udara mengalami perlambatan. Aliran mengalami stagnasi pada daerah depan *advancing blade* dan daerah depan *returning blade*, pada daerah tersebut memiliki tekanan yang paling tinggi ditandai dengan warna merah. Penumpukan aliran fluida paling banyak terjadi pada *advancing blade* bagian depan sehingga memiliki tekanan yang paling besar dibandingkan pada *advancing blade* bagian belakang yang memiliki tekanan yang lebih kecil ditandai dengan warna biru muda. Begitu juga pada *returning blade*, penumpukan aliran fluida paling banyak terjadi pada *returning blade* bagian depan. Secara visualisasi dapat dilihat bahwa warna merah yang terdapat pada bagian depan *advancing blade* dan bagian depan *returning blade* hampir sama, dapat diartikan bahwa tekanan bagian depan *advancing* dan *returning blade* juga hampir sama. Pada *returning blade* tekanan di bagian depan lebih besar daripada bagian belakang sehingga terdapat gaya yang dapat melawan putaran turbin. Kondisi tersebut membuat gaya turbin

yang besar dari *advancing blade* berkurang banyak karena adanya gaya yang juga besar melawan putaran dari *returning blade*.

Gambar 4.8 merupakan tampilan dari tekanan yang terjadi pada seluruh bagian sudu savonius. Pada sumbu x, data yang diberikan adalah panjang dari sudu savonius sedangkan sumbu y adalah nilai tekanan yang diterima sudu savonius. Sehingga dapat dibaca dengan jelas tekanan yang terjadi pada setiap panjang sudu savonius. Supaya analisa distribusi tekanan pada sudu semakin jelas maka plot distribusi tekanan di bawah ditampilkan dalam bentuk tabel yang terlampir dibelakang.



Gambar 4.8 Plot distribusi tekanan statis pada savonius dengan sudut 90°

Syarat agar sudu savonius dapat berputar adalah gaya yang diterima harus searah pada kedua sudu atau gaya pada salah satu sudu harus lebih besar ketika gaya yang diterima sudu berlawanan.

Menghitung tekanan total pada sudu :

$$P_{\text{total}} = P_1 - P_2$$

Dimana

$$\begin{aligned} P_1 &= P_{\text{atas depan}} + P_{\text{bawah belakang}} \\ &= 26,796 + (-3,258) \\ &= 23,538 \text{ Pa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_2 &= P_{\text{atas belakang}} + P_{\text{bawah depan}} \\
 &= -6,668 + 18,177 \\
 &= 11,509 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

Sehingga

$$\begin{aligned}
 P_{\text{total}} &= P_1 - P_2 \\
 &= 23,538 - 11,509 \\
 &= 12,029 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

Untuk mengetahui gaya yang dihasilkan dapat diperoleh dari tekanan total dikalikan frontal area dari sudu turbin yang tegak lurus terhadap aliran udara :

$$\begin{aligned}
 F_R &= P_{\text{total}} \times A \\
 &= 12,029 \text{ Pa} \times 0,19 \text{ m} \times 1 \text{ m} \\
 &= 2,285 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Sebelum menghitung torsi maka harus ditentukan titik tangkap gaya yang terjadi melalui :

$$\begin{aligned}
 y' &= \frac{1}{F_R} \int_A y p dA \\
 &= \frac{1}{F_R} \int_0^L y p z dy \\
 &= \frac{p \cdot z}{F_R} \int_0^L y dy \\
 &= \frac{p \cdot z}{F_R} \left[\frac{1}{2} y^2 \right]_0^L \\
 y' &= \frac{p \cdot z}{F_R} \left[\frac{1}{2} L^2 \right] \quad \text{dimana } L = 0,19 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Maka,

$$\begin{aligned}
 l = y' &= \frac{12,029 \text{ Pa} \times 1 \text{ m}}{2,285 \text{ N}} \left[\frac{1}{2} 0,19^2 \text{ m}^2 \right] \\
 &= 0,095 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Untuk dapat mengetahui torsi yang dihasilkan oleh kincir angin dapat dihasilkan pada saat pertama kali berputar yaitu melalui:

$$\begin{aligned}\tau &= F \sin \theta \times l \\ &= 2,285 \text{ N} \times \sin 90^\circ \times 0,095 \text{ m} \\ &= 0,217 \text{ Nm}\end{aligned}$$

Putaran yang dihasilkan kincir angin adalah:

$$\begin{aligned}\omega &= \frac{v}{r} \\ \omega &= \frac{5}{0,19} = \mathbf{26,316 \text{ rad/s}} \\ \omega &= \frac{2 \pi n}{60} \\ n &= \frac{60 \omega}{2} = \frac{60 \times 26,316}{2} \\ n &= \mathbf{251 \text{ rpm}}\end{aligned}$$

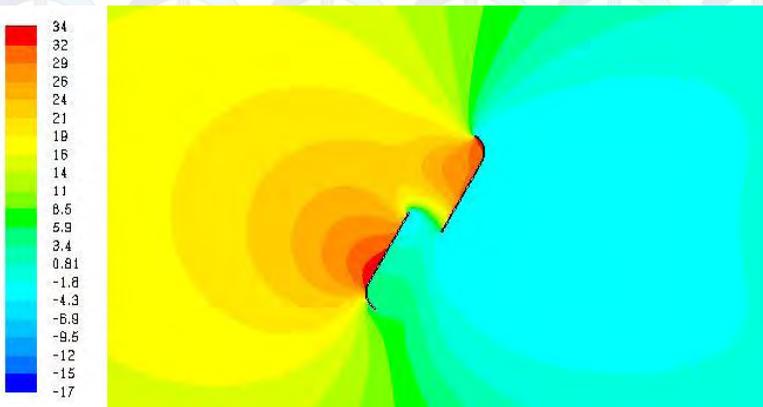
Daya maksimum yang dapat dihasilkan oleh kincir angin yaitu:

$$\begin{aligned}W \text{ maks} &= \tau \times \omega \\ &= 0,217 \text{ Nm} \times 26,316 \text{ rad/s} \\ &= \mathbf{5,711 \text{ watt}}\end{aligned}$$

Sehingga dapat dijelaskan bahwa kincir angin savonius pada posisi sudut 90° diatas dapat diperoleh tekanan total sebesar 12,029 Pa. Dari tekanan di setiap sudu yang dihasilkan lalu menghasilkan gaya total sebesar 2,285 N dan menghasilkan torsi sebesar 0,217 Nm. Kecepatan sudut dari turbin adalah 26,316 rad/s maka dapat menghasilkan putaran sebanyak 251 rpm. Dari torsi dan kecepatan sudut yang sudah dihitung didapatkan daya sebesar 5,711 watt.

4.2.5 Savonius Dengan Sudut Kemiringan 120°

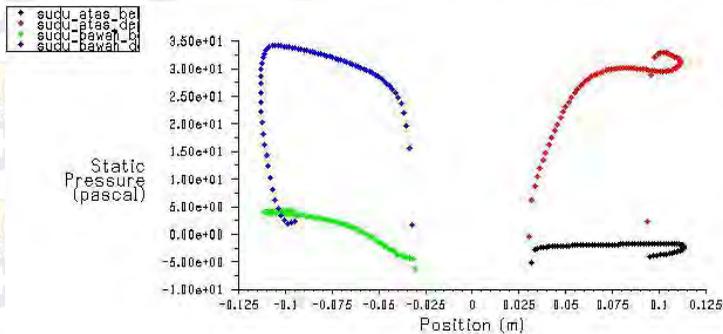
Berdasarkan gambar 4.9 aliran udara dari *free stream* mengalir dari kiri menuju sudu savonius dan terjadi tumbukan dengan bagian depan sudu, sehingga aliran udara mengalami perlambatan. Aliran mengalami stagnasi pada daerah depan *advancing blade* dan daerah depan *returning blade*, pada daerah tersebut memiliki tekanan yang paling tinggi ditandai dengan warna merah. Penumpukan aliran fluida paling banyak terjadi pada *advancing blade* bagian depan sehingga memiliki tekanan yang paling besar dibandingkan pada *advancing blade* bagian belakang yang memiliki tekanan yang lebih kecil ditandai dengan warna biru muda. Begitu juga pada *returning blade*, tekanan aliran fluida paling banyak terjadi pada *returning blade* bagian depan sedangkan *returning blade* bagian belakang memiliki tekanan yang lebih kecil.



Gambar 4.9 Distribusi tekanan statis pada savonius dengan sudut 120°

Secara visualisasi dapat dilihat bahwa distribusi tekanan statis yang terjadi pada savonius dengan sudut 120° mirip dengan distribusi tekanan statis yang terjadi pada savonius dengan sudut 90° dimana warna merah yang terdapat pada bagian depan *advancing blade* dan bagian depan *returning blade* hampir sama, dapat diartikan bahwa tekanan bagian depan *advancing* dan

returning blade juga hampir sama. Pada *returning blade* tekanan di bagian depan lebih besar daripada bagian belakang sehingga terdapat gaya yang dapat melawan putaran turbin. Kondisi tersebut membuat gaya turbin yang besar dari *advancing blade* berkurang banyak karena adanya gaya yang juga besar melawan putaran dari *returning blade*.



Gambar 4.10 Plot distribusi tekanan statis pada savonius dengan sudut 120°

Gambar 4.10 merupakan tampilan dari tekanan yang terjadi pada seluruh bagian sudu savonius. Pada sumbu x, data yang diberikan adalah panjang dari sudu savonius sedangkan sumbu y adalah nilai tekanan yang diterima sudu savonius. Sehingga dapat dibaca dengan jelas tekanan yang terjadi pada setiap panjang sudu savonius. Supaya analisa distribusi tekanan pada sudu semakin jelas maka plot distribusi tekanan di atas ditampilkan dalam bentuk tabel yang terlampir dibelakang.

Syarat agar sudu savonius dapat berputar adalah gaya yang diterima harus searah pada kedua sudu atau gaya pada salah satu sudu harus lebih besar ketika gaya yang diterima sudu berlawanan.

Menghitung tekanan total pada sudu :

$$P_{\text{total}} = P_1 - P_2$$

Dimana

$$\begin{aligned} P_1 &= P_{\text{atas depan}} + P_{\text{bawah belakang}} \\ &= 26,763 + 1,834 \\ &= 28,597 \text{ Pa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_2 &= P_{\text{atas belakang}} + P_{\text{bawah depan}} \\ &= -2,276 + 25,862 \\ &= 23,586 \text{ Pa} \end{aligned}$$

Sehingga

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} &= P_1 - P_2 \\ &= 28,597 - 23,586 \\ &= 5,010 \text{ Pa} \end{aligned}$$

Untuk mengetahui gaya yang dihasilkan dapat diperoleh dari tekanan total dikalikan frontal area dari sudu turbin yang tegak lurus terhadap aliran udara :

$$\begin{aligned} F_R &= P_{\text{total}} \times A \\ &= 5,010 \text{ Pa} \times 0,164 \text{ m} \times 1 \text{ m} \\ &= 0,822 \text{ N} \end{aligned}$$

Sebelum menghitung torsi maka harus ditentukan titik tangkap gaya yang terjadi melalui :

$$\begin{aligned} y' &= \frac{1}{F_R} \int_A y p dA \\ &= \frac{1}{F_R} \int_0^L y p z dy \\ &= \frac{p \cdot z}{F_R} \int_0^L y dy \\ &= \frac{p \cdot z}{F_R} \left[\frac{1}{2} y^2 \right]_0^L \\ y' &= \frac{p \cdot z}{F_R} \left[\frac{1}{2} L^2 \right] \quad \text{dimana } L = 0,19 \text{ m} \end{aligned}$$

Maka,

$$l = y' = \frac{5,010 \text{ Pa} \times 1 \text{ m}}{0,822 \text{ N}} \left[\frac{1}{2} 0,19^2 \text{ m}^2 \right]$$
$$= 0,11 \text{ m}$$

Untuk dapat mengetahui torsi yang dihasilkan oleh kincir angin dapat dihasilkan pada saat pertama kali berputar yaitu melalui:

$$\tau = F \sin \theta \times l$$
$$= 0,822 \text{ N} \times \sin 60^\circ \times 0,11 \text{ m}$$
$$= 0,078 \text{ Nm}$$

Putaran yang dihasilkan kincir angin adalah:

$$\omega = \frac{v}{r}$$
$$\omega = \frac{5}{0,19} = \mathbf{26,316 \text{ rad/s}}$$

$$\omega = \frac{2 \text{ n}}{60}$$
$$n = \frac{60 \omega}{2} = \frac{60 \times 26,316}{2}$$
$$n = \mathbf{251 \text{ rpm}}$$

Daya maksimum yang dapat dihasilkan oleh kincir angin yaitu:

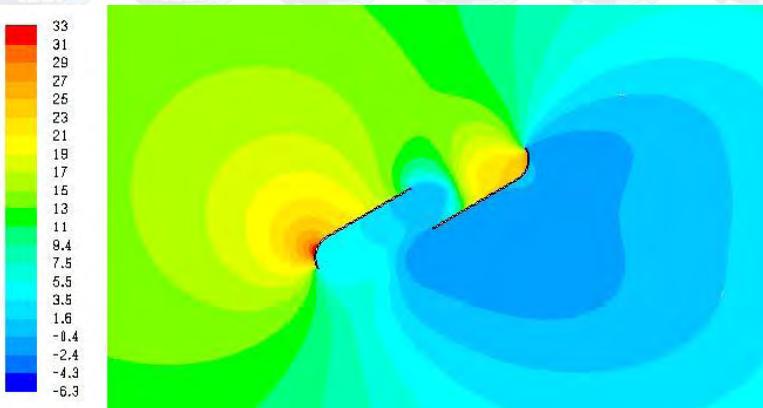
$$W \text{ maks} = \tau \times \omega$$
$$= 0,078 \text{ Nm} \times 26,316 \text{ rad/s}$$
$$= \mathbf{2,053 \text{ watt}}$$

Sehingga dapat dijelaskan bahwa kincir angin savonius pada posisi sudut 120° diatas dapat diperoleh tekanan total sebesar 5,010 Pa. Dari tekanan di setiap sudu yang dihasilkan lalu menghasilkan gaya total sebesar 0,822 N dan menghasilkan torsi sebesar 0,078 Nm. Kecepatan sudut dari turbin adalah 26,316 rad/s maka dapat menghasilkan putaran sebanyak 251 rpm. Dari

torsi dan kecepatan sudut yang sudah dihitung didapatkan daya sebesar 2,053 watt.

4.2.6 Savonius Dengan Sudut Kemiringan 150°

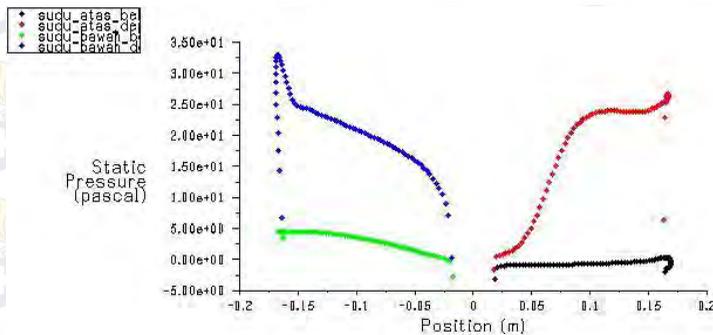
Berdasarkan gambar 4.11 aliran udara dari *free stream* mengalir dari kiri menuju sudu savonius dan terjadi tumbukan dengan bagian depan sudu, sehingga aliran udara mengalami perlambatan. Aliran mengalami stagnasi pada daerah depan *advancing blade* dan daerah depan *returning blade*, pada daerah tersebut memiliki tekanan yang paling tinggi di setiap sudu ditandai dengan masing-masing warna jingga dan warna merah. Penumpukan aliran fluida paling banyak terjadi pada *advancing blade* bagian depan sehingga memiliki tekanan yang paling besar dibandingkan pada *advancing blade* bagian belakang yang memiliki tekanan yang lebih kecil ditandai dengan warna biru muda. Begitu juga pada *returning blade*, penumpukan aliran fluida paling banyak terjadi pada *returning blade* bagian depan.



Gambar 4.11 Distribusi tekanan statis pada savonius dengan sudut 150°

Pada *returning blade* tekanan di bagian depan lebih besar daripada bagian belakang sehingga terdapat gaya yang dapat melawan putaran turbin. Kondisi tersebut membuat gaya turbin

dari *advancing blade* berkurang banyak karena adanya gaya yang melawan putaran dari *returning blade*.



Gambar 4.12 Plot distribusi tekanan statis pada savonius dengan sudut 150°

Gambar 4.12 merupakan tampilan dari tekanan yang terjadi pada seluruh bagian sudu savonius. Pada sumbu x, data yang diberikan adalah panjang dari sudu savonius sedangkan sumbu y adalah nilai tekanan yang diterima sudu savonius. Sehingga dapat dibaca dengan jelas tekanan yang terjadi pada setiap panjang sudu savonius. Supaya analisa distribusi tekanan pada sudu semakin jelas maka plot distribusi tekanan di atas ditampilkan dalam bentuk tabel yang terlampir dibelakang.

Syarat agar sudu savonius dapat berputar adalah gaya yang diterima harus searah pada kedua sudu atau gaya pada salah satu sudu harus lebih besar ketika gaya yang diterima sudu berlawanan.

Menghitung tekanan total pada sudu :

$$P_{\text{total}} = P_1 - P_2$$

Dimana

$$\begin{aligned} P_1 &= P_{\text{atas depan}} + P_{\text{bawah belakang}} \\ &= 18,472 + 3,214 \\ &= 21,686 \text{ Pa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_2 &= P_{\text{atas belakang}} + P_{\text{bawah depan}} \\
 &= -0,608 + 21,381 \\
 &= 20,773 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

Sehingga

$$\begin{aligned}
 P_{\text{total}} &= P_1 - P_2 \\
 &= 21,686 - 20,773 \\
 &= 0,913 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

Untuk mengetahui gaya yang dihasilkan dapat diperoleh dari tekanan total dikalikan frontal area dari sudu turbin yang tegak lurus terhadap aliran udara :

$$\begin{aligned}
 F_R &= P_{\text{total}} \times A \\
 &= 0,913 \text{ Pa} \times 0,095 \text{ m} \times 1 \text{ m} \\
 &= 0,087 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Sebelum menghitung torsi maka harus ditentukan titik tangkap gaya yang terjadi melalui :

$$\begin{aligned}
 y' &= \frac{1}{F_R} \int_A y p dA \\
 &= \frac{1}{F_R} \int_0^L y p z dy \\
 &= \frac{p \cdot z}{F_R} \int_0^L y dy \\
 &= \frac{p \cdot z}{F_R} \left[\frac{1}{2} y^2 \right]_0^L \\
 y' &= \frac{p \cdot z}{F_R} \left[\frac{1}{2} L^2 \right] \quad \text{dimana } L = 0,19 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Maka,

$$\begin{aligned}
 l &= y' = \frac{0,913 \text{ Pa} \times 1 \text{ m}}{0,087 \text{ N}} \left[\frac{1}{2} 0,19^2 \text{ m}^2 \right] \\
 &= 0,189 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Untuk dapat mengetahui torsi yang dihasilkan oleh kincir angin dapat dihasilkan pada saat pertama kali berputar yaitu melalui:

$$\begin{aligned}\tau &= F \sin \theta \times l \\ &= 0,087 \text{ N} \times \sin 30^\circ \times 0,189 \text{ m} \\ &= 0,008 \text{ Nm}\end{aligned}$$

Putaran yang dihasilkan kincir angin adalah:

$$\begin{aligned}\omega &= \frac{v}{r} \\ \omega &= \frac{5}{0,19} = \mathbf{26,316 \text{ rad/s}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\omega &= \frac{2 \pi n}{60} \\ n &= \frac{60 \omega}{2} = \frac{60 \times 26,316}{2} \\ n &= \mathbf{251 \text{ rpm}}\end{aligned}$$

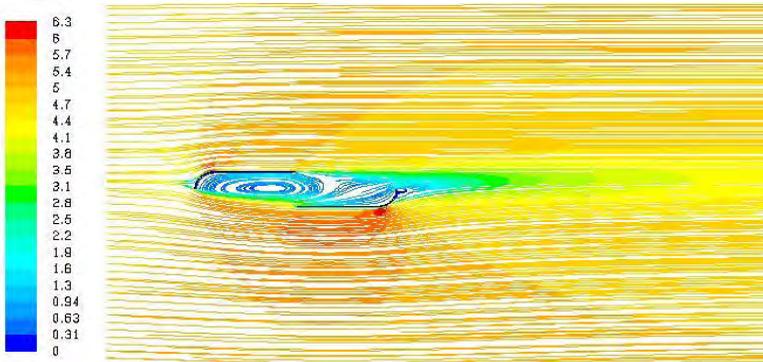
Daya maksimum yang dapat dihasilkan oleh kincir angin yaitu:

$$\begin{aligned}W_{\text{maks}} &= \tau \times \omega \\ &= 0,008 \text{ Nm} \times 26,316 \text{ rad/s} \\ &= \mathbf{0,211 \text{ watt}}\end{aligned}$$

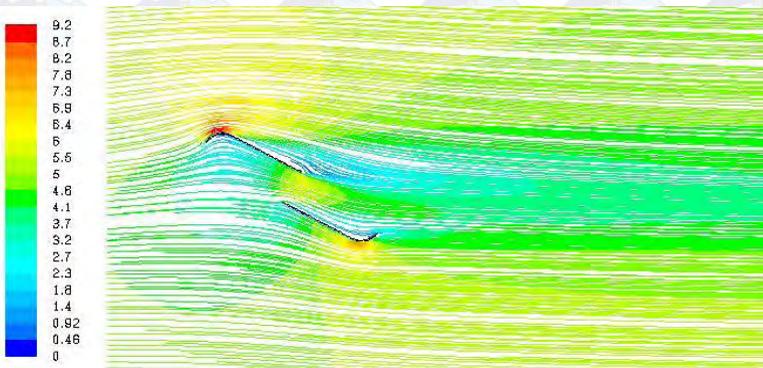
Sehingga dapat dijelaskan bahwa kincir angin savonius pada posisi sudut 150° diatas dapat diperoleh tekanan total sebesar 0,913 Pa. Dari tekanan di setiap sudu yang dihasilkan lalu menghasilkan gaya total sebesar 0,087 N dan menghasilkan torsi sebesar 0,008 Nm. Kecepatan sudut dari turbin adalah 26,316 rad/s maka dapat menghasilkan putaran sebanyak 251 rpm. Dari torsi dan kecepatan sudut yang sudah dihitung didapatkan daya sebesar 0,211 watt.

4.3 Analisa Distribusi Kecepatan

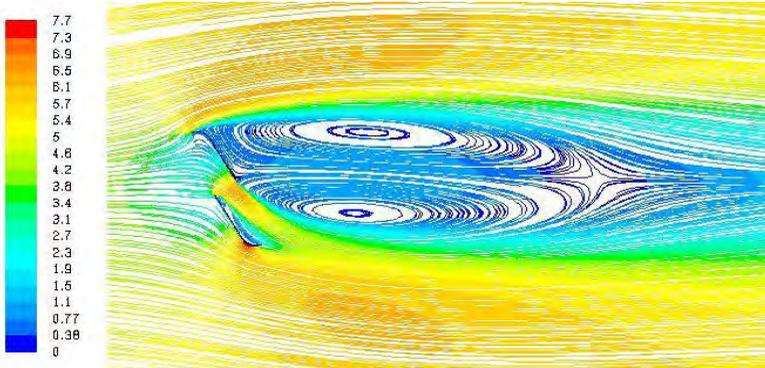
Berdasarkan hasil simulasi pada software *Fluent* didapatkan visualisasi *pathlines velocity* pada turbin savonius dengan variasi posisi sudut. Dari gambar-gambar di bawah, dapat dijelaskan bahwa angin diasumsikan berasal dari arah kiri dengan kecepatan 5 m/s bergerak ke arah sudu turbin.



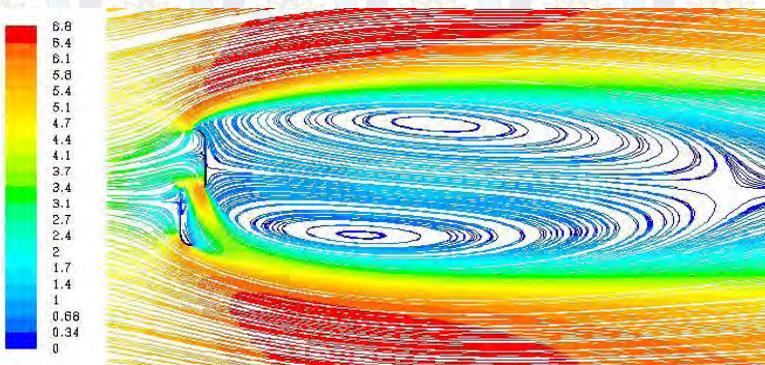
Gambar 4.13 *Pathlines velocity* pada posisi sudut 0°



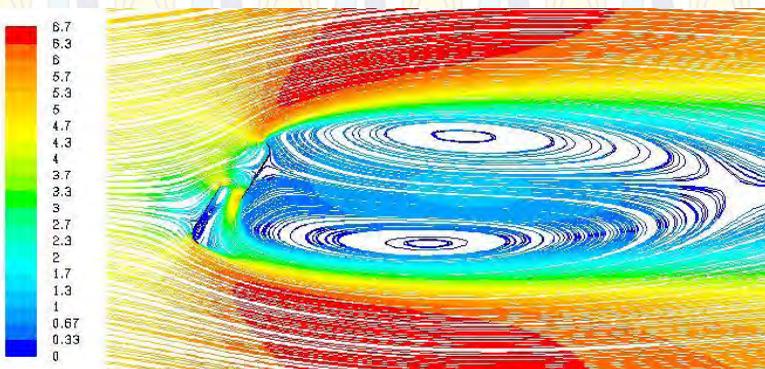
Gambar 4.14 *Pathlines velocity* pada posisi sudut 30°



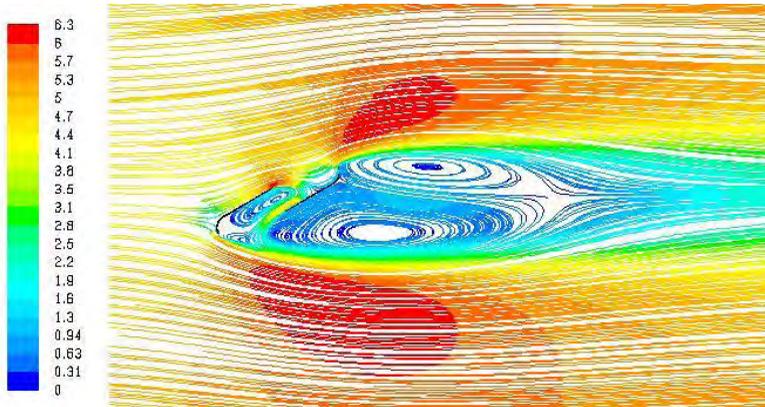
Gambar 4.15 *Pathlines velocity* pada posisi sudut 60°



Gambar 4.16 *Pathlines velocity* pada posisi sudut 90°



Gambar 4.17 *Pathlines velocity* pada posisi sudut 120°



Gambar 4.18 *Pathlines velocity* pada posisi sudut 150°

Secara visualisasi *pathlines* terlihat bahwa pada saat turbin berada pada posisi sudut 0° aliran fluida langsung menabrak sudu lengkung bagian belakang sehingga aliran fluida tidak bisa masuk ke celah antar sudu secara sempurna dan tidak bisa mengikuti kelengkungan sudu bagian depan yang seharusnya. Hal tersebut mengakibatkan adanya aliran sekunder yang besar pada sudu atas bagian depan. Sedangkan pada saat turbin berada pada posisi sudut 30° , terlihat juga bahwa aliran fluida mengalir hampir sempurna mengikuti kelengkungan sudu bagian atas maupun sudu bawah. Sehingga hampir tidak terlihat adanya aliran sekunder pada sudu turbin.

Secara visualisasi *pathlines* terlihat juga kondisi aliran fluida setelah melewati turbin menunjukkan adanya *wake region* yang timbul di belakang turbin karena adanya penghalang pada aliran fluida yang berupa turbin itu sendiri. Ketika turbin pada posisi sudut 90° , *wake region* yang terjadi sangatlah besar dibanding pada saat posisi sudut lain. Sedangkan *wake region* yang paling kecil atau hampir tak terlihat terjadi ketika turbin berada pada posisi 30° .

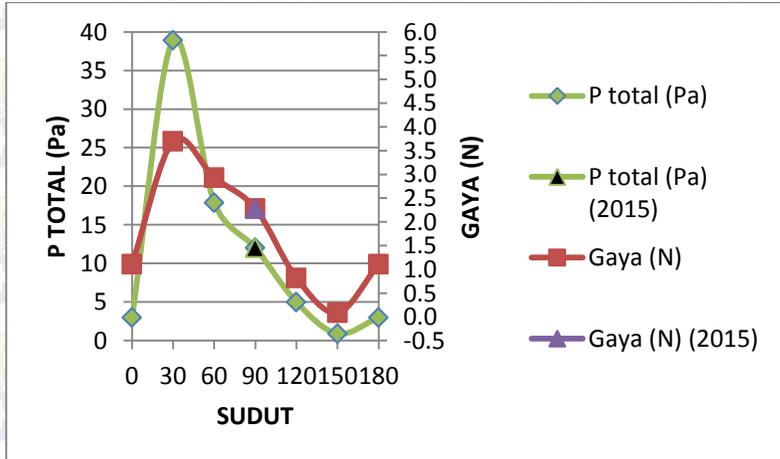
4.4 Pembahasan

Dari hasil analisa dan perhitungan didapatkan data sebagai berikut :

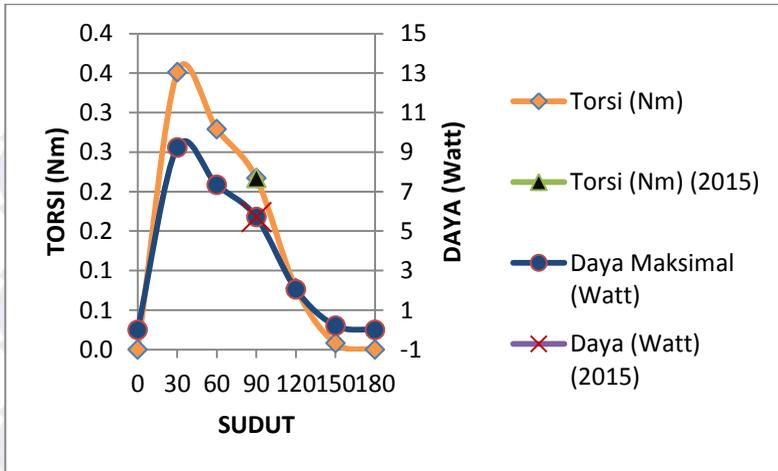
Tabel 4.2 Data hasil perhitungan

Sudut	P total (Pa)	Gaya (N)	Torsi (Nm)	Kecepatan sudut (rad/s)	Putaran (rpm)	Daya Maksimal (Watt)
0	2,998	1,109	0	26,316	251	0
30	38,900	3,695	0,351	26,316	251	9,237
60	17,885	2,933	0,279	26,316	251	7,342
90	12,029	2,285	0,217	26,316	251	5,711
120	5,010	0,822	0,078	26,316	251	2,053
150	0,913	0,087	0,008	26,316	251	0,211
180	2,998	1,109	0	26,316	251	0

Dari tabel di atas dapat dijadikan grafik sebagai berikut :



Gambar 4.19 Grafik tekanan total dan gaya



Gambar 4.20 Grafik torsi dan daya maksimal

Dari data hasil perhitungan di atas dapat dilihat bahwa tekanan total dan gaya yang paling besar dihasilkan turbin savonius ketika berada pada posisi sudut 30° yakni tekanan sebesar 38,900 Pa dan gaya sebesar 3,695 N. Torsi dan daya yang maksimal juga dihasilkan ketika turbin berada pada posisi sudut 30° yakni torsi sebesar 0,351 Nm dan daya maksimal sebesar 9,237 watt. Pada saat turbin savonius berada pada posisi sudut 150° , tekanan total dan gaya yang dihasilkan sangatlah kecil yakni 0,913 Pa dan 0,087 N. Dan pada saat turbin savonius berada pada posisi sudut 0° dan 180° , turbin savonius sama sekali tidak menghasilkan torsi dan daya. Kecepatan sudut turbin savonius sumbu vertikal tipe L ini sebesar 26,316 rad/s dengan putaran turbin sebanyak 251 rpm.

BAB V PENUTUP

5.1 KESIMPULAN

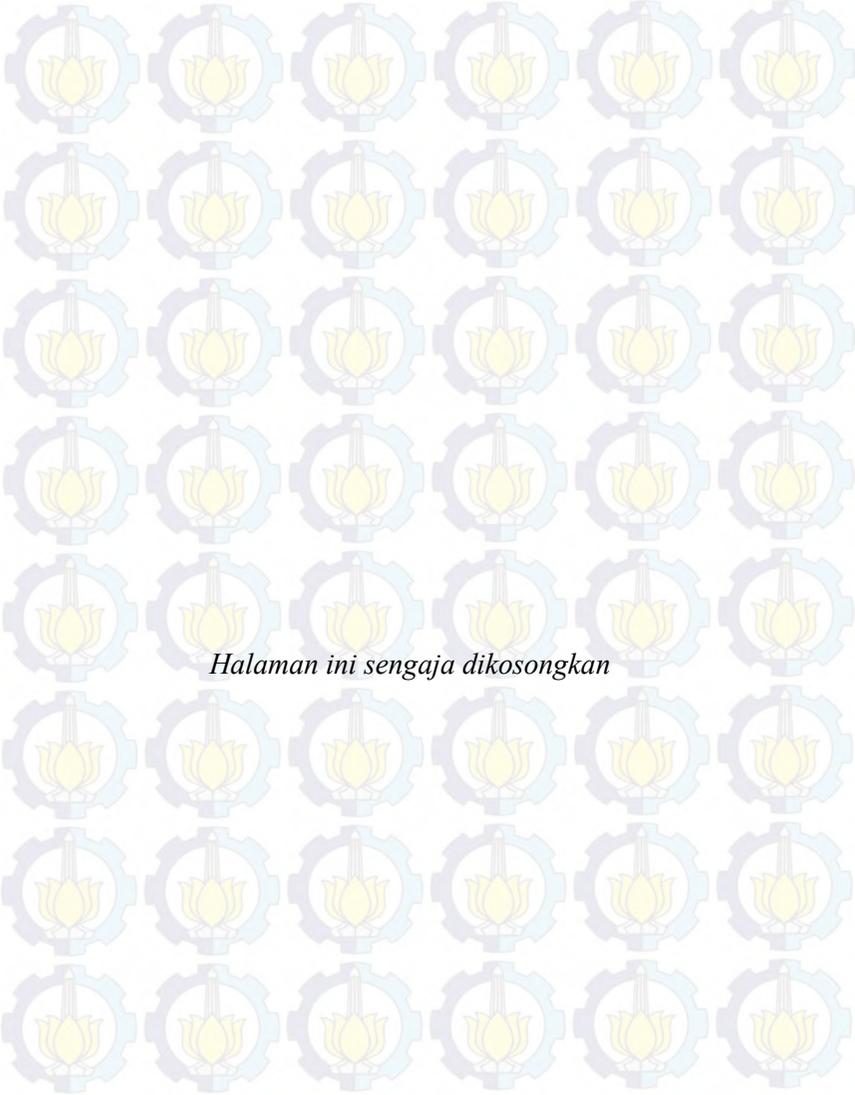
Berdasarkan hasil analisis pengaruh posisi sudut terhadap karakteristik aliran fluida turbin savonius sumbu vertikal tipe-L menggunakan perangkat lunak *Fluent 6.3.26*, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Dari hasil simulasi distribusi tekanan, turbin savonius pada saat posisi sudut kemiringan 30° memiliki tekanan total yang paling besar yakni 38,9 Pa.
2. Dari hasil simulasi distribusi kecepatan, turbin savonius pada saat posisi sudut kemiringan 0° terdapat aliran sekunder yang besar di depan sudu atas, pada saat turbin berada pada posisi sudut kemiringan 30° hampir tidak terlihat adanya aliran sekunder dan wake region. Sedangkan ketika turbin pada posisi sudut 90° , wake region yang terjadi di belakang turbin sangatlah besar dibanding pada saat posisi sudut lain.
3. Dari hasil perhitungan, ketika turbin berada pada posisi sudut 30° turbin memiliki performa yang paling baik, yakni dengan torsi 0,351 Nm dan daya maksimal 9,237 watt.

5.2 SARAN

Beberapa saran yang dapat direkomendasikan untuk perkembangan penelitian selanjutnya adalah :

1. Untuk pengujian selanjutnya disarankan menggunakan pemodelan 3 Dimensi, supaya mendapatkan hasil yang lebih optimal sehingga mengetahui data karakteristik aliran pada turbin savonius yang lebih akurat.



Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN I

SUDUT 0							
sudu atas depan		sudu atas belakang		sudu bawah depan		sudu bawah belakang	
position	Pst	position	Pst	position	Pst	position	Pst
-0.188	-2.15133	-0.19	6.98627	-6.80E-18	1.23603	-6.43E-18	5.57542
-0.18793	-1.44585	-0.18993	19.9927	0.00306	-9.4148	0.00306	-1.56859
-0.18772	-1.3879	-0.18971	23.4661	0.00612	-5.77701	0.00612	-0.09991
-0.18738	-1.35936	-0.18935	24.7903	0.00918	-4.42604	0.00918	0.559537
-0.1869	-1.34708	-0.18884	24.9274	0.01224	-4.1212	0.01224	0.757879
-0.18629	-1.34016	-0.18819	24.3888	0.0153	-3.77257	0.0153	1.03833
-0.18554	-1.33649	-0.1874	23.3526	0.01836	-3.47139	0.01836	1.31073
-0.18467	-1.33605	-0.18648	21.9083	0.02142	-3.23073	0.02142	1.53794
-0.18367	-1.34024	-0.18542	20.123	0.02448	-3.04851	0.02448	1.74899
-0.18255	-1.34736	-0.18424	18.0661	0.02754	-2.9169	0.02754	1.95204
-0.18132	-1.34948	-0.18293	15.8039	0.0306	-2.79601	0.0306	2.14511
-0.17997	-1.34969	-0.18151	13.4004	0.03366	-2.70722	0.03366	2.32916
-0.17851	-1.35332	-0.17997	10.9232	0.03672	-2.63645	0.03672	2.50522
-0.17696	-1.35757	-0.17833	8.41646	0.03978	-2.57259	0.03978	2.6732
-0.17531	-1.36263	-0.17659	5.8452	0.04284	-2.51762	0.04284	2.83289
-0.17357	-1.36836	-0.17475	3.26737	0.0459	-2.47276	0.0459	2.98422
-0.17175	-1.37489	-0.17283	0.825968	0.04896	-2.43685	0.04896	3.1271
-0.16986	-1.38262	-0.17083	-1.42767	0.05202	-2.40895	0.05202	3.26156
-0.1679	-1.3928	-0.16875	-3.4508	0.05508	-2.38856	0.05508	3.38768
-0.16588	-1.4049	-0.16662	-5.19091	0.05814	-2.37538	0.05814	3.50566
-0.16382	-1.41517	-0.16443	-6.62016	0.0612	-2.3691	0.0612	3.61573
-0.1617	-1.42232	-0.1622	-7.71091	0.06426	-2.36928	0.06426	3.71818
-0.15956	-1.43379	-0.15993	-8.41776	0.06732	-2.37593	0.06732	3.81336
-0.15739	-1.45335	-0.15764	-8.63046	0.07038	-2.38899	0.07038	3.90162
-0.1552	-1.47883	-0.15532	-8.19115	0.07344	-2.40824	0.07344	3.98335
-0.153	-1.51736	-0.153	-7.0169	0.0765	-2.43389	0.0765	4.05897
-0.14994	-1.56424	-0.14994	-5.28646	0.07956	-2.46622	0.07956	4.12887
-0.14688	-1.6091	-0.14688	-3.70516	0.08262	-2.50541	0.08262	4.19347
-0.14382	-1.65224	-0.14382	-2.69289	0.08568	-2.55174	0.08568	4.25315
-0.14076	-1.69331	-0.14076	-1.99705	0.08874	-2.60561	0.08874	4.30831
-0.1377	-1.73274	-0.1377	-1.43676	0.0918	-2.66749	0.0918	4.3593
-0.13464	-1.77061	-0.13464	-0.97997	0.09486	-2.73796	0.09486	4.40649
-0.13158	-1.80694	-0.13158	-0.60552	0.09792	-2.81772	0.09792	4.45023
-0.12852	-1.8416	-0.12852	-0.28916	0.10098	-2.90762	0.10098	4.49084
-0.12546	-1.87445	-0.12546	-0.0166	0.10404	-3.00867	0.10404	4.52863
-0.1224	-1.90527	-0.1224	0.220456	0.1071	-3.12209	0.1071	4.56391
-0.11934	-1.93383	-0.11934	0.42857	0.11016	-3.2494	0.11016	4.59697
-0.11628	-1.95989	-0.11628	0.612858	0.11322	-3.39244	0.11322	4.62807
-0.11322	-1.98325	-0.11322	0.77715	0.11628	-3.55354	0.11628	4.65749
-0.11016	-2.00368	-0.11016	0.924439	0.11934	-3.7356	0.11934	4.6855
-0.1071	-2.02101	-0.1071	1.05714	0.1224	-3.94232	0.1224	4.71242
-0.10404	-2.03503	-0.10404	1.17721	0.12546	-4.17843	0.12546	4.73858
-0.10098	-2.04558	-0.10098	1.28622	0.12852	-4.45011	0.12852	4.76418
-0.09792	-2.0525	-0.09792	1.38547	0.13158	-4.76574	0.13158	4.7895
-0.09486	-2.05575	-0.09486	1.47602	0.13464	-5.13719	0.13464	4.81484
-0.0918	-2.0553	-0.0918	1.55879	0.1377	-5.58207	0.1377	4.84089
-0.08874	-2.05104	-0.08874	1.63453	0.14076	-6.12917	0.14076	4.86612
-0.08568	-2.04282	-0.08568	1.7039	0.14382	-6.82498	0.14382	4.89235
-0.08262	-2.03056	-0.08262	1.76743	0.14688	-7.75145	0.14688	4.92181
-0.07956	-2.0142	-0.07956	1.8256	0.14994	-9.01801	0.14994	4.9514
-0.0765	-1.99369	-0.0765	1.87881	0.153	-10.7513	0.153	4.97916
-0.07344	-1.96894	-0.07344	1.92739	0.155323	-12.6739	0.155198	5.00045
-0.07038	-1.93985	-0.07038	1.97162	0.157637	-14.1938	0.157387	5.01271
-0.06732	-1.90628	-0.06732	2.01173	0.159933	-15.0515	0.159558	5.01975
-0.06426	-1.86808	-0.06426	2.04792	0.162202	-15.2561	0.161704	5.02283
-0.0612	-1.82504	-0.0612	2.08032	0.164434	-14.8525	0.163816	5.02914
-0.05814	-1.7769	-0.05814	2.10907	0.166621	-13.8963	0.165884	5.04055
-0.05508	-1.72334	-0.05508	2.13424	0.168754	-12.473	0.167902	5.05056
-0.05202	-1.66394	-0.05202	2.15586	0.170825	-10.6741	0.169861	5.05888
-0.04896	-1.59824	-0.04896	2.17396	0.172826	-8.63257	0.171754	5.06564
-0.0459	-1.52568	-0.0459	2.18851	0.174748	-6.43503	0.173572	5.07146
-0.04284	-1.4455	-0.04284	2.19927	0.176585	-4.19307	0.17531	5.07648
-0.03978	-1.35686	-0.03978	2.206	0.178328	-2.13299	0.176959	5.08064
-0.03672	-1.25874	-0.03672	2.20747	0.179972	-0.43343	0.178514	5.08343
-0.03366	-1.15001	-0.03366	2.20387	0.181509	0.785746	0.179968	5.08501
-0.0306	-1.02949	-0.0306	2.19379	0.182934	1.50386	0.181316	5.08214
-0.02754	-0.89591	-0.02754	2.19238	0.18424	1.82337	0.182551	5.08127
-0.02448	-0.74791	-0.02448	2.17903	0.185423	1.91404	0.183671	5.08486
-0.02142	-0.5845	-0.02142	2.14634	0.186479	1.92479	0.184669	5.08249
-0.01836	-0.40486	-0.01836	2.11206	0.187402	1.92946	0.185542	5.07145
-0.0153	-0.20829	-0.0153	2.06325	0.188189	1.95804	0.186287	5.0513
-0.01224	0.00083	-0.01224	1.99634	0.188838	2.00808	0.1869	5.01699
-0.00918	0.198677	-0.00918	1.93784	0.189345	2.0453	0.18738	4.9563
-0.00612	0.39788	-0.00612	1.85471	0.189708	2.0265	0.187724	4.82075
-0.00306	0.589758	-0.00306	1.77965	0.189927	1.95834	0.187931	4.5364
2.14E-18	0.246015	2.27E-18	0.65802	0.19	1.8228	0.188	2.77189
RATA2	-1.44716		3.463987		-3.91646		3.992516

SUDUT 30							
sudu atas depan		sudu atas belakang		sudu bawah depan		sudu bawah belakang	
position	Pst	position	Pst	position	Pst	position	Pst
-0.16281	16.4522	-0.16455	-4.01058	-0.0185	18.9486	-0.0175	-12.4277
-0.16165	13.9645	-0.16332	-15.8945	-0.01585	20.0287	-0.01485	-18.8626
-0.16038	15.0025	-0.16197	-17.9624	-0.0132	18.7192	-0.0122	-12.6641
-0.159	15.5836	-0.16051	-21.0548	-0.01055	17.7364	-0.00955	-10.9772
-0.15751	15.9247	-0.15894	-25.3515	-0.0079	16.9737	-0.0069	-10.4824
-0.15592	16.2277	-0.15726	-29.7307	-0.00525	16.22	-0.00425	-9.75425
-0.15424	16.4726	-0.15548	-33.9929	-0.0026	15.5068	-0.0016	-8.91144
-0.15248	16.6979	-0.15362	-38.0251	5.03E-05	14.895	0.00105	-7.97256
-0.15063	16.9099	-0.15167	-41.7184	0.0027	14.3759	0.0037	-6.99316
-0.14872	17.0886	-0.14964	-45.1992	0.00535	13.8798	0.00635	-6.07281
-0.14674	17.263	-0.14755	-48.3154	0.008	13.4165	0.009	-5.25514
-0.1447	17.4238	-0.1454	-50.8498	0.01065	12.9791	0.01165	-4.53688
-0.14262	17.5751	-0.1432	-52.8843	0.013301	12.56	0.014301	-3.90224
-0.14049	17.7207	-0.14095	-54.4722	0.015951	12.157	0.016951	-3.33609
-0.13834	17.8648	-0.13867	-55.594	0.018601	11.7684	0.019601	-2.82561
-0.13616	18.0051	-0.13637	-56.2471	0.021251	11.392	0.022251	-2.36036
-0.13397	18.1364	-0.13405	-56.3725	0.023901	11.0257	0.024901	-1.93211
-0.13177	18.2568	-0.13173	-55.8929	0.026551	10.6676	0.027551	-1.53438
-0.12957	18.3732	-0.12941	-54.8454	0.029201	10.3163	0.030201	-1.16213
-0.12739	18.4747	-0.1271	-53.2826	0.031851	9.97001	0.032851	-0.81138
-0.12523	18.638	-0.12481	-51.2226	0.034501	9.62747	0.035501	-0.47897
-0.12309	18.8085	-0.12255	-48.6863	0.037151	9.28728	0.038151	-0.16238
-0.12099	18.8879	-0.12033	-45.6776	0.039801	8.94814	0.040801	0.140409
-0.11894	18.9359	-0.11816	-42.2374	0.042451	8.60879	0.043451	0.431031
-0.11694	18.9429	-0.11605	-38.4137	0.045101	8.268	0.046101	0.710828
-0.115	18.8773	-0.114	-34.333	0.047751	7.92454	0.048751	0.980976
-0.11235	18.7186	-0.11135	-30.2625	0.050401	7.57716	0.051401	1.24266
-0.1097	18.5069	-0.1087	-26.8847	0.053051	7.22455	0.054051	1.49688
-0.10705	18.2891	-0.10605	-24.4909	0.055701	6.86534	0.056701	1.74423
-0.1044	18.0649	-0.1034	-22.633	0.058351	6.49808	0.059351	1.98513
-0.10175	17.8349	-0.10075	-21.0892	0.061001	6.12117	0.062001	2.21992
-0.0991	17.6031	-0.0981	-19.8106	0.063651	5.73288	0.064651	2.4489
-0.09645	17.3711	-0.09545	-18.7431	0.066301	5.33124	0.067301	2.67232
-0.0938	17.1393	-0.0928	-17.836	0.068951	4.91407	0.069951	2.8904
-0.09115	16.9078	-0.09015	-17.0602	0.071601	4.47883	0.072601	3.1033
-0.0885	16.6766	-0.0875	-16.3961	0.074251	4.02262	0.075251	3.31115
-0.08585	16.4454	-0.08485	-15.8259	0.076901	3.542	0.077901	3.51406
-0.0832	16.2139	-0.0822	-15.3317	0.079551	3.0329	0.080551	3.71209
-0.08055	15.9814	-0.07955	-14.8971	0.082201	2.4904	0.083201	3.9053
-0.0779	15.7476	-0.0769	-14.5075	0.084852	1.9085	0.085852	4.09368
-0.07525	15.512	-0.07425	-14.1489	0.087502	1.27967	0.088502	4.27721
-0.0726	15.2739	-0.0716	-13.8082	0.090152	0.594289	0.091152	4.45585
-0.06995	15.0328	-0.06895	-13.4744	0.092802	-0.16024	0.093802	4.62957
-0.0673	14.7882	-0.0663	-13.1392	0.095452	-0.99982	0.096452	4.79836
-0.06465	14.5393	-0.06365	-12.7982	0.098102	-1.94719	0.099102	4.96224
-0.062	14.2855	-0.061	-12.4506	0.100752	-3.03135	0.101752	5.12127
-0.05935	14.0262	-0.05835	-12.0988	0.103402	-4.30356	0.104402	5.27563
-0.0567	13.7607	-0.0557	-11.747	0.106052	-5.82659	0.107052	5.42538
-0.05405	13.4884	-0.05305	-11.3989	0.108702	-7.78056	0.109702	5.57013
-0.0514	13.2085	-0.0504	-11.058	0.111352	-10.4161	0.112352	5.70824
-0.04875	12.9203	-0.04775	-10.7284	0.114002	-14.1294	0.115002	5.8361
-0.0461	12.6231	-0.0451	-10.4137	0.116605	-18.4314	0.11694	5.9501
-0.04345	12.3163	-0.04245	-10.1153	0.118164	-22.0575	0.118939	6.05185
-0.0408	11.999	-0.0398	-9.83336	0.120334	-24.7884	0.120992	6.14837
-0.03815	11.6706	-0.03715	-9.56702	0.122552	-26.9637	0.12309	6.23669
-0.0355	11.3303	-0.0345	-9.31517	0.124809	-28.6459	0.125225	6.35471
-0.03285	10.9774	-0.03185	-9.07658	0.127097	-29.8269	0.127389	6.48403
-0.0302	10.6112	-0.0292	-8.85005	0.129406	-30.5077	0.129573	6.58557
-0.02755	10.231	-0.02655	-8.63446	0.131727	-30.67	0.131769	6.68301
-0.0249	9.83609	-0.0239	-8.42875	0.134051	-30.3352	0.133968	6.77754
-0.02225	9.42573	-0.02125	-8.23189	0.136369	-29.5532	0.13616	6.87195
-0.0196	8.9992	-0.0186	-8.043	0.138672	-28.3598	0.138339	6.97015
-0.01695	8.5557	-0.01595	-7.86146	0.140951	-26.7907	0.140494	7.07086
-0.0143	8.09433	-0.0133	-7.68662	0.143196	-24.8777	0.142618	7.16926
-0.01165	7.61398	-0.01065	-7.51854	0.145399	-22.6573	0.144702	7.26568
-0.009	7.11323	-0.008	-7.35545	0.147551	-20.1597	0.146738	7.36055
-0.00635	6.59013	-0.00535	-7.1966	0.149644	-17.4014	0.148717	7.45613
-0.0037	6.04184	-0.0027	-7.03001	0.151669	-14.5152	0.150633	7.54407
-0.00105	5.46384	-5.03E-05	-6.88632	0.153618	-11.6039	0.152477	7.68336
0.0016	4.84947	0.0026	-6.76147	0.155484	-8.83556	0.154242	7.81914
0.00425	4.1852	0.00525	-6.62701	0.15726	-6.46597	0.155921	7.86814
0.0069	3.45505	0.0079	-6.49687	0.158937	-4.59765	0.157508	7.86678
0.00955	2.60766	0.01055	-6.37092	0.160511	-3.28464	0.158997	7.77436
0.0122	1.57392	0.0132	-6.27698	0.161974	-2.51723	0.16038	7.41235
0.01485	0.054728	0.01585	-6.30866	0.16332	-2.15532	0.161654	6.48951
0.0175	-4.7986	0.0185	-7.92106	0.164545	-2.16608	0.162813	0.363973
RATA2	13.58244		-22.1539		-1.43353		1.730335

SUDUT 60							
sudu atas depan		sudu atas belakang		sudu bawah depan		sudu bawah belakang	
position	Pst	position	Pst	position	Pst	position	Pst
-0.094	20.5756	-0.095	-13.5632	-0.03204	3.73908	-0.03031	-15.1342
-0.09206	27.0584	-0.09295	-21.10922	-0.03051	27.2401	-0.02878	-18.6892
-0.09006	27.0577	-0.09084	-15.8236	-0.02898	28.7248	-0.02725	-18.2999
-0.08801	26.7778	-0.08867	-13.6134	-0.02745	28.8327	-0.02572	-18.178
-0.08591	26.547	-0.08645	-12.7329	-0.02592	28.4696	-0.02419	-17.8642
-0.08378	26.3691	-0.08419	-11.9768	-0.02439	27.9947	-0.02266	-17.5434
-0.08161	26.2249	-0.08191	-11.314	-0.02286	27.4874	-0.02113	-17.0968
-0.07943	26.1102	-0.0796	-10.7357	-0.02133	27.0577	-0.0196	-16.5634
-0.07723	26.0302	-0.07727	-10.2294	-0.0198	26.6994	-0.01807	-15.9501
-0.07503	25.9737	-0.07495	-9.79746	-0.01827	26.3241	-0.01654	-15.2867
-0.07284	25.9332	-0.07263	-9.43453	-0.01674	25.9571	-0.01501	-14.5939
-0.07066	25.9052	-0.07033	-9.11142	-0.01521	25.5955	-0.01348	-13.8886
-0.06851	25.8892	-0.06805	-8.81687	-0.01368	25.2374	-0.01195	-13.1817
-0.06638	25.8865	-0.06581	-8.55868	-0.01215	24.8845	-0.01042	-12.4824
-0.0643	25.8921	-0.0636	-8.33828	-0.01062	24.537	-0.00889	-11.7976
-0.06226	25.9047	-0.06145	-8.15362	-0.00909	24.1944	-0.00736	-11.1327
-0.06028	25.925	-0.05936	-8.00217	-0.00756	23.8559	-0.00583	-10.4911
-0.05837	25.9506	-0.05733	-7.88214	-0.00603	23.5206	-0.0043	-9.87539
-0.05653	25.9821	-0.05538	-7.78964	-0.0045	23.1875	-0.00277	-9.28668
-0.05476	26.02	-0.05352	-7.71907	-0.00297	22.8557	-0.00124	-8.72545
-0.05308	26.0656	-0.05174	-7.66361	-0.00144	22.5242	0.000289	-8.19149
-0.05149	26.1212	-0.05006	-7.61663	8.71E-05	22.192	0.001819	-7.68415
-0.05001	26.1796	-0.04849	-7.57197	0.001617	21.858	0.003349	-7.20248
-0.04862	26.2264	-0.04703	-7.52201	0.003147	21.5214	0.004879	-6.74533
-0.04735	26.2505	-0.04568	-7.46135	0.004677	21.1812	0.006409	-6.31151
-0.04619	26.2404	-0.04446	-7.40023	0.006207	20.8363	0.007939	-5.8998
-0.04466	26.1925	-0.04293	-7.35431	0.007737	20.4856	0.009469	-5.50902
-0.04313	26.1229	-0.0414	-7.32497	0.009267	20.128	0.010999	-5.13794
-0.0416	26.047	-0.03987	-7.30618	0.010797	19.7623	0.012529	-4.78538
-0.04007	25.9681	-0.03834	-7.29306	0.012327	19.3872	0.014059	-4.45015
-0.03854	25.8883	-0.03681	-7.28226	0.013857	19.0013	0.015589	-4.13117
-0.03701	25.8083	-0.03528	-7.27204	0.015387	18.6029	0.017119	-3.82742
-0.03548	25.727	-0.03375	-7.26177	0.016917	18.1903	0.018649	-3.53794
-0.03395	25.6433	-0.03222	-7.2511	0.018447	17.7614	0.020179	-3.26187
-0.03242	25.556	-0.03069	-7.23989	0.019977	17.3142	0.021709	-2.99841
-0.03089	25.464	-0.02916	-7.22809	0.021507	16.8458	0.023239	-2.74684
-0.02936	25.3665	-0.02763	-7.21567	0.023037	16.3533	0.024769	-2.50647
-0.02783	25.2627	-0.0261	-7.20252	0.024567	15.8331	0.026299	-2.27663
-0.0263	25.1513	-0.02457	-7.18859	0.026097	15.2805	0.027829	-2.0567
-0.02477	25.0313	-0.02304	-7.17388	0.027627	14.6902	0.029359	-1.84612
-0.02324	24.9019	-0.02151	-7.15838	0.029157	14.0551	0.030889	-1.64436
-0.02171	24.7619	-0.01998	-7.14209	0.030687	13.3657	0.032419	-1.4509
-0.02018	24.6104	-0.01845	-7.12506	0.032217	12.6095	0.033949	-1.26506
-0.01865	24.4464	-0.01692	-7.10731	0.033747	11.7703	0.035479	-1.08604
-0.01712	24.2689	-0.01539	-7.08888	0.035277	10.8275	0.037009	-0.91322
-0.01559	24.0768	-0.01386	-7.0698	0.036807	9.75605	0.038539	-0.7461
-0.01406	23.869	-0.01233	-7.0501	0.038337	8.50796	0.040069	-0.58423
-0.01253	23.6445	-0.0108	-7.02983	0.039867	7.01396	0.041599	-0.42739
-0.011	23.4021	-0.00927	-7.00906	0.041397	5.12145	0.043129	-0.27611
-0.00947	23.1405	-0.00774	-6.98781	0.042927	2.63155	0.044659	-0.13287
-0.00794	22.8583	-0.00621	-6.96614	0.044457	-0.72353	0.046189	-0.00365
-0.00641	22.5543	-0.00468	-6.94408	0.045682	-4.62131	0.047348	0.108284
-0.00488	22.2267	-0.00315	-6.9217	0.047028	-8.46578	0.048622	0.20988
-0.00335	21.8742	-0.00162	-6.89904	0.048491	-12.0602	0.050005	0.3082
-0.00182	21.4949	-8.71E-05	-6.87617	0.050065	-15.1959	0.051494	0.414543
-0.00029	21.0872	0.001443	-6.85314	0.051742	-17.8091	0.05308	0.523875
0.001241	20.6491	0.002973	-6.83	0.053518	-20.0001	0.05476	0.626003
0.002771	20.1788	0.004503	-6.80684	0.055384	-21.8332	0.056525	0.725885
0.004301	19.6744	0.006033	-6.78369	0.057333	-23.301	0.058369	0.824337
0.005831	19.134	0.007563	-6.76064	0.059358	-24.4058	0.060285	0.922213
0.007361	18.5558	0.009093	-6.73775	0.061451	-25.1538	0.062264	1.01616
0.008891	17.9377	0.010623	-6.71511	0.063603	-25.5428	0.0643	1.15055
0.010421	17.2777	0.012153	-6.69281	0.065806	-25.5295	0.066384	1.29281
0.011951	16.5738	0.013683	-6.67102	0.068051	-25.043	0.068508	1.40568
0.013481	15.824	0.015213	-6.64993	0.07033	-24.0793	0.070663	1.5274
0.015011	15.026	0.016743	-6.63019	0.072632	-22.6677	0.072842	1.65695
0.016541	14.1777	0.018273	-6.61316	0.074951	-20.868	0.075034	1.79852
0.018071	13.2748	0.019803	-6.59977	0.077275	-18.7904	0.077233	1.95538
0.019601	12.3129	0.021333	-6.5887	0.079596	-16.4671	0.079429	2.13156
0.021131	11.282	0.022863	-6.57512	0.081905	-13.8967	0.081613	2.33196
0.022661	10.173	0.024393	-6.56371	0.084193	-11.1731	0.083777	2.55243
0.024191	8.95235	0.025923	-6.56895	0.08645	-8.484	0.085912	2.78208
0.025721	7.56978	0.027453	-6.60489	0.088668	-6.02844	0.08801	3.00503
0.027251	5.82494	0.028983	-6.71098	0.090838	-4.00608	0.090063	3.15315
0.028781	3.44963	0.030513	-6.94103	0.092952	-2.60186	0.092062	3.00968
0.030311	-4.23295	0.032043	-9.23243	0.095	-1.98277	0.094	-0.57394
RATA2	21.98894		-8.02659		7.514118		-4.61631

SUDUT 90							
sudu atas depan		sudu atas belakang		sudu bawah depan		sudu bawah belakang	
position	Pst	position	Pst	position	Pst	position	Pst
0	6.14615	0	-6.89242	-0.037	-5.78472	-0.035	-14.5905
0.002198	28.5398	0.002323	-8.72762	-0.037	23.9984	-0.035	-14.0008
0.004387	31.0611	0.004637	-8.68475	-0.037	27.6334	-0.035	-14.1016
0.006558	31.7746	0.006933	-8.55559	-0.037	28.9449	-0.035	-14.0316
0.008704	31.8369	0.009202	-8.40142	-0.037	29.5918	-0.035	-13.8124
0.010816	31.7266	0.011434	-8.27582	-0.037	29.9969	-0.035	-13.4647
0.012884	31.587	0.013621	-8.16206	-0.037	30.2754	-0.035	-13.0275
0.014902	31.4632	0.015754	-8.066	-0.037	30.472	-0.035	-12.5263
0.016861	31.3364	0.017825	-7.98162	-0.037	30.6209	-0.035	-11.9831
0.018754	31.1092	0.019826	-7.90797	-0.037	30.7361	-0.035	-11.4156
0.020573	30.8898	0.021748	-7.84206	-0.037	30.8158	-0.035	-10.837
0.02231	30.7672	0.023585	-7.78414	-0.037	30.8632	-0.035	-10.2566
0.023959	30.6547	0.025328	-7.7306	-0.037	30.8863	-0.035	-9.68168
0.025514	30.5487	0.026972	-7.67553	-0.037	30.8906	-0.035	-9.11759
0.026968	30.4427	0.028509	-7.61548	-0.037	30.8797	-0.035	-8.5687
0.028316	30.338	0.029934	-7.54815	-0.037	30.8551	-0.035	-8.0384
0.029552	30.2339	0.03124	-7.47107	-0.037	30.8193	-0.035	-7.52879
0.030671	30.1296	0.032423	-7.38282	-0.037	30.7759	-0.035	-7.04109
0.031669	30.0265	0.033479	-7.28407	-0.037	30.7262	-0.035	-6.57589
0.032542	29.9184	0.034402	-7.17722	-0.037	30.6704	-0.035	-6.13333
0.033287	29.7615	0.035189	-7.06576	-0.037	30.6081	-0.035	-5.71325
0.0339	29.6181	0.035838	-6.95276	-0.037	30.5389	-0.035	-5.3152
0.03438	29.5298	0.036345	-6.83954	-0.037	30.4622	-0.035	-4.93855
0.034724	29.4459	0.036708	-6.7261	-0.037	30.3778	-0.035	-4.58252
0.034931	29.3668	0.036927	-6.61063	-0.037	30.286	-0.035	-4.2462
0.035	29.2932	0.037	-6.49856	-0.037	30.1866	-0.035	-3.92863
0.035	29.2531	0.037	-6.40768	-0.037	30.0792	-0.035	-3.62885
0.035	29.263	0.037	-6.34459	-0.037	29.9642	-0.035	-3.3459
0.035	29.3107	0.037	-6.30153	-0.037	29.8419	-0.035	-3.07879
0.035	29.3801	0.037	-6.27082	-0.037	29.7115	-0.035	-2.82655
0.035	29.4592	0.037	-6.24621	-0.037	29.5716	-0.035	-2.58826
0.035	29.5426	0.037	-6.22468	-0.037	29.4214	-0.035	-2.36301
0.035	29.626	0.037	-6.20475	-0.037	29.2599	-0.035	-2.14993
0.035	29.7069	0.037	-6.1859	-0.037	29.0863	-0.035	-1.9483
0.035	29.7825	0.037	-6.16797	-0.037	28.8994	-0.035	-1.75769
0.035	29.8511	0.037	-6.1509	-0.037	28.698	-0.035	-1.57752
0.035	29.9114	0.037	-6.13467	-0.037	28.4806	-0.035	-1.4066
0.035	29.9626	0.037	-6.11928	-0.037	28.2453	-0.035	-1.24391
0.035	30.0042	0.037	-6.1047	-0.037	27.99	-0.035	-1.08902
0.035	30.0355	0.037	-6.09091	-0.037	27.7119	-0.035	-0.94152
0.035	30.0551	0.037	-6.07787	-0.037	27.4077	-0.035	-0.80081
0.035	30.0616	0.037	-6.06555	-0.037	27.0732	-0.035	-0.66616
0.035	30.0537	0.037	-6.05394	-0.037	26.7031	-0.035	-0.53683
0.035	30.0295	0.037	-6.04302	-0.037	26.2915	-0.035	-0.41222
0.035	29.9869	0.037	-6.03278	-0.037	25.8313	-0.035	-0.29181
0.035	29.9254	0.037	-6.02321	-0.037	25.313	-0.035	-0.17518
0.035	29.8448	0.037	-6.01431	-0.037	24.7177	-0.035	-0.06207
0.035	29.7433	0.037	-6.00608	-0.037	24.004	-0.035	0.047403
0.035	29.6188	0.037	-5.99851	-0.037	23.0675	-0.035	0.152484
0.035	29.4694	0.037	-5.99161	-0.037	21.7249	-0.035	0.250942
0.035	29.293	0.037	-5.9854	-0.037	19.7662	-0.035	0.336876
0.035	29.0875	0.037	-5.97988	-0.03693	17.3477	-0.03493	0.407517
0.035	28.8504	0.037	-5.9751	-0.03671	14.8965	-0.03472	0.46788
0.035	28.5793	0.037	-5.97111	-0.03634	12.5395	-0.03438	0.522359
0.035	28.2716	0.037	-5.96791	-0.03584	10.2097	-0.0339	0.571871
0.035	27.9245	0.037	-5.96552	-0.03519	7.88205	-0.03329	0.642231
0.035	27.5352	0.037	-5.96397	-0.0344	5.55054	-0.03254	0.714681
0.035	27.1007	0.037	-5.96332	-0.03348	3.17932	-0.03167	0.768516
0.035	26.6178	0.037	-5.96359	-0.03242	0.797506	-0.03067	0.82469
0.035	26.0832	0.037	-5.96483	-0.03124	-1.46864	-0.02955	0.881123
0.035	25.4935	0.037	-5.96712	-0.02993	-3.53271	-0.02832	0.938747
0.035	24.8448	0.037	-5.97061	-0.02851	-5.36941	-0.02697	0.998305
0.035	24.1332	0.037	-5.97548	-0.02697	-6.95791	-0.02551	1.0609
0.035	23.3548	0.037	-5.98202	-0.02533	-8.30156	-0.02396	1.12707
0.035	22.5054	0.037	-5.99072	-0.02358	-9.46031	-0.02231	1.19572
0.035	21.5814	0.037	-6.00202	-0.02175	-10.4218	-0.02057	1.2647
0.035	20.5797	0.037	-6.01636	-0.01983	-11.065	-0.01875	1.36779
0.035	19.5007	0.037	-6.03309	-0.01782	-11.3363	-0.01686	1.47757
0.035	18.3479	0.037	-6.05233	-0.01575	-11.1995	-0.0149	1.5668
0.035	17.1345	0.037	-6.07764	-0.01362	-10.5722	-0.01288	1.6672
0.035	15.8665	0.037	-6.11418	-0.01143	-9.44632	-0.01082	1.77853
0.035	14.5239	0.037	-6.17054	-0.0092	-7.86367	-0.0087	1.9047
0.035	12.9347	0.037	-6.26011	-0.00693	-5.8742	-0.00656	2.04682
0.035	10.7401	0.037	-6.42877	-0.00464	-3.55948	-0.00439	2.19126
0.035	7.42963	0.037	-6.75636	-0.00232	-1.19264	-0.0022	2.27047
0.035	-3.20735	0.037	-10.1252	-2.33E-17	0.664048	-2.30E-17	1.28609
RATA2	26.79644		-6.66769		18.17676		-3.25812

SUDUT 120							
sudu atas depan		sudu atas belakang		sudu bawah depan		sudu bawah belakang	
position	Pst	position	Pst	position	Pst	position	Pst
0.094	2.28897	0.095	-4.0978	-0.03204	1.65147	-0.03031	-6.11793
0.095869	28.9185	0.096976	-3.81813	-0.03357	15.5482	-0.03184	-4.5877
0.097661	31.925	0.09887	-3.78623	-0.0351	19.5458	-0.03337	-4.36783
0.09937	32.706	0.100677	-3.72295	-0.03663	21.9572	-0.0349	-4.22077
0.100988	32.8759	0.102388	-3.65332	-0.03816	23.62	-0.03643	-4.05635
0.10251	32.8906	0.103996	-3.5798	-0.03969	24.7651	-0.03796	-3.85924
0.103929	32.8579	0.105497	-3.50067	-0.04122	25.6039	-0.03949	-3.62407
0.10524	32.7742	0.106883	-3.41312	-0.04275	26.2633	-0.04102	-3.35532
0.106438	32.5185	0.108148	-3.31393	-0.04428	26.8169	-0.04255	-3.05947
0.107517	32.2619	0.10929	-3.20778	-0.04581	27.3234	-0.04408	-2.73979
0.108474	32.125	0.110301	-3.09531	-0.04734	27.8025	-0.04561	-2.40207
0.109305	31.9881	0.111179	-2.97597	-0.04887	28.2226	-0.04714	-2.05416
0.110006	31.8559	0.111921	-2.85381	-0.0504	28.5897	-0.04867	-1.70288
0.110575	31.7187	0.112522	-2.73071	-0.05193	28.9126	-0.0502	-1.35409
0.111101	31.5766	0.112982	-2.60867	-0.05346	29.2044	-0.05173	-1.01239
0.111308	31.4276	0.113297	-2.48923	-0.05499	29.4733	-0.05326	-0.6813
0.111469	31.2705	0.113468	-2.3737	-0.05652	29.7251	-0.05479	-0.3634
0.111492	31.1125	0.113492	-2.26311	-0.05805	29.9628	-0.05632	-0.0604
0.111377	30.9606	0.11337	-2.15867	-0.05958	30.1888	-0.05785	0.226696
0.111125	30.8011	0.113103	-2.06267	-0.06111	30.4044	-0.05938	0.497393
0.110735	30.5629	0.112691	-1.97679	-0.06264	30.6108	-0.06091	0.751612
0.110211	30.3414	0.112137	-1.90104	-0.06417	30.8087	-0.06244	0.989587
0.109553	30.1934	0.111442	-1.83616	-0.0657	30.999	-0.06397	1.21179
0.108765	30.0364	0.110609	-1.7833	-0.06723	31.1825	-0.0655	1.41885
0.10785	29.8768	0.109641	-1.74324	-0.06876	31.3597	-0.06703	1.61152
0.106811	29.7184	0.108543	-1.71679	-0.07029	31.5311	-0.06856	1.79061
0.105281	29.5917	0.107013	-1.70339	-0.07182	31.6973	-0.07009	1.957
0.103751	29.5175	0.105483	-1.69916	-0.07335	31.8584	-0.07162	2.11154
0.102221	29.4934	0.103953	-1.69973	-0.07488	32.0148	-0.07315	2.25509
0.100691	29.5088	0.102423	-1.70269	-0.07641	32.1668	-0.07468	2.38848
0.099161	29.5497	0.100893	-1.70665	-0.07794	32.3145	-0.07621	2.51252
0.097631	29.6027	0.099363	-1.71121	-0.07947	32.4581	-0.07774	2.62796
0.096101	29.6625	0.097833	-1.71633	-0.081	32.5978	-0.07927	2.73551
0.094571	29.7267	0.096303	-1.72203	-0.08253	32.7337	-0.0808	2.83586
0.093041	29.7912	0.094773	-1.72824	-0.08406	32.8657	-0.08233	2.92961
0.091511	29.8533	0.093243	-1.7349	-0.08559	32.9939	-0.08386	3.01734
0.089981	29.9113	0.091713	-1.74197	-0.08712	33.1183	-0.08539	3.0996
0.088451	29.9638	0.090183	-1.74945	-0.08865	33.2387	-0.08692	3.17687
0.086921	30.0095	0.088653	-1.75733	-0.09018	33.3548	-0.08845	3.24962
0.085391	30.0464	0.087123	-1.76561	-0.09171	33.4658	-0.08998	3.31826
0.083861	30.0721	0.085593	-1.77425	-0.09324	33.5712	-0.09151	3.38322
0.082331	30.0844	0.084063	-1.78322	-0.09477	33.671	-0.09304	3.44484
0.080801	30.0831	0.082533	-1.7925	-0.0963	33.7648	-0.09457	3.50349
0.079271	30.0676	0.081003	-1.80212	-0.09783	33.8526	-0.0961	3.55947
0.077741	30.036	0.079473	-1.81209	-0.09936	33.934	-0.09763	3.6131
0.076211	29.9852	0.077943	-1.82235	-0.10089	34.0083	-0.09916	3.6646
0.074681	29.9125	0.076413	-1.83288	-0.10242	34.073	-0.10069	3.71418
0.073151	29.8158	0.074883	-1.84368	-0.10395	34.1226	-0.10222	3.76198
0.071621	29.6928	0.073353	-1.85477	-0.10548	34.1443	-0.10375	3.80756
0.070091	29.5403	0.071823	-1.86615	-0.10701	34.1137	-0.10528	3.84994
0.068561	29.355	0.070293	-1.87784	-0.10854	33.9813	-0.10681	3.88523
0.067031	29.1335	0.068763	-1.88983	-0.10964	33.7082	-0.10785	3.91089
0.065501	28.872	0.067233	-1.90214	-0.11061	33.2852	-0.10877	3.92949
0.063971	28.5666	0.065703	-1.91477	-0.11144	32.7073	-0.10955	3.94413
0.062441	28.2129	0.064173	-1.92774	-0.11214	31.9693	-0.11021	3.95695
0.060911	27.8065	0.062643	-1.94106	-0.11269	31.0618	-0.11074	3.97344
0.059381	27.3427	0.061113	-1.95474	-0.1131	29.9785	-0.11113	3.98968
0.057851	26.8168	0.059583	-1.96883	-0.11337	28.714	-0.11138	4.00192
0.056321	26.2244	0.058053	-1.98336	-0.11349	27.2719	-0.11149	4.01524
0.054791	25.5612	0.056523	-1.99843	-0.11347	25.6764	-0.11147	4.02976
0.053261	24.8237	0.054993	-2.01413	-0.1133	23.9542	-0.11131	4.04498
0.051731	24.0091	0.053463	-2.03064	-0.11298	22.1202	-0.11101	4.06069
0.050201	23.1155	0.051933	-2.04822	-0.11252	20.1976	-0.11058	4.07733
0.048671	22.142	0.050403	-2.06711	-0.11192	18.2257	-0.11001	4.09543
0.047141	21.0889	0.048873	-2.08773	-0.11118	16.2461	-0.10931	4.11542
0.045611	19.9592	0.047343	-2.11026	-0.1103	14.2766	-0.10847	4.13664
0.044081	18.7574	0.045813	-2.13495	-0.10929	12.2911	-0.10752	4.15971
0.042551	17.4939	0.044283	-2.15916	-0.10815	10.1999	-0.10644	4.1922
0.041021	16.1797	0.042753	-2.18525	-0.10688	8.11262	-0.10524	4.22447
0.039491	14.8345	0.041223	-2.2182	-0.1055	6.25567	-0.10393	4.25156
0.037961	13.4577	0.039693	-2.26206	-0.104	4.67765	-0.10251	4.28272
0.036431	12.0467	0.038163	-2.3229	-0.10239	3.39653	-0.10099	4.31725
0.034901	10.4866	0.036633	-2.41599	-0.10068	2.48245	-0.09937	4.35358
0.033371	8.67623	0.035103	-2.55582	-0.09887	2.01825	-0.09766	4.37331
0.031841	6.2853	0.033573	-2.85752	-0.09698	2.11044	-0.09587	4.31505
0.030311	-0.38313	0.032043	-5.17768	-0.095	2.4185	-0.094	3.33639
RATA2	26.76272		-2.27621		25.86243		1.833816

SUDUT 150							
sudu atas depan		sudu atas belakang		sudu bawah depan		sudu bawah belakang	
position	Pst	position	Pst	position	Pst	position	Pst
0.162813	6.30721	0.164545	-1.96807	-0.0185	0.299364	-0.0175	-2.71635
0.163852	22.807	0.165643	-1.46533	-0.02115	7.07093	-0.02015	-0.37151
0.164767	25.3622	0.166611	-1.38943	-0.0238	9.01188	-0.0228	-0.00801
0.165555	26.3138	0.167444	-1.28683	-0.02645	10.4427	-0.02545	0.206846
0.166213	26.5835	0.168139	-1.15363	-0.0291	11.4592	-0.0281	0.352241
0.166737	26.6233	0.168693	-1.00071	-0.03175	12.2992	-0.03075	0.476446
0.167126	26.5735	0.169105	-0.83664	-0.0344	13.0319	-0.0334	0.598531
0.167379	26.4798	0.169372	-0.6625	-0.03705	13.6894	-0.03605	0.723515
0.167494	26.3677	0.169494	-0.48713	-0.0397	14.2425	-0.0387	0.852456
0.167471	26.2536	0.169469	-0.31931	-0.04235	14.7388	-0.04135	0.985107
0.16731	26.1393	0.169299	-0.16349	-0.045	15.2003	-0.044	1.12085
0.167012	26.0269	0.168984	-0.02298	-0.04765	15.6146	-0.04665	1.2587
0.166577	25.9208	0.168524	0.098016	-0.0503	15.9987	-0.0493	1.39756
0.166008	25.8098	0.167923	0.196926	-0.05295	16.3565	-0.05195	1.53645
0.165307	25.6213	0.167181	0.27196	-0.0556	16.6941	-0.0546	1.67448
0.164476	25.439	0.166303	0.322155	-0.05825	17.0143	-0.05725	1.8109
0.163519	25.3217	0.165291	0.347032	-0.0609	17.3197	-0.0599	1.94505
0.16244	25.1994	0.16415	0.346736	-0.06355	17.612	-0.06255	2.07644
0.161242	25.0742	0.162884	0.322649	-0.0662	17.8929	-0.0652	2.20472
0.159931	24.9377	0.161499	0.277767	-0.06885	18.1638	-0.06785	2.32963
0.158512	24.7898	0.159998	0.215751	-0.0715	18.4259	-0.0705	2.45105
0.15699	24.6243	0.158389	0.13979	-0.07415	18.6805	-0.07315	2.56894
0.155372	24.4623	0.156678	0.054111	-0.0768	18.9281	-0.0758	2.68334
0.153663	24.3116	0.154872	-0.03491	-0.07945	19.1697	-0.07845	2.79433
0.151871	24.1559	0.152977	-0.11723	-0.0821	19.4061	-0.0811	2.902
0.150002	24.0041	0.151002	-0.18268	-0.08475	19.638	-0.08375	3.00651
0.147352	23.8815	0.148352	-0.2284	-0.0874	19.866	-0.0864	3.10799
0.144702	23.8029	0.145702	-0.26354	-0.09005	20.0907	-0.08905	3.20656
0.142052	23.7655	0.143052	-0.29764	-0.0927	20.3125	-0.0917	3.30234
0.139402	23.7623	0.140402	-0.33133	-0.09535	20.5319	-0.09435	3.39539
0.136752	23.7791	0.137752	-0.36391	-0.098	20.7492	-0.097	3.48572
0.134102	23.8066	0.135102	-0.39532	-0.10065	20.965	-0.09965	3.5733
0.131452	23.8388	0.132452	-0.42563	-0.1033	21.1794	-0.1023	3.65806
0.128802	23.8707	0.129802	-0.45482	-0.10595	21.3929	-0.10495	3.73985
0.126152	23.8986	0.127152	-0.48289	-0.1086	21.6056	-0.1076	3.81848
0.123502	23.9194	0.124502	-0.50984	-0.11125	21.8178	-0.11025	3.89363
0.120851	23.9311	0.121851	-0.53566	-0.1139	22.0297	-0.1129	3.96504
0.118201	23.931	0.119201	-0.56034	-0.11655	22.2415	-0.11555	4.03252
0.115551	23.9159	0.116551	-0.58385	-0.1192	22.4532	-0.1182	4.09579
0.112901	23.8819	0.113901	-0.6062	-0.12185	22.665	-0.12085	4.15445
0.110251	23.8242	0.111251	-0.62735	-0.1245	22.8768	-0.1235	4.20807
0.107601	23.7368	0.108601	-0.64728	-0.12715	23.0886	-0.12615	4.25629
0.104951	23.6133	0.105951	-0.66599	-0.1298	23.3001	-0.1288	4.29887
0.102301	23.4471	0.103301	-0.68352	-0.13245	23.5107	-0.13145	4.33567
0.099651	23.2313	0.100651	-0.69994	-0.1351	23.719	-0.1341	4.36661
0.097001	22.9575	0.098001	-0.71536	-0.13775	23.9219	-0.13675	4.3917
0.094351	22.6162	0.095351	-0.72973	-0.1404	24.1191	-0.1394	4.41109
0.091701	22.1973	0.092701	-0.74303	-0.14305	24.3063	-0.14205	4.42503
0.089051	21.6907	0.090051	-0.75529	-0.1457	24.4472	-0.1447	4.43395
0.086401	21.0865	0.087401	-0.76643	-0.14835	24.5254	-0.14735	4.43884
0.083751	20.3765	0.084751	-0.77644	-0.151	24.704	-0.15	4.44093
0.081101	19.5544	0.082101	-0.78545	-0.15298	25.1304	-0.15187	4.44151
0.078451	18.6175	0.079451	-0.79356	-0.15487	25.8114	-0.15366	4.4416
0.075801	17.567	0.076801	-0.80084	-0.15668	26.7029	-0.15537	4.44179
0.073151	16.409	0.074151	-0.80738	-0.15839	27.6628	-0.15699	4.44202
0.070501	15.1562	0.071501	-0.81324	-0.16	28.6314	-0.15851	4.44189
0.067851	13.8303	0.068851	-0.81849	-0.1615	29.596	-0.15993	4.44177
0.065201	12.4614	0.066201	-0.8232	-0.16288	30.5026	-0.16124	4.44206
0.062551	11.0825	0.063551	-0.82741	-0.16415	31.3188	-0.16244	4.44292
0.059901	9.72693	0.060901	-0.83119	-0.16529	32.007	-0.16352	4.4447
0.057251	8.4251	0.058251	-0.83461	-0.1663	32.5348	-0.16448	4.4472
0.054601	7.20275	0.055601	-0.83776	-0.16718	32.8741	-0.16531	4.45137
0.051951	6.08094	0.052951	-0.84074	-0.16792	32.9972	-0.16601	4.4538
0.049301	5.07395	0.050301	-0.84371	-0.16852	32.8804	-0.16658	4.45334
0.04665	4.19039	0.04765	-0.84683	-0.16898	32.5122	-0.16701	4.45394
0.044	3.4326	0.045	-0.85037	-0.1693	31.8904	-0.16731	4.45549
0.04135	2.79507	0.04235	-0.85468	-0.16947	31.0156	-0.16747	4.45759
0.0387	2.26807	0.0397	-0.85965	-0.16949	29.8921	-0.16749	4.46009
0.03605	1.83784	0.03705	-0.8648	-0.16937	28.52	-0.16738	4.46274
0.0334	1.48593	0.0344	-0.87318	-0.16911	26.8846	-0.16713	4.46465
0.03075	1.19672	0.03175	-0.88803	-0.16869	24.9898	-0.16674	4.46369
0.0281	0.960828	0.0291	-0.91544	-0.16814	22.8352	-0.16621	4.45575
0.02545	0.76884	0.02645	-0.95986	-0.16744	20.4007	-0.16556	4.43369
0.0228	0.613594	0.0238	-1.04624	-0.16661	17.5487	-0.16477	4.38066
0.02015	0.468066	0.02115	-1.21441	-0.16564	14.3107	-0.16385	4.26519
0.0175	-1.59889	0.0185	-3.06686	-0.16455	6.71831	-0.16281	3.42399
RATA2	18.4721		-0.60849		21.38143		3.213945

LAMPIRAN 2

Data performa turbin ketika posisi sudut 90°
(Tugas Akhir dari Edwin Johan 2015)

Sudut	P total (Pa)	Gaya (N)	Torsi (Nm)	Kecepatan sudut (rad/s)	Putaran (rpm)	Daya (Watt)
90	12.03	2.286	0.217	26.316	251	5.711

DAFTAR PUSTAKA

Hendra A. 2012. Pengaruh Jumlah Sudu Terhadap Unjuk Kerja Turbin Angin Savonius. Malang : Universitas Brawijaya

Johan, Edwin. 2015. Analisis Pengaruh Overlap Ratio Pada Turbin Angin Savonius Sumbu Vertikal Tipe-L Menggunakan Perangkat Lunak Fluent 6.3.26. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Kundu, Pijush K dan Cohen, Ira M dan Dowling, David R. 2012. *Fluid Mechanics : fifth edition*. USA : Elsevier Inc.

Pritchard, Philip J, Fox and McDonald's. 2011. *Introduction of fluid mechanics: Eight edition*. USA: John Wiley & Sons, Inc.

Soelaiman F.A.T, Tandian P.N, dan Rosidin N. 2007. Perancangan, Pembuatan, dan Pengujian Prototipe SKEA Menggunakan Rotor Savonius dan Windside Untuk Penerangan Jalan Tol. Bandung : Laporan Penelitian ITB

Tuakia, Firman. 2008. Dasar-Dasar CFD Menggunakan FLUENT. Bandung: Informatika.

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Lamongan, 11 November 1994, merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu SDN TawangrejoII Lamongan, SMP Negeri 1 Turi Lamongan, SMA Negeri 1 Lamongan. Pada tahun 2012, penulis diterima di Program Studi D3 Teknik Mesin FTI-ITS dan terdaftar sebagai mahasiswa dengan NRP 2112 030 054. Konversi Energi merupakan bidang studi yang dipilih penulis.

Selama duduk di bangku kuliah, penulis aktif mengikuti kegiatan perkuliahan. Selain itu penulis juga aktif di bidang keorganisasian di Himpunan Mahasiswa D3 Teknik Mesin. Penulis juga pernah mengikuti berbagai kegiatan untuk menunjang soft skill. Kegiatan yang pernah diikuti penulis antara lain : Pelatihan LKMM Pra-TD, Pelatihan LKMM TD, Pelatihan Karya Tulis Ilmiah, Pelatihan Motor Bakar. Penulis juga pernah melaksanakan kerja praktek di PT. YTL Jawa Timur selama 3 Juli – 1 Agustus 2014 pada Department Engineering Turbine Section.