

**SKRIPSI - ME141501** 

ANALISIS DAN PEMODELAN SAVONIUS VERTICAL AXIS WIND TURBINE DENGAN VARIASI BLADE TERHADAP ALIRAN UDARA DENGAN METODE cfd (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS)

Raden Ekky Setyawan NRP 04211645000011

Dosen Pembimbing Sutopo Purwono Fitri, S.T., M.Eng., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER SURABAYA 2018



## **SKRIPSI - ME 141501**

# ANALISIS DAN PEMODELAN SAVONIUS VERTICAL AXIS WIND TURBINE DENGAN VARIASI BLADE TERHADAP ALIRAN UDARA DENGAN METODE cfd (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS)

Raden Ekky Setyawan NRP 04211645000011

Dosen Pembimbing Sutopo Purwono Fitri, S.T., M.Eng., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER SURABAYA 2018



## FINAL PROJECT - ME 141501

# ANALISYS AND MODELING SAVONIUS VERTICAL AXIS WIND TURBINE WITH BLADE VARIATION AGAINST AIR FLOW USING CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS) METHOD

Raden Ekky Setyawan NRP 04211645000011

Supervisors
Sutopo Purwono Fitri, S.T., M.Eng., Ph.D.

DEPARTEMENT OF MARINE ENGINEERING FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER SURABAYA 2018

#### LEMBAR PENGESAHAN

## ANALISIS DAN PEMODELAN SAVONIUS VERTICAL AXIS WIND TURBINE DENGAN VARIASI BLADE TERHADAP ALIRAN UDARA DENGAN METODE CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS)

#### **TUGAS AKHIR**

Diajukan Guna Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada

Bidang Studi *Marine Fluid Machinery and System* (MMS) Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan Fakultas Teknologi Kelautan Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Raden Ekky Setyawan NRP. 04211645000011

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:

Sutopo Purwono Fitri, S.T., M.Eng., Ph.D. NIP 1975 1006 2002 12 1003

(Surabaya, Juli 2018)

#### **LEMBAR PENGESAHAN**

## ANALISIS DAN PEMODELAN SAVONIUS VERTICAL AXIS WIND TURBINE DENGAN VARIASI BLADE TERHADAP ALIRAN UDARA DENGAN METODE CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS)

#### **TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada

Bidang Studi Marine Fluid Machinery and System (MMS) Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan Fakultas Teknologi Kelautan Institut Teknologi Sepuluh Nopember

> Oleh: RADEN EKKY SETYAWAN NRP 0421 16 4500 0011

Disetujui oleh,

Kepala Departemen Teknik Sistem Perkapalan: ELAN LIKNOLOGI

Enge M. Badrus Zaman, S.T., M.T.

NIP. 1977 0802 2008 01 1007

(Surabaya, Juli 2018)

### SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Raden Ekky Setyawan NRP : 04211645000011

Jurusan : Departemen Teknik Sistem Perkapalan

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul:

## ANALISIS DAN PEMODELAN SAVONIUS VERTICAL AXIS WIND TURBINE DENGAN VARIASI BLADE TERHADAP ALIRAN UDARA DENGAN METODE CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS)

benar bebas dari plagiat, dan apabila pernyataan ini terbukti tidak benar maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat untuk dipergunakan sebagaimana mestinya.

Surabaya, 13 Juli 2018

Penulis

## ANALISIS DAN PEMODELAN SAVONIUS VERTICAL AXIS WIND TURBINE DENGAN VARIASI BLADE TERHADAP ALIRAN UDARA DENGAN METODE CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS)

Nama Mahasiswa : Raden Ekky Setyawan

NRP : 04211645000011

Departemen : Teknik Sistem Perkapalan

Dosen Pembimbing : Sutopo Purwono Fitri, S.T., M.Eng., Ph.D.

#### **ABSTRAK**

Energi merupakan sebuah kebutuhan penting di dalam kehidupan manusia, terutama pada era globalisasi ini. Banyak peralatan yang digunakan untuk mendukung dan meringankan setiap kegiatan manusia. Sebagian besar energi yang digunakan selama ini berasal dari sumber daya energi fosil, sedangkan fosil merupakan sumber energi yang tidak terbarukan dalam artian jumlahnya terbatas dan lama-kelamaan akan habis. Pemanfaatan energi angin merupakan pemanfaatan energi terbarukan yang paling berkembang belakangan ini. Berdasarkan jenisnya, turbin angin dibagi menjadi dua jenis yaitu turbin angin yang berputar pada poros horisontal yang disebut dengan Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT), dan turbin angin yang berputar pada poros vertikal yang disebut dengan Vertical Axis Wind Turbine (VAWT). Berdasarkan hal tersebut penulis berkeinginan untuk melakukan penelitian mengenai turbin angin sumbu vertikal dengan tipe (VAWT) dengan tipe Savonius untuk mengetahui kinerja turbin angin sumbu vertikal tipe Savonius dengan melakukan variasi tipe blade yaitu tipe L dan tipe U dengan dimensi utama yang sama yaitu d poros: 0.05 m, d dalam: 0.5 m, d luar: 0.51, tinggi: 1.5 m, dan jumlah blade 3 buah, serta variasi kecepatan angin 4 m/s, 5 m/s, dan 6 m/s dengan menggunakan metode CFD (Computational Fluid Dynamics). Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan kinerja turbin savonius dengan tipe blade L memiliki kinerja yang lebih optimal jika dibandingkan dengan tipe blade U. Pada kecepatan angin 6 m/s savonius dengan tipe blade L memiliki putaran 114 Rpm dan daya maksimal yang dihasilkan adalah 119.264 Watt, sedangkan savonius dengan blade U pada kecepatan angin 6 m/s memiliki 113 rpm dan daya maksimumnya adalah 118.905 Watt

Kata kunci: Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT), Vertical Axis Wind Turbine (VAWT), Savonius, blade, Computational Fluid Dynamics.

## ANALISYS AND MODELING SAVONIUS VERTICAL AXIS WIND TURBINE WITH BLADE VARIATION AGAINST AIR FLOW USING CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS) METHOD

Student's Name : Raden Ekky Setyawan NRP : 04211645000011 : Marine Engineering

Supervisor : Sutopo Purwono Fitri, S.T., M.Eng., Ph.D.

#### **ABSTRACT**

Energy is an important need for human life, especially in this era of globalization. Many tools are used to support and alleviate every human activity. So far, most of the energy used for tools and any human's needed is comes from the fossils energy resources, whereas fossils energy are a non renewable energy resources, that is means the numbers of that resources are limited and over time it will be exhausted. The use of wind energy is the most developed utilization of renewable energy in recent years. The tools used to utilizing the wind energy is called wind turbine or windmill. Based on its type, the wind turbine is divided into two types, a wind turbine that rotates on a horizontal axis called Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT), and a wind turbine that rotates on a vertical axis called Vertical Axis Wind Turbine (VAWT). Based on that case above, the writer want to develop and analyze on vertycal axis wind turbine with Savonius type to know the performance of the Savonius wind turbine by doing variation of its blade type, type L and tupe U with same dimension that is: d shaft: 0.05 metres, d in of turbine: 0.5 metres, d out of turbine: 0.51 metres, height of turbine: 1.5 metres, and the number of blades is 3 pieces, as well as wind speed variation is 4 m/s, 5 m/s, and 6 m/s. The simulation analyzing is using CFD method, and based on it the results is the Savonius turbine with blade L has optimum performance compared to the blade U. The Savonius with blade L at wind speed 6 m/s has 114 rpm and the maximum power is 119.264 Watt, whereas the Savonius with blade U at wind speed 6 m/s has 113 rpm and the maximum power is 118.905 Watt.

Keywords: Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT), Vertical Axis Wind Turbine (VAWT), Savonius, blade, Computational Fluid Dynamics.

#### KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada kehadirat Allah SWT, karena dengan rahmat dan karunia serta taufik dan hidayah Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan tepat waktu yang berjudul "ANALISIS DAN PEMODELAN SAVONIUS VERTICAL AXIS WIND TURBINE DENGAN VARIASI BLADE TERHADAP ALIRAN UDARA DENGAN METODE CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS)". Dalam proses penulisan tugas akhir ini penulis juga mendapatkan beberapa dukungan baik materi maupun moril dari orangorang terdekat penulis oleh karena itu penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada :

- 1. Allah SWT yang telah memberikan nikmat kesehatan, kesempatan, dan kehidupan sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir kali ini.
- 2. Kedua orang tua penulis R. Sonny Indrio Agustiono S.H. dan Suyanti yang telah mendukung penulis baik dukungan moril, dukungan materi, dan dukungan lainnya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan baik.
- 3. Bapak Dr. Eng. M. Badrus Zaman, S.T.,M.T selaku Ketua Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- 4. Bapak Ir. Sardono Sarwito, M.Sc selaku Dosen Wali.
- 5. Bapak Sutopo Purwono Fitri, S.T., M.Eng., Ph.D. selaku dosen pembimbing penulis yang telah memberikan saran dan ilmu kepada penulis sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir kali ini.
- 6. Bapak H. R. Dr, Endro Sukmono yang memberikan segala dukungannya kepada penulis.
- 7. Teman teman seperjuangan Lintas Jalur Teknik Sistem Perkapalan ITS Semester Ganjil 2016 (Adrian, Yafi, Maful, Fauzi, Yandi, Bayu, Riri, Anton, Ekky, Ridho, dan Satryo) yang telah berjuang bersama untuk mencapai proses akhir.
- 8. Teman teman dan pengurus laboraturium *Marine Machinery And Fluids System* (MMS) yang telah membantu penulis dan menyediakan fasilitas sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir.
- 9. Kepada Vani Puji Paras Putri yang selalu memberikan segala dukungan dan motivasi penulis selama pengerjaan tugas akhir.
- 10. Kepada Bayu Putra, Maful Suranto, Yafi Dresta Adi Wiradikna, Triantono Taufik, dan Paundra Yahya Al Haris sebagai teman diskusi mengenai metode CFD dan *software* yang digunakan untuk menyelesaikan tugas akhir.
- 11. Kepada keluarga besar Warkop PWK yang selalu mendukung, memberikan motivasi, dan menyediakan tempat kepada penulis selama pengerjaan tugas akhir.
- 12. Kepada seluruh staff dan pengurus departemen Teknik Sistem Perkapalan ITS yang telah menerima penulis di jajaran civitas akademika ITS.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan tugas akhir ini masih banyak kekurangan karena keterbatasan pengetahuan dan pengalaman, oleh karena itu kritik dan saran yang membangun sangatlah penulis harapkan untuk lebih baik dan sempurnanya Tugas Akhir ini. Semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dan dapat digunakan sebagai tambahan informasi serta wacana-wacana bagi semua pihak yang membutuhkan sehingga dapat memberikan kontribusi yang berarti bagi semua pihak yang berkepentingan dalam topik Tugas Akhir ini.

Surabaya, 14 Juli 2018

Penulis,

## **DAFTAR ISI**

HA	LAMAN JUDUL	i
LEN	MBAR PENGESAHAN	V
LEN	MBAR PENGESAHAN	vii
SUF	RAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT	ix
ABS	STRAK	xi
ABS	STRACT	xiii
KA	TA PENGANTAR	xv
DA	FTAR ISI	xvii
DA	FTAR GAMBAR	xxi
DA	FTAR TABELx	xiii
BAl	B I PENDAHULUAN	1
1.1	Latar Belakang	1
1.2	Rumusan Masalah	2
1.3	Tujuan Penelitian	2
1.4	Batasan Masalah	2
1.5	Manfaat Penelitian	3
1.6	Tempat Pelaksanaan	3
BAI	B II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1	Energi Angin	5
2.2	Udara dan sifatnya	7
	2.2.1 Udara	7
	2.2.2 Sifat Udara	8
2.3	Bilangan Reynolds	9
2.4	Aliran Eksternal	10
	2.4.1 Boundary Layer	10
	2.4.2 Aliran Viscous dan Nonviscous	11
	2.4.3 Separasi Aliran	12
2.5	Tekanan Statis, Stagnasi, dan Dinamis	14
2.6	Turbin Angin	17
	2.6.1 Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)	18

	2.6.2	Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)	22
2.7	Rumu	s Dasar Perhitungan Turbin	25
2.8	Dinan	nika Aliran Fluida Secara Komputasi (Computational Fluid Dynamic)	27
2.9	Analis	sis CFD (Computational Fluid Dynamics) menggunakan ANSYS Fluent	28
	2.9.1	Meshing dan Grid Independensi	29
	2.9.2	Boundary Condition	29
	2.9.3	Penentuan Parameter Model	30
BA	B III M	IETODE PENELITIAN	32
3.1	Metod	de Penulisan Tugas Akhir	33
3.2	Tahap	oan Penulisan Tugas Akhir	33
3.3	Prose	dur Penelitian	35
	3.3.1	Identifikasi dan Perumusan Masalah	35
	3.3.2	Studi Literatur	35
	3.3.3	Pemodelan Model	35
	3.3.4	Melakukan Perbandingan dan Hasil Analisis	49
BA	B IV A	NALISA DAN PEMBAHASAN	50
4.1	Peran	cangan Turbin Angin Poros Vertikal dengan Tipe Savonius	51
	4.1.1	Kecepatan Angin Indonesia	51
	4.1.2	Parameter Perancangan Turbin Angin Poros Vertikal Tipe Savonius	51
	4.1.3	Meshing dan Grid Independensi Model Turbin Savonius	52
4.2	Pengo	olahan Data	54
	4.2.1	Savonius dengan Tipe Blade U Terhadap Kecepatan Angin 4 m/s	54
	4.2.2	Savonius dengan Tipe Blade U Terhadap Kecepatan Angin 5 m/s	56
	4.2.3	Savonius dengan Tipe Blade U Terhadap Kecepatan Angin 6 m/s	58
	4.2.4	Savonius dengan Tipe Blade L Terhadap Kecepatan Angin 4 m/s	60
	4.2.5	Savonius dengan Tipe Blade L Terhadap Kecepatan Angin 5 m/s	62
	4.2.6	Savonius dengan Tipe Blade L Terhadap Kecepatan Angin 6 m/s	64
4.3	Pemb	ahasan	66
	4.3.1	Grafik Perbandingan Nilai Tekanan pada <i>Blade</i> Tipe U dan Tipe L Terha Kecepatan Udara	•
	4.3.2	Grafik Perbandingan Jumlah Putaran Rotor pada <i>Blade</i> Tipe U dan Tipe Terhadap Kecepatan Udara	
	4.3.3	Grafik Perbandingan Nilai Torsi pada <i>Blade</i> Tipe U dan Tipe L Terhadar Kecepatan Udara	

	4.3.4	Grafik Perbandingan Torsi pada <i>Blade</i> Tipe U dan Tipe L Terhadap Put	
	4.3.5	Grafik Perbandingan Daya pada <i>Blade</i> Tipe U dan Tipe L Terhadap Kecepatan Udara	
	4.3.6	Grafik Perbandingan Daya pada <i>Blade</i> Tipe U dan Tipe L Terhadap Pur	
BA	B V K	ESIMPULAN DAN SARAN	71
5.1	Kesin	npulan	71
5.2	Saran	1	71
DA	FTAR	PUSTAKA	73
LA	MPIR A	AN	75
BIC	DATA	A PENULIS	93

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Proses Terjadinya Angin	5
Gambar 2.2. Grafik Total Kapasitas Kincir Angin di Dunia Tahun 2004 – 2014	6
Gambar 2.3. Grafik Negara Pengguna Turbin Angin Terbesar Tahun 2014	
Gambar 2.4. Peta Energi Angin di Dunia	7
Gambar 2.5. Boundary Layer pada Plat Datar	. 11
Gambar 2.6. Perbedaan Fluida Ideal dengan Viscous	. 12
Gambar 2.7. Boundary Layer Flow dengan Gradien Tekanan	. 12
Gambar 2.8. Aliran inviscid pada Lintasan berbentuk Sphere	. 13
Gambar 2.9. Aliran pada Lintasan berbentuk Teardrop Sphere	. 14
Gambar 2.10. Pengukuran Tekanan Statis	. 14
Gambar 2.11. Pengukuran Stagnasi	. 16
Gambar 2.12. Pengukuran Tekanan Stagnasi dan Statis	. 16
Gambar 2.13. Turbin Angin	. 18
Gambar 2.14. Horizontal Axis Wind Turbine	. 19
Gambar 2.15. Komponen Horizontal Axis Wind Turbine	
Gambar 2.16. Vertical Axis Wind Turbine	. 23
Gambar 2.17. Darrieus Vertical Axis Wind Turbine	. 24
Gambar 2.18. Savonius Vertical Axis Wind Turbine	. 25
Gambar 2.19. Hubungan Koefisien Daya dan Tip Speed Ratio	. 27
Gambar 2.20. Proses Simulasi CFD	. 28
Gambar 2.21. Simulasi Aliran Turbin Angin Menggunakan ANSYS Fluent	. 29
Gambar 2.22. Boundary Condition	. 30
Gambar 3.23. Tahapan Penelitian	. 33
Gambar 3.24. Kovensional Savonius	. 35
Gambar 3.25. Bach-Type Savonius	. 35
Gambar 3.26. Membuat Diameter Dalam pada Tipe Blade U	. 37
Gambar 3.27. Membuat Diameter Luar pada Tipe Blade U	. 37
Gambar 3.28. Geometri Blade U	. 38
Gambar 3.29. Array Geometri Blade U	. 38
Gambar 3.30. Geometri 3D blade turbin Savonius tipe U	. 39
Gambar 3.31. Geometri 2D blade turbin Savonius tipe L	. 39
Gambar 3.32. Array Geometri Blade L	. 40
Gambar 3.33. Geometri 3D blade turbin Savonius tipe L	. 40
Gambar 3.34. Domain Pemodelan Savonius	. 41
Gambar 3.35. Domain Setelah Proses Meshing	. 41
Gambar 3.36. Kondisi Batas pada Area Boundary	. 42
Gambar 3.37. Penentuan Kondisi Models Aliran	. 42

Gambar 3.38. Penentuan Material	43
Gambar 3.39. Penentuan Cellzone Condition	43
Gambar 3.40. Penentuan Boundary Condition Inlet	44
Gambar 3.41. Penentuan Boundary Condition Outlet	44
Gambar 3.42. Penentuan Boundary Condition Wall	45
Gambar 3.43. Penentuan Solution Method	
Gambar 3.44. Initialize	46
Gambar 3.45. Penentuan Monitor Residual	46
Gambar 3.46. Penentuan Monitor Drag and Lift	
Gambar 3.47. Penentuan Jumlah Time Step dan Iterasi	47
Gambar 4.48. Data Monitoring Kecepatan Angin Indonesia	51
Gambar 4.49. Blade L meshing	
Gambar 4.50. Blade U meshing	53
Gambar 4.51. Contour pressure boundary layer terhadap kecepatan angin 4 m/s	54
Gambar 4.52. Contour pressure boundary layer terhadap kecepatan angin 5 m/s	56
Gambar 4.53. Contour pressure boundary layer terhadap kecepatan angin 6 m/s	58
Gambar 4.54. Contour pressure boundary layer terhadap kecepatan angin 4 m/s	60
Gambar 4.55. Contour pressure boundary layer terhadap kecepatan angin 5 m/s	62
Gambar 4.56. Contour pressure boundary layer terhadap kecepatan angin 6 m/s	64
Gambar 4.57. Grafik Tekanan Terhadap Kecepatan Udara	66
Gambar 4.58. Grafik Putaran Terhadap Kecepatan Udara	67
Gambar 4.59. Grafik Torsi Terhadap Kecepatan Udara	68
Gambar 4.60. Grafik Torsi Terhadap Putaran	69
Gambar 4.61. Grafik Daya Terhadap Kecepatan Udara	69
Gambar 4.60. Grafik Dava Terhadap Putaran	70

## **DAFTAR TABEL**

Tabel 3.1. Geometri Turbin Angin Vertikal Tipe U	37
Tabel 3.2. Geometri Turbin Angin Vertikal Tipe L	37
Tabel 4.3. Parameter kondisi Simulasi	51
Tabel 4.4. Grid Independensi Hasil Meshing	53
Tabel 4.5. Hasil Perhitungsn	65



xxiv

## BAB I PENDAHULUAN

#### 1.1 Latar Belakang

Energi merupakan sebuah kebutuhan penting di dalam kehidupan manusia, terutama pada era globalisasi ini. Banyak peralatan yang digunakan untuk mendukung dan meringankan setiap kegiatan manusia. Sebagian besar energi yang digunakan selama ini berasal dari sumber daya energi fosil, sedangkan fosil merupakan sumber energi yang tidak terbarukan dalam artian jumlahnya terbatas dan lama-kelamaan akan habis. Dilihat dari semakin majunya jaman, semakin meningkat pula kebutuhan manusia akan energi. Semakin tingginya penggunaan sumber energi fosil oleh manusia dapat menjadi ancaman bagi alam dan manusia itu sendiri di masa depan. Oleh karena itu diperlukan solusi untuk mengurangi penggunakan sumber energi fosil.

Berbagai negara mulai gencar memanfaatkan sumber energi lain yang terbarukan. Selain itu energi terbarukan memiliki sifat yang tidak terbatas sehingga mampu digunakan oleh manusia terus-menerus dengan jangka waktu panjang hingga tak terbatas, contohnya sumber energi yang berasal dari sinar matahari, aliran air, dan juga angin. Diantara beberapa sumber energi tersebut, Indonesia adalah negara yang memiliki potensi angin yang cukup baik. Dimana perbedaan tekanan udara akan menghasilkan hembusan angin. Dari hal itu dapat diciptakan alat rekayasa untuk memanfaatkan angin yaitu kincir angin. Kincir angin tersebut akan berputar seiring hembusan angin yang menabrak permukaannya, kincir angin akan dihubungkan pada generator listrik menggunakan sebuah poros. Dari putaran kincir angin tersebut akan memutar poros generator dan generator akan menghasilkan listrik.

Pemanfaatan energi angin merupakan pemanfaatan energi terbarukan yang paling berkembang belakangan ini. Berdasarkan data dari *Renewable Energy Policy Network for the 21<sup>st</sup> Century* (REN21), total kapasitas energi listrik yang dihasilkan dari pemanfaatan turbin angin di seluruh dunia terus meningkat setiap tahunnya, dengan total tahun 2014 sebesar 370 *GigaWatts*. Negara dengan kapasitas turbin angin terbesar saat ini adalah China dengan kapasitas lebih dari 110 GW, disusul dengan Amerika Serikat, Jerman, Spanyol dan India.

Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan turbin angin sebagai sarana untuk memanfaatkan energi angin yang merupakan salah satu energi terbarukan yang sangat menjanjikan dan efisien. Energi angin mempunyai potensi yang cukup besar untuk dimanfaatkan menjadi energi listrik di Indonesia. Indonesia, termasuk negara kepulauan yang 2/3 wilayahnya adalah lautan dan mempunyai garis pantai terpanjang di dunia yaitu  $\pm$  80.791,42 Km. Hal ini berpotensi untuk pengembangan pembangkit listrik tenaga angin. Menurut data dari Bidang Konversi Energi Dirgantara, Indonesia memiliki potensi kecepatan angin 3-5 m/s.

Berdasarkan jenisnya, turbin angin dibagi menjadi dua jenis yaitu turbin angin yang berputar pada poros horisontal yang disebut dengan *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT), dan turbin angin yang berputar pada poros vertikal yang disebut dengan *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT). Pada penelitian ini, penulis akan melakukan

penelitian mengenai kinerja turbin angin poros vertikal (VAWT) terhadap kecepatan angin dan variasi *blade* untuk mengetahui tingkat efisiensi serta kinerja turbin angin poros vertikal (VAWT) tipe *Savonius*.

#### 1.2 Rumusan Masalah

Dari uraian latar belakang diatas, rumusan masalah yang akan digunakan oleh penulis adalah sebagai berikut :

- 1. Bagaimana perancangan turbin angin poros vertikal dengan tipe Savonius?
- 2. Bagaimana cara mengetahui pengaruh kecepatan angin terhadap kinerja turbin angin poros vertikal tipe *Savonius*?
- 3. Bagaimana cara mengetahui pengaruh variasi tipe *blade* terhadap kinerja turbin angin poros vertikal tipe *Savonius*?

#### 1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan perumusan masalah di atas, tujuan yang ingin dicapai dari Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

- 1. Mengetahui rancangan turbin angin poros vertikal (VAWT) dengan tipe *Sayonius*.
- 2. Mengetahui pengaruh kecepatan angin terhadap kinerja turbin angin poros vertikal (VAWT) tipe *Savonius* dengan menggunakan *ANSYS Fluent*
- 3. Mengetahui pengaruh variasi *blade* terhadap kinerja turbin angin poros vertikal (VAWT) tipe *Savonius* dengan menggunakan *ANSYS Fluent*

#### 1.4 Batasan Masalah

Untuk memperjelas dan memfokuskan mengenai permasalahan dalam penulisan Tugas Akhir ini, maka perlu adanya ruang lingkup batasan, yaitu sebagai berikut

- 1. Pembahasan mengenai *blade* dari turbin angin sumbu vertikal (VAWT) tipe *Savonius* menggunakan tipe *blade* U dan tipe *blade* L.
- 2. Pemodelan dan analisis turbin angin menggunakan 3 variasi kecepatan angin yang berbeda, yaitu 4 m/s, 5 m/s, dan 6 m/s.
- 3. Penelitian yang dilakukan hanya berskala pemodelan dan pengujian menggunakan software *ANSYS Fluent*.
- 4. Hanya membahas mengenai pengaruh desain turbin angin terhadap kecepatan putaran yang dipengaruhi oleh kecepatan angin dan variasi *blade*.
- 5. Tidak membahas mengenai transmisi daya generator secara detail.

#### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

- 1. Mengetahui mengenai rancangan turbin angin poros vertikal (VAWT) dengan tipe *Savonius*
- 2. Mengetahui pengaruh kecepatan angin dan pengaruh variasi *blade* terhadap kinerja turbin angin poros vertikal (VAWT) tipe *Savonius*?
- 3. Mempelajari mengenai keunggulan dan kelemahan turbin angina sumbu vertikal (VAWT).

## 1.6 Tempat Pelaksanaan

Tempat pelaksanaan untuk pengerjaan tugas akhir ini adalah:

- 1. Laboratorium MMS (*Marine Machinery and System*), Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknik Kelautan.
- 2. Perpustakaan Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

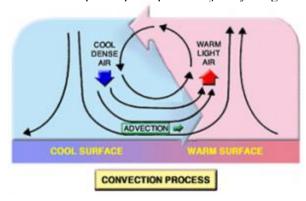
## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Energi Angin

Energi angin merupakan salah satu energi terbarukan yang telah lama ada. Pada awalnya manusia memanfaatkan energi angin untuk berlayar yaitu dengan menggunakan layar, lalu digunakan pula dalam keperluan sehari-hari dengan cara energi mengkonversi energi angin menjadi energi mekanik yang digunakan untuk proses penggilingan biji, ataupun memompa air. Pada perkembangan saat ini, energi angin dikonversikan menjadi energi mekanik lalu dikonversikan kembali menjadi energi listrik. Energi angin yang telah dikonversikan menjadi bentuk energi listrik kemudian energi tersebut akan di transmisikan sehingga dapat digunakan sebagai sumber daya listrik bagi alat-alat elektronik. Tenaga listrik sebagai salah satu sistem energi mempunyai peranan yang sangat penting dalam pembangunan ekonomi suatu negara. Terlebih pada masa sekarang ini, muncul tantangan dan dimensi-dimensi baru yang dihadapi umat manusia sejalan dengan bertambahnya jumlah penduduk menyebabkan aspekaspek kehidupan yang harus dipenuhi oleh pengadaan tenaga listrik semakin meningkat. Kebutuhan akan listrik sangatlah besar di daerah perkotaan

maupun di pedesaan, sejalan dengan meningkatnya pembangunan kesejahteraan masyarakat, berbagai upaya telah dilakukan untuk penyediaan listrik sampai pada pelosok-pelosok desa. (Yuni, 2002)

Angin merupakan udara yang bergerak akibat adanya perbedaan tekanan udara antara tempat yang memiliki tekanan tinggi ke tempat yang memiliki tekanan rengah, atau dari wilayah bersuhu rendah ke wilayah bersuhu tinggi (Petra, 2009). Angin terjadi pada saat bumi menerima radiasi sinar matahari secara tidak merata. Dengan demikian, daerah khatulistiwa akan menerima energi radiasi matahari lebih banyak daripada di daerah kutub, atau dengan kata lain, udara di daerah khatulistiwa akan lebih tinggi dibandingkan dengan udara di daerah kutub. Berat jenis dan tekanan udara yang disinari cahaya matahari akan lebih kecil dibandingkan jika tidak disinari. Perbedaan berat jenis dan tekanan inilah yang akan menimbulkan adanya pergerakan udara. Pergerakan udara ini merupakan prinsip dari terjadinya angin.



Gambar 2.1. Proses Terjadinya Angin

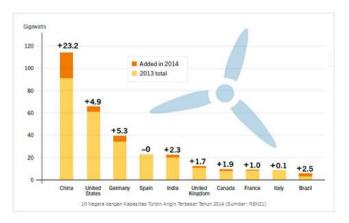
#### (Sumber: https://ilmugeografi.com)

Energi angin merupakan salah satu dari sumber energi terbarukan, keberadaannya tidak akan bisa habis jika dibandingkan dengan bahan bakar fosil. Kebanyakan energi angin dalam era modern ini dihasilkan dalam bentuk listrik dengan mengubah rotasi dari *blade* turbin menjadi arus listrik dengan menggunakan generator listrik. Indonesia yang secara geografis terletak pada jalur khatulistiwa memiliki potensi angin yang baik, menurut Bidang Konversi Dirgantara (2006) Indonesia memiliki potensi angin dengan kecepatan 3-5 m/s, namun Indonesia termasuk salah satu negara yang tertinggal dalam memanfaatkan energi angin sebagai pembangkit listrik.

Pemanfaatan energi angin merupakan pemanfaatan energi terbarukan yang paling berkembang belakangan ini. Berdasarkan data dari *Renewable Energy Policy Network for the 21<sup>st</sup> Century* (REN21), total kapasitas energi listrik yang dihasilkan dari pemanfaatan turbin angin di seluruh dunia terus meningkat setiap tahunnya, dengan total tahun 2014 sebesar 370 *GigaWatts*. Negara dengan kapasitas turbin angin terbesar saat ini adalah China dengan kapasitas lebih dari 110 GW, disusul dengan Amerika Serikat, Jerman, Spanyol dan India.

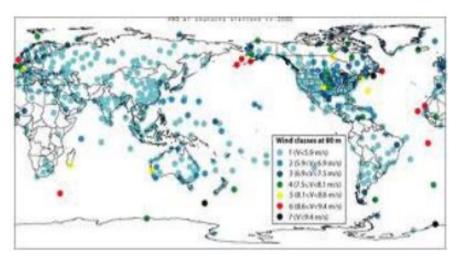


Gambar 2.2. Grafik Total Kapasitas Kincir Angin di Seluruh Dunia Tahun 2004 – 2014. (Sumber: *Renewable Energy Policy Network for the 21<sup>st</sup> Century* (REN21))



Gambar 2.3. Grafik Negara Pengguna Turbin Angin Terbesar Tahun 2014. (Sumber: *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century* (REN21))

Indonesia juga mempunyai wilayah garis pantai yang panjang dan hal tersebut dapat menjadi potensi besar sebagai tempat untuk memanfaatkan energi angin yang ada. Perubahan iklim yang terjadi di Indonesia akibat dari pemanasan global ternyata meningkatkan potensi angin yang ada di berbagai wilayah Indonesia.



Gambar 2.4. Peta Energi Angin di Dunia (Sumber: *Buku Panduan Energi Terbarukan - PNPM*)

## 2.2 Udara dan sifatnya

#### 2.2.1 Udara

Udara merupakan salah satu jenis fluida yang memiliki densitas dan viskositas. Densitas ( $\rho$ ) dapat didefinisikan sebagai massa persatuan volume. Hal ini tergantung pada kondisi tekanan (P) dan temperatur (T). Seperti contoh, kendaraan di jalan pada umumnya berjalan dengan kecepatan dibawah sepertiga kecepatan suara. Pada batas kecepatan tersebut nilai untuk variasi tekanan dan temperatur dalam aliran dengan nilai *stream* sangat kecil, oleh karena itu perubahan nilai pada densitas itu diabaikan. Dengan demikisan aliran udara yang mengalir di sisi-sisi kendaraan tersebut dapat dikategorikan sebagai aliran fluida *incompressible*. Untuk kondisi standar, P = 1 atm dan  $T = 288^{\circ}$ K, nilai densitas ( $\rho$ ) udara adalah  $\rho = 1,2250$  kg/m³ (Johan, Edwin, 2015)

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

#### 2.2.2 Sifat Udara

#### **2.2.2.1 Densitas**

Udara adalah fluida yang memiliki densitas dan viskositas. Densitas ( $\rho$ ) didefinisikan sebagai massa persatuan volume. Property 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 persamaan :

$$\rho = \frac{m}{v} \tag{1}$$

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

m = massa (kg)

 $v = \text{volume (m}^3)$ 

Untuk harga standar pada tekanan (P) =  $1,01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2$  dengan temperature (T) = 288.15 K sehingga nilai densitas udara adalah  $1,23 \text{ kg/m}^3$  dan untuk air adalah  $1000 \text{ kg/m}^3$ .

#### 2. Berat Spesifik

Didefinisikan sebagai densitas massa dikalikan dengan gravitasi yang kemudian dapat dirumuskan dengan persamaan :

$$\gamma = \rho \cdot g$$
 (2)

Dimana unit dari berat spesifik adalah N/m<sup>3</sup>. Untuk nilai  $\gamma_{udara} = 12.07$  N/m<sup>3</sup> dan  $\gamma_{air} = 9.81 \times 10^3$  N/m<sup>3</sup>.

#### 3. Densitas Relatif (Specific Gravity)

Densitas relatif disebut juga dengan *specific gravity* (SG) yaitu merupakan perbandingan antara berat spesifik suatu zat dengan berat spesifik air pada temperature 4°C. Densitas relative tidak memiliki satuan unit.

#### 2.2.2.2 Viskositas

Properti lain dari udara adalah viskositas. Properti ini disebabkan oleh gesekan molekuler antara partikel-partikel fluida. Gesekan ini berhubungan dengan adanya fluks momentum karena *gradient* kecepatan. Untuk fluida *incompressible*, properti ini bergantung pada temperature (Johan, Edwin, 2015). Viskositas dinyatakan dalam dua bentuk yaitu:

#### 1. Viskositas Dinamis (μ)

Merupakan perbandingan tegangan geser dengan laju perubahannya, besarnya viskositas air bervariasi dan dipengaruhi oleh temperature. Pada kondisi standar (temperature kamar 26,5°C) besar viskositas dinamik adalah  $\mu_{air} = 8.6 \times 10^{-4} \text{ Ns/m}^2$  dan  $\mu_{udara} = 1.7894 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$ .

#### 2. Viskositas Kinematis (v)

Merupakan perbandingan antara viskositas dinamis  $(\mu)$  terhadap kerapatan densitas  $(\rho)$ :

$$v = \frac{\mu}{\rho} \tag{3}$$

Viskositas kinematis muncul dalam banyak terapan, misalnya dalam bilangan *reynolds* yang tanpa dimensi. Untuk  $v_{\text{air}}$  pada temperature kamar 26,5 °C ialah 8,6 x  $10^{-7}$  m²/s dan  $v_{\text{udara}} = 1,4607$  x  $10^{5}$  m²/s.

#### 2.3 Bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds merupakan bilangan tak berdimensi yang digunakan untuk membedakan jenis dari suatu aliran dimana aliran tersebut dikatakan laminar, transisi, atau turbulen (J.Wright, Steven and Reuben M.Olson, 1993). Kondisi aliran *laminar* atau *turbulent* dapat dinyatakan dalam bilangan *Reynolds* untuk aliran *incompressible*. Jenis lapisan yang terjadi pada aliran udara yang mengaliri suatu objek juga dapat ditentukan oleh bilangan *Reynolds* (Re). Hal ini dapat dikatakan bahwa dalam lapis batas gaya geser dan gaya inersia sangat penting. Sementara bilangan *Reynolds* sendiri menggambarkan perbandingan antara gaya inersia terhadap gaya geser.

$$Re = \frac{Gaya Inersia}{Gaya Geser}$$
 (4)

Dimana : Gaya Inersia =  $p x A = \rho U^2 L^2$ 

Gaya Geser 
$$= \tau x A = \left(\frac{\mu . U \infty}{L}\right) . L^2$$

Sehingga,

Untuk aliran eksternal

Re = 
$$\frac{\rho \cdot U^2 \cdot L^2}{\left(\frac{\mu \cdot U \cdot \infty}{L}\right) \cdot L^2} = \frac{\rho \cdot U^2 \cdot L^2}{\mu}$$
 (5)

Dimana :  $\rho$  = Densitas fluida

 $U_{\infty}$  = Kecepatan aliran free stream fluida

L = Panjang karakteristik yang diukur pada medan

aliran, dalam kasus ini digunakan diameter hidrolis (Dh)

 $\mu$  = Viskositas dinamis fluida

- Untuk aliran internal

Diameter hidrolis (Dh) digunakan untuk perhitungan saluran bundar. Diameter hidrolis dapat didefinisikan sebagai berikut.

$$Dh = \frac{4A}{P} \tag{6}$$

Dimana : A = Luas penampang

P = keliling penampang

Sehingga,

$$Re = \frac{\rho. U_{\infty} \cdot \underline{Dh}}{\mu}$$
 (7)

#### 2.4 Aliran Eksternal

## 2.4.1 Boundary Layer

Suatu aliran dapat dikatakan sebagai aliran eksternal apabila aliran tersebut melewati *contour body* yang berada pada aliran fluida tanpa batas. Contoh aliran tanpa batas adalah aliran fluida yang melewati sisi luar dari permukaan lengkung dan juga plat datar (*semi-infinite flat plate*) (*Fox and Mc.Donald*, 8<sup>th</sup> Edition, 2011).

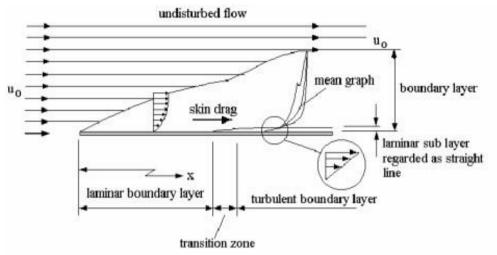
Boundary layer (lapis batas) merupakan lapis tipis pada solid surface yang terbatas daerah sangat sempit dekat contour surface dengan kecepatan fluida tidak uniform dikarenakan tegangan geser yang muncul akibat viskositas.

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

- 1. Daerah di dalam lapisan batas (dekat permukaan *contour*) 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 di luar *boundary layer*, partikel mempertahankan bentuk asalnya sambil bergerak translasi namun tidak berotasi dan efek *viscosity* dapat diabaikan. Kondisi ini bisa dinamakan denang *irrotational*.

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



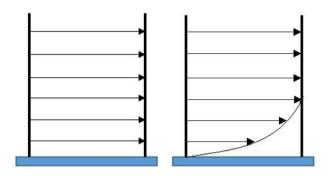
Gambar 2.5. *Boundary Layer* pada plat datar (Sumber: *Fox and Mc.Donald*, 8<sup>th</sup> *Edition*)

Gambar di atas menunjukkan suatu pengembangan *boundary layer* sepanjang permukaan plat. Pada daerah tersebut terdapat dua macam bentuk aliran. Aliran *laminar* dapat dilihat terjadi di bagian awal hingga sepanjang jarang tertentu, kemudian terjadi suatu transmisi aliran yang pada akhirnya akan terjadilah perubahan aliran menjadi *turbulent*. Untuk aliran *incompressible* yang melewati *smooth plate* (plat datar tanpa perubahan tekanan) perubahan aliran dapat dipengaruhi oleh *Reynolds Number*.

## 2.4.2 Aliran Viscous dan Nonviscous

Pada dasarnya aliran dibagi menjadi dua jenis yaitu aliran *viscous* dan aliran *nonviscous*. Untuk aliran *viscous*, kecepatan fluida tepat diatas permukaan padat sama dengan nol. Semakin jauh dari permukaan padat, maka secara berangsur-angsur tegangan geser yang terjadi semakin berkurang, sehingga kecepatan aliran akan membesar. Pada suatu titik tertentu pengaruh tegangan geser terhadap aliran akan hilang sehingga kecepatan aliran akan mencapai nilai yang sama dengan aliran bebasnya (*Fox and Mc.Donald*, 8<sup>th</sup> Edition, 2011).

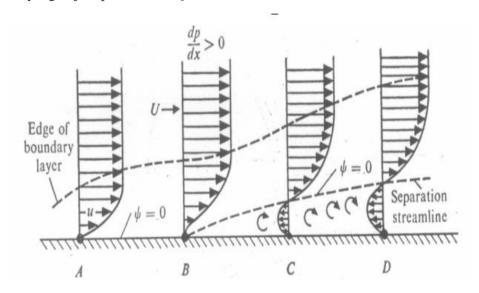
Aliran *nonviscous* bukan berarti bahwa aliran tidak mempunyai viskositas karena fluida akan tetap mempunyai viskositas tertentu. Pengertian aliran *nonviscous* adalah aliran yang mempunyai gradient kecepatan mendekati nol.



Gambar 2.6. Perbedaan Fluida Ideal dengan *Viscous* (Sumber: *Fox and Mc.Donald*, 8<sup>th</sup> *Edition*)

## 2.4.3 Separasi Aliran

Setiap aliran fluida terutama aliran *viscous*, apabila menemui 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 *adserve pressure gradient* dan pengaruh gesekan yang terjadi pada *solid surface* tersebut.

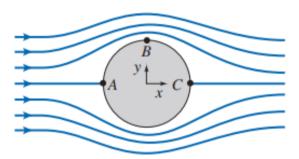


Gambar 2.7. *Boundary layer flow* dengan Gradien Tekanan (Sumber: *Fox and Mc.Donald, 8<sup>th</sup> Edition*)

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 *adserve 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 oleh vorticity tersebut dan terjadilah vortex. Vortex merupakan daerah belakang pada daerah separasi. Terdapat dua area pada daerah separasi ini yaitu daerah laminar yang terseparasi dan daersah resirkulasi. Daerah separasi tersebut semakin kebelakang semakin besar sampai pada titik dimana alirannya sudah kembali ke kondisi paralel, hal ini dikenal dengan reattachment. Pada titik ini energi yang ada pada aliran fluida ini sudah dapat mengatasi adserve pressure gradient yang terjadi sebelumnya, dengan kata lain energi yang momentumnya sudah mendapatkan tambahan kembali dari kondisi freestream-nya. Namun aliran ini sudah berubah menjadi aliran yang turbulen karena penambahan momentum yang ada tersebut melebihi dari kondisi laminarnya. Aliran yang turbulent ini sangat baik untuk mengatasi adserve pressure gradient (Fox and Mc.Donald, 8th Edition, 2011).

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

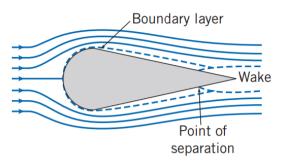


Gambar 2.8. Aliran *inviscid* pada Lintasan berbentuk *Sphere* (Sumber: *Fox and Mc.Donald*, 8<sup>th</sup> *Edition*)

Kecepatan yang mengelilingi silinder meningkat sampai suatu titik maksimum D dan kemudian berkurang saat bergerak lebih jauh ke belakang dari titik D tersebut. Titik D disebut titik separasi 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 dari silinder, distribusi tekanan disepanjang permukaan dari silinder berkurang saat berjalan dari A-D dan akan meningkat lagi saat bergerak dari D-E.

Jika pada lintasan dengan bentuk *teardrop sphere*, pola aliran akan terbuka secara bertahap akibat hal tersebut tekanan akan meningkat perlahanlahan, karena hal terebut tekanan akan meningkat secara perlahan. Untuk

fluida yang melewati lintasan tidak bergerak menjauh hingga mencapai bagian akhir dari objek, seperti pada gambar berikut.

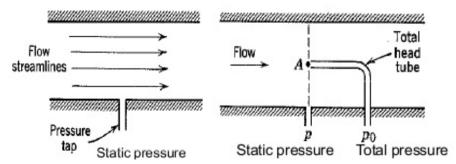


Gambar 2.9. Aliran pada Lintasan berbentuk *Teardrop Sphere* (Sumber: *Fox and Mc.Donald*, 8<sup>th</sup> *Edition*)

*Wake* yang timbul akan lebih kecil (tekanan yang terjadi tidak serendah sebelumnya) menyebabkan *pressure drag* yang timbul semakin berkurang. Salah satu aspek negatif dari bentuk ini adalah total luasan permukaan di mana gesekan terjadi lebih besar, sehingga *friction drag* sedikit meningkat.

## 2.5 Tekanan Statis, Stagnasi, dan Dinamis

Tekanan (P) yang digunakan dalam persamaan Bernoulli adalah tekanan thermodinamis 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 untuk 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. (Johan, Edwin, 2015)



Gambar 2.10. Pengukuran Tekanan Statis (Sumber: *Fox and Mc.Donald*, 8<sup>th</sup> Edition)

Pressure tap adalah sebuah lubang kecil yang dibuat pada dinding dimana axis nya tegak lurus terharap 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 apabila *streamlines* nya berbentuk kurva, akurasi pengukuran dapat diperoleh dengan menggunakan *pressure probe*. 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:

$$\frac{P}{\rho} + \frac{v2}{2} = \text{konstan} \tag{8}$$

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

$$\frac{Po}{\rho} + \frac{Vo}{2} = \frac{P}{\rho} + \frac{V2}{\rho} \tag{9}$$

Dimana  $V_o = 0$ , sehingga:

$$\frac{Po}{\rho} = \frac{P}{\rho} + \frac{V2}{\rho} \tag{10}$$

Atau,

$$P_0 = P + \frac{1}{2} \rho V^2 \tag{11}$$

Persamaan di atas adalah kalimat matematis dari definisi tekanan stagnasasi, yang valid untuk aliran *incompressible*. Bentuk ½  $\rho$ V² umumnya disebut tekanan dinamis. Sehingga persamaan tekanan dinamis adalah :

$$\frac{1}{2} \rho V^2 = P_o - P$$
 (12)

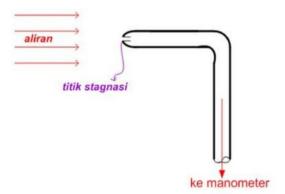
Dan kecepatannya adalah:

$$V = \sqrt{\frac{2(Po - P)}{\rho}} \tag{13}$$

(Fox and Mc.Donald, 8th Edition)

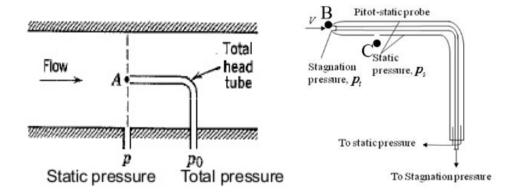
Jadi, bila tekanan stagnasi dan tekanan statis diukur pada suatu titik, maka persamaan kecepatan diatas akan menghasilkan kecepatan aliran lokal.

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



Gambar 2.11. Pengukuran Tekanan Stagnasi (Sumber: *Fox and Mc.Donald*, 8<sup>th</sup> Edition)

Tekanan statis yang sejajar dengan titik A dapat dibaca dari *wall static pressure tap*. Sedangkan tekanan stagnasi dapat diukur langsung pada titik A dengan menggunakan *total head tube*.



Gambar 2.12. Pengukuran Tekanan Stagnasi dan Tekanan Statis (Sumber: *Fox and Mc.Donald*, 8<sup>th</sup> 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 local static pada setiap titik dalam aliran dengan tekanan statik pada *freestream* bergantung langsung dengan tekanan dinamik pada *freestream*, dan perbandingan ini yang disebutdengan koefisien tekanan dan *pressure coefficient* (Cp).

$$Cp = \frac{P - P \infty}{\frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2} \tag{14}$$

(Barnard R.H, 1996)

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

 $P_{\infty}$  = Tekanan static freestream  $V_{\infty}$  = Kecepatan freestream

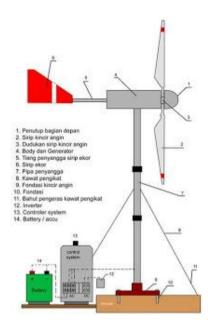
## 2.6 Turbin Angin

Turbin angin adalah kincir angin atau alat mekanik yang digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik. Turbin angin pada awalnya dibuat untuk mengakomodasi kebutuhan para petani dalam melakukan penggilingan padi dan bijibijian, keperluan irigasi, dan lainnya. Turbin angin terdahulu banyak digunakan di Denmark, Belanda, dan negara lain yang lebih dikenal dengan sebutan negara windmill (Arifin, 2011)

Beberapa penelitian yang telah melakukan penelitian terkait tentang turbin angin, antara lain: Bambang Setioko (2007), kenaikan harga BBM mendorong masyarakat untuk mencari alternatif baru yang murah dan mudah didapat untuk mendapatkan energi mekanik menjadi tenaga listrik. Energi angin merupakan energi yang murah dan mudah didapat, sehingga hal ini dimanfaatkan untuk memutar turbin angin yang digunakan sebagai tenaga penggerak generator listrik.

Kini turbin angin mulai banyak digunakan untuk mengakomodasi kebutuhan listrik masyarakat, dengan menggunakan prinsip konversi energi dengan menggunakan sumber daya alam yang dapat diperbarui yaitu angina. Walaupun sampai saat ini penggunaan turbin angin sebagai pembangkit listrik belum dapat menyaingi pembangkit listrik konvensional atau pembangkit listrik dengan sumber energi fosil (PLTD, PLTU), turbin angin masih terus dikembangkan oleh para ilmuan karena dalam kurung waktu tertentu manusia akan dihadapkan dengan masalah kekurangan sumber daya alam yang tak terbarui, misalnya batu bara, minyak bumi, gas bumi sebagai bahan bakar untuk membangkitkan listrik.

Angin merupakan salah satu bentuk energi terbarukan yang tersedia di alam dan tak dapat habis atau hilang keberadaanya. Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) mengkonversikan energi angin menjadi energi mekanik dengan menggunakan alat konversi energi yaitu turbin angin.



Gambar 2.13. Turbin Angin (Sumber: https://alpensteel.com-windmill)

Cara kerja dari turbin angin cukup sederhana, energi angin yang berhembus akan menabrak permukaan *blade* dan akan memutar turbin angin, lalu diteruskan untuk memutar rotor pada generator yang terletak di bagian belakang turbin, sehingga rotor generator berputar dan akan menghasilkan energi listrik. Energii listrik ini biasanya akan disimpan ke dalam baterai sebelum nantinya dapat dimanfaatkan.

Berdasarkan arah sumbunya turbin angin dibagi menjadi dua jenis yaitu :

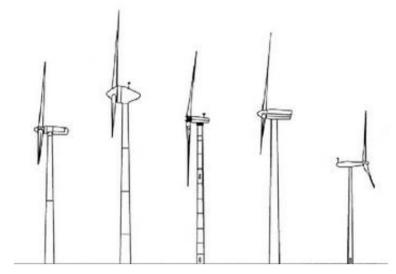
## **2.6.1** Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)

Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) atau turbin angin sumbu horisontal merupakan jenis turbin angin yang umum sering digunakan, desain dari turbin ini mirip dengan kincir angin atau propeller.

Turbin angin sumbu horisontal memiliki poros utama dan generator listrik yang berada di puncak menara turbin, peletakkan dari turbin jenis HAWT ini harus diarahkan ke arah angina berhembus. Turbin HAWT yang berukuran kecil mengarah ke arah angin dengan menggunakan wind plane atau sirip yang diletakkan dibagian belakang rotor turbin, sedangkan untuk turbin yang berukuran besar dilengkapi dengan sensor yang terhubung dengan motor servo yang dapat mengarahkan blade sesua dengan arah angin. Pada umumnya turbin angin jenis horisontal ini memiliki gearbox yang membantu transmisi saat putaran dari blade rendah sehingga menjadi meningkat sebagai masukan untuk memutar rotor generator listrik.

Tower turbin angin sumbu horisontal menghasilkan turbulensi aliran udara di bagian belakangnya, maka turbin harus diarahkan ke arah angin berhembus.

*Blade* turbin juga didesain kaku untuk mencegah agar tidak terdorong oleh angin ke arah tower.



Gambar 2.14. *Horizontal Axis Wind Turbine* (Sumber: *Erih Hau, Wind Turbine*)

Turbin angin sumbu horisontal memiliki kelebihan, yaitu :

- a. Dasar menara yang tinggi memungkinkan akses ke angina yang memiliki kecepatan lebih tinggi.
- b. Efisiensi lebih tinggi, karena blades selalu bergerak tegak lurus terhadap arah angin, menerima daya sepanjag putaran.

Sedangkan kekurangan dari turbin angin sumbu horisontal ini adalah:

- a. Konstruksi menara harus kuat untuk menyangga beban *blade*, generator dan gearbox yang berat.
- b. Saat pemasangan turbin angin sumbu horisontal, komponen seperti *blade*, gearbox, dan generator harus di angkat ke posisinya di atas sehingga pemasangannya sulit.
  - c. Ukuran turbin angina sumbu horisontal cenderung tinggi sehingga mengganggu pandangan dan estetika secara umum.
  - d. Membutuhkan mekanisme kontrol tambahan untuk mengarahkan *blade* turbin ke arah angin.

Turbin angin sumbu horisontal terdiri dari beberapa komponen yang dipasang terutama pada bagian atas dari menara seperti generator listrik dan poros rotor utama, pada turbin angin sumbu horisontal seringkali di tambah dengan gearbox untuk menambah putaran turbin yang di *couple* ke generator listrik. Dalam menara turbin angin sumbu horisontal umumya terdapat tangga yang digunakan untuk mengakses ruangan bagian atas turbin (*nacelle*), karena

komponen-komponen dari turbin angin sumbu horisontal ini terletak di bagian atas turbin tersebut.

Karena sebuah menara turbin angin sumbu horisontal menghasilkan turbulensi di bagian belakangnya, turbin angin sumbu horisontal seringkali

diarahkan melawan arah angin.



Gambar 2.15. Komponen *Horizontal Axis Wind Turbine* (Sumber: Ahmad Hemami, *Wind Turbine Technology*)

Menurut Arifin, 2011, secara umum, komponen utama turbin angin sumbu horisontal terdiri dari : rotor (*blade* dan *hub*), *nacelle*, generator, transmisi *gearbox*, kopling, rem, *yaw system*, menara, system control, dan pondasi seperti yang tampak di gambar atas. Adapun penjelasan untuk masing-masing komponennya adalah:

#### a. Blade

Rotor turbin angin yang terdiri dari baling-baling/ sudu dan *hub* merupakan bagian dari turbin angin yang berfungsi menerima energi kinetik dari angin dan merubahnya menjadi energi gerak (mekanik) putar pada poros penggerak. Pada sebuah turbin angin, baling-baling rotor dapat berjumlah lebih dari 1 buah.

#### b. Rotor Hub

*Hub* merupakan bagian dari rotor yang berfungsi menghubungkan sudu dengan *shaft* (poros) utama.

### c. Control Pitch Blade

Salah satu tipe rotor adalah dengan sudu terpasang variabel yang dapat dirubah sudutnya dengan mengatur posisi sudut serang sudu terhadap arah angin bertiup. Rotor dengan mekanisme demikian disebut dengan rotor dengan *pitch variable blade*. Tidak semua turbin angin menggunakan tipe rotor dengan sudut *blade* variabel.

#### d. Generator

Generator merupakan komponen terpenting dalam sistem turbin angin, dimana fungsinya adalah merubah energi gerak (mekanik) pada poros penggerak menjadi energi listrik. Tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh generator dapat berupa *alternating current* (AC) maupun *direct current* (DC) dan tegangan keluarannya dapat dari tegangan rendah (12 volt) atau sampai tegangan 680 volt atau bahkan lebih.

#### e. Gearbox

Pada umumnya transmisi di turbin angin berfungsi untuk memindahkan daya dari rotor ke generator dengan dipercepat putarannya. Hal ini diperlukan karena umumnya putaran rotor berotasi pada putaran rendah, sementara generatornya bekerja pada putaran tinggi.

## f. Rem

Rem berfungsi untuk menghentikan putaran poros rotor yang bertujuan untuk keamanan atau pada saat dilakukan perbaikan.

## g. Poros Rotor Putaran Rendah

Poros rotor berfungsi untuk memindahkan daya dari rotor ke generator, dapat secara langsung maupun melalui mekanisme transmisi *gearbox*.

## h. Pengontrol Arah (yaw)

Pada turbin angin yang relatif besar, umumnya sudah menggunakan sistem geleng aktif (active yawing system), yang digerakkan oleh motor servo. Kontrol yawing disini berfungsi menerima input dari sensor anemometer (mendeteksi kecepatan angin) dan wind direction (mendeteksi perubahan arah angin), dan memberikan komando kepada motor servo untuk membelokkan arah poros turbin angin dan juga memberikan masukan kepada kontrol pitch.

#### Anemometer Sensor

Anemometer berfungsi untuk mendeteksi/mengukur kecepatan angin, sebagai masukan kepada sistem kontrol untuk mengendalikan operasional pada kondisi optimum.

## j. Tail Vane

Salah satu sistem orientasi yang pasif (*passive yawing*) adalah menggunakan ekor pengarah. Fungsi dari ekor pengarah (*tail vane*) adalah untuk membelokan posisi rotor terhadap arah datangnya angin.

## k. Nacelle

Fungsi nasel adalah untuk menempatkan dan melindungi komponenkomponen turbin angin, yaitu : generator, *gearbox*, kopling, rem, kontrol, sistem geleng (*yawing system*).

## 1. Poros Rotor Putaran Tinggi

Poros rotor putaran tinggi berfungsi untuk memindahkan atau meneruskan daya dari *gearbox* ke generator.

#### m. Yaw System Gearbox

Fungsi *yaw drive* adalah untuk menempatkan komponen turbin angin yang berada di atas menara menghadap optimal terhadap arah angin bertiup mengikuti perubahan arah angin.

## n. Motor Servo (*Yaw motor*)

Fungsi motor servo (*yaw motor*) adalah untuk menggerakan *yaw drive* untuk memposisikan komponen turbin angin yang berada di atas menara menghadap optimal ke arah angin bertiup mengikuti perubahan arah angin.

## o. Menara (Tower)

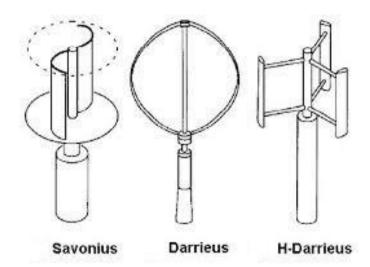
Menara merupakan tiang penyangga yang fungsi utamanya adalah untuk menopang rotor, *nacelle* dan semua komponen turbin angin yang berada di atasnya.

## 2.6.2 Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)

Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) atau turbin angin sumbu vertikal memiliki poros atau sumbu rotor utama yang disusun tegak lurus. Kelebihan utama susunan ini adalah turbin angin sumbu vertikal tidak harus diarahkan ke arah angin berhembus agar bekerja secara efektif. Kelebihan ini sangat berguna untuk lokasi penempatan di daerah yang arah anginnya bervariasi. Turbin angin sumbu vertikal ini mampu untuk memanfaatkan angin dari berbagai arah.

Dengan sumbu yang vertikal, generator serta *gearbox* pada turbin angin sumbu vertikal ini bisa ditempatkan di dekat tanah, sehingga menara tidak memerlukan menara yang tinggi dan juga lebih mudah untuk mengakses bagian turbin ketika akan dilakukan perawatan atau perbaikan, sehingga biaya perawatan turbin jenis ini akan lebih rendah dan efisien.

Namun demikian, karena sulit untuk memasang turbin angina di tower, maka turbin angin jenis ini umumnya di*install* lebih dekat dengan dasar tempat ia diletakkan, seperti tanah atau puncak atap sebuah bangunan. Dimana hal ini akan menyebabkan kecepatan angin yang akan dimanfaatkan menjadi lebih rendah karena pengaruh *altitude* yang rendah, sehingga energi angin yang tersedia akan menjadi lebih kecil. Aliran udara yang berada di dekat tanah dapat terhalangi oleh obyek-obyek dari arah datangnya angina hal ini juga dapat menyebabkan permasalahan yang berkaitan dengan getaran, diantaranya kebisingan dan *bearing wear* yang akan meningkatkan biaya pemeliharaan untuk mengatasi masalah ini dan memungkinkan umur turbin angin yang lebih singkat.



Gambar 2.16. Vertical Axis Wind Turbine (Sumber: A.P.Schaffarczyk, Introduction to Wind Turbine Aerodynamics)

Turbin angin sumbu vertikal memiliki kelebihan, yaitu:

- a. Tidak memerlukan mekanisme system *yaw*, karena turbin angin sumbu vertikal dapat berputar tanpa harus diarahkan ke arah angina berhembus.
- b. Turbin angin sumbu vertikal bisa diletakkan di dekat permukaan tanah, sehingga lebih mudah dalam proses perawatan dan perbaikannya.
- c. Turbin angin sumbu vertikal memiliki *tip speed ratio* (perbandingan antara kecepatan putaran dari ujung *blade* dengan laju aliran angin) yang lebih rendah jika dibandingkan dengan turbin angin sumbu horisontal, sehingga kemungkinan rusak lebih kecil jika dibandingkan dengan turbin angin sumbu horisontal.
- d. Turbin angin sumbu vertikal bias ditempatkan di lokasi di mana struktur tinggi dilarang karena tidak memerlukan tower penyangga yang tinggi.

Dari kelebihan yang telah disebutkan di atas, turbin angin sumbu vertikal juga memiliki kekurangan yaitu :

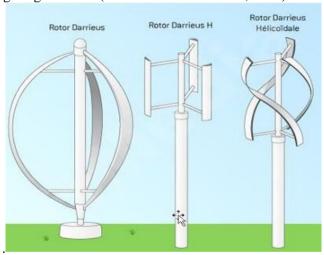
- a. Turbin angin sumbu vertikal memiliki penurunan efisiensi jika dibanding dengan turbin angin sumbu horisontal, terutama karena hambatan tambahan yang mereka miliki seperti angin yang menabrak bagian belakang dari *blade* turbin.
- b. Memiliki posisi dekat dengan permukaan tanah sehingga, tidak memanfaatkan kecepatan angin yang tinggi di atas. (10 meter di atas permukaan tanah kenaikan kecepatan angin sekitar 20 %).
- c. Turbin angin sumbu vertikal memiliki torsi awal yang rendah, sehingga membutuhkan dorongan eksternal untuk mulai beroperasi.

Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) dibagi menjadi beberapa macam berdasarkan bentuk blade yang dimilikinya, yaitu tipe Darrieus dan Savonius.

#### 2.6.2.1 Darrieus Vertical Axis Wind Turbine

Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) tipe Darrieus awalnya diperkenalkan di Perancis pada sekitar tahun 1930 oleh penemunya yaitu George Jeans Maria Darrieus yang dipatenkan pada tahun 1931. Turbin angin sumbu vertikal tipe Darrieus mempunyai bentuk blade yang disusun dalam posisi simetris terhadap poros. Dengan pengaturan seperti itu, turbin tipe ini cukup efektif untuk menangkap berbagai arah angin.

Turbin angin tipe *Darrieus* memiliki efisiensi yang baik, namun menghasilkan *ripple torque* dan *cyclic stress* (tekanan yang berulang terusmenerus pada suatu bagian yang seringkali menyebabkan sebuah material mengalami *fatique*) pada menaranya. Dorongan eksternal dibutuhkan untuk memutar turbin *Darrieus* dikarenakan turbin vertikal tipe *Darrieus* memiliki torsi awal yang sangat rendah (Medeline Citra Vanessa, 2011).

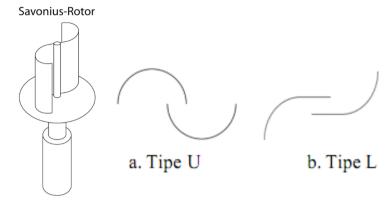


Gambar 2.17. Darrieus Vertical Axis Wind Turbine (Sumber: A.P.Schaffarczyk, Introduction to Wind Turbine Aerodynamics)

## 2.6.2.2. Savonius Vertical Axis Wind Turbine

Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) tipe Savonius pertama kali diciptakan oleh seorang insinyur asal Finlandia yaitu Sigurd J. Savonius pada tahun 1929. Turbin angin sumbu vertikal ini adalah jenis turbin angin vertikal paling sederhana dan menjadi versi besar dari anemometer. Turbin tipe Savonius ini dapat berputar karena gaya dorong dari angin terhadap bagian permukaan cekung dari blade, sehingga rotor tidak akan melebihi kecepatan angin. Turbin angin sumbu vertikal tipe Savonius ini cocok untuk aplikasi

daya rendah dan umumnya digunakan pada kecepatan angin yang berbeda (Medeline Citra Vanessa, 2016)



Gambar 2.18. Savonius Vertical Axis Wind Turbine, (a) Tipe Blade U; (b) Tipe Blade L

(Sumber: A.P.Schaffarczyk, Introduction to Wind Turbine Aerodynamics)

Turbin angin sumbu vertikal tipe *Savonius* ini juga memiliki keunggulan yaitu fabrikasi yang mudah, bahkan dalam beberapa aplikasi untuk skala kecil turbin angin *Savonius* ini dibuat dari drum bekas yang dipotong menjadi 2 bagian sehingga membentuk geometri setengah lingkaran yang digunakan untuk *blade*nya, (Mathew, 2006).

## 2.7 Rumus Dasar Perhitungan Turbin

Rumus perhitungan yang digunakan untuk mengetahui kerja model turbin angin adalah sebagai berikut :

## a) Daya Maksimal Rotor

Daya angin (Ps) merupakan daya yang tersedia oleh angin di mana daya ini berbanding lurus pangkat tiga kecepatannya dan dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$Ps = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot Cp$$
 (15)

Dimana:

Ps : Daya maksimal yang dihasilkan dari rotor (Watt)

A : Luas penampang blade (m²)
ρ : Massa jenis udara (kg/m³)
V : Kecepatan angina (m/s)
Cp : 0.593 (Betz Coefficient)

## b) Torsi

Torsi  $(\tau)$  merupakan hasil perkalian dari besarnya gaya pembebanan (F) dengan panjang lengan torsi (I), sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\tau = \frac{Ps}{\omega} \tag{16}$$

Dimana:

T : Torsi (N.m)

F : Gaya pembebanan (N)
1 : Panjang lengan torsi (m)

## c) Kecepatan Putaran

Untuk mengetahui kecepatan putaran dari turbin yaitu dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\omega = \frac{v}{r}$$

$$\omega = n \cdot \frac{2\pi}{60} \frac{rad}{s} \tag{17}$$

Sehingga bisa didapatkan nilai putaran (n) dengan persamaan,

$$n = \left(\frac{60}{2.\pi}\right) \cdot \omega \tag{18}$$

# d) Tip Speed Ratio

Tip Speed Ratio adalah perbandingan antara kecepatan yang ada pada ujung blade turbin angin dengan kecepatan angin itu sendiri, sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$tsr = \frac{Speed\ of\ rotor\ tip}{wind\ speed} = \frac{v}{V} = \frac{\omega r}{V}$$
 (19)

Dimana:

tsr : Tip speed ratio

v : Kecepatan putar rotor (m/s)r : Jari-jari blade turbin angin (m)

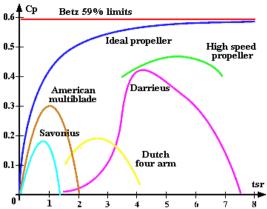
V : kecepatan angin (m/s)

ω : kecepatan putar sudut (rad/s)

: frekuensi putaran turbin (Hz),(s<sup>-1</sup>)

f = 1 (rotasi/second)

Menurut Albert Betz, hubungan antara koefisien daya (Cp) dengan *tip speed ratio* (tsr) dari berbagai jenis turbin angin adalah 59 %, teorinya tersebut dinamakan dengan *Betz Limit* dengan grafik sebagai berikut :



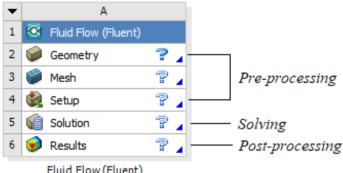
Grafik 2.19. Hubungan Antara Koefisien Daya (Cp) dan *Tip Speed Ratio* (tsr). (Sumber: https://windturbine-performance.com)

## 2.8 Dinamika Aliran Fluida Secara Komputasi (Computational Fluid Dynamic)

Computational fluid dynamics adalah sekumpulan metodologi yang menggunakan computer untuk melakukan simulasi aliran fluida, perpindahan panas, reaksi kimia, dan fenomena aliran lainnya dengan memecahkan persamaan Navier-Stokes secara numerik. (Charles, 2007). Persamaan Navier-stokes adalah permasaan umum untuk fenomena aliran fluida yang notabene adalah persamaan mekanika klasik yang solusi analitkya sampai saat ini belum terpecahkan. Masalah persamaan Navier Stokes ini selain di dunia fisika dan terapannya, menjadi masalah tersendiri pula bagi matematikawan.

Dengan menggunakan salah satu *software* CFD, dapat dibuat sebuah *virtual prototype* dari sebuah sistem atau alat yang nantinya akan dianalisis dengan menerapkan kondisi nyata di lapangan. *Computational Fluid Dynamic* (CFD) dapat dikatakan merupakan sebuah *software* analisa sistem dengan melibatkan aliran fluida, perpinadahan panas, *momentum*, perpindahan energi, dan fenomena aliran lainnya dengan didasarkan simulasi pada media komputer (*digital*). Simulasi dengan menggunakan CFD dapat menghasilkan parameter-parameter penting seperti tekanan, suhu, kecepatan, dan laju aliran massa (*mass flow rate*). Analisa menggunakan CFD diperlukan pemahaman dan pengetahuan dasar mengenai mekanika fluida untuk interpretasi hasil-hasil simulasi. Penyederhanaan CFD terdiri dari tiga tahapan pengerjaan, yaitu:

- 1. **Pre-processing**. Pada tahap ini dibangun model geometri dengan paket CAD (*Computer Aided Design*), *Solidwork*, dan *software* gambar lainnya yang nantinya dibangun mesh atau grid yang sesuai, dan diterapkan kondisi batas serta sifat-sifat fluida serta solidnya.
- 2. *Solving*. Ini adalah tahap inti dari CFD, pada tahap ini, solusi dihitung berdasarkan kondisi-kondisi yang diterapkan pada tahap *pre-processing*.
- 3. *Post-processing*. Tahapan terakhir dalam CFD. Pada tahapan ini, dilakukan interpretasi dari data hasil simulasi yang dapat berupa visualisasi kontur, vektor, kurva, histogram, dan lain sebagainya.



Fluid Flow (Fluent)

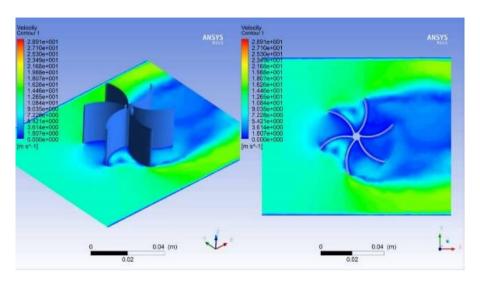
Gambar 2.20. Proses Simulasi CFD (Sumber: https://ansys.com/products)

Software CFD akan memberikan data, visualisasi gambar, dan kurva yang menunjukkan prediksi dari performa keandalan suatu sistem atau benda yang telah didesain. Hasil dari analisis CFD bisa menyajikan prediksi kualitatif dan kuantitatif dari berbagai persoalan mengenai dinamika fluida.

## 2.9 Analisis CFD (Computational Fluid Dynamics) menggunakan ANSYS Fluent

ANSYS adalah salah satu perangkat lunak berbasiskan metode elemen hingga yang dipakai untuk menganalisa masalah-masalah rekayasa (engineering). ANSYS Workbench menyediakan fasilitas untuk berinteraksi antar solvers famili ANSYS. ANSYS Workbench juga dapat berintegrasi dengan perangkat lunak CAD sehingga memudahkan pengguna dalam membangun model geometri dengan berbagai perangkat lunak CAD. Beberapa perangkat lunak tersebut adalah Catia dan Solidwork. ANSYS dapat dioperasikan di platform Windows dan Linux.

Sedangkan untuk ANSYS Fluent merupakan sebuah software yang digunakan untuk mensimulasikan aliran fluida dan perpindahan panas. Aliran dan perpindahan panas dari berbagai fluida dapat disimulasikan dalam bentuk atau geometri yang rumit. Dengan menggunakan program dari Fluent, dapat diketahui mengenai parameter-parameter aliran dan perpindahan panas yang diinginkan mulai dari distribusi tekanan, kecepatan aliran, laju aliran massa, distribusi temperatur, dan pola aliran fluida yang terjadi pada tiap titik yang terdapat dalam sistem yang dianalisa.



Gambar 2.21. Simulasi Analisis Aliran Turbin Angin dengan Menggunakan ANSYS *Fluent*.

(Sumber: https://windturbine-performance.com)

## 2.9.1 Meshing dan Grid Independensi

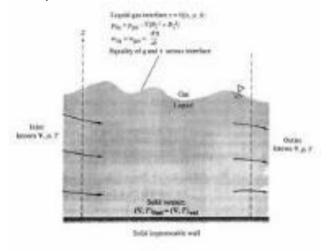
Dalam *software* ANSYS *Fluent* memiliki dua jenis *mesh* yang dapat dilakukan, yaitu tipe 2D (*two dimension*) *triangular* – *quadrilateral*, 3D (*three dimension*) *tetrahedral* – *hexahedral* – *pyramid wedge*, dan *mesh* campuran (*hybrid*). *Fluent* juga memungkinkan penggunanya untuk memperhalus atau memperbesar *mesh* yang sudah ada.

Untuk mendapatkan hasil simulasi CFD dengan sukses perlu memperhatikan *grid* independensi. Salah satu cara untuk mengujinya adalah dengan melakukan *adapt*. *Grid* independensi sendiri merupakan solusi konvergen yang ditentukan dari perhitungan CFD yang tidak dipengaruhi oleh besar kecilnya *grid*. Apabila dengan meningkatkan jumlah sel maka kemungkinan tidak akan mengubah *flow field solution* dan *intergrated quantities*. Dalam praktiknya *grid* independensi diidentifikasikan dengan menghaluskan *mesh* sehingga hal tersebut dapat mengubah solusi numeric. Oleh karena itu dengan *adapt* dapat kita ketahui hanya beberapa bagian *mesh* saja yang harus diperbaiki agar tidak mengubah solusi numerik.

#### 2.9.2 Boundary Condition

Dalam menganalisa suatu aliran fluida terdapat dua metode yang dapat digunakan, yang pertama adalah mencari pola aliran secara detail (x, y, z) pada setiap titik atau yang kedua, mencari pola aliran pada suatu daerah tertentu dengan keseimbangan antara aliran masuk dan keluar dan menentukan (secara kasar) efek-efek yang mempengaruhi aliran tersebut (seperti: gaya atau perubahan energi). Metode pertama adalah metode analisa diferensial sedangkan yang kedua adalah metode integral atau *control volume*.

Boundary conditions adalah kondisi dari batasan sebuah kontrol volume tersebut. Dalam analisa menggunakan CFD seluruh titik dalam kontrol volume tersebut di cari nilainya secara detail, seperti yang telah di jelaskan di awal bab ini, dengan memanfaatkan nilai-nilai yang telah diketahui pada *boundary conditions*. Secara umum *boundary conditions* terdiri dari dua macam, inlet dan oulet. Inlet biasanya didefinisikan sebagai tempat dimana fluida memasuki domain (*control volume*) yang ditentukan. Berbagai macam kondisi didefinisikan pada inlet ini mulai dari kecepatan, komposisi, temperatur, tekanan, laju aliran. Sedangkan pada outlet biasanya didefinisikan sebagai kondisi dimana fluida tersebut keluar dari domain atau dalam suatu aplikasi CFD merupakan nilai yang didapat dari semua variabel yang didefinisikan dan diekstrapolasi dari titik atau sel sebelumnya. Di bawah ini salah satu contoh penerapan *boundary conditions*.



Gambar 2.22. *Boundary Condition* (Sumber: Firman Tuakia, Dasar-Dasar CFD Menggunakan *Fluent*)

#### 2.9.3 Penentuan Parameter Model

Terdapat beberapa model dan persamaan yang dapat dipilih sesuai dengan kasus yang akan dianalisis. Persamaan tersebut meliputi model *multiphase*, persamaan energi, model viskos, model spesies transport dan reaksi, model fasa diskrit, model peleburan dan pembekuan, dan model akustik. Pada topic tugas akhir ini akan dibahas mengenai model viskos dan persamaan energi.

Secara garis besar, model turbulen dapat dilakukan dengan dua pendekatan, yaitu berdasarkan *Reynolds Navier Stokes* (RANS) dan berdasarkan *Large Eddy Simulation* (LES). Sebelum menentukan model viskos, aliran fluida yang akan disimulasikan harus ditentukan terlebih dahulu apakah termasuk pola aliran laminar atau turbulen dengan menghitung bilangan *reynold* terlebih dahulu, maka dapat digunakan model yang telah tersedia yaitu model *Spalart* – *Allmaras*, model *k-epsilon* ( $k - \varepsilon$ ) standart,  $k - \varepsilon$  *Renormalization group* (RNG  $k - \varepsilon$ ),  $k - \varepsilon$  *Realizable*, model *k-gamma* ( $k - \omega$ )

standart,  $k - \omega$  Shear Stress Transport (SST), model reynold stress (RSM), dan model Large Eddy Simulation (LES) khusus 3D.

Dari pemodelan tersebut, pemodelan turbulensi yang baik dalam memprediksi tekanan statis dinding adalah pemodelan  $k-\varepsilon$  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.

Istilah realizable mempunyai arti bahwa model tersebut memenuhi beberapa batasan matematis pada bilangan reynold, konsisten dengan bentuk fisik aliran turbulen. Kelebihan dari model  $realizable\ k-\varepsilon$  adalah lebih akurat untuk memprediksi laju penyebaran fluida. Model ini memberikan performa yang bagus untuk aliran yang melibatkan putaran, lapisan batas yang mempunyai gradient tekanan yang besar, separasi, dan resirkulasi. Salah satu keterbatasan model  $k-\varepsilon$  Realizable adalah terbentuknya viskositas turbulen non fisik pada kasus dimana domain perhitungan mengantung zona fluida yang diam dan berputar ( $multiple\ reference\ frame,\ sliding\ mesh$ ).

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

# BAB III METODE PENELITIAN

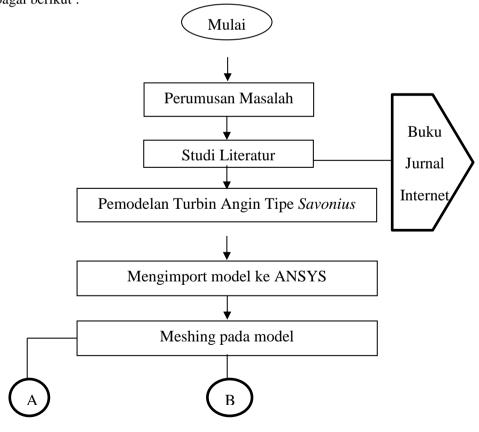
## 3.1 Metode Penulisan Tugas Akhir

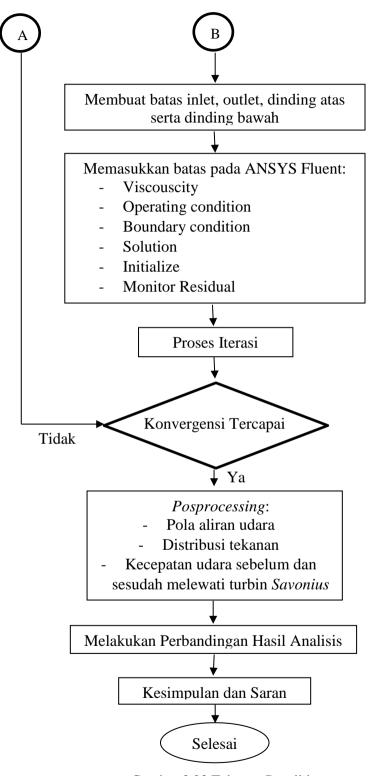
Metode yang diambil dalam penulisan tugas akhir ini adalah dengan menggunakan metode Deskriptif.

Penelitian dengan metode deskriptif menurut Soegiono (2014: 59) adalah penelitian yang dilakukan untuk mengetahui nilai variabel mandiri, baik satu variabel atau lebih tanpa membuat perbandingan atau menghubungkan dengan variabel lain. Sedangkan studi kelayakan menurut Ibrahim (1998:1) adalah penelitian tentang dapat tidaknya suatu proyek (biasanya suatu proyek investasi) dilaksanakan dengan berhasil. Dalam hal ini studi kelayakan merupakan bahan pertimbangan dalam mengambil suatu keputusan. Apakah akan menerima atau menolak suatu gagasan usaha yang telah direncanakan.

## 3.2 Tahapan Penulisan Tugas Akhir

Tahapan penelitian ini merupakan langkah-langkah yang dilakukan dalam penyusunan tugas akhir ini secara berurutan. Penjelasan mengenai langkah pelaksanaan Tugas Akhir ini dapat dilihat pada diagram alir sebagai berikut :





Gambar 3.23 Tahapan Penelitian

#### 3.3 Prosedur Penelitian

Adapun prosedur dan langkah-langkah penelitian dalam Tugas Akhir ini dijelaskan sebagai berikut:

#### 3.3.1 Identifikasi dan Perumusan Masalah

Dalam melakukan sebuah penelitian tahap awal yang perlu dilakukan adalah mengidentifikasi masalah yang akan diangkat dalam topik tugas akhir. Identifikasi merupakan suatu pernyataan bahwa terdapat suatu permasalahan yang akan dijelaskan penyebabnya serta bagaimana langkah penyelesaiannya. Dari perumusan masalah kemudian ditetapkan tujuan penelitian agar penelitian menjadi jelas dan terarah. Selanjutnya dilakukan studi literatur dan studi lapangan untuk mencari referensi serta penelitian terdahulu yang kemudian dapat dijadikan perbandingan mengenai gap yang ditemukan. Pada tugas akhir ini perumusan masalah yang diambil adalah mengenai pengaruh variasi *blade* dan kecepatan angin terhadap kinerja turbin angin sumbu *vertikal* dengan tipe *Savonius*.

#### 3.3.2 Studi Literatur

Untuk membantu dalam penulisan tugas akhir ini diperlukan banyak literatur-literatur yang mendukung seperti buku dan jurnal yang terkait, hal ini berfungsi sebagai pengembangan wawasan dan analisis serta membantu dalam pengerjaan tugas akhir.

Dalam pengerjaan tugas akhir ini, terdapat 2 jenis sumber data yang akan dijadikan metode. Menurut Hartono (2009:8) dalam bukunya mengatakan bahwa sumber data statistik juga dapat diperoleh dari manusia, hewan, tumbuhtumbuhan, benda, dan gejala atau peristiwa yang terjadi dalam di sekitar kita. Namun, menurut Sugiyono (2013:62) sumber data dibagi menjadi 2 jenis yaitu:

## 1. Sumber Data Primer

Data primer adalah sumber data yang langsung memberikan data kepada pengumpul data. Data primer yang digunakan oleh peneliti tugas akhir ini kali ini adalah data geometri model turbin angin sumbu vertikal dengan tipe *Savonius* dengan tipe *blade* U dan *blade* L.

## 2. Sumber Data Sekunder

Sumber data sekunder merupakan sumber data yang tidak secara langsung memberikan data kepada pengumpul data, dapat melalui orang lain atau melalui dokumen. Sumber data sekunder dalam rencana tugas akhir ini berupa dokumen-dokumen yang dapat berbentuk buku, bahan ajar kuliah, diktat mata kuliah, dan jurnal ilmiah.

## 3.3.3 Pemodelan Model

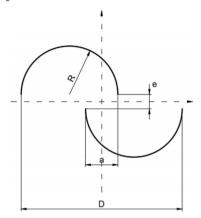
Pada Tugas Akhir ini visualisasi dan analisis dari model turbin angin sumbu vertikal tipe *Savonius* dengan variasi *blade* tipe U dan tipe L menggunakan metode CFD (*Computational Fluid Dynamics*) pada *Software ANSYS Fluent*. Pada pemodelan dan analisis dari turbin angin *Savonius* ini ada tiga tahapan utama yang dilakukan, yaitu : *pre-processing*, *solving* (*processing*), *dan post-processing*.

## 3.3.3.1. Preprocessing

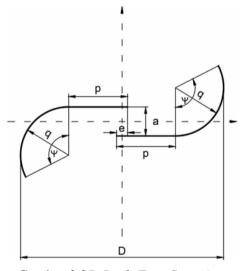
Preprocessing merupakan langkah pertama yang dilakukan dalam membangun dan menganalisis model komputasi (CFD), dalam tahapan ini terdapat beberapa langkah yang harus dilakukan yaitu: membuatan model atau geometri, menentukan domain, membuat meshing dan membuat parameter lainnya.

## 1. Geometri Turbin Savonius

Analisa dan pemodelan dari modifikasi geometri turbin vertikal tipe *savonius* ini didasari dari penelitian sebelumnya mengenai turbin *savonius* konvensional pada *wind tunnels* oleh Kamoji et al. Desain geometri dari *savonius* yang digunakan adalah model konvensional yang berbentuk setengah lingkaran (U) dan juga model dengan modifikasi berbentuk (L) dengan *fillet* radius.



Gambar 3.24. Konvensional Savonius



Gambar 3.25. Bach-Type Savonius

Berdasarkan hal tersebut dilakukan modifikasi sesuai bentuk geometri awal namun dengan ukuran yang berbeda dan juga penambahan jumlah blade, pembuatan geometri turbin angin Savonius ini menggunakan software Solidwork 2014, berikut merupakan modifikasi geometri dan dimensi dari turbin angin Savonius adalah sebagai berikut.

Tabel 3.1 Geometri turbin angin vertikal Savonius tipe U:

Tipe blade	= Tipe U
Jumlah <i>blade</i>	= 3 (tiga)
Diameter poros	= 0.05  m
Diameter dalam	= 0.5  m
Diameter luar	= 0.51  m
Tebal	= 0.01  m
Tinggi	= 1.5 m
Diameter tutup turbin	= 1.25 m
Tebal tutup turbin	= 0.03  m

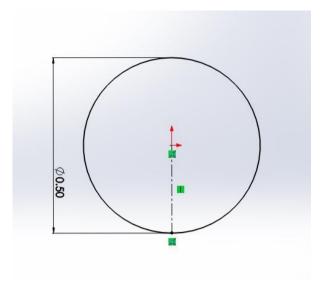
Tabel 3.2 Geometri turbin angin vertikal *Savonius* tipe L:

	C	1
Tipe blade	= Tipe L	
Jumlah <i>blade</i>	= 3 (tiga)	
Radius Fillet	= 0.15  m	
Panjang blade	= 0.5  m	
Tebal	= 0.01  m	
Tinggi	= 1.5 m	
Diameter tutup turbin	= 1.25 m	•
Tebal tutup turbin	= 0.03  m	

## 2. Membuat Model Turbin Savonius

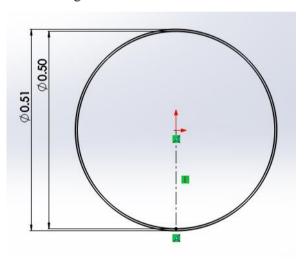
## a. Savonius Blade U

 Langkah pertama dengan memilih menu sketch dan menggambar diameter dalam untuk tipe blade U dengan ukuran diameter 0.50 meter.



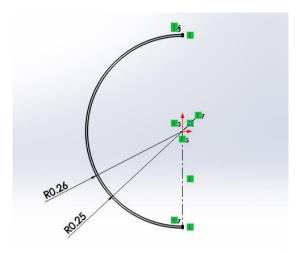
Gambar 3.26. Membuat diameter dalam blade tipe U

• Langkah kedua yaitu menggambar geometri diameter luar untuk tipe *blade* U dengan ukuran 0.51 meter.



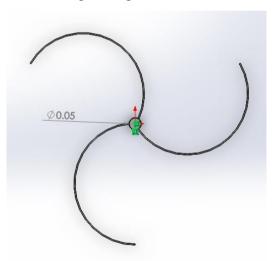
Gambar 3.27. Membuat diameter luar blade tipe U

 Setelah menggambar kedua lingkaran geometri blade, lalu melakukan trimming sehingga terbentuk geometri setengah lingkaran seperti pada gambar di bawah ini. Dari geometri tersebut dapat dilihat untuk ketebalan blade turbin yaitu 0,01 meter.



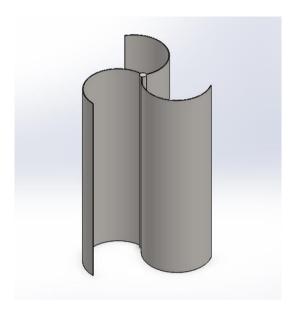
Gambar 3.28. Geometri blade turbin

• Setelah geometri 2D sudah terbentuk, lalu menggambar poros turbin dengan diameter 0,05 meter dan melakukan proses *array* untuk menduplikat dalam pola lingkaran objek 2D dari *blade* dengan sudut masing-masing 120°.



Gambar 3.29 Geometri turbin setelah di array.

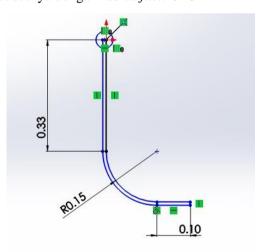
• Mengubah desain geometri 2D ke desain geometri 3D dengan melakukan *extrude bold* untuk menghasilkan *solid* 3D sehingga dapat dilakukan proses *meshing* pada tahap selanjutnya.



Gambar 3.30. Geometri 3D blade turbin Savonius tipe U.

## b. Savonius Blade L

• Langkah untuk menggambar geometri turbin dengan *blade* L, hampir sama dengan proses menggambar *blade* U. Namun dari segi bentuk dan ukuran geometri berbeda. Hal ini dikarenakan untuk geometri *blade* L ada bagian yang harus di *fillet* pada bagian sudutnya dengan radius *fillet* 0.15°



Gambar 3.31. Geometri 2D blade turbin Savonius tipe L

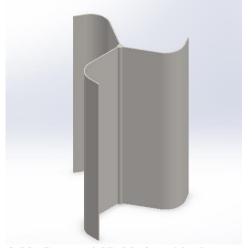
• Setelah geometri 2D dari *blade* L sudah terbentuk, lalu menggambar poros turbin dengan diameter 0,05 meter dan

melakukan proses *array* untuk menduplikat dalam pola lingkaran objek 2D dari *blade* dengan sudut masing-masing 120°.



Gambar 3.32. Geometri 2D *blade* turbin *Savonius* tipe L setelah di *array*.

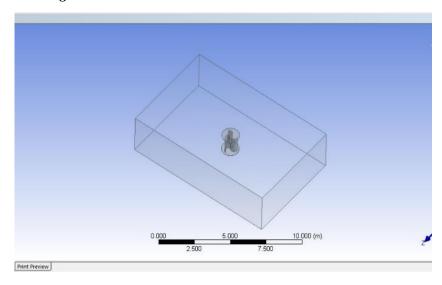
• Mengubah desain geometri 2D ke desain geometri 3D dengan melakukan *extrude bold* untuk menghasilkan *solid* 3D sehingga dapat dilakukan proses *meshing* pada tahap selanjutnya.



Gambar 3.33. Geometri 3D blade turbin Savonius tipe L.

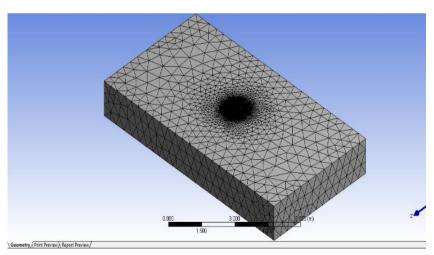
Diameter yang digunakan untuk turbin *Savonius* dengan tipe *blade* L dan *blade* U adalah sama yaitu diameter luar sebesar 0.51 m dan diameter dalam sebesar 0.50 m. Sehingga dapat diketahui ketebalan dari *blade* tersebut adalah 0.01 m. Untuk sudut dari turbin *Savonius* dengan tipe *blade* L dan *blade* U dengan 3 *blade* adalah sama yaitu 120°.

## 3. Meshing



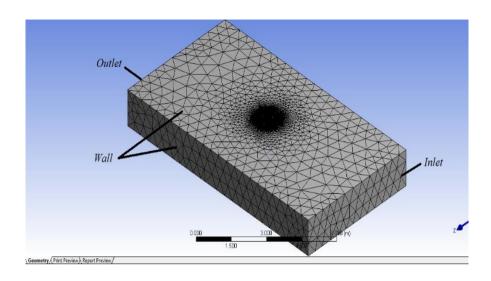
Gambar 3.34. Domain pemodelan Savonius.

Proses pemberian batasan sebagai *domain* pada pemodelan *Savonius* ini dibagi menjadi dua, *fixed* domain sebagai daerah aliran fluida bergerak, dan *rotating domain* sebagai daerah turbin berotasi. Untuk kedua *domain* tersebut perlu dilakukan pemisahan *domain* sebelum di lakukan *meshing* dengan cara *create* – *Boolean* – *subtract*.



Gambar 3.35. Domain dan benda setelah proses *meshing*.

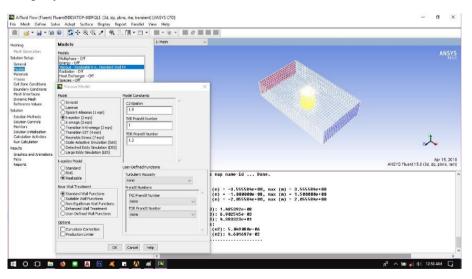
Pada proses *meshing*, perlu dilakukan pembagian kondisi batas yaitu, *inlet* sebagai daerah *input properties* berupa kecepatan awal dari fluida, *outlet* sebagai batas analisa *control surface* pada model uji, serta pemberian batas bagian atas, kanan, kiri, dan bawah sebagai *wall*.



Gambar 3.36. Kondisi batasan pada area boundary.

## 4. Models

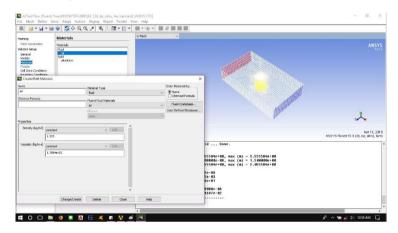
Sebelum menentukan model *viscous*, terlebih dahulu perlu dilakukan penentuan aliran yang akan disimulasikan, apakah termasuk aliran laminar atau turbulen. Dalam kasus ini digunakan model *k-epsilon* dengan model *realizable* karena diharapkan hasil yang diperoleh sesuai dengan kondisi nyata dam lebih akurat dalam memprediksi laju penyebaran fluida.



Gambar 3.37. Penentuan kondisi models aliran pada Fluent.

## 5. Materials

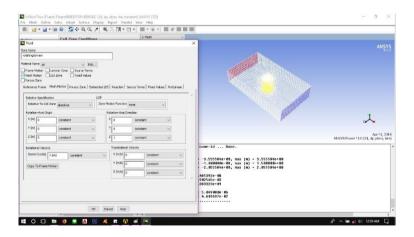
Langkah selanjutnya dalam pemodelan pada ANSYS *fluent* adalah mendefinisikan sifat fisik material. Pada *form materials* terdapat data *properties* dan material yang harus dimasukkan. Dalam hal ini material yang digunakan adalah udara dengan *density* 1,225 kg/m³ dan *viscousity* 1,7894x10<sup>-5</sup> kg/m.s.



Gambar 3.38. Penentuan materials pada Fluent.

## 6. Cell-Zone Condition

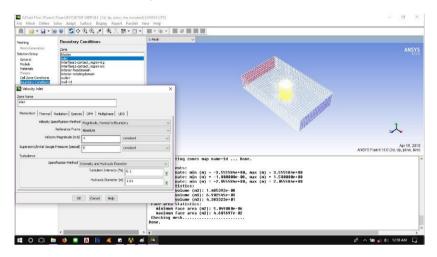
Pada langkah ini perlu ditentukan dan melakukan *setting* untuk *domain* yang berotasi dan tidak. Untuk bagian *domain* yang berotasi perlu dilakukan *setting* pada bagian *mesh motion*, pada bagian tersebut perlu menginput arah sumbu x, y, z untuk menentukan arah rotasi dari turbin *Savonius*.



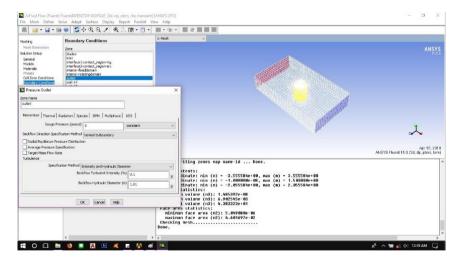
Gambar 3.39. Penentuan cell-zone condition pada Fluent.

## 7. Boundary Condition

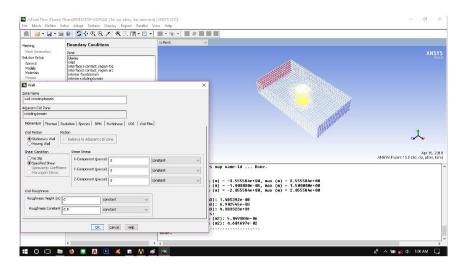
Merupakan penentuan kondisi batas yang melibatkan beberapa hal, yaitu dengan pemberian beban kecepatan, tekanan maupun pemberian kondisi batas turbulensi pada *inlet*, *outlet*, dan juga kondisi pada *wall*. Dalam hal ini akan dilakukan beberapa variasi untuk kecepatan yang dibebankan pada *inlet* yaitu 4 m/s, 5 m/s, dan 6 m/s, serta pada kondisi batas *outlet* adalah *outflow*.



Gambar 3.40. Penentuan boundary condition pada inlet.



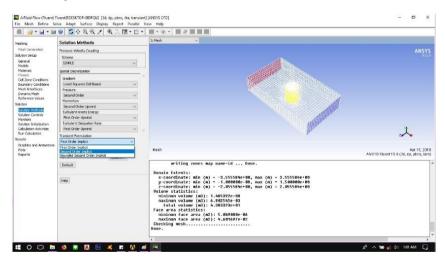
Gambar 3.41. Penentuan boundary condition pada outlet.



Gambar 3.42. Penentuan boundary condition pada wall.

## 8. Solution

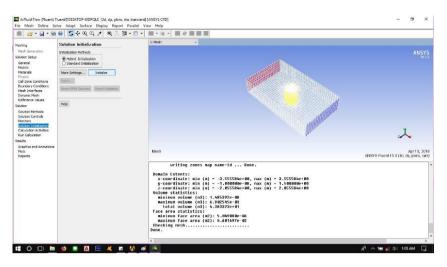
Solution methods pada pemodelan ini menggunakan SIMPLE, dikarenakan dapat mempercepat konvergensi untuk kasus yang sederhana dan pada bagian diskritisasi di pilih second order, second order upwind.



Gambar 3.43. Penentuan solution methods pada fluent.

## 9. Initialize

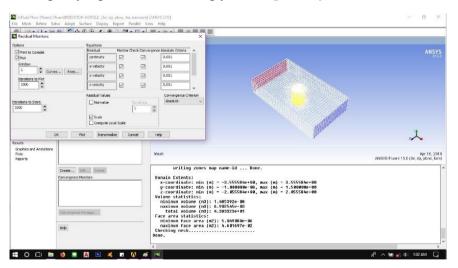
Proses *iterate* memerlukan *initialize* (tebakan awal) sebelum memulai *solving calculation* agar mempermudah konvergensi.



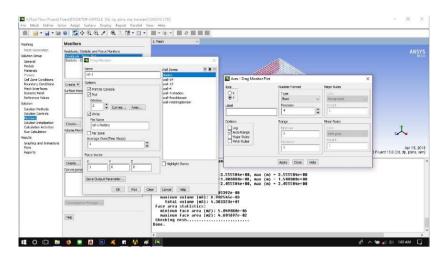
Gambar 3.44. Initialize pada fluent.

#### 10. Monitor Residual

Menentukan kriteria konvergensi dalam hal ini iterasi hingga mencapai harga  $10^{-4}$ . Artinya kriteria konvergensi akan dinyatakan tercapai setelah residualnya mencapai harga di bawah  $10^{-4}$ . Semakin kecil nilai kriteria konvergensi maka hasil yang dihasilkan akan semakin akurat. Pada bagian monitor ini juga perlu dilakukan penentuan untuk bagian yang akan dimonitoring yaitu drag, dan lift.



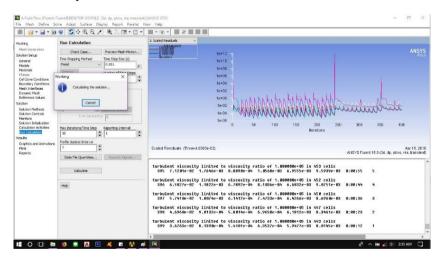
Gambar 3.45. *Monitor residual* pada *fluent*.



Gambar 3.46. Penentuan drag dan lift pada fluent.

#### 11. Iterate

Menentukan jumlah iterasi untuk mendapatkan hasil kalkulasi dan solusi dari permasalahan ini. Semakin banyak iterasi dan *time step* yang dilakukan saat *running* hasil yang didapatkan akan semakin jelas dan akurat, namun tetap perlu memperhatikan batasan konvergensi yang sebelumnya telah ditentukan.



Gambar 3.47. Penentuan *iterate* dan *time step* untuk memulai kalkulasi *solution*.

#### 3.3.3.2. Solving (Processing)

Dengan bantuan *software ANSYS fluent*, kondisi yang telah ditetapkan pada saat *pre-processing* akan dikalkulasi (iterasi). Jika kriteria konvergensi telah tercapai sesuai dengan kriteria konvergensi

yang telah ditentukan sebelumnya, jika telah tercapai maka akan dilanjutkan pada *post-processing*, namun jika gagal makan akan kembali untuk pembuatan *meshing*.

#### 3.3.3.2. Post-Processing

Post-processing merupakan tampilan dari hasil analisis serta kalkulasi terhadap hasil yang diperoleh dari pemecahan masalah yang telah diperoleh berupa data kualitatif dan data kuantitatif. Data kuantitatif berupa distribusi koefisien tekanan, koefisien drag, dan koefisien lift. Sedangkan data kualitatif berupa visualisasi aliran dengan menampilkan contour warna dan pathlines berupa pressure static dan velocity magnitude.

#### 3.3.4 Melakukan Perbandingan dan Hasil Analisis

Dalam tahap ini, desain turbin angin sumbu vertikal yang telah disimulasikan akan dianalisis dan dibandingkan nilai efisiensi, kecepatan putar, serta daya yang dihasilkan dengan objek turbin angin sumbu vertikal tipe *Savonius* dengan *blade* tipe L dan tipe S terhadap kecepatan angin yang bervariasi yaitu 4 m/s, 5 m/s, dan 6 m/s.

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

## BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

## 4.1 Perancangan Turbin Angin Poros Vertikal dengan Tipe Savonius

#### 4.1.1 Kecepatan Angin Indonesia

Potensi energi angin di Indonesia umumnya berkecepatan lebih dari 5 meter per detik (m/detik). Hasil pemetaan Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (Lapan) pada 120 lokasi menunjukkan, beberapa wilayah memiliki kecepatan angin di atas 5 m/detik, masing-masing Nusa Tenggara Timur, Nusa Tenggara Barat, Sulawesi Selatan, dan Pantai Selatan Jawa. Adapun kecepatan angin 4 m/detik hingga 5 m/detik tergolong berskala menengah dengan potensi kapasitas 10-100 kW.

Untuk penelitian mengenai perancangan turbin angin poros vertikal dengan tipe *Savonius* ini menggunakan kecepatan angin 4 m/s, 5 m/s, dan 6 m/s. Variasi kecepatan angin tersebut diambil dari kecepatan angin rata-rata di wilayah Indonesia khususnya di wilayah Indonesia bagian timur.



Gambar 4.48. Data Monitoring Kecepatan Angin Di Indonesia (Sumber: https://setkab.go.id)

#### 4.1.2 Parameter Perancangan Turbin Angin Poros Vertikal Tipe Savonius

Untuk melakukan perancangan model turbin angin poros vertikal dengan tipe *Savonius* data yang digunakan adalah sebagai berikut

Tabel 4.3 Parameter Kondisi Simulasi

Kecepatan Angin	= 4 m/s, 5 m/s, dan 6 m/s
Density udara	$= 1,225 \text{ kg/m}^3$
Viscousity udara	$= 1,7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$
Tipe blade	= Tipe U dan tipe L
Betz Limit	= 0.593

Geometri turbin angin sumbu vertikal tipe Savonius

## • Tipe U:

Tipe blade	= Tipe U
Jumlah <i>blade</i>	= 3  (tiga)
Diameter poros	= 0.05  m
Diameter dalam	= 0.5  m
Diameter luar	= 0.51  m
Tebal	= 0.01  m
Tinggi	= 1.5  m
Diameter tutup turbin	= 1.25  m
Tebal tutup turbin	= 0.03  m

#### • Tipe L:

Tipe blade	= Tipe L
Jumlah <i>blade</i>	= 3  (tiga)
Radius Fillet	= 0.15  m
Diameter poros	= 0.05  m
Panjang blade	= 0.5  m
Tebal	= 0.01  m
Tinggi	= 1.5  m
Diameter tutup turbin	= 1.25  m
Tebal tutup turbin	= 0.03  m

Untuk geometri dari luasan rotor (sweep area),

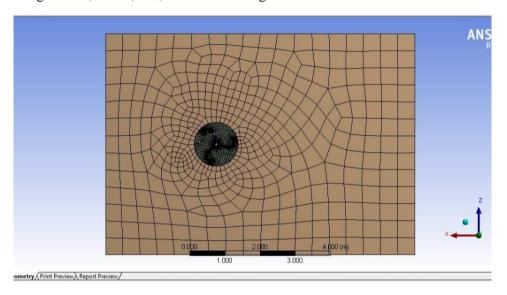
```
Luasan (A) tipe blade U = h . D
= 1.5 \text{ m x } 1.01042 \text{ m}
= 1.5156 \text{ m}^2
Luasan (A) tipe blade L = h . D
= 1.5 \text{ m x } 1.00436 \text{ m}
= 1.5421 \text{ m}^2
```

## 4.1.3 Meshing dan Grid Independensi Model Turbin Savonius

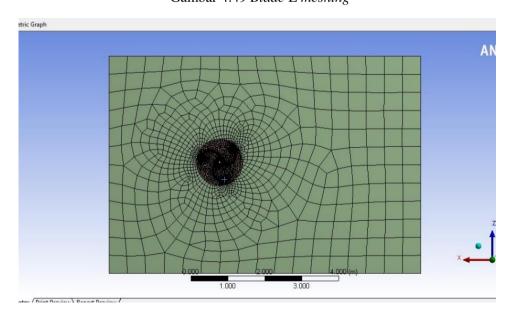
Dalam studi numeric menggunakan *software ANSYS Fluent* diperlukan keakuratan data, baik pada langkah *post-processing* maupun pada langkah *pre-processing*. Hal ini agar dapat divalidasi pada pengaplikasian sebenarnya.

Untuk itu perlu dilakukan langkah *meshing* dan *grid independensi* untuk menentukan tingkat serta strukur *grid* terbaik agar model mendekati bentuk yang sebenarnya.

Pada proses *ini*, perlu dilakukan pembagian kondisi batas yaitu, *inlet* sebagai daerah *input properties* berupa kecepatan awal dari fluida, *outlet* sebagai batas analisa *control surface* pada model uji, serta pemberian batas bagian atas, kanan, kiri, dan bawah sebagai *wall*.



Gambar 4.49 Blade L meshing



Gambar 4.50 Blade U meshing

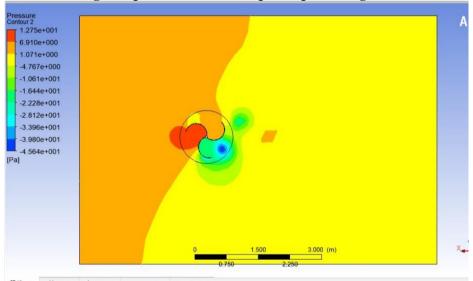
	No.	Tipe Blade Turbin	Kualitas Mesh	Faces	
-	1	Blade U	0.5	1129578	
	2	Blad4 L	0.5	1376462	

Tabel 4.4 Grid Independensi hasil Meshing

Pada table 4.2 menunjukkan variasi hasil *meshing* model uji pada pemodelan 3D *Savonius. Blade* U memiliki hasil *meshing* yang lebih renggang jika dibandingkan dengan model *blade* L. Hasil *meshing* tipe *blade* U menghasilkan *faces* berjumlah 1129578, sedangkan untuk hasil *meshing* pada tipe *blade* L menghasilkan *faces* berjumlah 1376462.

#### 4.2 Pengolahan Data





Gambar 4.51. *Contour pressure boundary layer blade* U terhadap kecepatan angin 4 m/s

Berdasarkan gambar 4.49 aliran udara yang mulanya berupa *free stream* mengalir menuju *blade* turbin *Savonius* dan terjadi tumbukan di bagian turbin yang menghadap ke arah sumber hembusan angin atau *inlet* kemudian udara akan terdorong ke arah kiri dan kanan turbin. Dari tumbukan angin pada *blade* tersebut mengakibatkan turbin berputar. Tekanan tertinggi ditunjukkan dengan warna oranye tua, sedangkan tekanan yang terendah ditunjukkan dengan warna biru tua. Tekanan yang terjadi di bagian belakang turbin (bagian dekat sisi *outlet*) memiliki tekanan terendah, hal menunjukkan bahwa tekanan akan menurun setelah melewati turbin dikarenakan pola hembusan

angin akan menyebar ke sisi kiri dan kanan turbin akibat pengaruh putaran turbin.

Syarat agar turbin bisa berputar adalah tekanan yang terdapat pada salah satu permukaan *blade* lebih besar daripada pada sisi lain permukaan *blade*. Dari hasil *running ANSYS Fluent* pada *Savonius* dengan tipe *blade* U pada kecepatan angin 4 m/s didapatkan hasil P total udara yang melewati turbin yaitu sebesar 12.749 Pa

Sehingga untuk mengetahui gaya yang digunakan untuk memutar turbin dapat dihitung dari:

Daya maksimum yang bisa dihasilkan oleh turbin *Savonius blade* U pada kecepatan angin 4 m/s adalah:

Power max = 
$$\frac{1}{2} \rho$$
. A . $v^3$ . $Cp$   
=  $\frac{1}{2}$  1.225 kg/m<sup>3</sup> x 1.5156 m x 4<sup>3</sup> x 0.593

$$= 35.231$$
 Watt

Untuk mengetahui torsi yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius blade* U pada saat berputar pertama kali adalah melalui:

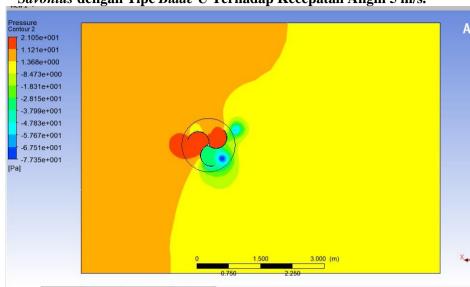
$$\tau = Ps / \omega$$
  
= 35.231 / 7.9177  
= 4.450 Nm

Dan untuk mendapatkan putaran yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius blade* U pada kecepatan angin 4 m/s adalah:

$$\omega = v / r$$
  
= 4 / 0.5052  
= 7.9177 rad/s  
 $\omega = 2 \pi n / 60$   
 $n = 60 \omega / 2 \pi$   
= 60 x 7.9177 / 2  $\pi$   
= 75.6464 rpm

Nilai *Tip Speed Ratio* yang merupakan perbandingan kecepatan ujung *blade* dengan kecepatan angin dapat dihitung dengan menggunakan rumus

$$tsr = \frac{Speed\ of\ rotor\ tip}{wind\ speed} = \frac{v}{V} = \frac{\omega r}{V}$$
$$= \frac{7.918\ x\ 0.5052}{4}$$



#### 4.2.2 Savonius dengan Tipe Blade U Terhadap Kecepatan Angin 5 m/s.

Gambar 4.52. Contour pressure blade U terhadap kecepatan angin 5 m/s

Berdasarkan gambar 4.50 aliran udara yang mulanya berupa *free stream* mengalir menuju *blade* turbin *Savonius* dan terjadi tumbukan di bagian turbin yang menghadap ke arah sumber hembusan angin atau *inlet* kemudian udara akan terdorong ke arah kiri dan kanan turbin. Dari tumbukan angin pada *blade* tersebut mengakibatkan turbin berputar. Tekanan tertinggi ditunjukkan dengan warna oranye tua, sedangkan tekanan yang terendah ditunjukkan dengan warna biru tua. Tekanan yang terjadi di bagian belakang turbin (bagian dekat sisi *outlet*) memiliki tekanan terendah, hal menunjukkan bahwa tekanan akan menurun setelah melewati turbin dikarenakan pola hembusan angin akan menyebar ke sisi kiri dan kanan turbin akibat pengaruh putaran turbin. Semakin cepat angin yang menumbuk pada permukaan *blade* turbin maka semakin besar nilai tumbukan tekanan yang terjadi pada permukaan *blade* turbin tersebut

Syarat agar turbin bisa berputar adalah tekanan yang terdapat pada salah satu permukaan *blade* lebih besar daripada pada sisi lain permukaan *blade*. Dari hasil *running ANSYS Fluent* pada *Savonius* dengan tipe *blade* U pada kecepatan angin 5 m/s didapatkan hasil P total udara yang melewati turbin yaitu sebesar 21.048 Pa

Sehingga untuk mengetahui gaya yang digunakan untuk memutar turbin dapat dihitung dari:

 $F = P \times A$ 

= 21.048 Pa x 1.5156 m

= 31.9 N

Daya maksimum yang bisa dihasilkan oleh turbin *Savonius blade* U pada kecepatan angin 5 m/s adalah:

Power max = 
$$\frac{1}{2} \rho$$
. A  $.v^3 . Cp$   
=  $\frac{1}{2} 1.225 \text{ kg/m}^3 \text{ x } 1.5156 \text{ m x } 5^3 \text{ x } 0.593$ 

$$= 68.811 \text{ Watt}$$

Untuk mengetahui torsi yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius blade* U pada saat berputar pertama kali adalah melalui:

$$\tau = Ps / \omega$$
  
= 68.811 / 9.897  
= 6.953 Nm

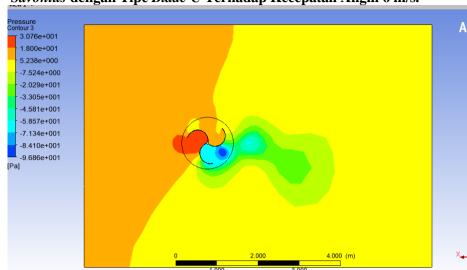
Dan untuk mendapatkan putaran yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius blade* U pada kecepatan angin 5 m/s adalah:

$$\omega = v / r$$
  
= 5 / 0.5052  
= 9.897 rad/s  
 $\omega = 2 \pi n / 60$   
 $n = 60 \omega / 2 \pi$   
= 60 x 9.897 / 2  $\pi$   
= 94.558 rpm

= 1

Nilai *Tip Speed Ratio* yang merupakan perbandingan kecepatan ujung *blade* dengan kecepatan angin dapat dihitung dengan menggunakan rumus

$$tsr = \frac{Speed\ of\ rotor\ tip}{wind\ speed} = \frac{v}{V} = \frac{\omega r}{V}$$
$$= \frac{9.897\ x\ 0.5052}{5}$$



## 4.2.3 Savonius dengan Tipe Blade U Terhadap Kecepatan Angin 6 m/s.

Gambar 4.53. *Contour pressure boundary layer blade* U terhadap kecepatan angin 6 m/s

Berdasarkan gambar 4.51 aliran udara yang mulanya berupa *free stream* mengalir menuju *blade* turbin *Savonius* dan terjadi tumbukan di bagian turbin yang menghadap ke arah sumber hembusan angin atau *inlet* kemudian udara akan terdorong ke arah kiri dan kanan turbin. Dari tumbukan angin pada *blade* tersebut mengakibatkan turbin berputar. Semakin cepat angin yang menumbuk pada permukaan *blade* turbin maka semakin besar nilai tumbukan tekanan yang terjadi pada permukaan *blade* turbin tersebut. Tekanan tertinggi ditunjukkan dengan warna oranye tua, sedangkan tekanan yang terendah ditunjukkan dengan warna biru tua. Tekanan yang terjadi di bagian belakang turbin (bagian dekat sisi *outlet*) memiliki tekanan terendah, hal menunjukkan bahwa tekanan akan menurun setelah melewati turbin dikarenakan pola hembusan angin akan menyebar ke sisi kiri dan kanan turbin akibat pengaruh putaran turbin.

Syarat agar turbin bisa berputar adalah tekanan yang terdapat pada salah satu permukaan *blade* lebih besar daripada pada sisi lain permukaan *blade*. Dari hasil *running ANSYS Fluent* pada *Savonius* dengan tipe *blade* U pada kecepatan angin 6 m/s didapatkan hasil P total udara yang melewati turbin yaitu sebesar 30.762 Pa

Sehingga untuk mengetahui gaya yang digunakan untuk memutar turbin dapat dihitung dari:

 $F = P \times A$ 

= 30.762 Pa x 1.5156 m

= 46.623 N

Daya maksimum yang bisa dihasilkan oleh turbin *Savonius blade* U pada kecepatan angin 6 m/s adalah:

Power max = 
$$\frac{1}{2} \rho$$
. A  $.v^3$ . Cp  
=  $\frac{1}{2}$  1.225 kg/m<sup>3</sup> x 1.5156 m x 6<sup>3</sup> x 0.593

= 118.905 Watt

Untuk mengetahui torsi yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius blade* U pada saat berputar pertama kali adalah melalui:

$$\tau = P_{S} / \omega$$
  
= 118.905 / 11.876  
= 4.450 Nm

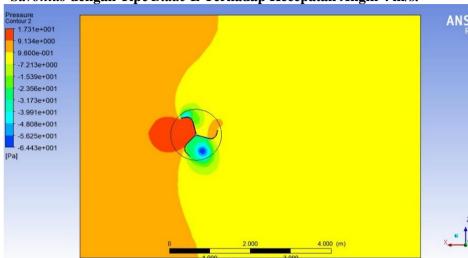
Dan untuk mendapatkan putaran yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius blade* U pada kecepatan angin 6 m/s adalah:

$$\omega = v / r$$
  
= 6 / 0.5052  
= 11.876 rad/s  
 $\omega = 2 \pi n / 60$   
 $n = 60 \omega / 2 \pi$   
= 60 x 11.876 / 2  $\pi$   
= 113.470 rpm

Nilai *Tip Speed Ratio* yang merupakan perbandingan kecepatan ujung *blade* dengan kecepatan angin dapat dihitung dengan menggunakan rumus

$$tsr = \frac{Speed\ of\ rotor\ tip}{wind\ speed} = \frac{v}{V} = \frac{\omega r}{V}$$
$$= \frac{11.876\ x\ 0.5052}{6}$$

= 1



#### 4.2.4 Savonius dengan Tipe Blade L Terhadap Kecepatan Angin 4 m/s.

Gambar 4.54. *Contour pressure boundary layer blade* L terhadap kecepatan angin 4 m/s

Berdasarkan gambar 4.52 aliran udara yang mulanya berupa *free stream* mengalir menuju *blade* turbin *Savonius* dan terjadi tumbukan di bagian turbin yang menghadap ke arah sumber hembusan angin atau *inlet* kemudian udara akan terdorong ke arah kiri dan kanan turbin. Dari tumbukan angin pada *blade* tersebut mengakibatkan turbin berputar. Tekanan tertinggi ditunjukkan dengan warna oranye tua, sedangkan tekanan yang terendah ditunjukkan dengan warna biru tua. Tekanan yang terjadi di bagian belakang turbin (bagian dekat sisi *outlet*) memiliki tekanan terendah, hal menunjukkan bahwa tekanan akan menurun setelah melewati turbin dikarenakan pola hembusan angin akan menyebar ke sisi kiri dan kanan turbin akibat pengaruh putaran turbin.

Syarat agar turbin bisa berputar adalah tekanan yang terdapat pada salah satu permukaan *blade* lebih besar daripada pada sisi lain permukaan *blade*. Dari hasil *running ANSYS Fluent* pada *Savonius* dengan tipe *blade* L pada kecepatan angin 4 m/s didapatkan hasil P total udara yang melewati turbin yaitu sebesar 17.307 Pa

Sehingga untuk mengetahui gaya yang digunakan untuk memutar turbin dapat dihitung dari:

$$F = P \times A$$

= 17.307 Pa x 1.5066 m

= 26.075 N

Daya maksimum yang bisa dihasilkan oleh turbin *Savonius blade* L pada kecepatan angin 4 m/s adalah:

Power max = 
$$\frac{1}{2}$$
 p. A  $v^3$ . Cp

$$= \frac{1}{2} \ 1.225 \ kg/m^3 \ x \ 1.5066 \ m \ x \ 4^3 \ x \ 0.593$$

Untuk mengetahui torsi yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius blade* U pada saat berputar pertama kali adalah melalui:

$$\tau = Ps / \omega$$
  
= 35.427 / 7.965  
= 4.397 Nm

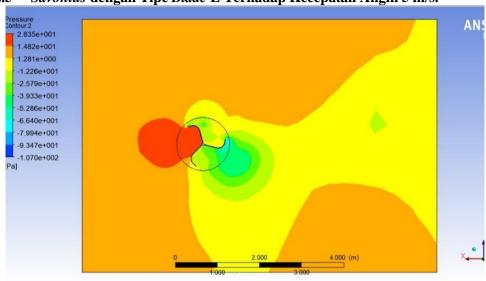
Dan untuk mendapatkan putaran yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius blade* U pada kecepatan angin 4 m/s adalah:

$$\omega = v / r$$
  
= 4 / 0.5022  
= 7.965 rad/s  
 $\omega = 2 \pi n / 60$   
 $n = 60 \omega / 2 \pi$   
= 60 x 7.965 / 2  $\pi$   
= 76.098 rpm

= 1

Nilai *Tip Speed Ratio* yang merupakan perbandingan kecepatan ujung *blade* dengan kecepatan angin dapat dihitung dengan menggunakan rumus

$$tsr = \frac{Speed\ of\ rotor\ tip}{wind\ speed} = \frac{v}{V} = \frac{\omega r}{V}$$
$$= \frac{7.965\ x\ 0.5022}{4}$$



#### 4.2.5 Savonius dengan Tipe Blade L Terhadap Kecepatan Angin 5 m/s.

Gambar 4.55. *Contour pressure boundary layer blade* L terhadap kecepatan angin 5 m/s

Berdasarkan gambar 4.53 aliran udara yang mulanya berupa *free stream* mengalir menuju *blade* turbin *Savonius* dan terjadi tumbukan di bagian turbin yang menghadap ke arah sumber hembusan angin atau *inlet* kemudian udara akan terdorong ke arah kiri dan kanan turbin. Dari tumbukan angin pada *blade* tersebut mengakibatkan turbin berputar. Tekanan tertinggi ditunjukkan dengan warna oranye tua, sedangkan tekanan yang terendah ditunjukkan dengan warna biru tua. Tekanan yang terjadi di bagian belakang turbin (bagian dekat sisi *outlet*) memiliki tekanan terendah, hal menunjukkan bahwa tekanan akan menurun setelah melewati turbin dikarenakan pola hembusan angin akan menyebar ke sisi kiri dan kanan turbin akibat pengaruh putaran turbin. Semakin cepat angin yang menumbuk pada permukaan *blade* turbin maka semakin besar nilai tumbukan tekanan yang terjadi pada permukaan *blade* turbin tersebut

Syarat agar turbin bisa berputar adalah tekanan yang terdapat pada salah satu permukaan *blade* lebih besar daripada pada sisi lain permukaan *blade*. Dari hasil *running ANSYS Fluent* pada *Savonius* dengan tipe *blade* L pada kecepatan angin 5 m/s didapatkan hasil P total udara yang melewati turbin yaitu sebesar 28.353 Pa

Sehingga untuk mengetahui gaya yang digunakan untuk memutar turbin dapat dihitung dari:

 $F = P \times A$ 

= 28.353 Pa x 1.5066 m

= 42.717 N

Daya maksimum yang bisa dihasilkan oleh turbin *Savonius blade* L pada kecepatan angin 5 m/s adalah:

Power max = 
$$\frac{1}{2} \rho$$
. A  $.v^3$ . Cp  
=  $\frac{1}{2}$  1.225 kg/m<sup>3</sup> x 1.5066 m x 5<sup>3</sup> x 0.593  
= 69.172 Watt

Untuk mengetahui torsi yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius blade* U pada saat berputar pertama kali adalah melalui:

$$\tau = Ps / \omega$$
  
= 69.172 / 9.956  
= 6.870 Nm

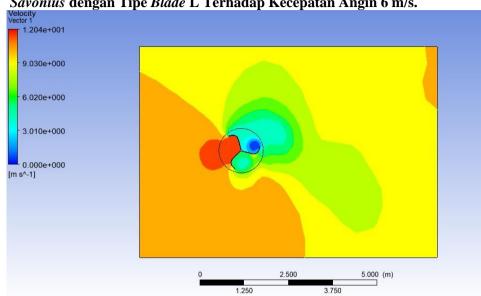
Dan untuk mendapatkan putaran yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius blade* L pada kecepatan angin 5 m/s adalah:

$$\omega = v / r$$
  
= 5 / 0.5022  
= 9.956 rad/s  
 $\omega = 2 \pi n / 60$   
 $n = 60 \omega / 2 \pi$   
= 60 x 9.956 / 2  $\pi$   
= 95.123 rpm

= 1

Nilai *Tip Speed Ratio* yang merupakan perbandingan kecepatan ujung *blade* dengan kecepatan angin dapat dihitung dengan menggunakan rumus

$$tsr = \frac{Speed\ of\ rotor\ tip}{wind\ speed} = \frac{v}{V} = \frac{\omega r}{V}$$
$$= \frac{9.956\ x\ 0.5022}{5}$$



#### 4.2.6 Savonius dengan Tipe Blade L Terhadap Kecepatan Angin 6 m/s.

Gambar 4.56. Contour pressure boundary layer blade L terhadap kecepatan angin 6 m/s

Berdasarkan gambar 4.54 aliran udara yang mulanya berupa free stream mengalir menuju *blade* turbin *Savonius* dan terjadi tumbukan di bagian turbin yang menghadap ke arah sumber hembusan angin atau inlet kemudian udara akan terdorong ke arah kiri dan kanan turbin. Dari tumbukan angin pada blade tersebut mengakibatkan turbin berputar. Semakin cepat angin yang menumbuk pada permukaan *blade* turbin maka semakin besar nilai tumbukan tekanan yang terjadi pada permukaan *blade* turbin tersebut. Tekanan tertinggi ditunjukkan dengan warna oranye tua, sedangkan tekanan yang terendah ditunjukkan dengan warna biru tua. Tekanan yang terjadi di bagian belakang turbin (bagian dekat sisi *outlet*) memiliki tekanan terendah, hal menunjukkan bahwa tekanan akan menurun setelah melewati turbin dikarenakan pola hembusan angin akan menyebar ke sisi kiri dan kanan turbin akibat pengaruh putaran turbin.

Syarat agar turbin bisa berputar adalah tekanan yang terdapat pada salah satu permukaan *blade* lebih besar daripada pada sisi lain permukaan *blade*. Dari hasil running ANSYS Fluent pada Savonius dengan tipe blade L pada kecepatan angin 6 m/s didapatkan hasil P total udara yang melewati turbin yaitu sebesar 35.761 Pa

Sehingga untuk mengetahui gaya yang digunakan untuk memutar turbin dapat dihitung dari:

 $F = P \times A$ 

= 35.761 Pa x 1.5066 m

= 53.878 N

Daya maksimum yang bisa dihasilkan oleh turbin *Savonius blade* L pada kecepatan angin 6 m/s adalah:

Power max = 
$$\frac{1}{2} \rho$$
. A . $v^3$ . $Cp$   
=  $\frac{1}{2}$  1.225 kg/m<sup>3</sup> x 1.5066 m x 6<sup>3</sup> x 0.593

Untuk mengetahui torsi yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius blade* L pada saat berputar pertama kali adalah melalui:

$$\tau = Ps / \omega$$
  
= 119.264 / 11.947  
= 9.893 Nm

= 119.264 Watt

Dan untuk mendapatkan putaran yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius blade* L pada kecepatan angin 6 m/s adalah:

$$\omega = v / r$$
  
= 6 / 0.5022  
= 11.947 rad/s  
 $\omega = 2 \pi n / 60$   
 $n = 60 \omega / 2 \pi$   
= 60 x 11.947 / 2  $\pi$   
= 114.147 rpm

= 1

Nilai *Tip Speed Ratio* yang merupakan perbandingan kecepatan ujung *blade* dengan kecepatan angin dapat dihitung dengan menggunakan rumus

$$tsr = \frac{Speed\ of\ rotor\ tip}{wind\ speed} = \frac{v}{V} = \frac{\omega r}{V}$$
$$= \frac{11.947\ x\ 0.5022}{6}$$

#### 4.3 Pembahasan

Data yang didapatkan dari hasil simulasi dan perhitungan yang menghasilkan nilai tekanan, gaya, torsi, rpm, serta daya kemudian akan diplotkan kedalam bentuk grafik. Dari grafik tersebut dapat disimpulkan karakteristik dari masing-masing model turbin yang disimulasikan terhadap variasi kecepatan udara dan variasi *blade*.

Tipe Blade	V (m/s)	P (Pa)	F (N)	Ps (Watt)	τ (Nm)	ω (rad/s)	n (rpm)	TSR
D1 1	4	12.749	19.322	35.231	4.450	7.918	75.646	1.00
Blade U	5	21.048	31.900	68.811	6.953	9.897	94.558	1.00
	6	30.762	46.623	118.905	10.012	11.876	113.470	1.00
D1 1	4	17.307	26.075	35.427	4.397	7.965	76.098	1.00
Blade L	5	28.353	42.717	69.172	6.870	9.956	95.123	1.00
	6	35.761	53.878	119.264	9.893	11.947	114.147	1.00

Tabel 4.5. Tabel Hasil Perhitungan

Dari table di atas tekanan yang paling besar terjadi pada kecepatan angin tertinggi yaitu 6 m/s pada *savonius* dengan tipe *blade* L yakni 35.761 Pa. Gaya yang terjadi paling besar terdapat pada *savonius* dengan tipe *blade* L yakni 54.199 N. Torsi yang terjadi paling tinggi terdapat pada *savonius* dengan tipe *blade* L yakni 11.791 Nm. Pada *savonius* dengan tipe *blade* U putaran yang terjadi yaitu 113 rpm lebih besar jika dibandingkan dengan tipe *blade* L yaitu 104 rpm. Pada table di atas juga bisa diketahui bahwa nilai daya tertinggi terdapat pada *savonius* dengan tipe *blade* L yaitu 129.037 Watt.

4.3.1 Grafik Perbandingan Nilai Tekanan pada *Blade* Tipe U dan Tipe L Terhadap Kecepatan Udara



Gambar 4.57. Grafik tekanan (Pa) terhadap kecepatan udara (m/s)

Grafik di atas menunjukkan bahwa hubungan antara kecepatan udara terhadap tekanan yang terjadi pada turbin angin *savonius* dengan variasi tipe *blade* dan kecepatan udara 4 m/s, 5 m/s, dan 6 m/s adalah berbanding lurus. Semakin besar kecepatan angin maka tekanan yang timbul pada turbin akan semakin besar. Dengan nilai tekanan tertinggi yaitu 35.761 Pa pada kecepatan angin 6 m/s, dan nilai tekanan yang terjadi pada tipe *blade* L lebih besar daripada nilai tekanan pada tipe *blade* U, yaitu 35.761 Pa pada tipe *blade* L dan 30.762 Pa pada tipe *blade* U.

4.3.2 Grafik Perbandingan Jumlah Putaran Rotor pada *Blade* Tipe U dan Tipe L Terhadap Kecepatan Udara



Gambar 4.58. Grafik Putaran (Rpm) terhadap kecepatan udara (m/s)

Grafik di atas menunjukkan bahwa hubungan antara kecepatan udara terhadap putaran yang terjadi pada turbin angin *savonius* dengan variasi tipe *blade* dan kecepatan udara 4 m/s, 5 m/s, dan 6 m/s adalah berbanding lurus. Semakin besar kecepatan angin maka putaran yang terjadi pada turbin akan semakin besar. Dengan kecepatan tertinggi yaitu 113 Rpm pada kecepatan angin 6 m/s. Putaran tertinggi terjadi pada tipe *blade* U yaitu 113 Rpm sedangkan pada tipe *blade* L adalah 105 Rpm, hal tersebut dipengaruhi oleh jari-jari dari turbin. Hal ini sesuai dengan rumus  $\omega = v / r$  lalu  $\omega = 2 \pi$  n / 60, semakin kecil nilai jari-jari (r) maka nilai  $\omega$  akan semakin besar, sehingga nilai putaran (n) akan semakin besar pula.

Kecepatan Angin vs Torsi 12,000 10,000 903932 8,000 Forsi (Nm) 6,878 6,000 4,490 Blade U 4.000 Blade L 2,000 0,000 5 6 4 Blade U 4,450 6,953 10,012 Blade L 6.870 9,893

#### 4.3.3 Grafik Perbandingan Nilai Torsi pada *Blade* Tipe U dan Tipe L Terhadap Kecepatan Udara

Gambar 4.59. Grafik Torsi (Nm) terhadap kecepatan udara (m/s)

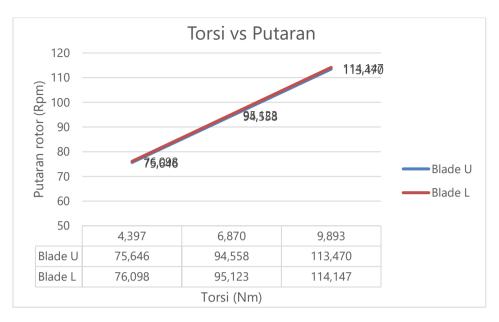
4,397

Grafik di atas menunjukkan bahwa hubungan antara kecepatan udara terhadap nilai torsi yang terjadi pada turbin angin savonius dengan variasi tipe blade dan kecepatan udara 4 m/s, 5 m/s, dan 6 m/s adalah berbanding lurus. Semakin besar kecepatan angin maka nilai torsi yang terjadi pada turbin akan semakin besar. Dengan nilai torsi tertinggi yaitu 11.791 Nm pada kecepatan angin 6 m/s. Nilai torsi tertinggi terjadi pada tipe blade L vaitu 11.791 Nm sedangkan pada tipe blade U adalah 10.012 Nm.

Kecepatan Angin (m/s)

#### 4.3.4 Grafik Perbandingan Torsi pada *Blade* Tipe U dan Tipe L Terhadap **Putaran**

Grafik di bawah menunjukkan bahwa hubungan antara nilai torsi terhadap putaran rotor turbin angin savonius dengan variasi tipe blade dan kecepatan udara 4 m/s, 5 m/s, dan 6 m/s adalah berbanding lurus. Semakin besar nilai torsi pada turbin tersebut maka putaran rotor yang terjadi pada turbin akan semakin besar atau cepat. Dengan putaran tertinggi yaitu 113 Rpm pada nilai torsi 11.791 Nm. Putaran tertinggi dihasilkan oleh savonius tipe blade U yaitu 113 Rpm sedangkan pada tipe blade L adalah 105 Rpm pada masing-masing nilai torsi tertinggi dari kedua tipe blade, yaitu 10.012 Nm pada *blade* U dan 11.791 Nm pada *blade* L.



Gambar 4.60. Grafik Torsi (Nm) terhadap putaran (rpm)

4.3.5 Grafik Perbandingan Daya pada *Blade* Tipe U dan Tipe L Terhadap Kecepatan Udara

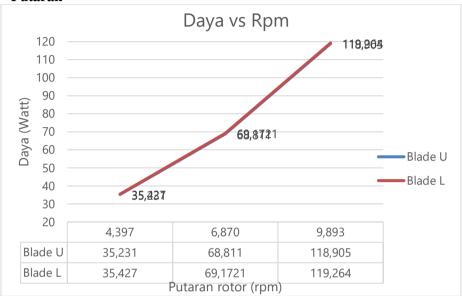


Gambar 4.61. Grafik Daya (Watt) terhadap kecepatan udara (m/s)

Grafik di atas menunjukkan bahwa hubungan antara kecepatan udara terhadap daya yang dihasilkan turbin angin *savonius* dengan variasi tipe *blade* dan kecepatan udara 4 m/s, 5 m/s, dan 6 m/s adalah berbanding lurus. Semakin besar kecepatan angin maka besar daya yang dihasilkan oleh turbin juga akan semakin besar. Pada grafik diatas dapat diketahui daya tertinggi

yaitu 129.037 Watt pada kecepatan angin 6 m/s. Daya terbesar dihasilkan oleh *savonius* tipe *blade* L yaitu 129.037 Watt sedangkan pada tipe *blade* U adalah 118.905 Watt yang masing-masing pada kecepatan angina tertinggi yaitu 6 m/s.

# 4.3.6 Grafik Perbandingan Daya pada *Blade* Tipe U dan Tipe L Terhadap Putaran



Gambar 4.62. Grafik Daya (Watt) terhadap Putaran (Rpm)

Grafik di atas menunjukkan bahwa hubungan antara putaran terhadap daya yang dihasilkan turbin angin *savonius* dengan variasi tipe *blade* dan kecepatan udara 4 m/s, 5 m/s, dan 6 m/s adalah berbanding lurus. Semakin besar putaran yang terjadi pada turbin akan semakin besar pula daya yang dihasilkan oleh turbin. Dengan daya tertinggi yaitu 161.251 Watt pada putaran 105 rpm. Daya terbesar dihasilkan oleh *savonius* tipe *blade* L yaitu 161.251 Watt sedangkan pada tipe *blade* U adalah 143.770 Watt pada masing-masing kecepatan tertingginya.

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari simulasi, analisa data, serta pembahasan yang telah dilakukan pada bab sebelumnya, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- 1. Hubungan antara besar tekanan yang terjadi pada turbin akibat dari kecepatan udara adalah berbanding lurus, semakin besar kecepatan udara yang melewati turbin maka tekanan yang timbul juga akan semakin besar, pada turbin *savonius* dengan tipe *blade* L pada kecepatan udara tertinggi yaitu 6 m/s memiliki nilai tekanan terbesar yaitu 35.761 Pa sedangkan pada *savonius* dengan tipe *blade* U pada kecepatan udara tertinggi yaitu 6 m/s memiliki tekanan sebesar 30.762 Pa.
- 2. Kecepatan putaran yang dihasilkan dari turbin angin savonius dengan variasi blade tipe U dan L dengan variasi kecepatan udara 4 m/s, 5 m/s, dan 6 m/s adalah pada blade tipe U kecepatan putaran yang terjadi adalah 114 Rpm dan pada blade tipe L kecepatan putarannya adalah 113 Rpm. Sehingga dapat diketahui putaran tertinggi didapat pada turbin savonius dengan tipe blade L yaitu 114 Rpm jika dibandingkan dengan tipe blade U sebanyak 113 Rpm pada kecepatan angin yang sama yaitu 6 m/s.
- 3. Pada turbin angin *savonius* dengan variasi *blade* tipe U dan L nilai torsi terbesar pada masing-masing model yaitu pada *blade* tipe U sebesar 10.012 Nm dan pada *blade* tipe L sebesar 11.947 Nm. Dari hal tersebut dapat diketahui bahwa nilai torsi terbesar adalah pada *savonius* dengan tipe *blade* L yaitu 11.947 Nm. Pada turbin angin *savonius* dengan variasi *blade* tipe U dan L daya terbesar yang bisa dihasilkan oleh masing-masing model yaitu pada *blade* tipe L sebesar 119.264 Watt dan pada *blade* tipe U sebesar 118.905 Watt. Dari hal tersebut dapat diketahui bahwa *savonius* dengan tipe *blade* L dapat menghasilkan daya lebih besar jika dibandingkan dengan *blade* U pada kecepatan angin yang sama yaitu 6 m/s.

#### 5.2 Saran

- 1. Perlu dilakukan analisa pengaruh material terhadap kinerja turbin *savonius* tersebut.
- 2. Untuk menghasilkan data yang lebih baik dan akurat jumlah iterasi harus ditambah agar *solver* dapat menghasilkan data yang lebih baik dan akurat sesuai pada keadaan nyata.
- 3. Sebaiknya perlu melakukan analisis pemodelan dengan menggunakan *software CFD* (*Computational Fluid Dynamics*) yang lain agar mendapatkan perbandingan data simulasi.
- 4. Perlu menggunakan computer dengan spesifikasi lebih tinggi, sehingga dapat meminimalisir waktu yang digunakan untuk *running* simulasi CFD tersebut.

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

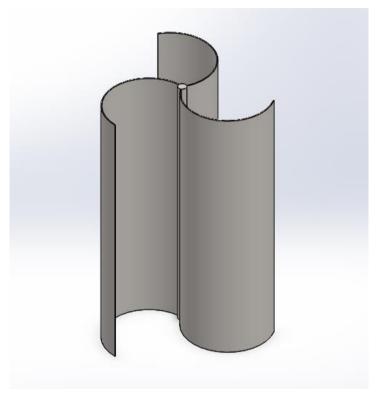
#### DAFTAR PUSTAKA

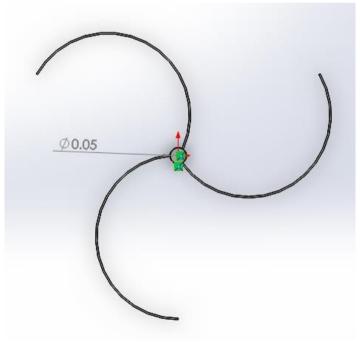
- Ahmad Hemami. 2011: Wind Turbine Technology, Associate of McGill University, Montreal, Canada, Cengage Learning
- Ali, Mohammed Hadi. (2013): Experimental Comparison Study for Savonius Wind Turbine of Two Three Blades At Low Wind Speed. International Journal of Modern Engineering Research (IJMER): Mustansiriya.
- Anonim. 2014. Wind Energy Basics: Wind Energy and Wind Power. 5 Desember 2017 dari Wind Energy Development Programmatic EIS, Website http://windeis.anl.gov/guide/basics/
- Anonim. 2014. *Wind Power* Diperoleh 6 desember 2017 dari *National Geograpic*, Website ; http://environment.nationalgeographic.com/environment/global-warming/wind-power-profile/
- Anonim. 2015. *Cara Membuat Kincir Angin*. 7 Januari 2018, Website: https://www.caratekno.com/2015/06/cara-membuat-generator-kincir-angin.html.
- Anonim. 2014. Wind Energy Basics: Wind Energy and Wind Power. 8 Maret 2016 dari Wind Energy Development Programmatic EIS, Website; http://windeis.anl.gov/guide/basics/
- A.P.Schaffarczyk. 2014: *Introduction to Wint Turbine Aerodynamics*, Green Energy and Technology, Berlin Germany, Springer.
- Arifin. 2017: Optimasi Daya Pada Sistem Turbin Angin Menggunakan Kontrol Pitch Angle Dengan Fuzzy Logic Control (Aplikasi Pada Kecepatan Angin Daerah Nias Utara). Electrical Engineering, Universitas Sumatra Utara, Sumatra Utara, Indonesia.
- Bala Govind. 2017: Increasing the operational capability of a horizontal axis wind turbine by its integration with a vertical axis wind turbine. Department of Mechanical and Aerospace Engineering, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina 27606, United States
- Duffet, Ian. 2009: Design and Evaluation of Twisted Savonius Wind Turbine. Vertical Wind Energy Engineering.
- Erich Hau. 2013: Wind Turbine Fundamental, Technologies, Application, Economics, Munich Germany, Springer.
- Faruk, Al Abdulah. 2014: Influence of Blade Overlap and Blade Angle on the Aerodynamic Coefficients in Vertical Axis Swirling type Savonius Wind Turbine. University of Southern Queensland: Australia.

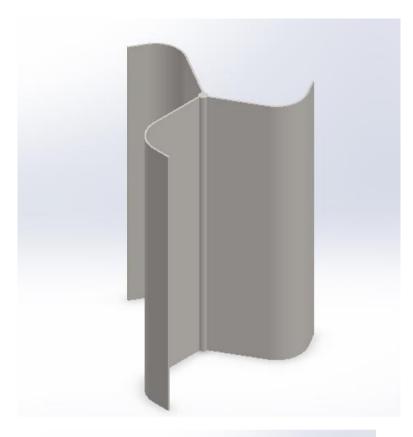
- Johan, Edwin. 2015. Analisis Pengaruh Overlap Ratio Pada Turbin Angin Savonius Sumbu Vertikal Tipe L Menggunakan Perangkat Lunak Fluent 6.3.26. Teknik Mesin, Institute Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- J. Wright, Steven, and Reuben M. Olson, 1993. *Dasar-Dasar Mekanika Fluida Teknik*. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama
- Konrad Kacprzak, Grzegorz Liskiewicz, Krzysztof Sobczak, 2013: *Numerical Investigation of Conventional and Modified Savonius Wind Turbines*. Institute of Turbomachinery, Technical University of Lodz, Wolczanska Street, Lodz, Poland.
- M.A. Kamoji, S.B. Kedare, S.V. Prabhu, 2009: Experimental Investigations on Single Stage Modified Savonius Rotor. Departement of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology, Bombay, Powai, Mumbai, India
- Mahendra, Bayu dkk. : *Pengaruh Jumlah Sudu Terhadap Unjuk Kerja Turbin Angin Savonius Type L.* Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya : Malang
- Mahmud, Syahir dkk. 2014: Desain Turbin Darrieus-Savonius pada Proses Pemanfaatan Arus Laut sebagai Pembangkit Energi Mekanik. Prosiding Seminar Nasional Geofisika 2014: Makassar.
- Medeline Citra Vanessa. 2016: Laporan Penelitian Riset Mini Tentang Turbin Angin Model Savonius dan Darrieus. Physics Energy Engineering, Clean Energy and Climate Change Faculty, Surya University, Tangerang, Banten, 15810, Indonesia.
- Pranato, Dwi Haryono. : Rancang Bangun Turbin Angin Vertikal Tipe Hybrid Savonius-Darrieus dengan Perbedaan Jumlah Sudu. Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Jakarta : Jakarta
- Sudargana, Analisa Perancangan Turbin Darrieus pada Hydrofoil NACA 0015 dari Karakteristik Cl dan Cd Pada Variasi Sudut Serang menggunakan Regresi Linier pada Matlab. Jurnal Teknik Mesin, Universitas Diponogoro: Semarang
- Sumiati, Ruzita dkk. 2014: Rancang Bangun Micro Turbin Angin Pembangkit Listrik untuk Rumah Tinggal Angin Pembangkit Listrik untuk Rumah Tinggal di Daerah Kecepatan Angin Rendah. Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah: Jakarta.

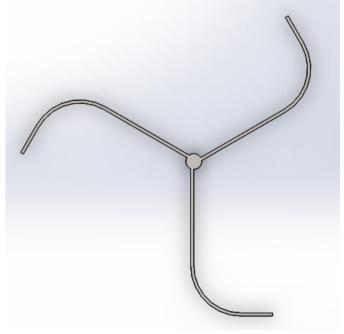
•

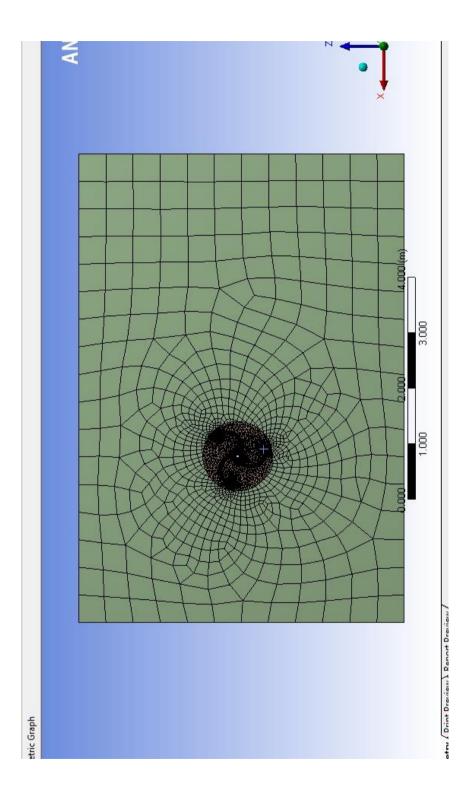
# LAMPIRAN

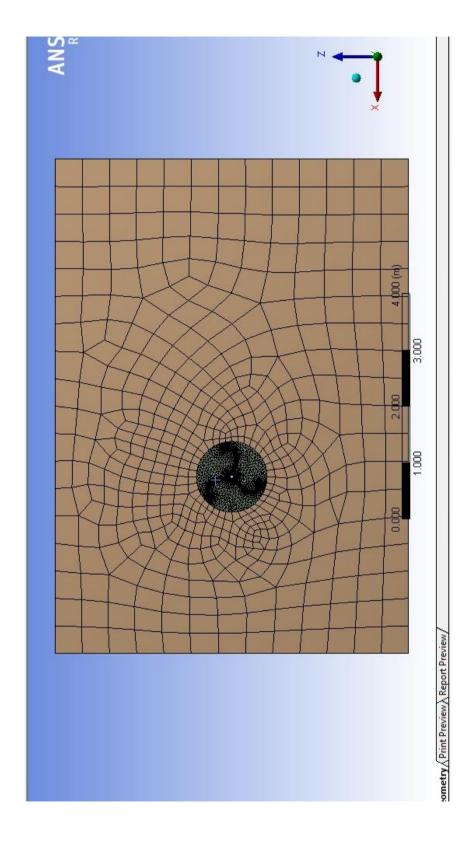




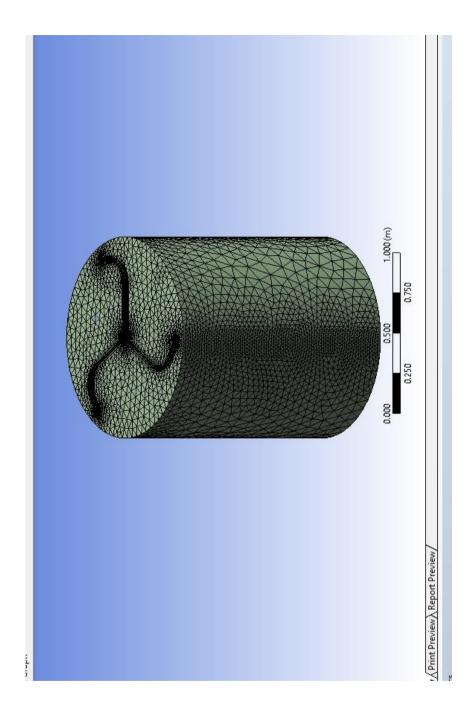


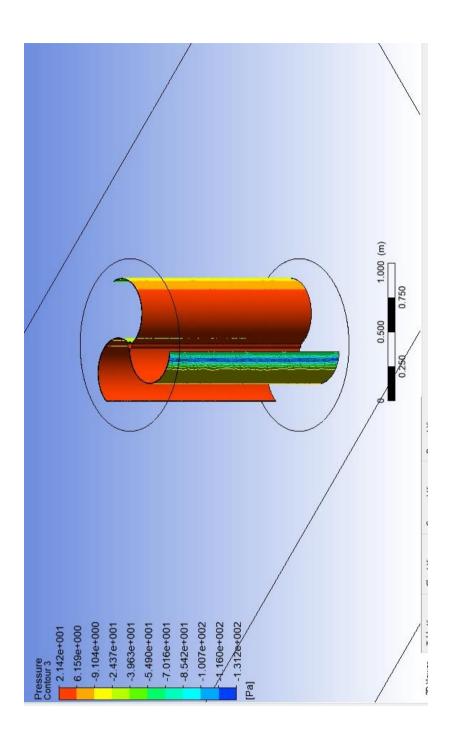


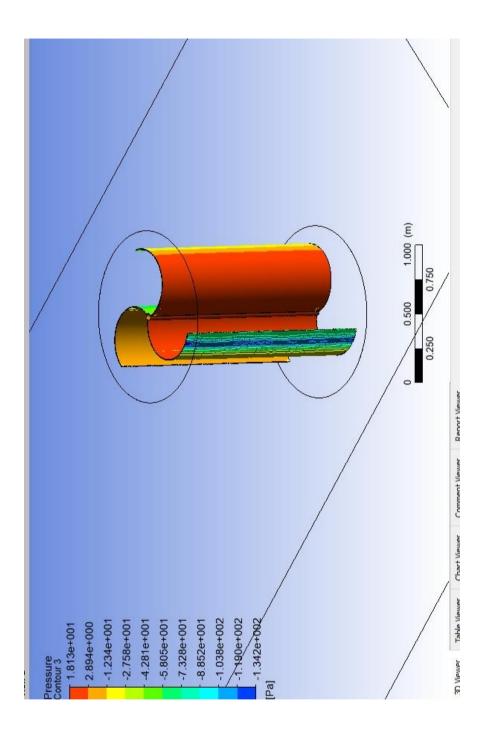


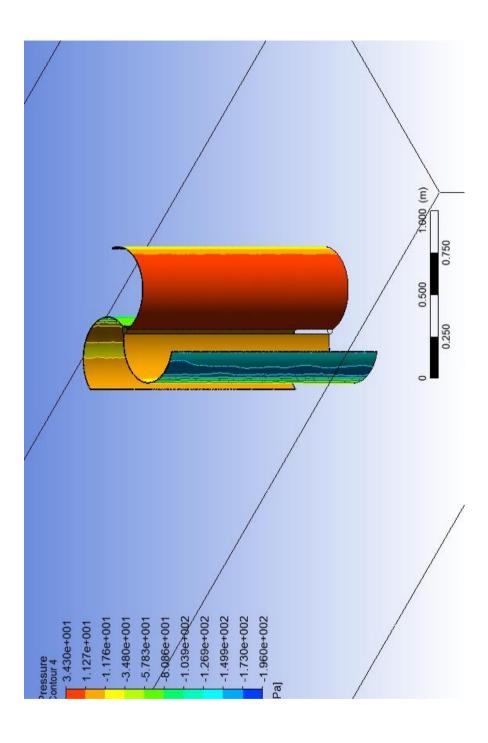


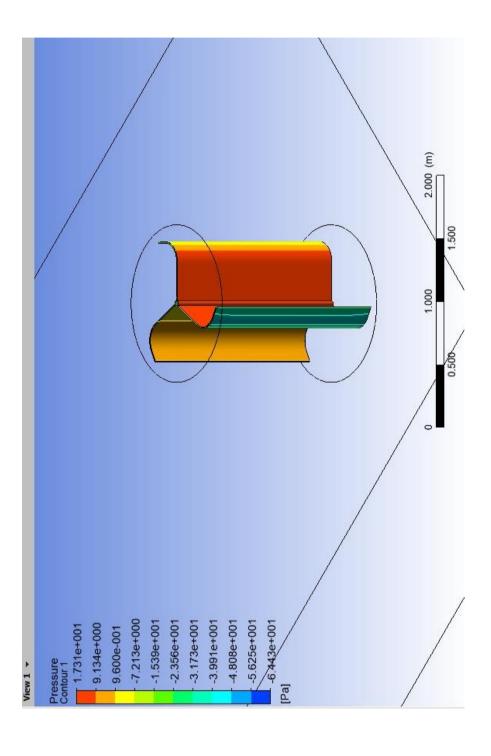


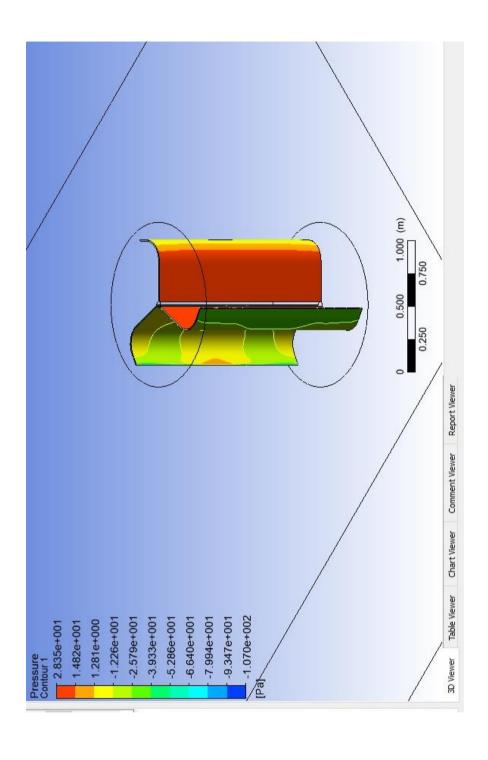


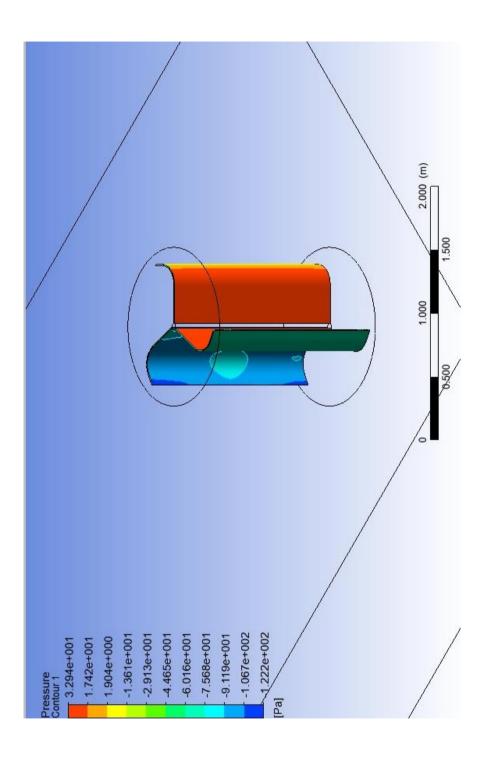


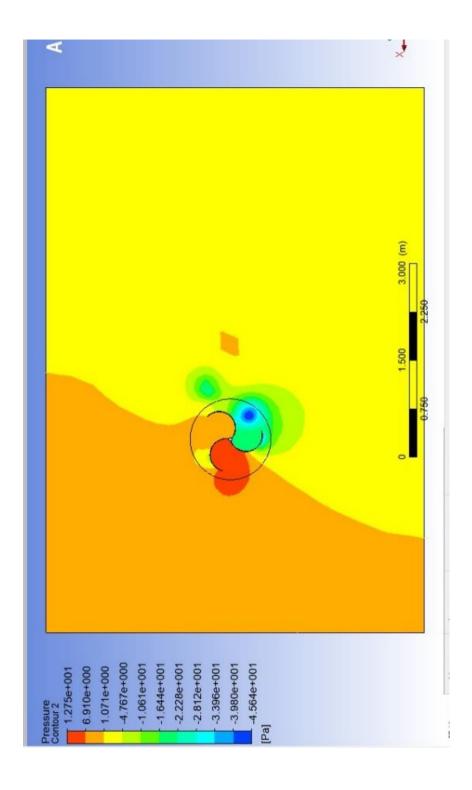


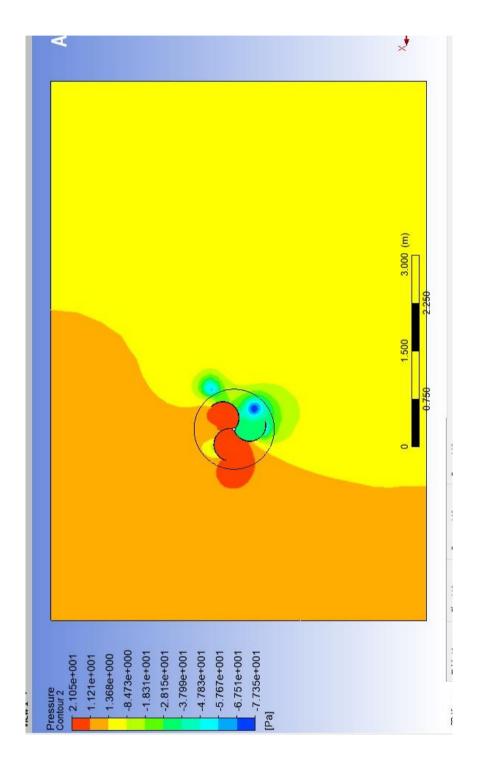


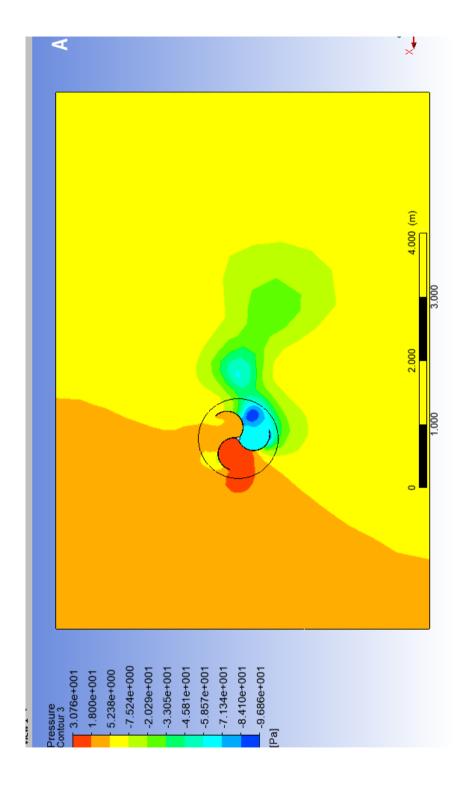


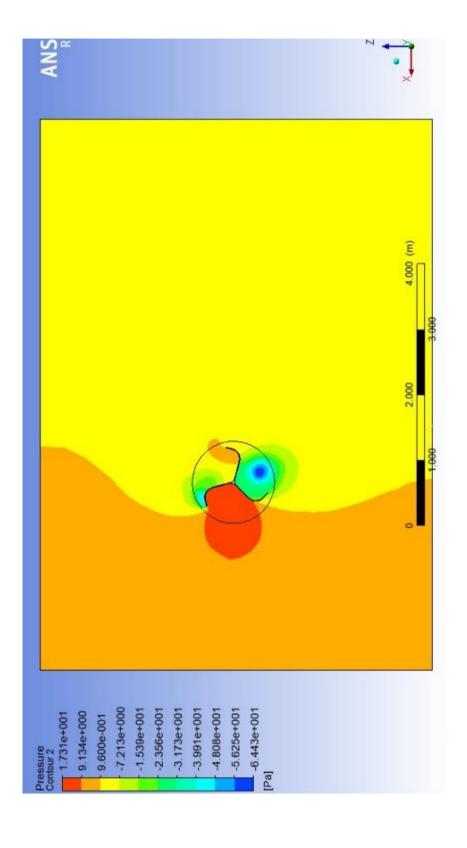


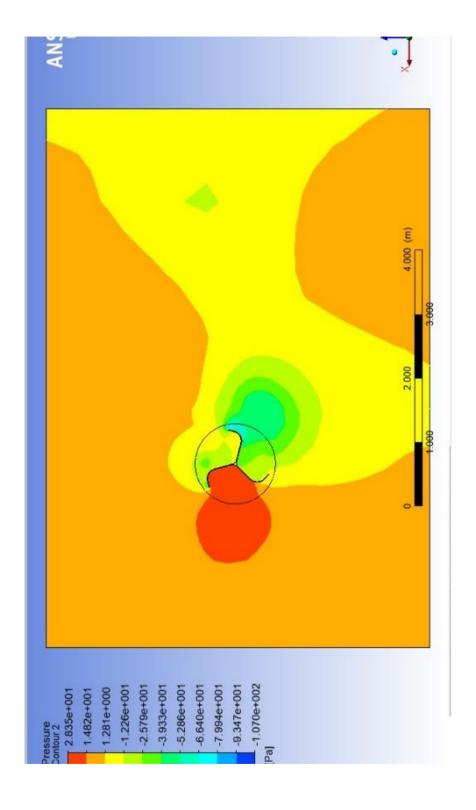


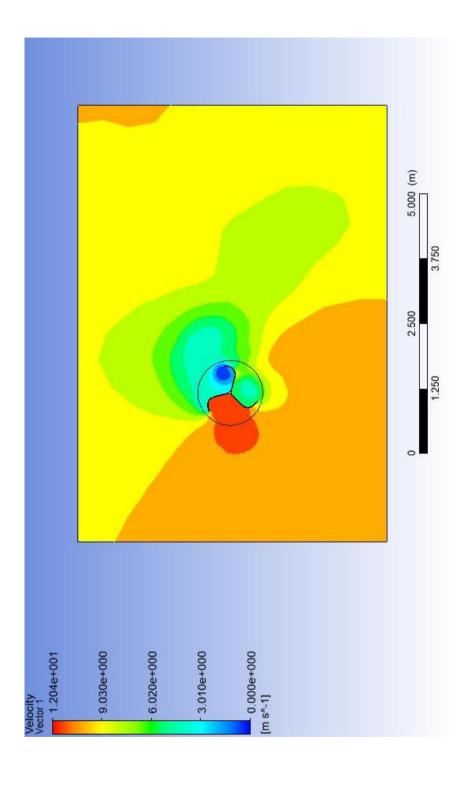












#### **BIODATA PENULIS**



Penulis dilahirkan di Surabaya pada tanggal 23 Januari 1994, dan merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal mulai dari TK Negri Pembina, SDN Tandes Kidul II Surabaya, SMP N 28 Surabaya, dan SMA N 13 Surabaya, penulis juga menempuh Pendidikan D3 di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya dengan program studi Marine Engineering. Pada tahun 2016 penulis melanjutkan pendidikan Lintas Jalur Strata 1 di Departmen Teknik Sistem Perkapalan FTK-ITS. Selama berkuliah di PPNS penulis sangat aktif dalam beberapa kegiatan kemahasiswaan di dalam kampus, penulis menempati jabatan sebagai anggota divisi Kominfo dalam Himpunan

Mahasiswa Marine Engineering, dan menjadi ketua divisi Hubungan Luar Negeri Himpunan Mahasiswa Marine Engineering. Penulis juga pernah mengikuti kegiatan pelatihan dalam LKMM Pra-Tingkat Dasar. Pada waktu kuliah di D3 Teknik Permesinan Kapal PPNS, penulis pernah melaksanakan on the job training di perusahaan Kalimantan Prima Persada yang ditempatkan di site PDRO, ADARO Hauling Road, Tanjung, Kalimantan Selatan.