



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**RANCANG BANGUN DAN ANALISA TURBIN ANGIN  
UNTUK BANGUNAN RENDAH ENERGI  
(*ZERO ENERGY BUILDING*)**

**SKRIPSI**

**FERY HERMAWAN**

**0405020316**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
DEPOK  
DESEMBER 2009**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**RANCANG BANGUN DAN ANALISA TURBIN ANGIN  
UNTUK BANGUNAN RENDAH ENERGI  
(ZERO ENERGY BUILDING)**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana teknik**

**FERY HERMAWAN**

**0405020316**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
DEPOK  
DESEMBER 2009**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.**

**Nama : Fery Hermawan**

**NPM : 0405020316**

**Tanda Tangan :**

**Tanggal :**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Fery Hermawan

NPM : 0405020316

Program Studi : Teknik Mesin

Judul Skripsi : Rancang Bangun dan Analisa Turbin Angin untuk  
Bangunan Rendah Energi (*Zero Energy Building*)

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Ahmad Indra Siswantara ( )

Penguji : Dr. Ir. Wardjito, M.Eng. ( )

Penguji : Ir. Imansyah Ibnu Hakim, M.Eng. ( )

Penguji : Dr. Ir. Engkos A. Kosasih, M.T. ( )

Ditetapkan di :

Tanggal :

## Ucapan Terima Kasih

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT. yang telah memberikan nikmat serta karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan skripsi yang berjudul “Rancang Bangun dan Analisa Turbin Angin untuk Bangunan Rendah Energi (*Zero Energy Building*)”.

Penulis menyadari, bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai masa penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Ir. Ahmad Indra Siswantara, selaku dosen pembimbing yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi pengarahan, diskusi dan bimbingan serta persetujuan sehingga skripsi ini dapat selesai dengan baik.
2. Seluruh staf pengajar Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia yang telah memberikan ilmunya, sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi ini dengan ilmu yang telah didapat.
3. Seluruh staf karyawan Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia yang telah membantu pengambilan data, pembuatan turbin angin.
4. Keluarga penulis tercinta yang selalu mendukung, mendoakan, dan menyemangati penulis.
5. Niken Wulandari, yang telah memberikan bimbingan penulisan, mendoakan, dan menyemangati penulis.
6. Teman-teman Tim ZEB RUUI 2009/2010 dan teman-teman Teknik Mesin UI..
7. Teman-teman komunitas Kaskus\_UI, atas doa dan dukungannya.

Depok, Desember 2009

Penulis

## HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

---

Sabagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Fery Hermawan  
NPM : 0405020316  
Program Studi : Teknik Mesin  
Departemen : Teknik Mesin  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul: **RANCANG BANGUN DAN ANALISA TURBIN ANGIN UNTUK BANGUNAN RENDAH ENERGI (ZERO ENERGY BUILDING)**, beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : Desember 2009

Yang menyatakan,

(Fery Hermawan)

## Abstrak

Nama : Fery Hermawan  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul : Rancang Bangun dan Analisa Turbin Angin untuk  
Bangunan Rendah Energi (*Zero Energy Building*)

Semakin berkurangnya energi yang tidak dapat diperbaharui membuat orang berpikir untuk mencari solusi energi alternatif. Di antaranya adalah pemanfaatan energi yang dapat diperbaharui yang terdapat di lingkungan sekitar, atau pemanfaatan bentuk energi yang terbuang menjadi bentuk energi lainnya, sesuai dengan tujuan *Zero Energy Building* (ZEB). Salah satu pemanfaatan energi yang terdapat di lingkungan adalah turbin angin yang memanfaatkan energi angin. Dalam penelitian ini, dilakukan simulasi pengaruh bentuk eksentrisitas dan bentuk terhadap karakteristik savonius itu sendiri, yang berupa *meshing*, tekanan, dan kecepatan udara. Simulasi menggunakan metode CFD berbasis perangkat komputasi. Model yang disimulasikan adalah yang memiliki gap 48 mm, 60 mm, 76 mm, 89 mm, 114 mm, 140 mm, 165 mm, dan 216 mm. Kemudian model yang mendapat nilai *error* terendah dimodifikasi bentuknya dengan menambah luas permukaan menjadi tiga kalinya. Bentuk yang pertama dengan sudut serang sudu linear, dan kedua dengan sudut serang sudu berbeda  $60^\circ$  pada tiap lapisannya. Hasil simulasi menunjukkan bahwa semakin besar luas permukaan akan meningkatkan daya pada turbin itu sendiri. Turbin savonius tanpa penambahan luas yang memiliki *error* rendah terdapat pada gap 114 mm yang memiliki daya tertinggi secara simulasi 0,110360406 Watt pada putaran -20 rpm, torsi - 0,052719939 N.m, dan *error*-nya sebesar 79,084%. Sedangkan dengan penambahan luas permukaan, maka bentuk turbin dengan sudut serang sudu  $60^\circ$  memiliki *error* terendah dengan nilai 57,87% dan daya menurut simulasi 0,666869687 Watt. Sedangkan *error* turbin savonius model sudut serang sudu linear tertinggi adalah 64,373% dengan daya 0,563935102 Watt.

Kata kunci:

ZEB, energi angin, turbin savonius, CFD, eksentrisitas, *meshing*, tekanan, kecepatan angin, daya, *error*.

## Abstract

Name : Fery Hermawan  
Study Program : Mechanical Engineering  
Title : Engineering and Analysis Wind Turbine for Zero Energy Building

The non-renewable energy that on the wane make the people think to look for alternative energy solutions. Among them is the utilization of renewable energy contained in the environment, or the utilization of wasted energy into other energy forms, in accordance with the purpose of Zero Energy Building (ZEB). One of the utilization of energy contained in the environment is the use of wind energy for wind turbines. In this study, carried out simulations of the effects of eccentricity and form to characteristic savonius of itself, like meshing, pressure, and air velocity. Simulations using CFD method based on computing devices. The model is simulated with a gap 48 mm, 60 mm, 76 mm, 89 mm, 114 mm, 140 mm, 165 mm and 216 mm. Later models had the lowest error value is modified form, by adding surface area thrice. The first form an blade angle of attack mean linear, and the second with a different blade angle of attack 60o on each pad. Simulation results show that the greater the surface area will increase the power of the turbine itself. Savonius turbine without the addition of a large low error are the 114 mm gap that has supreme power in a simulation 0.110360406 Watt on rotation -20 rpm, -0.052719939 Nm of torque, and error of 79,084%. Meanwhile, with the addition of surface area, the form of turbine blade angle 60° attack has the lowest error with a value of 57,87% and power by simulation 0.666869687 Watt. While error savonius turbine blade model point of attack is the lowest linear with 64,373%, 0.563935102 Watt power.

Keywords:

ZEB, wind energy, savonius turbine, CFD, eccentricity, meshing, pressure, air velocity, power, error.

## DAFTAR ISI

Halaman Judul .....	ii
Halaman Pernyataan Orisinalitas .....	iii
Halaman Pengesahan .....	iv
Ucapan Terima Kasih .....	v
Halaman Persetujuan Publikasi Karya Ilmiah .....	vi
Abstrak .....	vii
Abstract .....	viii
Daftar Isi .....	ix
Daftar Gambar .....	xii
Daftar Tabel .....	xviii
Daftar Grafik .....	xxi
Daftar Rumus .....	xxii
Daftar Notasi .....	xxiii
Daftar Singkatan .....	xxiv
Daftar Lampiran .....	xxv
<b>Bab I: Pendahuluan .....</b>	<b>1</b>
I.1 Latar Belakang .....	1
I.2 Perumusan Masalah .....	2
I.3 Tujuan Penelitian .....	3
I.4 Batasan Masalah .....	3
I.5 Metodologi Penelitian .....	4
I.6 Sistematika Penulisan .....	4
<b>Bab II: Kajian Literatur .....</b>	<b>6</b>
II.1 Zero Energy Building .....	6
II.2 Energi Angin .....	7
II.2.1 Karakteristik Angin .....	7
II.2.2 Pemanfaatan Energi Angin .....	9
II.3 Turbin Angin .....	11
II.3.1 Turbin Angin Sumbu Horizontal .....	15

II.3.2 Turbin Angin Sumbu Vertikal .....	17
II.4 Turbin Savonius .....	19
II.4.1 Faktor Eksentrisitas pada Turbin Savonius .....	20
II.4.2 Variasi Model Turbin Savonius .....	21
II.4.2.1 Model Memanjang ke Atas .....	21
II.4.2.1 Model Sudu Berlapis .....	22
II.4.3 Perkembangan Penelitian Turbin Savonius .....	23
II.5 Computational Fluid Dynamics .....	24
II.5.1 Meshing .....	25
II.5.2 Pre-Processor .....	26
II.5.3 Solver .....	26
II.5.4 Post-Processor .....	26
II.5.5 Penelitian yang Menggunakan CFD sebagai Analisa .....	27
Bab III: Metodologi Penelitian .....	30
III.1 Metode Penelitian .....	30
III.1.1 Objek, Waktu, dan Tempat Penelitian .....	30
III.1.2 Peralatan dan Alat Ukur .....	31
III.1.3 Alur Kerangka Penelitian .....	31
III.2 Pengambilan Data .....	33
III.2.1 Cara dan Hasil Pengukuran Data Kecepatan Angin .....	33
III.2.2 Pemodelan Turbin Angin Savonius .....	34
III.2.2.1 Pemodelan Berdasarkan Eksentrisitas .....	35
III.2.2.2 Pemodelan Berdasarkan Variasi Model .....	37
III.3 Simulasi .....	38
III.3.1 Simulasi pada Flow Simulation Solidworks .....	38
III.3.2 Verifikasi dan Validasi Model Simulasi .....	40
Bab IV: Analisa Hasil Simulasi .....	41
IV.1 Perhitungan Daya Teoritis .....	41
IV.2 Validasi Rancangan Turbin Savonius .....	42
IV.3 Perbandingan Hasil Daya Teoritis dengan Daya Simulasi dan Analisa pada Model Berdasarkan Eksentrisitas .....	53
IV.3.1 Model dengan Gap 48 mm .....	53

IV.3.2 Model dengan Gap 60 mm .....	59
IV.3.3 Model dengan Gap 76 mm .....	64
IV.3.4 Model dengan Gap 89 mm .....	70
IV.3.5 Model dengan Gap 114 mm .....	75
IV.3.6 Model dengan Gap 140 mm .....	80
IV.3.7 Model dengan Gap 165 mm .....	85
IV.3.8 Model dengan Gap 216 mm .....	90
IV.4 Perbandingan Hasil Daya Teoritis dengan Daya Simulasi dan Analisa pada Model Berdasarkan Bentuk .....	95
IV.4.1 Model dengan Sudut Serang Sudu Linear 3 Lapis .....	96
IV.4.2 Model dengan Sudut Serang Sudu 60° 3 Lapis .....	105
IV.5 Analisa Aplikasi Turbin Savonius pada ZEB .....	115
Bab V: Penutup .....	119
IV.1 Kesimpulan .....	119
IV.2 Saran .....	120
Daftar Referensi .....	121
Lampiran .....	122

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Terjadinya (a) angin darat dan (b) angin laut (anonim) ....	9
Gambar 2.2. Penggunaan kincir angin di eropa pada awalnya membantu di bidang pertanian (Arpingstone: 2006) .....	10
Gambar 2.3. Penggunaan turbin angin di masa kini (Magnus Manske: 2008) .....	11
Gambar 2.4. Komponen utama turbin angin (Natural Resources Canada: 2003) .....	13
Gambar 2.5. Pengklasifikasian turbin angin berdasarkan sumbu putarnya (Ontario Ministry of Energy: 2003) .....	14
Gambar 2.6. Turbin angin sumbu horizontal (Eco Center: 2008) .....	16
Gambar 2.7. Turbin angin sumbu vertikal (-jha-: 2007) .....	18
Gambar 2.8. Turbin savonius (anonim: 2008) .....	19
Gambar 2.9. Nilai eksentrisitas turbin savonius (Ugo14: 2008) .....	21
Gambar 2.10. Penambahan ketinggian turbin savonius konvensional (anonim: 2009) .....	21
Gambar 2.11. Perbedaan sudut serang di tiap lapisan sudu (anonim) ...	22
Gambar 2.12. Penggambaran sederhana bagaimana <i>mesh</i> bekerja berdasarkan bentuk domain (Anurag: 2005) .....	25
Gambar 2.13. Turbin angin (H.Grassmann: 2009) .....	27
Gambar 2.14. (a) Turbin angin dengan menggunakan selubung. (b) Komponen kecepatan angin aksial. Arah vektor menunjukkan arah angin ambien (H.Grassmann: 2009) .....	28
Gambar 2.15. (a) Total tekanan rata-rata pada aliran tabung rotor turbin dengan dan tanpa selubung. (b) Daya keluaran turbin dengan dan tanpa selubung (H.Grassmann: 2009) .....	28
Gambar 3.16. Flowchart umum kerangka penelitian .....	32
Gambar 3.17. Pola dasar turbin savonius yang memiliki eksentrisitas ...	34
Gambar 3.18. Ukuran standard AW dalam pipa (anonim: 2004) .....	35

Gambar 3.19. Skema kerja turbin savonius yang memanfaatkan gaya dorong angin melalui eksentrisitas (Ugo14: 2008) .....	
36	
Gambar 3.20. Variasi bentuk yang akan disimulasikan .....	37
Gambar 3.21. Flowchart simulasi .....	39
Gambar 4.22. Karakteristik turbin mengenai $C_p$ vs $TSR$ .....	42
Gambar 4.23. Model savonius gap 48 mm .....	53
Gambar 4.24. Plot tampak depan <i>meshing</i> model savonius gap 48 mm ..	55
Gambar 4.25. Plot tampak atas <i>meshing</i> model savonius gap 48 mm ....	56
Gambar 4.26. Plot tampak depan tekanan model savonius gap 48 mm ..	56
Gambar 4.27. Plot tampak samping tekanan model savonius gap 48 mm	57
Gambar 4.28. Plot tampak atas tekanan model savonius gap 48 mm .....	57
Gambar 4.29. Plot tampak depan kecepatan angin model savonius gap 48 mm .....	58
Gambar 4.30. Plot tampak samping kecepatan angin model savonius gap 48 mm .....	58
Gambar 4.31. Plot tampak atas kecepatan angin model savonius gap 48 mm .....	59
Gambar 4.32. Model savonius gap 60 mm .....	59
Gambar 4.33. Plot tampak depan <i>meshing</i> model savonius gap 60 mm	61
Gambar 4.34. Plot tampak atas <i>meshing</i> model savonius gap 60 mm ...	61
Gambar 4.35. Plot tampak depan tekanan model savonius gap 60 mm .	62
Gambar 4.36. Plot tampak samping tekanan model savonius gap 60 mm	62
Gambar 4.37. Plot tampak atas tekanan model savonius gap 60 mm ...	63
Gambar 4.38. Plot tampak depan kecepatan angin model savonius gap 60 mm .....	63
Gambar 4.39. Plot tampak samping kecepatan angin model savonius gap 60 mm .....	64
Gambar 4.40. Plot tampak atas kecepatan angin model savonius gap 60 mm .....	64
Gambar 4.41. Model savonius gap 76 mm .....	65
Gambar 4.42. Plot tampak depan <i>meshing</i> model savonius gap 76 mm	67

Gambar 4.43. Plot tampak atas <i>meshing</i> model savonius gap 76 mm ...	67
Gambar 4.44. Plot tampak depan tekanan model savonius gap 76 mm	68
Gambar 4.45. Plot tampak samping tekanan model savonius gap 76 mm	68
Gambar 4.46. Plot tampak atas tekanan model savonius gap 76 mm ...	68
Gambar 4.47. Plot tampak depan kecepatan angin model savonius gap 76 mm .....	69
Gambar 4.48. Plot tampak samping kecepatan angin model savonius gap 76 mm .....	69
Gambar 4.49. Plot tampak atas kecepatan angin model savonius gap 76 mm .....	69
Gambar 4.50. Model savonius gap 89 mm .....	70
Gambar 4.51. Plot tampak depan <i>meshing</i> model savonius gap 89 mm	72
Gambar 4.52. Plot tampak atas <i>meshing</i> model savonius gap 89 mm ...	72
Gambar 4.53. Plot tampak depan tekanan model savonius gap 89 mm	73
Gambar 4.54. Plot tampak samping tekanan model savonius gap 89 mm	73
Gambar 4.55. Plot tampak atas tekanan model savonius gap 89 mm ....	73
Gambar 4.56. Plot tampak depan kecepatan angin model savonius gap 89 mm .....	74
Gambar 4.57. Plot tampak samping kecepatan angin model savonius gap 89 mm .....	74
Gambar 4.58. Plot tampak atas kecepatan angin model savonius gap 89 mm .....	74
Gambar 4.59. Model savonius gap 114 mm .....	75
Gambar 4.60. Plot tampak depan <i>meshing</i> model savonius gap 114 mm	77
Gambar 4.61. Plot tampak atas <i>meshing</i> model savonius gap 114 mm ...	77
Gambar 4.62. Plot tampak depan tekanan model savonius gap 114 mm	78
Gambar 4.63. Plot tampak samping tekanan model savonius gap 114 mm	78
Gambar 4.64. Plot tampak atas tekanan model savonius gap 114 mm ...	78
Gambar 4.65. Plot tampak depan kecepatan angin model savonius gap 114 mm .....	79
Gambar 4.66. Plot tampak samping kecepatan angin model savonius gap 114 mm .....	79

Gambar 4.67. Plot tampak atas kecepatan angin model savonius gap 114 mm .....	79
Gambar 4.68. Model savonius gap 140 mm .....	80
Gambar 4.69. Plot tampak depan <i>meshing</i> model savonius gap 140 mm	82
Gambar 4.70. Plot tampak atas <i>meshing</i> model savonius gap 140 mm ..	82
Gambar 4.71. Plot tampak depan tekanan model savonius gap 140 mm	83
Gambar 4.72. Plot tampak samping tekanan model savonius gap 140 mm	83
Gambar 4.73. Plot tampak atas tekanan model savonius gap 140 mm ..	83
Gambar 4.74. Plot tampak depan kecepatan angin model savonius gap 140 mm .....	84
Gambar 4.75. Plot tampak samping kecepatan angin model savonius gap 140 mm .....	84
Gambar 4.76. Plot tampak atas kecepatan angin model savonius gap 140 mm .....	84
Gambar 4.77. Model savonius gap 165 mm .....	85
Gambar 4.78. Plot tampak depan <i>meshing</i> model savonius gap 165 mm	87
Gambar 4.79. Plot tampak atas <i>meshing</i> model savonius gap 165 mm ..	87
Gambar 4.80. Plot tampak depan tekanan model savonius gap 165 mm	88
Gambar 4.81. Plot tampak samping tekanan model savonius gap 165 mm	88
Gambar 4.82. Plot tampak atas tekanan model savonius gap 165 mm ...	88
Gambar 4.83. Plot tampak depan kecepatan angin model savonius gap 165 mm .....	89
Gambar 4.84. Plot tampak samping kecepatan angin model savonius gap 165 mm .....	89
Gambar 4.85. Plot tampak atas kecepatan angin model savonius gap 165 mm .....	89
Gambar 4.86. Model savonius gap 216 mm .....	90
Gambar 4.87. Plot tampak depan <i>meshing</i> model savonius gap 216 mm	92
Gambar 4.88. Plot tampak atas <i>meshing</i> model savonius gap 216 mm ..	92
Gambar 4.89. Plot tampak depan tekanan model savonius gap 216 mm	93
Gambar 4.90. Plot tampak samping tekanan model savonius gap 216 mm	93
Gambar 4.91. Plot tampak atas tekanan model savonius gap 216 mm ..	93

Gambar 4.92. Plot tampak depan kecepatan angin model savonius gap 216 mm .....	94
Gambar 4.93. Plot tampak samping kecepatan angin model savonius gap 216 mm .....	94
Gambar 4.94. Plot tampak atas kecepatan angin model savonius gap 216 mm .....	94
Gambar 4.95. Model savonius sudut sudu linear .....	96
Gambar 4.96. Plot tampak atas <i>meshing</i> model savonius sudut sudu linear	98
Gambar 4.97. Plot tampak depan <i>meshing</i> model savonius sudut sudu linear .....	99
Gambar 4.98. Plot tampak depan tekanan model savonius sudut sudu linear .....	100
Gambar 4.99. Plot tampak samping tekanan model savonius sudut sudu linear .....	100
Gambar 4.100. Plot tampak atas tekanan lapisan bawah model savonius sudut sudu linear .....	101
Gambar 4.101. Plot tampak atas tekanan lapisan tengah model savonius sudut sudu linear .....	101
Gambar 4.102. Plot tampak atas tekanan lapisan atas model savonius sudut sudu linear .....	102
Gambar 4.103. Plot tampak depan kecepatan angin model savonius sudut sudu linear .....	103
Gambar 4.104. Plot tampak samping kecepatan angin model savonius sudut sudu linear .....	103
Gambar 4.105. Plot tampak atas kecepatan angin lapisan bawah model savonius sudut sudu linear .....	104
Gambar 4.106. Plot tampak atas kecepatan angin lapisan tengah model savonius sudut sudu linear .....	104

Gambar 4.107. Plot tampak atas kecepatan angin lapisan atas model savonius sudut sudu linear .....	
	105
Gambar 4.108. Model savonius sudut sudu 60° .....	106
Gambar 4.109. Plot tampak depan <i>meshing</i> model savonius sudut sudu 60°	108
Gambar 4.110. Plot tampak atas <i>meshing</i> model savonius sudut sudu 60°	109
Gambar 4.111. Plot tampak depan tekanan model savonius sudut sudu 60°	110
Gambar 4.112. Plot tampak samping tekanan model savonius sudut sudu 60° .....	110
Gambar 4.113. Plot tampak atas tekanan lapisan bawah model savonius sudut sudu 60° .....	
	111
Gambar 4.114. Plot tampak atas tekanan lapisan tengah model savonius sudut sudu 60° .....	
	111
Gambar 4.115. Plot tampak atas tekanan lapisan atas model savonius sudut sudu 60° .....	112
Gambar 4.116. Plot tampak depan kecepatan angin model savonius sudut sudu 60° .....	113
Gambar 4.117. Plot tampak samping kecepatan angin model savonius sudut sudu 60° .....	113
Gambar 4.118. Plot tampak atas kecepatan angin lapisan bawah model savonius sudut sudu 60° .....	114
Gambar 4.119. Plot tampak atas kecepatan angin lapisan tengah model savonius sudut sudu 60° .....	114
Gambar 4.120. Plot tampak atas kecepatan angin lapisan atas model savonius sudut sudu 60° .....	
	115
Gambar 4.121. (a) Proses manufaktur turbin savonius di Lab Mekanika Fluida. (b) Pengujian dengan menempatkan turbin savonius di rumah X .....	116
Gambar 4.122. Prinsip kerja <i>rope pump</i> (Greg Bartle: 2007) .....	117

Gambar 4.123. *Rope pump* yang akan disatukan dengan turbin angin hasil  
rancangan ..... 118

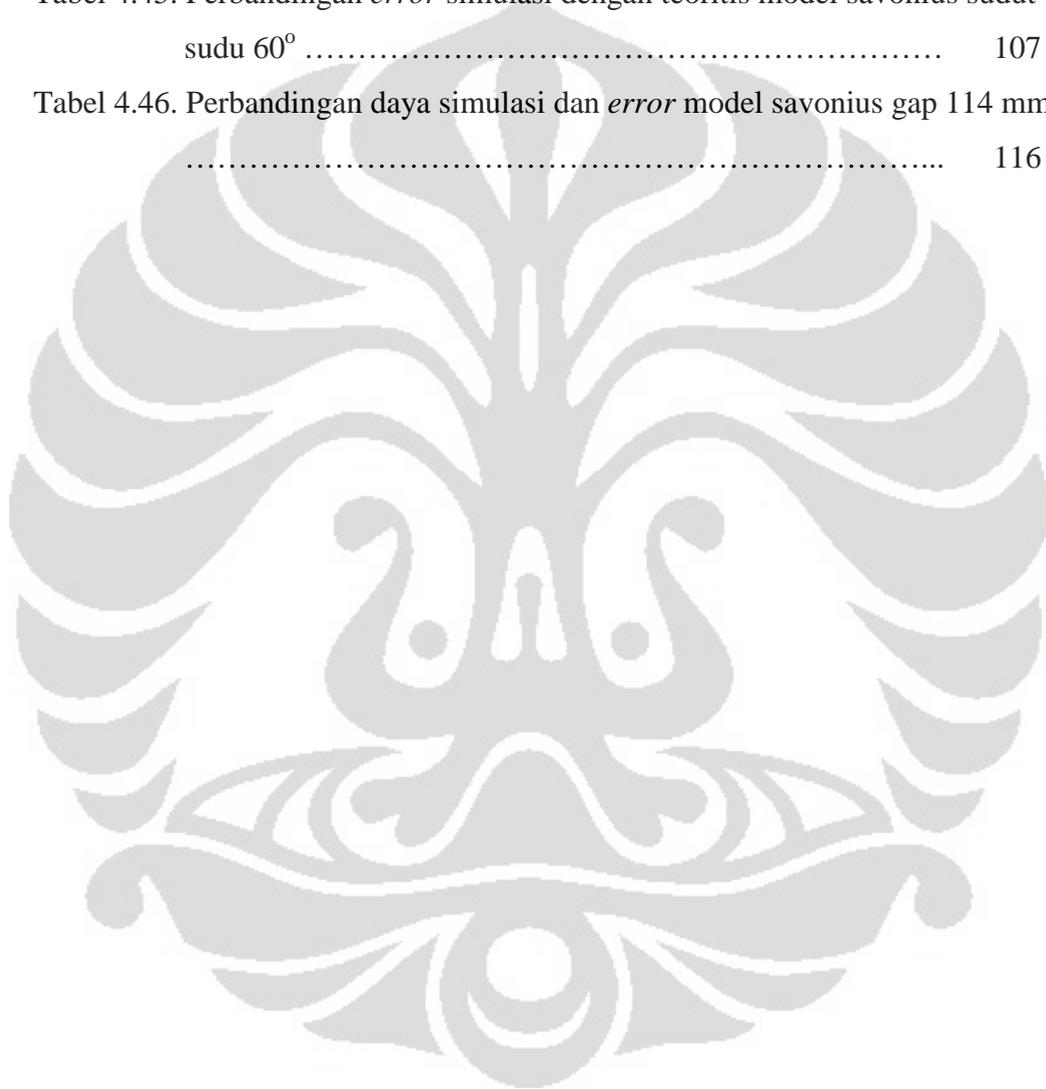


## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Data kecepatan angin di rumah X .....	33
Tabel 3.2. Perbandingan luas permukaan yang dicapai pada masing-masing kemungkinan bentuk .....	36
Tabel 3.3. Nilai eksentrisitas pada masing-masing gap .....	36
Tabel 4.4. Perbandingan perolahan daya teoritis pada turbin yang memiliki gap tertentu .....	41
Tabel 4.5. Nilai tip speed ratio gap 48 mm .....	42
Tabel 4.6. Nilai $C_P$ gap 48 mm .....	42
Tabel 4.7. Nilai tip speed ratio gap 60 mm .....	43
Tabel 4.8. Nilai $C_P$ gap 60 mm .....	43
Tabel 4.9. Nilai tip speed ratio gap 76 mm .....	44
Tabel 4.10. Nilai $C_P$ gap 76 mm .....	44
Tabel 4.11. Nilai tip speed ratio gap 89 mm .....	45
Tabel 4.12. Nilai $C_P$ gap 89 mm .....	45
Tabel 4.13. Nilai tip speed ratio gap 114 mm .....	46
Tabel 4.14. Nilai $C_P$ gap 114 mm .....	46
Tabel 4.15. Nilai tip speed ratio gap 140 mm .....	47
Tabel 4.16. Nilai $C_P$ gap 140 mm .....	47
Tabel 4.17. Nilai tip speed ratio gap 165 mm .....	48
Tabel 4.18. Nilai $C_P$ gap 165 mm .....	48
Tabel 4.19. Nilai tip speed ratio gap 216 mm .....	49
Tabel 4.20. Nilai $C_P$ gap 216 mm .....	49
Tabel 4.21. Nilai tip speed ratio gap 114 mm sudut serang sudu linear ..	50
Tabel 4.22. Nilai $C_P$ gap 114 mm sudut serang sudu linear .....	51
Tabel 4.23. Nilai tip speed ratio gap 114 mm sudut serang sudu $60^\circ$ ....	51
Tabel 4.24. Nilai $C_P$ gap 114 mm sudut serang sudu $60^\circ$ .....	52
Tabel 4.25. Perolehan daya pada masing-masing putaran model savonius gap 48 mm .....	54

Tabel 4.26. Perbandingan <i>error</i> simulasi dengan teoritis model savonius gap 48 mm .....	54
Tabel 4.27. Perolehan daya pada masing-masing putaran model savonius gap 60 mm .....	60
Tabel 4.28. Perbandingan <i>error</i> simulasi dengan teoritis model savonius gap 60 mm .....	60
Tabel 4.29. Perolehan daya pada masing-masing putaran model savonius gap 76 mm .....	65
Tabel 4.30. Perbandingan <i>error</i> simulasi dengan teoritis model savonius gap 76 mm .....	66
Tabel 4.31. Perolehan daya pada masing-masing putaran model savonius gap 89 mm .....	70
Tabel 4.32. Perbandingan <i>error</i> simulasi dengan teoritis model savonius gap 89 mm .....	71
Tabel 4.33. Perolehan daya pada masing-masing putaran model savonius gap 114 mm .....	75
Tabel 4.34. Perbandingan <i>error</i> simulasi dengan teoritis model savonius gap 114 mm .....	76
Tabel 4.35. Perolehan daya pada masing-masing putaran model savonius gap 140 mm .....	80
Tabel 4.36. Perbandingan <i>error</i> simulasi dengan teoritis model savonius gap 140 mm .....	81
Tabel 4.37. Perolehan daya pada masing-masing putaran model savonius gap 165 mm .....	85
Tabel 4.38. Perbandingan <i>error</i> simulasi dengan teoritis model savonius gap 165 mm .....	86
Tabel 4.39. Perolehan daya pada masing-masing putaran model savonius gap 216 mm .....	90
Tabel 4.40. Perbandingan <i>error</i> simulasi dengan teoritis model savonius gap 216 mm .....	91
Tabel 4.41. Perbandingan perolehan daya teoritis pada turbin sudu linear dan 60° .....	95

Tabel 4.42. Perolehan daya pada masing-masing putaran model savonius sudut sudu linear .....	97
Tabel 4.43. Perbandingan <i>error</i> simulasi dengan teoritis model savonius sudut sudu linear .....	97
Tabel 4.44. Perolehan daya pada masing-masing putaran model savonius sudut sudu 60° .....	106
Tabel 4.45. Perbandingan <i>error</i> simulasi dengan teoritis model savonius sudut sudu 60° .....	107
Tabel 4.46. Perbandingan daya simulasi dan <i>error</i> model savonius gap 114 mm .....	116



## DAFTAR GRAFIK

Grafik 2.1. Perbandingan $C_p$ turbin terhadap TSR-nya (Matt Ball: 2009)	15
Grafik 4.2 Grafik kurva turbin savonius gap 48 mm .....	43
Grafik 4.3. Grafik kurva turbin savonius gap 60 mm .....	44
Grafik 4.4. Grafik kurva turbin savonius gap 76 mm .....	45
Grafik 4.5. Grafik kurva turbin savonius gap 89 mm .....	46
Grafik 4.6. Grafik kurva turbin savonius gap 114 mm .....	47
Grafik 4.7. Grafik kurva turbin savonius gap 140 mm .....	48
Grafik 4.8. Grafik kurva turbin savonius gap 165 mm .....	49
Grafik 4.9. Grafik kurva turbin savonius gap 216 mm .....	50
Grafik 4.10. Grafik kurva turbin savonius gap 114 mm sudut serang sudu linear .....	51
Grafik 4.11. Grafik kurva turbin savonius gap 114 mm sudut serang sudu 60° .....	52
Grafik 4.12. Grafik torsi dan daya vs putaran model savonius gap 48 mm	54
Grafik 4.13. Grafik torsi dan daya vs putaran model savonius gap 60 mm	60
Grafik 4.14. Grafik torsi dan daya vs putaran model savonius gap 76 mm	66
Grafik 4.15. Grafik torsi dan daya vs putaran model savonius gap 89 mm	71
Grafik 4.16. Grafik torsi dan daya vs putaran model savonius gap 114 mm	76
Grafik 4.17. Grafik torsi dan daya vs putaran model savonius gap 140 mm	81
Grafik 4.18. Grafik torsi dan daya vs putaran model savonius gap 165 mm	86
Grafik 4.19. Grafik torsi dan daya vs putaran model savonius gap 216 mm	91
Grafik 4.20. Grafik torsi dan daya vs putaran model savonius sudut sudu linear .....	97
Grafik 4.21. Grafik torsi dan daya vs putaran model savonius sudut sudu 60° .....	107

## DAFTAR RUMUS

Rumus 2.1. Daya turbin angin secara teoritis ..... 13

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

Rumus 2.2. Daya turbin angin secara simulasi ..... 14

$$P_s = T \frac{2\pi N}{60}$$

Rumus 2.3. Perbandingan kecepatan aktual turbin angin ..... 15

$$\lambda = \frac{TSB}{v}$$

Rumus 2.4. Faktor Eksentrisitas ..... 20

$$e = \frac{g}{D}$$

Rumus 3.1 Nilai *error* (verifikasi) turbin angin ..... 40

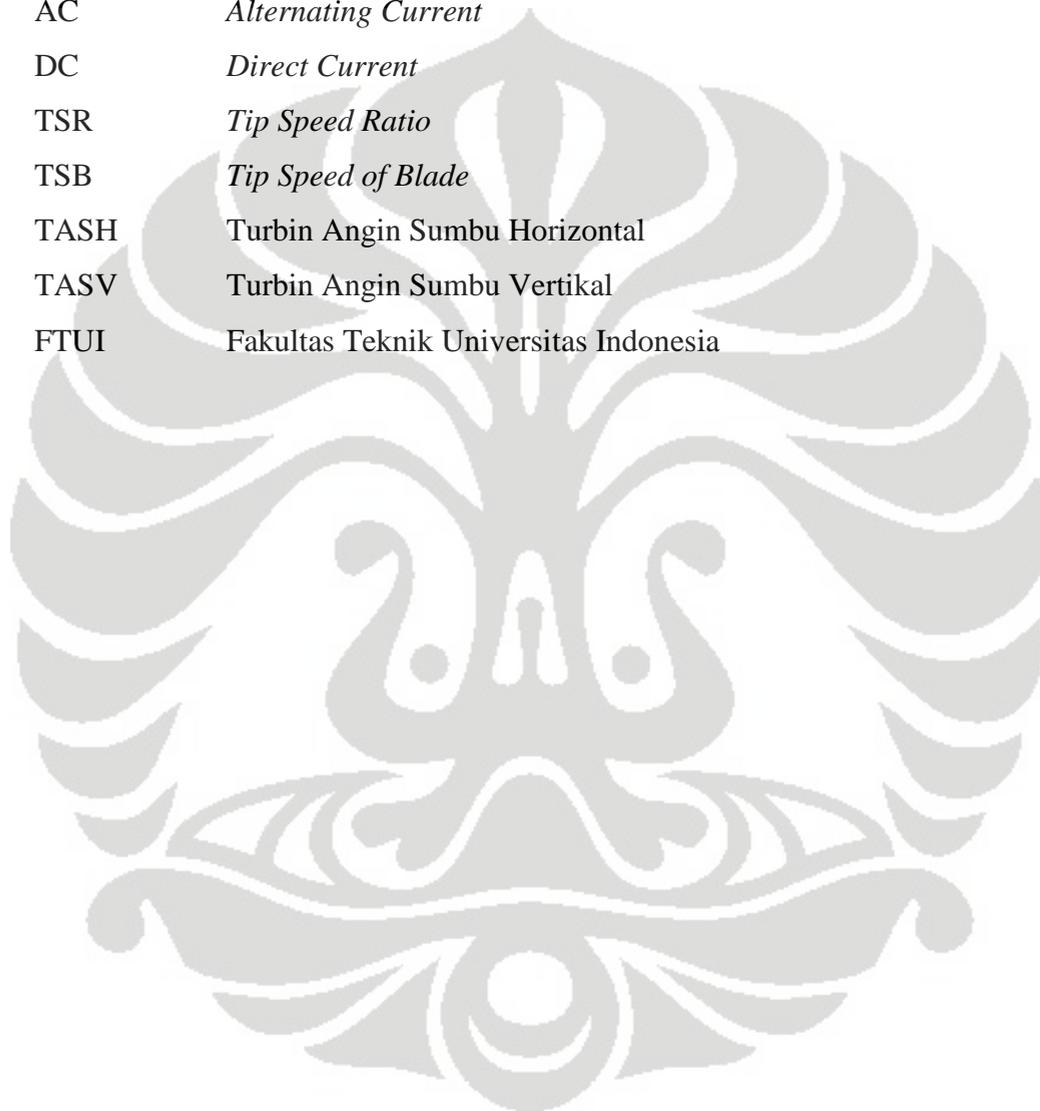
$$\text{Error (\%)} = \left[ \frac{C_{\text{pengukuran}} - C_{\text{model}}}{C_{\text{pengukuran}}} \right] \times 100\%$$

## DAFTAR NOTASI

$P_t$	daya yang dihasilkan turbin angin secara teoritis (Watt)
$C_P$	koefisien daya turbin angin
	massa jenis udara pada waktu tertentu ( $\text{kg/m}^3$ )
$A$	luas permukaan turbin yang dikenai tumbukan angin ( $\text{m}^2$ )
$v$	kecepatan udara pada waktu tertentu (m/s)
$P_s$	daya yang dihasilkan turbin angin dengan simulasi (Watt)
$T$	torsi yang dihasilkan turbin (N.m)
$N$	jumlah putaran (rpm)
	TSR atau <i>Tip Speed Ratio</i>
$TSB$	kecepatan putar sudu turbin
$e$	faktor eksentrisitas
$g$	<i>overlap gap</i>
$D$	diameter turbin
$Re$	bilangan Reynold
	sudut serang sudu
$C_D$	koefisien drag turbin angin
$t$	tinggi turbin
$K$	keliling lingkaran
$r_t$	jari-jari tabung
$D_t$	diameter tabung
$D_s$	diameter savonius
	nilai efisiensi

## DAFTAR SINGKATAN

ZEB	<i>Zero Energy Building</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>
AC	<i>Alternating Current</i>
DC	<i>Direct Current</i>
TSR	<i>Tip Speed Ratio</i>
TSB	<i>Tip Speed of Blade</i>
TASH	Turbin Angin Sumbu Horizontal
TASV	Turbin Angin Sumbu Vertikal
FTUI	Fakultas Teknik Universitas Indonesia



## DAFTAR LAMPIRAN

Pemodelan dan Simulasi Turbin Savonius untuk Mendapatkan Nilai Torsi Turbin  
sebagai Goal



# BAB I

## PENDAHULUAN

### I.1 Latar Belakang

Berkurangnya cadangan sumber energi minyak bumi khususnya dan energi fosil pada umumnya merupakan persoalan penting saat ini terutama keterkaitannya sebagai sumber bahan bakar pembangkit tenaga listrik dan dampak yang ditimbulkannya pada kerusakan lingkungan dan perubahan iklim. Berbagai pengembangan teknologi energi alternatif substitusi yang bersifat terbarukan, telah dilakukan untuk mengatasi masalah tersebut. Mulai dari pemanfaatan energi potensial alam hingga energi potensial kimia melalui rekayasa reaksi kimia. Selain solusi pengembangan teknologi alternatif, penting pula dipahami bagaimana energi digunakan secara efisien dan optimal agar kelangsungan suplai energi dapat terjaga.

Dalam konsep energi pada bangunan, utilisasi energi sebagian besar diperuntukkan untuk menyediakan kebutuhan pencahayaan dan kenyamanan termal guna mendukung aktivitas penghuninya. Efisiensi dan optimasi sistem dapat dilakukan pada kedua hal tersebut melalui pemanfaatan sinar matahari untuk membantu pencahayaan namun tidak boleh membebani kenyamanan termal. Hal ini dapat ditempuh melalui optimasi sirkulasi udara ruangan dan pemilihan material reduksi radiasi panas matahari.

Sebuah bangunan *zero energy*, semua energi terbarukan diberdayakan dan yang tidak terbarukan diminimalkan pemakaiannya. Untuk energi terbarukan dikembangkan dari potensial energi lingkungan sekitar sedangkan pengurangan beban energi tak terbarukan dilakukan dengan cara usaha penghematan dan optimasi energi. Energi potensi angin lokal di sekitar lokasi dan teknologi elektrokimia akan diaplikasikan pada bangunan *zero energy* yang memanfaatkan tumbuhan atap dan kolam air resapan.

Penggunaan energi pada bangunan-bangunan saat ini juga berdampak pada minimnya jumlah energi yang tersedia dan mendorong timbulnya berbagai efek negatif terhadap lingkungan. Selain itu, kebutuhan akan energi semakin meningkat dan penggunaan energi semakin berlebih. Oleh karena itu, penerapan konsep *green building* di Negara-negara maju sudah mulai dikembangkan untuk konservasi. Salah satu cara untuk mengoptimalkannya adalah dengan menerapkan konsep *Zero Energy Building* (ZEB), baik dengan penggunaan ventilasi natural, penghitungan *building energy* yang efisien, maupun dengan pemanfaatan potensi energi yang bersifat dapat diperbaharui.

Dalam konsep ZEB mengenai energi, semua energi yang dapat diperbaharui diperdagangkan untuk mengurangi energi yang tidak dapat diperbaharui. Artinya, dalam pengelolaan energi pada bangunan seminimal mungkin mengurangi energi-energi yang tidak dapat diperbaharui atau merubah kembali energi yang dihasilkan untuk dapat dimanfaatkan kembali.

Turbin angin merupakan salah satu konsep pembangkit energi yang dapat diperbaharui. Turbin angin adalah salah satu teknologi yang memanfaatkan potensi energi lokal berupa energi angin. Udara yang bergerak ini dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan energi tertentu. Energi angin yang ditangkap oleh turbin angin diubah menjadi bentuk energi lainnya, ada yang berupa energi listrik untuk memenuhi energi pada bangunan, atau berupa energi mekanik untuk menggerakkan alat mekanik lainnya.

Dalam pembuatan turbin angin ini, diharapkan penggunaannya mampu mengubah energi pergerakan angin menjadi bentuk energi lainnya dan sesuai dengan konsep ZEB. Sehingga pemenuhan kebutuhan energi yang berasal dari energi tidak dapat diperbaharui dapat dikurangi pada bangunan yang menerapkan konsep ini.

## **I.2 Perumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang di atas, maka penelitian ini dirumuskan dengan melakukan rancang bangun turbin angin berdasarkan data kecepatan angin di tempat yang menjadi objek penelitian, yaitu di rumah X (Kukusan, Depok). Penelitian dilakukan dengan memodelkan beberapa bentuk turbin angin,

kemudian disimulasikan dengan mengkondisikan sesuai keadaan objek penelitian. Simulasi menggunakan perangkat komputasi berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk mendapatkan model yang mendekati referensi turbin angin berdasarkan validasi dan verifikasi data serta mempelajari tekanan dan aliran udara di sekitar turbin angin.

### I.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mendapatkan nilai daya turbin savonius berdasarkan pengambilan data dan perhitungan teoritis pada masing-masing model.
2. Mendapatkan nilai validasi yang mendekati nilai referensi turbin savonius.
3. Mendapatkan nilai torsi dan daya turbin savonius berdasarkan simulasi pada masing-masing model.
4. Mendapatkan nilai verifikasi berupa *error* turbin savonius dengan membandingkan daya yang dicapai oleh masing-masing model turbin angin yang disimulasikan perangkat lunak Flow Simulation 2009 dengan perhitungan daya secara teoritis.
5. Mengetahui karakteristik *meshing*, tekanan dan aliran udara di sekitar turbin savonius yang dimodelkan dan disimulasikan dengan perangkat lunak Flow Simulation 2009.
6. Mendapatkan bentuk rancangan sudu turbin savonius yang mendekati referensi berdasarkan validasi dan verifikasi data, sehingga dapat diterapkan pada bangunan ZEB.

### I.4 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini, dibatasi pada:

1. Melakukan pemodelan dan simulasi turbin angin sumbu vertikal tipe savonius dengan menggunakan perangkat lunak Solidworks 2009 dan Flow Simulation Solidworks 2009, yang memberikan hasil validasi dan verifikasi mendekati referensi, hasilnya dibuat dalam bentuk *prototype* turbin savonius.

2. Kecepatan angin di sekitar rumah X (Kukusan, Depok) pada tanggal 28 Mei 2009 diambil rata-ratanya. Kondisi cuaca dan udara di sekitar rumah X dianggap ideal.
3. Desain turbin savonius hanya memodifikasi pada bagian eksentrisitas (0.067, 0.085, 0.110, 0.132, 0.175, 0.224, 0.275, dan 0.394) dan savonius 3 tingkat dengan variasi sudut serang pada lapisan sudunya ( $0^\circ$  dan  $60^\circ$ ).

## I.5 Metodologi Penelitian

Dalam penelitian ini, metode untuk mengumpulkan sumber data dan informasi adalah sebagai berikut:

1. Studi literatur.

Metode yang digunakan dalam pencarian studi literatur ini dengan tinjauan kepustakaan berupa buku-buku yang ada di perpustakaan, jurnal-jurnal tertulis maupun *online*, serta referensi artikel yang terdapat di internet.

2. Pengambilan data.

Data yang diambil dalam penelitian ini adalah data kecepatan angin yang ada di sekitar rumah X (Kukusan, Depok)

3. Simulasi numerik.

Data kecepatan angin tersebut diambil rata-ratanya kemudian menjadi *input*-an pada simulasi Flow Simulation Solidworks 2009. Kemudian diperoleh data berupa torsi dan daya yang dihasilkan turbin model melalui simulasi.

## I.6 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan skripsi ini adalah sebagai berikut:

Bab I:           Pendahuluan

Menjelaskan mengenai latar belakang permasalahan, perumusan masalah, tujuan penelitian, pembatasan masalah, metodologi penelitian dan sistematika penulisan.

Bab II:          Kajian Literatur

Menjelaskan tentang konsep ZEB (*Zero Energy Building*), energi angin dalam hal karakteristik dan pemanfaatannya, keunggulan dan kelemahan turbin angin sumbu horizontal dan vertikal, faktor

eksentrisitas dan variasi sudut serang pada lapisan sudu turbin savonius, serta penjelasan komponen CFD sebagai bagian dari penyelesaian penelitian ini.

**Bab III: Metodologi Penelitian**

Menjelaskan tentang tahapan-tahapan yang harus dilakukan selama kegiatan penelitian, peralatan dan alat ukur yang diperlukan selama penelitian, proses pengambilan data, proses pembuatan model dan simulasi yang dilakukan, serta melakukan tahap proses validasi dan verifikasi.

**Bab IV: Analisa Hasil Simulasi**

Mendapatkan nilai validasi turbin savonius. Memuat hasil-hasil dari proses simulasi pada program Simulation Flow 2009, dan analisa membahas dari hasil data simulasi dibandingkan dengan perhitungan menurut teori. Mem-verifikasi data hasil simulasi. Serta hubungan simulasi pemodelan turbin angin dengan bangunan ZEB.

**Bab V: Penutup**

Menjelaskan tentang kesimpulan dari hasil penelitian dan saran untuk kemajuan penelitian berikutnya.

## BAB II

### KAJIAN LITERATUR

#### II.1 Zero Energy Building

*Zero Energy Building* atau ZEB adalah istilah umum yang diaplikasikan pada bangunan yang mengkonsumsi energi bersih nol (*zero*) setiap tahunnya, atau setidaknya mengurangi penggunaan energi yang tidak dapat diperbaharui dengan pemanfaatan potensi energi yang ada di sekitarnya, bahkan jika memungkinkan bisa menghasilkan surplus energi untuk digunakan pada bangunan lain. Bangunan *zero energy* sangat bagus untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan konservasi energi. Di Eropa dan Amerika, bangunan menggunakan 40% total kebutuhan energi (Baden, S., Agustus 2006.).

Bangunan *zero energy* biasanya dibangun dengan fitur penghematan energi signifikan. Beban pemanasan dan pendinginan sering kali turun drastis dengan menggunakan peralatan berefisiensi tinggi, penambahan isolasi, jendela efisiensi tinggi, teknik solar pasif, dan teknik-teknik lainnya. Fitur ini bisa bermacam-macam di antara bangunan-bangunan yang memiliki perbedaan iklim. Beban pemanasan air dapat dikurangi dengan menggunakan unit pengolah panas pada air sisa, dan menggunakan pemanas air berefisiensi tinggi. Sebagai tambahan, penggunaan energi cahaya dapat dikurangi dengan pencahayaan siang hari, *fluorescent*, dan pencahayaan LED, dan beban listrik lainnya dapat dikurangi dengan memilih alat-alat rumah tangga yang efisien dan mengurangi daya *standby*.

Bangunan *zero energy* biasanya didesain untuk membuat peningkatan energi dari sumber daya lainnya termasuk *white goods*, misalnya penggunaan *exhaust* refrigerator untuk memanaskan air, ventilasi udara dan saluran penukar panas, mesin kantor dan komputer server, dan panas tubuh yang dihasilkan ruangan dengan banyak penghuni. Bangunan ini membuat penggunaan energi panas *exhaust* bangunan konvensional secara khas. Bangunan tersebut menggunakan ventilasi pertukaran panas, penggunaan kembali panas air panas,

dan lain-lain. Normalnya optimalisasi penggunaan penangkap panas matahari pasif, menggunakan massa termal untuk menstabilkan variasi temperatur harian sepanjang tahun, dan kebanyakan iklim terisolasi penuh. Semua teknologi dibutuhkan untuk membuat bangunan *zero energy* tersedia saat ini.

ZEB menghasilkan energinya sendiri untuk kebutuhan kelistrikan dan panas. Dalam contoh rumah individu, variasi teknologi pembangkit mikro dapat digunakan untuk menyediakan panas dan listrik untuk bangunan, menggunakan sel surya (*solar cells*) atau turbin angin untuk kelistrikan, dan *biofuel* atau pengumpul panas (*solar collectors*) yang dihubungkan ke panas musiman disimpan untuk pemanasan ruang. Untuk mengatasi fluktuasi kebutuhan, ZEB seringkali terhubung ke jaringan listrik, mengeluarkan listrik ke jaringan saat terjadi surplus, dan mengambil listrik saat tidak cukup memenuhi kebutuhan listrik.

## **II.2 Energi Angin**

Energi angin sebenarnya adalah berasal dari energi surya (matahari). Atmosfer dapat dipandang sebagai “mesin panas” yang menggunakan energi dari matahari. Mesin panas ini mentransformasikan sebagian energi yang disuplai oleh matahari menjadi kerja dan sisanya hilang dalam bentuk radiasi gelombang panjang yang dipancarkan oleh bumi dan atmosfernya ke ruang angkasa. Kerja yang timbul berupa angin dan arus samudera.

Jadi, sumber angin adalah perbedaan temperatur udara yang ditimbulkan oleh matahari sehingga menghasilkan perbedaan tekanan, perbedaan tekanan yang timbul ini yang akan menyebabkan pergerakan udara yang pada akhirnya akan menghasilkan angin.

Energi angin sebenarnya telah dipergunakan secara tradisional beberapa abad yang lalu, tetapi sejak revolusi industri, terdesak oleh teknologi konversi energi batubara dan minyak bumi. Tetapi akhir-akhir ini karena timbulnya kesadaran akan terbatasnya sumber energi batubara dan minyak bumi, mulai dikembangkan kembali teknologi konversi energi angin dengan cukup pesat.

### **II.2.1 Karakteristik Angin**

Adanya perbedaan kecepatan udara disebabkan variasi temperatur menimbulkan gerakan udara dari suatu ketinggian ke ketinggian yang lain, sedang

arahnya dipengaruhi oleh kecepatan berputar bumi pada porosnya. Di daerah ekuator permukaan bumi mempunyai kecepatan 0,45 m/s. Sedang dikutub kecepatannya nol. Pengaruh inilah yang menyebabkan adanya perbedaan tekanan yang menghasilkan gerakan udara dari titik bertekanan tinggi ke titik bertekanan rendah.

Kondisi rata-rata tahunan memperlihatkan bahwa dua daerah cincin mengitari bumi yang terletak diantara lintang  $30^{\circ}\text{U}$  sampai  $40^{\circ}\text{U}$ ,  $0^{\circ}\text{S}$  dan  $30^{\circ}\text{S}$  sampai  $40^{\circ}\text{S}$  mempunyai tekanan tinggi sedang didaerah equator ( $30^{\circ}\text{U} - 30^{\circ}\text{S}$ ) mempunyai tekanan rendah. Ini berarti arah angin biasanya menuju ekuator. Namun kecepatan angin tidak lepas dari faktor-faktor setempat misalnya bukit-bukit, pohon-pohon dan variasi temperatur lokal.

Jika kita ingin memanfaatkan energi angin harus diperhatikan:

- Di daerah mana kincir angin ditempatkan supaya menguntungkan dalam arti ekonomis.
- Beberapa taksiran jumlah energi angin selama setahun.
- Bagaimana distribusi angin harian bulanan, tahunan, maupun periode jangka panjang.

Dua faktor penting yang termasuk dalam sangkutan ekonomi adalah:

- Laju rata-rata tahunan angin, dan
- Perbandingan harga dengan pembangkit listrik yang lain.

Untuk mengetahui laju rata-rata angin perlu melakukan survey di beberapa tempat. Laju angin ini disuatu tempat tergantung pada:

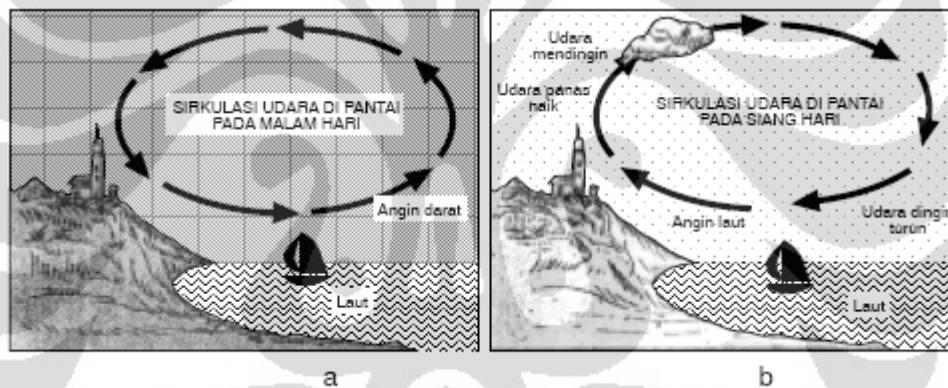
- Letak geografisnya (global).
- Faktor khusus tentang lokasi yaitu ketinggian dan jaraknya dari laut.
- *Exposure*-nya sebaiknya tidak dikelilingi oleh bangunan-bangunan, bukit terjal maupun pohon-pohon.
- Bentuk tanah disekitar lokasi biasanya ditempatkan dipuncak bukit karena disini angin dapat mempunyai gerakan yang lebih cepat. Tetapi dalam hal ini faktor transportasi perlu mendapat perhatian.

Di siang hari terutama jika iklim panas, berkurangnya temperatur karena bertambahnya ketinggian menyebabkan konveksi panas. Dan akibatnya terjadi saling isi mengisi di antara lapisan yang berlainan. Beberapa momentum dari

lapisan atas yang bergerak dengan kecepatan tinggi ditransmisikan ke lapisan permukaan yang menyebabkan angin bertambah. Jadi ada kecenderungan bahwa kecepatan angin di siang hari lebih besar dari malam hari.

Keadaan pemanasan di bumi, tidak sama dimana-mana Perbedaan yang amat besar terlihat pada tanah dan air. Adalah sifat fisik bahwa air tidak cepat menjadi panas dibandingkan dengan tanah yang keras oleh karena air lebih memantulkan sinar-sinar yang jatuh dari pada tanah keras selain itu sinar matahari pengaruhnya hanya sampai satu meter ke dalam tanah sedangkan pada air jatuh lebih dalam. Maka lapisan-lapisan atas air akan lebih dingin daripada lapisan-lapisan atas tanah.

Jika siang hari dimana matahari menyinari bumi, maka tanah (daratan) akan lebih cepat menjadi panas daripada laut maka akan terjadi aliran angin yang disebut angin laut seperti pada gambar berikut:



**Gambar 2.1.** Terjadinya (a) angin darat dan (b) angin laut.

(Sumber: [http://www.e-dukasi.net/mol/mo\\_full.php?moid=138&fname=geo109\\_12.htm](http://www.e-dukasi.net/mol/mo_full.php?moid=138&fname=geo109_12.htm), anonim)

Sebaliknya jika malam hari terjadi angin darat, meskipun pada malam hari selisih temperatur antara daratan dan laut tidak begitu besar karena itu angin darat selalu lebih lemah dari angin laut.

## II.2.2 Pemanfaatan Energi Angin

Angin sebagai sumber energi dalam penggunaannya mempunyai keuntungan antara lain:

- Energi angin merupakan sumber energi yang tidak akan habis dan dapat diperoleh secara bebas pada setiap tempat.

- Biaya konversi relatif lebih murah karena tidak dibutuhkan proses pengolahan, seperti sumber energi minyak bumi dan batubara.
- Tidak menimbulkan pencemaran lingkungan.
- Untuk daerah yang tidak terjangkau oleh jaringan listrik sedangkan angin bertiup cukup kuat maka energi angin dapat dimanfaatkan sebagai energi listrik.

Energi angin adalah merupakan sumber tenaga alamiah gratis yang tersedia dimana-mana dan bebas dari pencemaran lingkungan, untuk dapat memanfaatkan tenaga angin menjadi tenaga yang berguna dipergunakan kincir angin.



**Gambar 2.2.** Penggunaan kincir angin di eropa pada awalnya membantu di bidang pertanian.

(Sumber: [http://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_turbine](http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine), Arpingstone: 2006)

Kincir angin telah ada sejak tahun 1096 di Eropa, pada awalnya kincir angin didesain untuk menggantikan kerja hewan dalam penggilingan butiran padi, gandum dan jagung. Kemudian metode konversi energi ini mulai populer di daerah eropa seperti Inggris yang sekitar tahun 1400an memiliki 1000 kincir angin. Di abad-19 penggunaan kincir angin mulai meluas penggunaannya seperti memompa air untuk irigasi persawahan.

Pemakaian kincir angin sebagai alat konversi energi angin merupakan pemanfaatan energi angin yang paling banyak diteliti dan dipakai akhir-akhir ini, dimana kincir angin tersebut digunakan untuk menggerakkan generator guna membangkitkan tenaga listrik.



**Gambar 2.3.** Penggunaan turbin angin di masa kini.

(Sumber: [http://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_turbine](http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine), Magnus Manske: 2008)

Pada saat ini sudah banyak dikenal jenis kincir angin, dimana masing-masing jenis mempunyai karakteristik yang berbeda-beda. Pengembangan-pengembangan kincir angin yang banyak dilakukan akhir-akhir ini, umumnya bertujuan:

- Mencapai efisiensi yang lebih baik.
- Memperbaiki konstruksi.
- Menekan biaya investasi & operasi serendah mungkin.

Faktor konstruksi dan pembuatan dari kincir angin berhubungan erat dengan efisiensi aerodinamik makin tinggi efisiensi aerodinamiknya makin mahal harganya. Oleh karena itu pada perencanaan kincir angin harus dicapai kompromi yang sebaik-baiknya diantara faktor-faktor harga, efisiensi aerodinamik dan pemakaiannya.

### **II.3 Turbin Angin**

Turbin angin adalah sebuah alat konversi energi yang memanfaatkan energi gerak angin (energi mekanik) dan diubah menjadi bentuk energi lainnya sesuai yang diinginkan (misalnya energi listrik). Turbin angin ini pada awalnya dibuat untuk mengakomodasi kebutuhan para petani dalam melakukan penggilingan padi, keperluan irigasi, dan lain-lain.

Saat ini, penggunaan kincir angin lebih banyak digunakan sebagai pensuplai kebutuhan energi listrik sebagai salah satu bentuk penggunaan sumber daya alam yang dapat diperbaharui karena menggunakan angin sebagai sumber energinya. Dan untuk mendapatkan kebutuhan angin yang mampu menggerakkan turbin angin dalam jumlah besar, maka di daerah non-tropis sangat cocok diterapkan mesin konversi energi ini karena kecepatan angin rata-rata 4,0 sampai 4,5 m/s (Clarke, S., September 2003).

Walaupun penggunaan turbin angin belum sebanyak penggunaan mesin konversi energi yang tidak dapat diperbaharui, namun pengembangan turbin angin terus dilakukan karena permasalahan akan semakin berkurangnya sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui.

Prinsip kerja dari turbin angin adalah mengubah energi mekanis dari angin menjadi energi putar pada kincir, lalu putaran kincir digunakan untuk memutar generator, yang akhirnya akan menghasilkan listrik. Turbin angin secara umum terdiri dari 5 komponen utama:

1. *Gearbox*

Alat ini berfungsi untuk mengubah putaran rendah pada kincir menjadi putaran tinggi.

2. *Generator*

*Generator* ini dapat mengubah energi gerak menjadi energi listrik. Ketika poros generator mulai berputar maka akan terjadi perubahan fluks pada stator yang akhirnya karena terjadi perubahan fluks ini akan dihasilkan tegangan dan arus listrik tertentu. Tegangan dan arus listrik yang dihasilkan ini disalurkan melalui kabel jaringan listrik untuk akhirnya digunakan oleh masyarakat. Tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh generator ini berupa AC (*Alternating Current*) yang memiliki bentuk gelombang kurang lebih sinusoidal.

3. *Brake System*

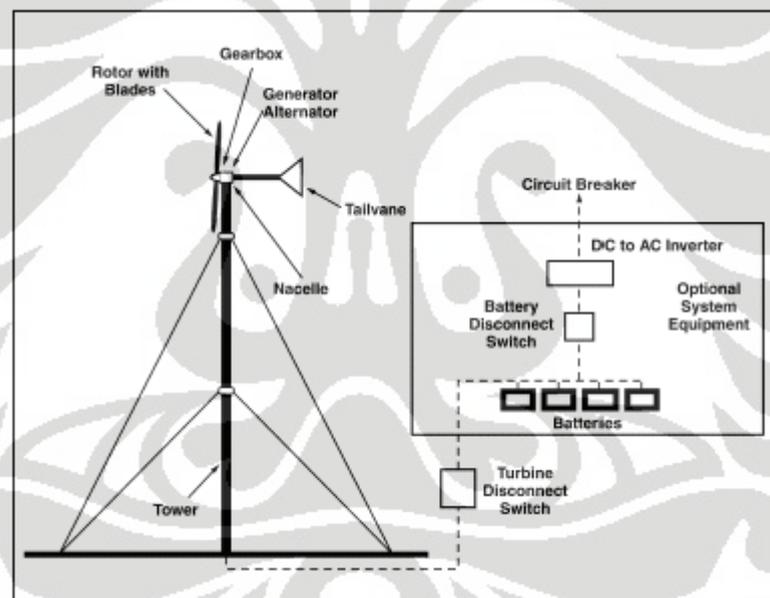
Digunakan untuk menjaga putaran pada poros setelah *gearbox* agar bekerja pada titik aman saat terdapat angin yang besar. Alat ini perlu dipasang karena *generator* memiliki titik kerja aman dalam pengoperasiannya.

#### 4. Penyimpanan energi

Alat penyimpanan energi yang difungsikan sebagai back-up energi listrik. Ketika beban penggunaan daya listrik masyarakat meningkat atau ketika kecepatan angin suatu daerah sedang menurun, maka kebutuhan permintaan akan daya listrik tidak dapat terpenuhi. Oleh karena itu kita perlu menyimpan sebagian energi yang dihasilkan ketika terjadi kelebihan daya pada saat turbin angin berputar kencang atau saat penggunaan daya pada masyarakat menurun.

#### 5. Rectifier-inverter

*Rectifier* dapat menyearahkan gelombang sinusodal (AC) yang dihasilkan oleh generator menjadi gelombang DC. *Inverter* diperlukan untuk mengubah gelombang DC yang dikeluarkan oleh aki menjadi gelombang AC, agar dapat digunakan oleh rumah tangga.



**Gambar 2.4.** Komponen utama turbin angin.

(Sumber: <http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/03-047.htm>, Natural Resources Canada: 2003)

Daya yang dihasilkan turbin dapat menggunakan rumus sebagai berikut:

$$P_t = C_p \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.1)$$

Dimana:

- $P_t$  = daya yang dihasilkan turbin angin secara teoritis (Watt)
- $C_p$  = koefisien daya turbin angin

- $\rho$  = massa jenis udara pada waktu tertentu ( $\text{kg/m}^3$ )
- $A$  = luas permukaan turbin yang dikenai tumbukan angin ( $\text{m}^2$ )
- $v$  = kecepatan udara pada waktu tertentu ( $\text{m/s}$ )

Sebagai pembanding, diperlukan rumusan daya lainnya. Daya itu didapat dari torsi yang dihasilkan sesuai dengan putaran turbin, rumusannya sebagai berikut:

$$P_s = T\omega$$

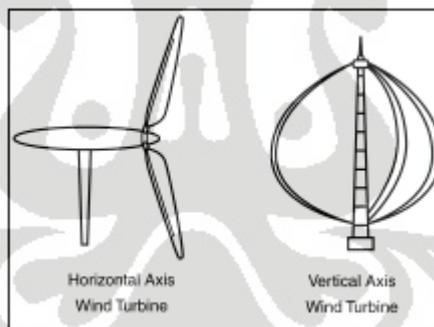
$$P_s = T \frac{2\pi N}{60} \quad (2.2)$$

Dimana:

- $P_s$  = daya yang dihasilkan turbin angin dengan simulasi (Watt)
- $T$  = torsi yang dihasilkan turbin (N.m)
- $N$  = jumlah putaran (rpm)

Secara umum turbin angin dibagi menjadi 2 tipe, yaitu:

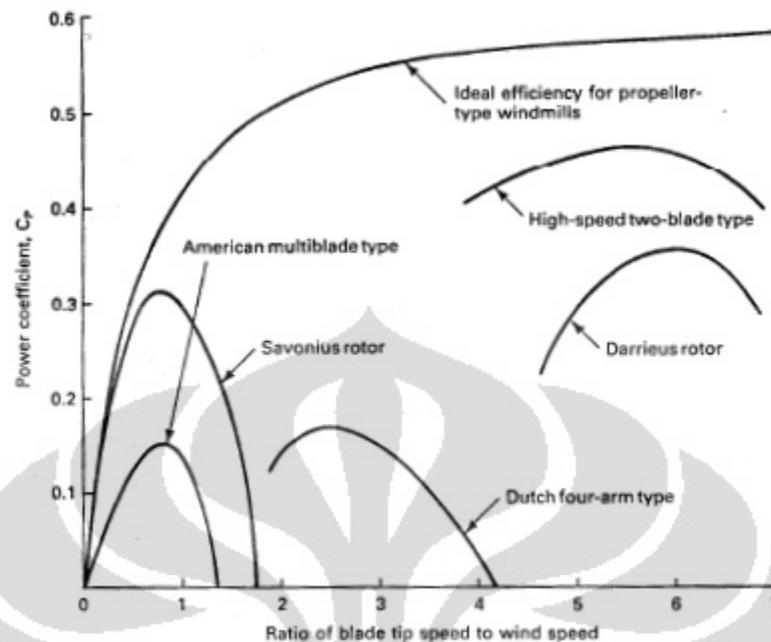
1. Turbin angin sumbu horizontal (*Horizontal Axis Wind Turbine*)
2. Turbin angin sumbu vertikal (*Vertical Axis Wind Turbine*)



**Gambar 2.5.** Pengklasifikasian turbin angin berdasarkan sumbu putarnya.

(Sumber: <http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/03-047.htm>, Ontario Ministry of Energy: 2003)

Turbin angin memiliki karakteristik masing nilai  $C_p$ -nya berdasarkan *Tip Speed Ratio*-nya (TSR). Hal ini ditunjukkan oleh grafik berikut.



**Grafik 2.1.** Perbandingan  $C_p$  turbin terhadap TSR-nya.

(Sumber: <https://wiki.duke.edu/display/wtw/Turbine+review>, Matt Ball: 2009)

TSR atau *Tip Speed Ratio* (  $\lambda$  ) adalah perbandingan antara kecepatan putar sudu turbin (*TSB*) dengan kecepatan aktualnya ( $v$ ).

$$\lambda = \frac{TSB}{v} \quad (2.3)$$

### II.3.1 Turbin Angin Sumbu Horizontal

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

Karena sebuah menara menghasilkan turbulensi di belakangnya, turbin biasanya diarahkan melawan arah anginnya menara. Bilah-bilah turbin dibuat kaku agar mereka tidak terdorong menuju menara oleh angin berkecepatan tinggi. Sebagai tambahan, bilah-bilah itu diletakkan di depan menara pada jarak tertentu dan sedikit dimiringkan.

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



**Gambar 2.6.** Turbin angin sumbu horizontal.

(Sumber: <http://www.rise.org.au/info/Applic/Smallturbines/index.html>, Eco Center: 2008)

Kelebihan turbin angin sumbu horizontal:

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

Kelemahan turbin angin sumbu horizontal:

- Menara yang tinggi serta bilah yang panjangnya bisa mencapai 90 meter sulit diangkat. Diperkirakan besar biaya transportasi bisa mencapai 20% dari seluruh biaya peralatan turbin angin.
- TASH yang tinggi sulit dipasang, membutuhkan derek yang sangat tinggi dan mahal serta para operator yangampil.
- Konstruksi menara yang besar dibutuhkan untuk menyangga bilah-bilah yang berat, *gearbox*, dan *generator*.

- TASH yang tinggi bisa mempengaruhi radar airport.
- Ukurannya yang tinggi merintangai jangkauan pandangan dan mengganggu penampilan lansekap.
- Berbagai varian *downwind* menderita kerusakan struktur yang disebabkan oleh turbulensi.
- TASH membutuhkan mekanisme kontrol *yaw* tambahan untuk membelokkan kincir ke arah angin.

### II.3.2 Turbin Angin Sumbu Vertikal

Turbin angin sumbu vertikal (atau TASV) memiliki poros rotor utama yang disusun tegak lurus. Kelebihan utama susunan ini adalah turbin tidak harus diarahkan ke angin agar menjadi efektif. Kelebihan ini sangat berguna di tempat-tempat yang arah anginnya sangat bervariasi. VAWT mampu mendayagunakan angin dari berbagai arah.

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

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



**Gambar 2.7.** Turbin angin sumbu vertikal.

(Sumber: [http://en.wikipedia.org/wiki/Darrieus\\_wind\\_turbine](http://en.wikipedia.org/wiki/Darrieus_wind_turbine), -jha-: 2007)

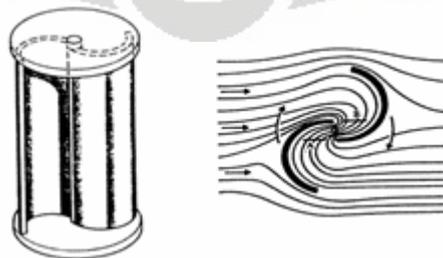
Kelebihan turbin angin sumbu vertikal:

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

- TASV yang ditempatkan di dekat tanah bisa mengambil keuntungan dari berbagai lokasi yang menyalurkan angin serta meningkatkan laju angin (seperti gunung atau bukit yang puncaknya datar dan puncak bukit).
- TASV tidak harus diubah posisinya jika arah angin berubah.
- Kincir pada TASV mudah dilihat dan dihindari burung.  
Kelemahan turbin angin sumbu vertikal:
  - Kebanyakan TASV memproduksi energi hanya 50% dari efisiensi TASH karena *drag* tambahan yang dimilikinya saat kincir berputar.
  - TASV tidak mengambil keuntungan dari angin yang melaju lebih kencang di elevasi yang lebih tinggi
  - Kebanyakan TASV mempunyai torsi awal yang rendah, dan membutuhkan energi untuk mulai berputar.
  - Sebuah TASV yang menggunakan kabel untuk menyanggahnya memberi tekanan pada bantalan dasar karena semua berat rotor dibebankan pada bantalan. Kabel yang dikaitkan ke puncak bantalan meningkatkan daya dorong ke bawah saat angin bertiup.

## II.4 Turbin Savonius

Turbin ini dinamakan atas nama penemunya yaitu Kapten S.J. Savonius, seorang Kapten Angkatan Laut Finlandia di tahun 1925. Konstruksi dasar dari rotor savonius adalah dua buah sudu yang berbentuk melengkung setengah lingkaran yang dipasangkan berlawanan satu dengan yang lainnya. Prinsip kerjanya adalah adanya perbedaan *drag* (gaya hambat) pada bagian cembung atau cekung sudu tengah lingkaran tersebut, tergantung pada arah angin mengenai sudu. Oleh karena itu, maka savonius termasuk jenis *drag type machine*.



**Gambar 2.8.** Turbin savonius.

(Sumber: <http://www.reuk.co.uk/Savonius-Wind-Turbines.htm>, anonim: 2008)

Konstruksi savonius memiliki beberapa kelebihan, yaitu:

- Mampu *start* pada kecepatan angin yang rendah.
- Torsi awal yang besar.
- Tidak tergantung pada arah angin.
- Desain yang sederhana.
- Konstruksi yang mudah.

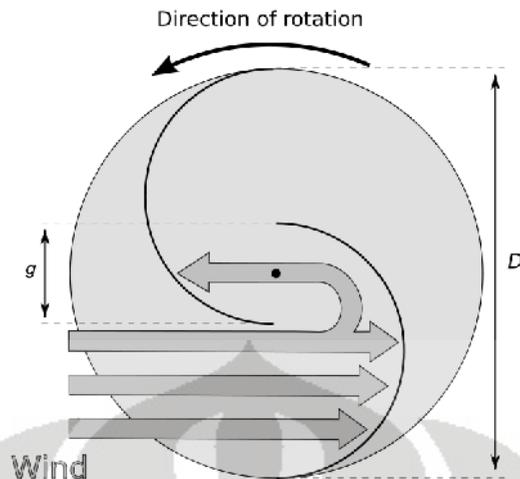
Selain kelebihan-kelebihan tersebut, savonius memiliki kekurangan, seperti kebutuhan material per satuan daya yang dihasilkan lebih besar dibanding untuk turbin darrieus. Untuk kemampuannya berputar pada kecepatan angin yang rendah, maka rotor savonius sering dikombinasikan dengan darrieus sebagai penolong *start* awal pada kecepatan rendah. Nilai  $C_p$  turbin savonius secara umum adalah 0,3 (Natural Resources Management and Environment Department)

Pada perkembangannya, terjadi penambahan sudu menjadi 4 untuk memberikan output daya yang lebih stabil. Bahan yang digunakan juga mengalami perubahan dari kayu, plastik, dan *fiberglass* alumunium. Modifikasi lain adalah *split* savonius, yaitu sudu-sudu tersebut digeser lebih ke dalam atau ke luar dan perbandingan lebar celah dengan diameter sudu adalah eksentrisitas ( $e$ ).

#### II.4.1 Faktor Eksentrisitas pada Turbin Savonius

Savonius memiliki karakteristik bentuk pada rotornya yang bisa divariasikan untuk mendapatkan nilai optimum desain yang diinginkan. Karakteristik bentuk pada rotornya tersebut dinamakan eksentrisitas. Faktor eksentrisitas merupakan perbandingan antara *overlap gap* ( $g$ ) dengan diameter turbin ( $D$ ).

$$e = \frac{g}{D} \quad (2.4)$$



**Gambar 2.9.** Nilai eksentrisitas turbin savonius.

(Sumber: [http://en.wikipedia.org/wiki/Savonius\\_wind\\_turbine](http://en.wikipedia.org/wiki/Savonius_wind_turbine), Ugo14: 2008)

## II.4.2 Variasi Model Turbin Savonius

Untuk turbin savonius, ditemukan berbagai variasi model turbin savonius. Di antaranya ada model *twist*, memanjang ke atas, dan sudu berlapis. Masing-masing bentuk ini memiliki keunggulan dan kelemahan masing-masing. Pada pembahasan kali ini hanya pada model memanjang ke atas dan model sudu berlapis.

### II.4.2.1 Model Memanjang ke Atas



**Gambar 2.10.** Penambahan ketinggian turbin savonius konvensional.

(Sumber: <http://www.dur.ac.uk/ecs/engineering/research/bioenergyrg/industry/casestudies/>, anonim: 2009)

Pada model ini memiliki keunggulan yaitu mampu menangkap angin dari satu arah secara keseluruhan luas permukaan. Kekurangan dari model ini yaitu membutuhkan angin yang cukup kuat untuk mengembalikan putaran  $180^\circ$  untuk membuat turbin berputar secara dinamis.

#### II.4.2.2 Model Sudu Berlapis



**Gambar 2.11.** Perbedaan sudut serang di tiap lapisan sudu.

(Sumber: <http://www.windstuffnow.com/main/projects.htm>, anonim)

Pada model ini memiliki keunggulan yaitu mampu menangkap angin dari segala arah karena bentuknya yang berlapis dan memiliki sudut serang yang berbeda di tiap sudutnya. Sebagai konsekuensi perbedaan sudut serang pada tiap lapisan tersebut, apabila angin hanya datang dari satu arah, maka luas area yang menangkap angin hanya sedikit, atau seperbagian dari lapisan savonius.

### II.4.3 Perkembangan Penelitian Turbin Savonius

Semenjak awal penemuan turbin savonius oleh S.J. Savonius tahun 1925, penelitian mengenai turbin savonius telah banyak dilakukan dengan berbagai metode seperti eksperimental, analisis, dan yang terakhir dengan metode numerik. Penelitian-penelitian tersebut tersebar dalam berbagai bidang seperti konstruksi, konversi energi, dan mekanika fluida.

Penelitian dengan metode eksperimental telah banyak dilakukan dalam upaya memahami karakteristik rotor savonius. Penelitian eksperimental tersebut dapat dibagi menjadi penelitian dengan kondisi statis dan dinamis (rotor berputar). Givalda et.al telah melakukan penelitian pada sifat *drag* dan *lift* rotor savonius. Penelitian ini dilakukan pada model rotor dengan  $e = \frac{1}{6}$  dan dilakukan dengan kondisi statis dan dinamis. Hasil penelitian tersebut adalah rotor dengan  $e = \frac{1}{6}$  menghasilkan daya paling optimum dan *tip speed ratio* ( $\lambda$ ) = 1 merupakan kondisi optimum bagi kondisi rotor yang berputar. (Givalda, et al, 1991)

Sedangkan Moustoglou melakukan penelitian perbandingan antara rotor savonius dengan rotor Benesh. Pemilihan gap pada rotor savonius adalah  $e = 0,15$  yang dipilih karena diharapkan dapat memberikan konfigurasi optimum. (Moustoglou, et al, 1995)

Penelitian terhadap koefisien drag, koefisien tekanan, dan torsi statis, telah dilakukan oleh Islam. Penelitian eksperimental memberikan data mengenai karakteristik rotor dengan  $e = 0$ . Penelitian ini dilakukan pada  $Re = 1,1 \times 10^5$ . Karakteristik dinamik rotor juga diteliti dengan pendekatan *quasi steady*. (Islam, A.K.M., 1995)

Sedangkan penelitian mengenai perbandingan antara rotor savonius dengan variasi eksentrisitas telah dilakukan oleh T. Sawada, selain itu juga dilakukan visualisasi terhadap pola aliran yang terjadi. Penelitian dilakukan dengan kondisi dinamis dengan variasi  $e = 0,21$  dan  $e = -0,51$  dengan  $\lambda = 0,8$ . Parameter yang didapat adalah koefisien torsi. Hasilnya adalah rotor dengan  $e = 0,21$  memberikan torsi yang lebih baik dengan nilai positif pada semua sudut serang sudu ( $\alpha$ ) dibandingkan rotor  $e = -0,51$ . (Sawada, T., et al, 1986)

Di Indonesia, penelitian mengenai turbin savonius dimulai di LAPAN, yaitu sekitar awal tahun 1980-an. Penelitian ini menitikberatkan pada konstruksi turbin savonius. Sedangkan beberapa tugas akhir di FTUI membahas turbin angin aksis vertikal dengan bentuk sudu yang bervariasi yang mengambil dasar dari sudu savonius.

Sony, mahasiswa FTUI angkatan 93, melakukan penelitian mengenai turbin savonius terhadap aspek aerodinamis rotor pada kondisi statis terhadap variasi yang dilakukan pada celah antara eksentrisitas. Variasi eksentrisitas dibuat menjadi tiga macam, yaitu  $e = 0$ ,  $e = 0,5$ , dan  $e = -0,2$ . Penelitian menggunakan perangkat lunak CFD, yang hasilnya mendapatkan nilai  $C_P$  dan  $C_D$  disamping tampilan grafis kontur tekanan dan vektor kecepatan sebagai dasar analisa. (Sony, 1998)

Aziz Okrianto et.al membuat kincir angin jenis savonius sebagai pembangkit listrik untuk pengisian ulang baterai pada “mobile devices”. (Okrianto, A., et al, 2005)

Dengan berkembangnya teknologi *Computational Fluid Dynamics*, maka arah perkembangan penelitian rotor savonius adalah dengan perbantuan komputer. Kemudahan-kemudahan CFD dan hasil komputasi yang relatif cukup dapat menggambarkan keadaan nyata menyebabkan penelitian dengan metode ini dapat melaju dengan pesat.

## II.5 Computational Fluid Dynamics

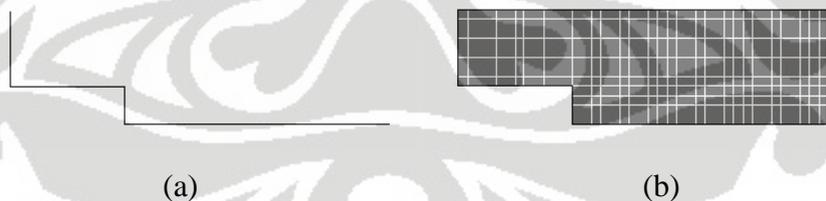
*Computational Fluid Dynamics* adalah perangkat lunak analisa suatu sistem fisik yang melibatkan aliran fluida, perpindahan kalor dan fenomena lain yang berhubungan dengan cara simulasi dengan bantuan komputer. Dengan kemampuan dan aplikasinya yang luas, sehingga CFD menawarkan kelebihan-kelebihan terhadap metode eksperimental pada desain sistem fluida, seperti:

- Pengurangan waktu dan biaya pada perancangan.
- Kemampuan untuk melakukan pengamatan pada eksperimen terkontrol yang sulit atau tidak mungkin untuk dilakukan (pada sistem yang besar).

- Kemampuan untuk melakukan pengamatan sistem dalam kondisi berbahaya dan di luar batasan normal kerjanya (pengamatan keselamatan dalam kecelakaan).
- Hasil pengamatan yang sangat mendetail.

### II.5.1 Meshing

Persamaan diferensial parsial yang menentukan aliran fluida dan perpindahan panas tidak biasa diterima dalam solusi analitis, kecuali untuk kasus yang sangat sederhana. Oleh karena itu, untuk menganalisa aliran fluida, daerah aliran dibagi menjadi subdomain yang lebih kecil (membuat geometri sederhana seperti heksahedral dan tetrahedral dalam 3 dimensi, dan kuadrilateral dan segitiga dalam 2 dimensi) dan persamaan pengatur diskritisasi dapat diselesaikan dengan membagi domain dalam beberapa bagian. Umumnya, satu dari tiga metode digunakan untuk menyelesaikan persamaan sistem: volume hingga, elemen hingga, atau elemen *differences*. Ketelitian harus diterapkan untuk meyakinkan kekontinuitas persamaan yang melewati dua permukaan di antara dua subdomain, demikian untuk mendapatkan persamaan perkiraan di dalam variasi bagian dapat dimasukkan bersama-sama untuk memberikan gambaran lengkap dari aliran fluida di tiap domain. Setiap bagian dari domain dikenal sebagai elemen atau sel, dan kumpulan dari semua elemen dikenal sebagai *mesh* atau *grid*.



**Gambar 2.12.** Penggambaran sederhana bagaimana *mesh* bekerja berdasarkan bentuk domain.

(Sumber: [http://www.cfd-online.com/Wiki/Mesh\\_generation](http://www.cfd-online.com/Wiki/Mesh_generation), Anurag: 2005)

Program CFD berisi struktur numerik yang bisa menyelesaikan permasalahan-permasalahan fluida. Dan secara garis besar terdiri dari tiga elemen utama, yaitu.

### II.5.2 Pre-Processor

*Pre-processing* berisikan masukan mengenai permasalahan fluida yang akan dianalisa dan perubahan masukan tersebut menjadi bentuk yang dapat diselesaikan oleh *solver*. Pada tahap *pre-processing* dilakukan:

- Pendefinisian geometri daerah yang akan diamati (*computational domain*).
- Pembuatan *grid*, pembagian domain menjadi bagian-bagian kecil *sub-domain* yang tidak bertindihan, yaitu menjadi sel-sel.
- Pemilihan fenomena fisik dan kimia yang akan dimodelkan.
- Penentuan sifat-sifat fluida.
- Spesifikasi kondisi batas dan kondisi awal.

### II.5.3 Solver

Persamaan atur adalah berbentuk persamaan diferensial parsial. Untuk dapat diselesaikan dengan komputer, maka persamaan tersebut harus ditransformasikan ke dalam bentuk numerik. Terdapat tiga teknik utama penyelesaian numerik CFD, yaitu dengan *finite difference*, *finite element*, dan *finite volume*. Pada garis besarnya, metode numerik yang menjadi basis *solver* melakukan langkah-langkah berikut:

- Perkiraan variabel aliran yang belum diketahui dengan suatu fungsi sederhana.
- Diskritisasi dengan mensubstitusi perkiraan tersebut pada persamaan pengatur dan melakukan perhitungan matematis yang berulang.
- Penyelesaian dari persamaan pengatur.

### II.5.4 Post-Processor

Pada tahap ini, paket program CFD menampilkan hasil perhitungan *solver* secara grafis yang meliputi:

- Tampilan geometri domain dan *grid*.
- Plot vektor.
- Plot kontur.
- Plot permukaan 2D atau 3D.
- Manipulasi tampilan (translasi, rotasi, dan lain-lain).

- Tampilan yang berwarna.

### II.5.5 Penelitian yang Menggunakan CFD sebagai Analisa

Dikutip dari:

[http://www.cd-adapco.com/press\\_room/dynamics/21/wind\\_turbines.html](http://www.cd-adapco.com/press_room/dynamics/21/wind_turbines.html)

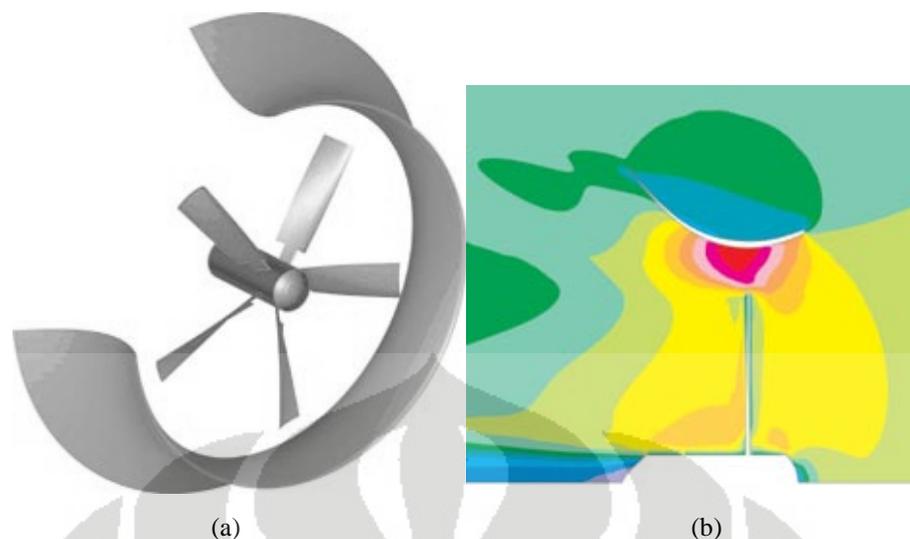
Dalam sumber tersebut, H. Grassmann, M.L.Ganis, dari Departemen Fisika Univ. di Udine Italia, membahas analisa pemodelan CFD untuk turbin angin. Pembuat artikel menggunakan perangkat lunak STAR-CD untuk menyelesaikan permasalahan CFD-nya. Tujuan simulasi ini adalah mengurangi biaya dan meningkatkan daya keluaran dari turbin angin.



**Gambar 2.13.** Turbin angin.

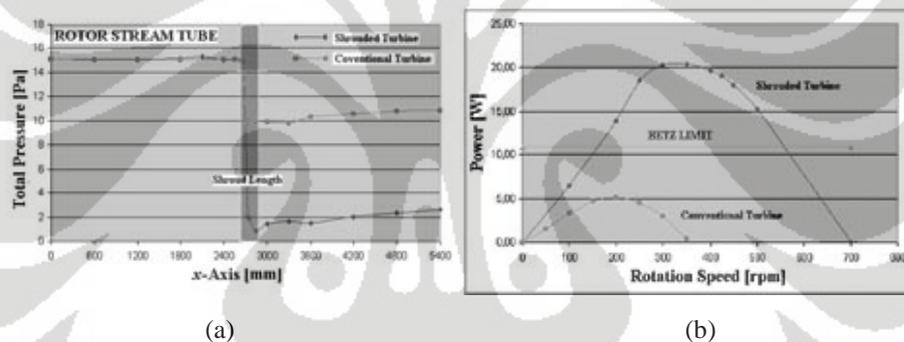
(Sumber: [http://www.cd-adapco.com/press\\_room/dynamics/21/wind\\_turbines.html](http://www.cd-adapco.com/press_room/dynamics/21/wind_turbines.html), H.Grassmann: 2009)

Grumman Corporation mempelajari penggunaan turbin angin dengan dan tanpa selubung yang menunjukkan hubungan antara gaya tekan karena aliran dari turbin dan transfer dari energi dan momentum linear. STAR-CD dalam penggunaannya mampu menemukan solusi permasalahan ini. Gambar 2.14.(a) menunjukkan model turbin angin yang menggunakan selubung di sekelilingnya, dengan layar berbentuk kurva. Luas permukaan luar selubung 3 kali lebih besar daripada luas permukaan propelernya. Gambar 2.14.(b) menunjukkan kecepatan yang melewati model dalam arah aliran. Berlawanan dengan sistem yang konvensional, percepatan udara sebagai pendekatan turbin, dan selubung statis memerankan part yang aktif dalam mengubah energi dalam sistem, oleh sebab itu disebut juga “turbin statis parsial”.



**Gambar 2.14.** (a) Turbin angin dengan menggunakan selubung. (b) Komponen kecepatan angin aksial. Arah vektor menunjukkan arah angin ambien.

(Sumber: [http://www.cd-adapco.com/press\\_room/dynamics/21/wind\\_turbines.html](http://www.cd-adapco.com/press_room/dynamics/21/wind_turbines.html), H.Grassmann: 2009)



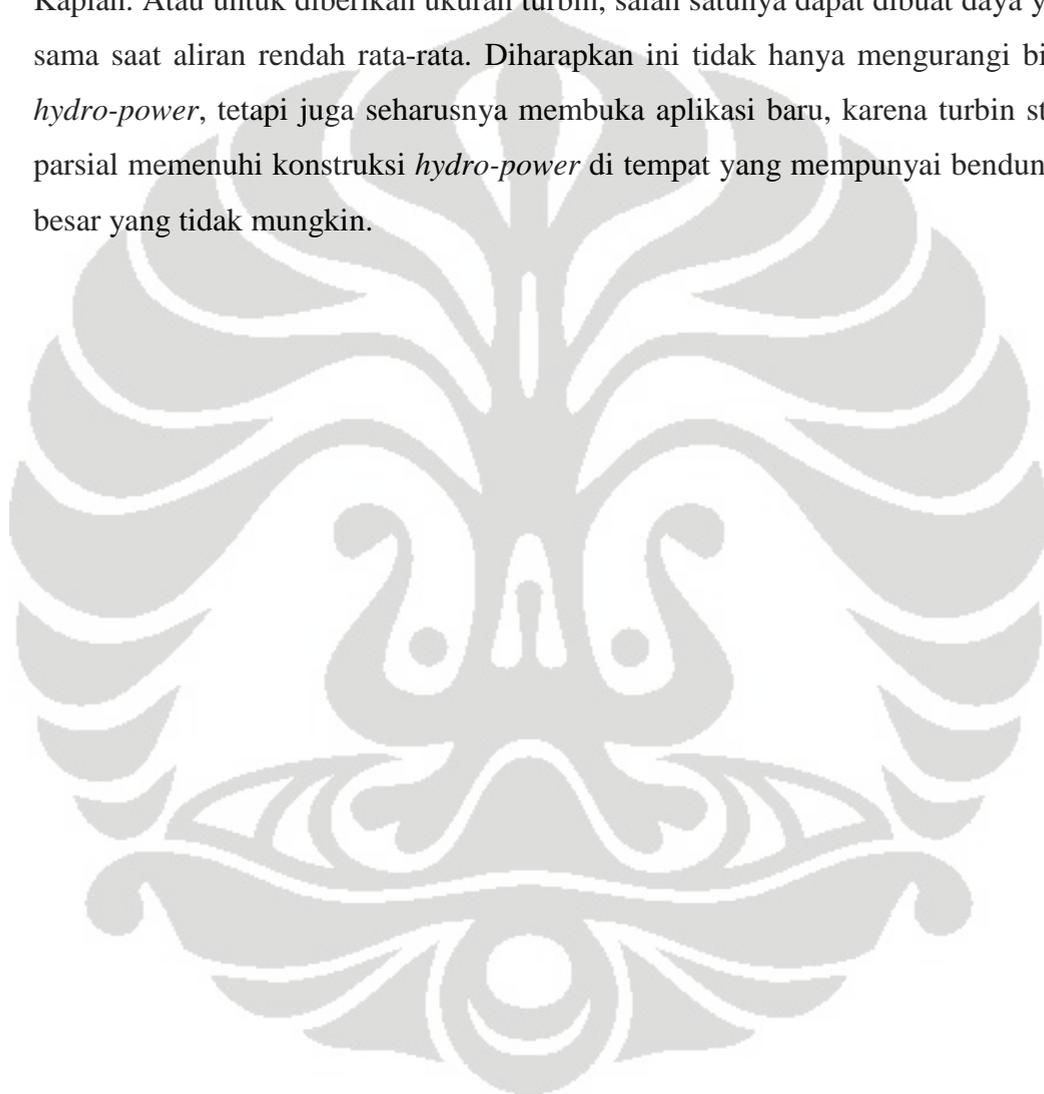
**Gambar 2.15.** (a) Total tekanan rata-rata pada aliran tabung rotor turbin dengan dan tanpa selubung. (b) Daya keluaran turbin dengan dan tanpa selubung.

(Sumber: [http://www.cd-adapco.com/press\\_room/dynamics/21/wind\\_turbines.html](http://www.cd-adapco.com/press_room/dynamics/21/wind_turbines.html), H.Grassmann: 2009)

Gambar 2.15.(a) membandingkan total tekanan rata-rata dalam aliran yang melewati tabung, dimana melewati propeler untuk turbin dengan dan tanpa selubung. Tekanan besar yang jatuh (*large pressure drop*) dapat secara prinsip diterima dalam sistem tanpa selubung, tetapi hanya untuk angin berkecepatan rendah. Dalam sistem dengan selubung, tekanan besar yang jatuh terjadi ketika udara yang mengalir melewati propeler di kecepatan aksial rata-rata 7,2 m/s (ketika angin ambien hanya 5 m/s). Dalam sistem tanpa selubung ataupun sistem dengan selubung, dimana tidak terdapat interaksi dengan aliran udara tambahan,

dalam kondisi ini akan terjadi beberapa pelanggaran perubahan energi dan momentum.

Gambar 2.15.(b) membandingkan daya keluaran turbin dengan selubung dengan turbin tanpa selubung. Kenaikan dalam daya puncak adalah faktor 4. Prinsip yang sama dapat juga diaplikasikan ke turbin angin. Untuk diberikan aliran rata-rata, salah satunya sapat dengan signifikan direduksi ukuran turbin Kaplan. Atau untuk diberikan ukuran turbin, salah satunya dapat dibuat daya yang sama saat aliran rendah rata-rata. Diharapkan ini tidak hanya mengurangi biaya *hydro-power*, tetapi juga seharusnya membuka aplikasi baru, karena turbin statis parsial memenuhi konstruksi *hydro-power* di tempat yang mempunyai bendungan besar yang tidak mungkin.



## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **III.1 Metode Penelitian**

Adapun metode penelitian yang digunakan dalam skripsi ini yaitu mencari referensi berbagai macam bentuk turbin yang akan dimodelkan. Selanjutnya adalah mengambil data kecepatan angin sebagai bagian dari input pada model yang akan disimulasikan. Berdasarkan data kecepatan angin yang diambil dan kemudian disesuaikan dengan keuntungan dan kelebihan desain turbin angin horizontal dan vertikal, maka diambil model turbin sumbu vertikal yang cocok dengan data dan kebutuhan untuk skala perumahan.

Setelah membatasi pada turbin angin vertikal, dibuatlah model yang mewakili karakteristik turbin angin vertikal, yaitu turbin savonius. Pemodelan pada perangkat lunak Solidworks 2009 dengan skala 1:1, tentunya dengan penyederhanaan model (diambil bagian sudunya saja). Input yang digunakan pada simulasi yaitu data kecepatan angin dan fluida yang digunakan berupa udara. Perangkat lunak yang digunakan untuk simulasi adalah Simulation Flow 2009. Tujuan dari simulasi ini adalah mendapatkan nilai torsi yang dihasilkan pada model yang telah disimulasikan. Nilai torsi tersebut menjadi daya yang dihasilkan pada model yang telah disimulasikan, kemudian hasilnya dibandingkan dengan nilai menurut perhitungan, maka didapatkan validasi dan verifikasi model turbin yang mendekati turbin referensi.

##### **III.1.1 Objek, Waktu, dan Tempat Penelitian**

Adapun objek penelitian ini adalah kecepatan angin yang berada di sekitar atap rumah X yang berlokasi di Kukusan, Depok, sekaligus menjadi tempat penelitian selain simulasi di Studio CFD Departemen Teknik Mesin FTUI. Pengambilan data berupa kecepatan angin yang dilakukan pada tanggal 28 Mei 2009.

### III.1.2 Peralatan dan Alat Ukur

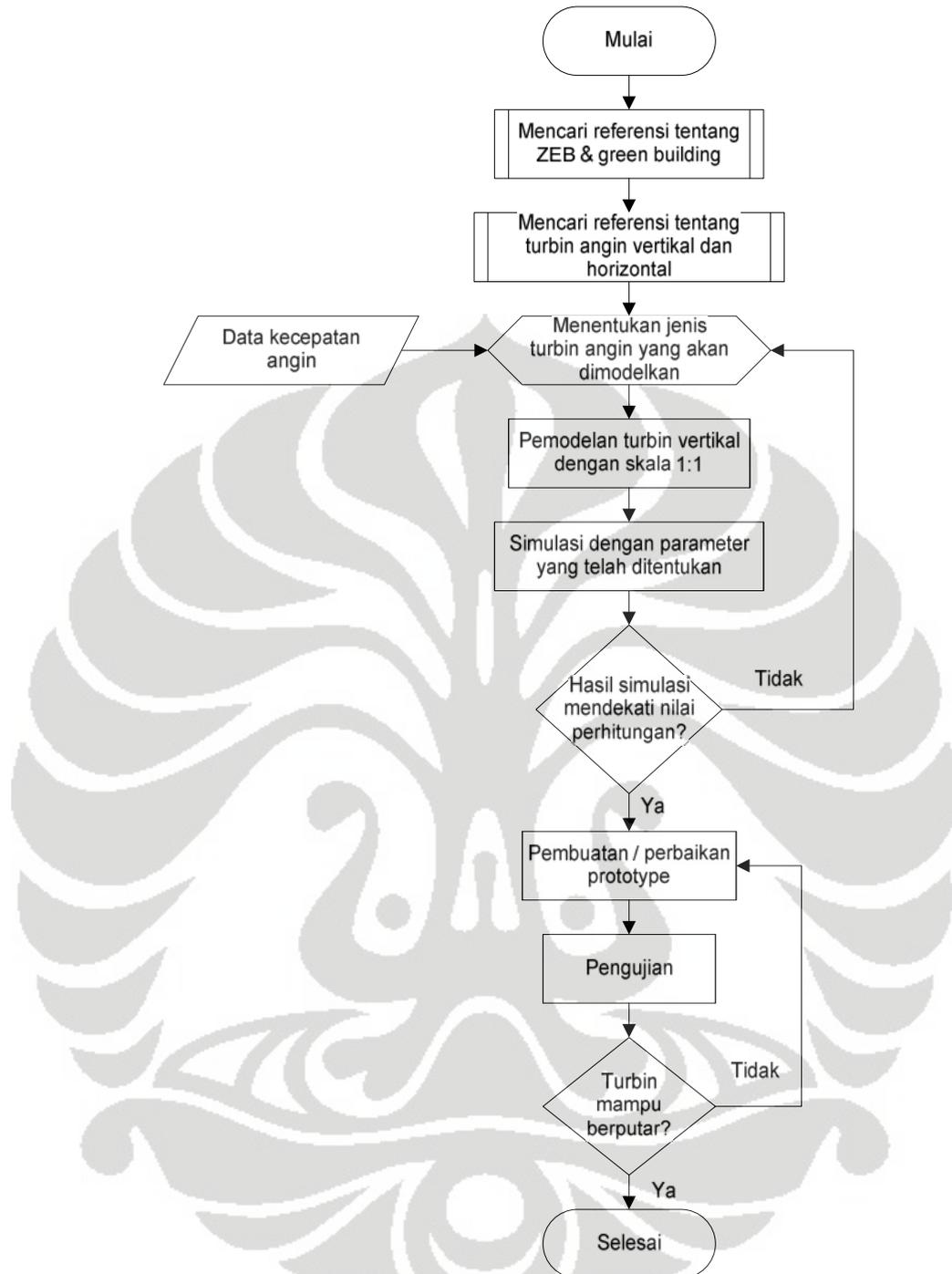
Adapun alat ukur yang digunakan dalam mengambil data kecepatan angin ini adalah anemometer. Peralatan lainnya adalah perangkat komputasi yang berisikan perangkat lunak Solidworks 2009 beserta Simulation Flow 2009 sebagai pemodelan dan simulasi dan menggunakan komputasi sebagai media dari perangkat lunak.

Perangkat komputasi yang digunakan adalah Axioo Pico DJJ615 dengan spesifikasi sebagai berikut:

- Intel Atom N270 1,6 GHz
- Memory SO-DIMM DDR2 PC5300 1 GB.
- HDD 160 GB
- Windows XP Home Edition SP3
- Solidworks 2009 SP 2.1 Education Edition dan Simulation Flow Solidworks 2009

### III.1.3 Alur Kerangka Penelitian

Adapun alur kerangka penelitian ini sebagai berikut:



**Gambar 3.1.** Flowchart umum kerangka penelitian.

## III.2 Pengambilan Data

### III.2.1 Cara dan Hasil Pengukuran Data Kecepatan Angin

Dalam penelitian ini, dibutuhkan kecepatan angin rata-rata sebagai input dalam simulasi pemodelan. Proses pengambilan data dengan alat ukur manometer adalah sebagai berikut:

- Menyalakan anemometer, pastikan kipas dari anemometer dalam keadaan diam terlebih dahulu.
- Memastikan bahwa bagian yang digunakan adalah bagian depan kipas dari anemometer.
- Hadapkan bagian depan dari anemometer tersebut ke arah angin. Catat hasil pengukurannya.
- Lakukan pengukuran sampai masing-masing mendapatkan 10 data. Data kecepatan angin tersebut diambil pada waktu pagi pukul 9.00, siang pukul 13.00, dan sore pukul 15.00.

Data yang diambil berdasarkan pengambilan data pada tanggal 28 Mei 2009 di rumah X adalah:

**Tabel 3.1.** Data kecepatan angin di rumah X.

	Jam 9.00	Jam 13.00	Jam 15.00
1	2	2	2,1
2	1,9	2,1	2,1
3	1,7	2,2	2,1
4	2	1,9	1,8
5	2,3	1,9	1,7
6	2,1	1,9	2,1
7	2	1,9	2,2
8	2	2,1	2,1
9	2,1	2	1,8
10	1,9	1,9	2,1
rata-rata	2	1,99	2,01

Tabel di atas menjelaskan bahwa data diambil dalam 3 tahap, pada waktu pukul 9.00, 13.00, dan 15.00. Dari data di atas, diambil rata-ratanya pada setiap sumbu dan jamnya. Nilai tersebut kemudian dirata-ratakan kembali menurut sumbunya:

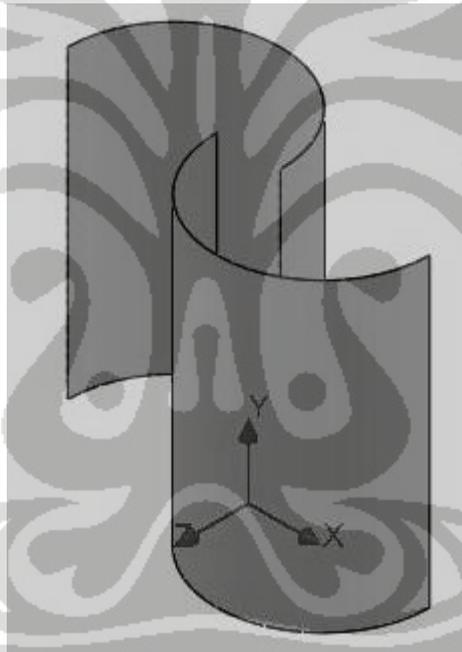
$$\bar{v}_{\text{sumbu}} = \frac{\sum(v_{\text{tiap waktu}})}{3}$$

$$\bar{v}_{\text{sumbu Z}} = \frac{(2 + 1.99 + 2.01)}{3} = 2 \text{ m/s}$$

Angin di rumah X memiliki kecepatan rata-rata 2 m/s dan dalam simulasi akan dimasukkan pada arah sumbu Z. Namun pada sumbu Z arahnya berkebalikan, maka kecepatan rata-ratanya adalah -2 m/s.

### III.2.2 Pemodelan Turbin Angin Savonius

Pemodelan dasar geometri savonius mengambil referensi plat aluminium yang berukuran 550 mm x 650 mm. Plat tersebut kemudian dibentuk menjadi setengah tabung berongga, seperti tampak gambar di bawah ini.



**Gambar 3.2.** Pola dasar turbin savonius yang memiliki eksentrisitas.

Ada dua bentuk yang bisa dibuat, pertama dengan menggunakan panjang yang 550 mm, kedua dengan menggunakan panjang yang 650 mm. Tiap panjang ini akan mengalami pemangkasan sebesar 50 mm jika salah satunya akan dijadikan keliling setengah lingkaran. Jadi model 1 dengan tinggi 550 mm dan diameter setengah lingkaran 600 mm, dan model 2 dengan tinggi 650 mm dan diameter setengah lingkaran 500 mm.

Pemangkasan ini karena terkait manufakturnya, dimana penempelan plat pada penyangga turbin savonius tidak tepat di ujung plat, melainkan 25 mm ke

arah dalam plat. Dari kedua model ini, diambil yang luas permukaannya terluas. Karena sesuai dengan rumus 2.1, untuk mencapai daya maksimum dibutuhkan luas permukaan yang terluas. Sesuai dengan perbandingan daya dengan luas permukaan.

Untuk model yang memiliki tinggi ( $t$ ) dan setengah keliling lingkaran ( $K$ ), lebarnya sesuai dengan diameter setengah lingkaran yang mampu dibentuk oleh plat. Sehingga jari-jari tabung ( $r_t$ ) adalah:

$$K = 2\pi \cdot r_t$$

$$\frac{1}{2}K = \pi r_t$$

Maka diameter tabung ( $D_t$ ) sudu savonius sebesar:

$$D_t = 2 \cdot r_t$$

Untuk mencapai diameter savonius ( $D_s$ ) yang memiliki eksentrisitas, maka diperlukan nilai gap ( $g$ ) untuk mengurangi nilai dua kali diameter tabung.

$$D_s = 2D_t - g$$

Setelah mendapatkan diameter savonius, maka luas permukaannya ( $A$ ) adalah:

$$A = D_s \cdot t$$

### III.2.2.1 Pemodelan Berdasarkan Eksentrisitas

Untuk pemilihan bentuk eksentrisitas, dipilih gap berdasarkan diameter dalam pipa standard AW.

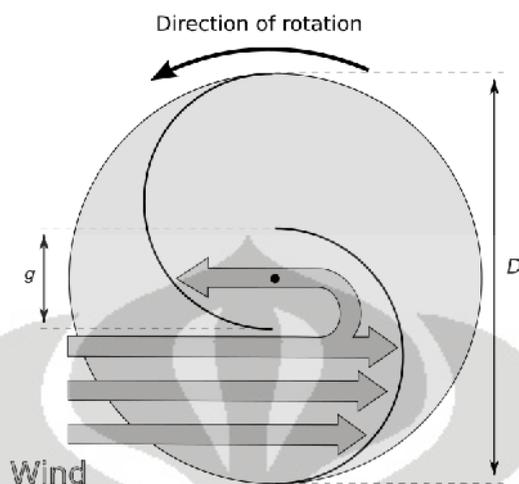
Pipa Wavin Standard AW

CLASS	DIAMETER		TEBAL DINDING Wall Thickness mm	PANJANG Length (mtr)	SISTEM SAMBUNG Joining System	KODE PRODUK Product Code
	Inch	mm				
AW (10kg/ /cm <sup>2</sup> )	1/2	22	1,5	4	SC	210.022.001
	3/4	26	1,8	4	SC	210.026.001
	1	32	2,0	4	SC	210.032.001
	1 1/4	42	2,3	4	SC	210.042.001
	1 1/2	48	2,3	4	SC	210.048.001
	2	60	2,3	4	SC	210.060.001
	2 1/2	76	2,6	4	SC	210.076.001
	3	89	3,1	4	SC	210.089.001
	4	114	4,1	4	SC	210.114.001
	5	140	5,4	4	SC	210.140.001
6	165	6,4	4	SC	210.165.001	
8	216	8,3	4	SC	210.216.001	

Gambar 3.3. Ukuran standard AW dalam pipa.

(Sumber: [http://www.wavin.co.id/public/product\\_category\\_popup.html?id=179](http://www.wavin.co.id/public/product_category_popup.html?id=179), anonim: 2004)

Pemilihan gap dimulai dari pipa 1 ½ inch yang memiliki diameter dalam 48 mm sampai pipa 8 inch yang memiliki diameter dalam 216 mm.



**Gambar 3.4.** Skema kerja turbin savonius yang memanfaatkan gaya dorong angin melalui eksentrisitas.

(Sumber: [http://en.wikipedia.org/wiki/Savonius\\_wind\\_turbine](http://en.wikipedia.org/wiki/Savonius_wind_turbine), Ugo14: 2008)

Eksentrisitas dimulai dari gap ( $g$ ) 48 mm. Perbandingan luas permukaan turbin savonius yang dicapai pada perbandingan dua model pembentukan plat adalah sebagai berikut:

**Tabel 3.2.** Perbandingan luas permukaan yang dicapai pada masing-masing kemungkinan bentuk.

	$t$ (mm)	$1/2 K$ (mm)	$r_t$ (mm)	$D_t$ (mm)	$g$ (mm)	$D_s$ (mm)	$A$ (mm <sup>2</sup> )
Model 1	550	600	190,986	381,972	48	715,944	393769,2
Model 2	650	500	159,155	318,31	48	588,62	382603

Dari tabel di atas terlihat bahwa model 1 memiliki permukaan terluas, sehingga dimensi pada model 1 ini akan dijadikan acuan selanjutnya pada bentuk-bentuk eksentrisitas lainnya.

Setelah mendapatkan dimensi yang memiliki permukaan terluas, maka pada model yang memiliki nilai gap selanjutnya:

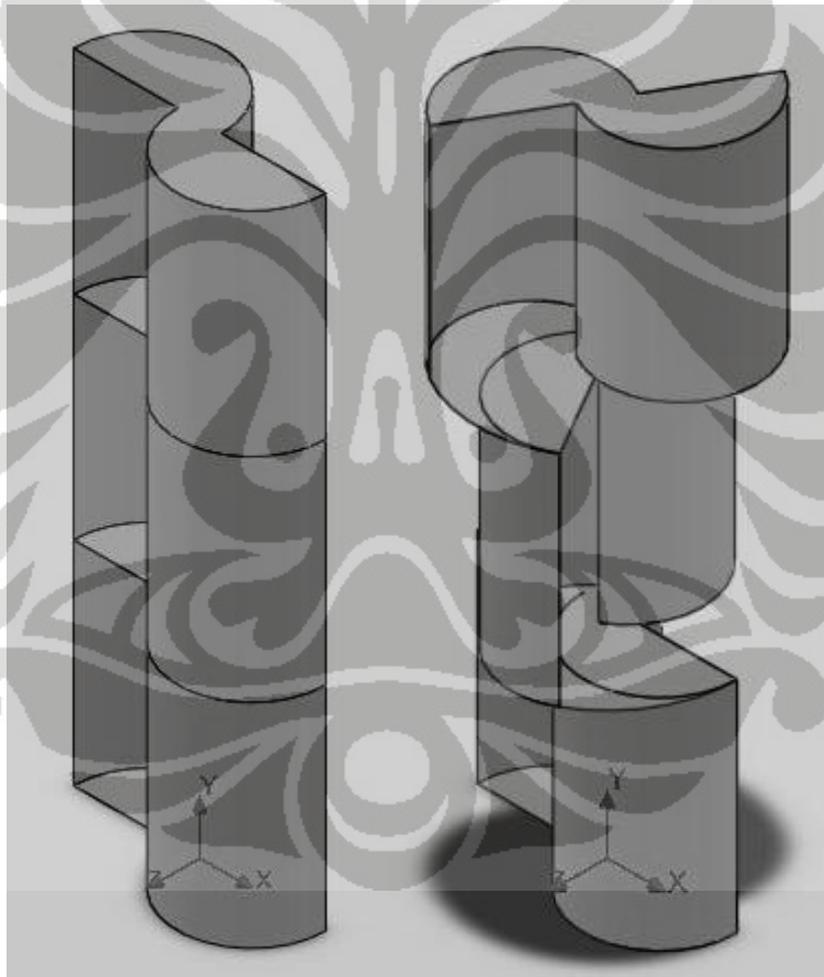
**Tabel 3.3.** Nilai eksentrisitas pada masing-masing gap.

	48	60	76	89	114	140	165	216
$D_s$	715,944	703,944	687,944	674,944	649,944	623,944	598,944	547,944
$t$	550	550	550	550	550	550	550	550
$A$	393769,2	387169,2	374369,2	371219,2	357469,2	343169,2	329419,2	301369,2
$e$	0,067	0,085	0,11	0,132	0,175	0,224	0,275	0,394

### III.2.2.2 Pemodelan Berdasarkan Variasi Model

Pada langkah ini, diambil model yang memiliki nilai validasi dan verifikasi mendekati referensi di antara 8 model eksentrisitas di atas. Sesuai dengan rumus 2.1, maka yang bisa diubah variabelnya adalah variabel luas permukaan ( $A$ ). Langkah yang akan dilakukan adalah dengan cara ditinggikan hingga luas permukaannya menjadi 3 kali ukuran semula (3 lapisan).

Selanjutnya adalah dengan membuat variasi sudut serang sudu turbin angin pada tiap lapisan. Variasi yang pertama dengan membuat 3 lapisan ini tidak memiliki perbedaan sudut (linier). Variasi yang kedua dengan membuat 3 lapisan ini memiliki perbedaan sudut serang sebesar  $60^\circ$ .



**Gambar 3.5.** Variasi bentuk yang akan disimulasikan.

### III.3 Simulasi

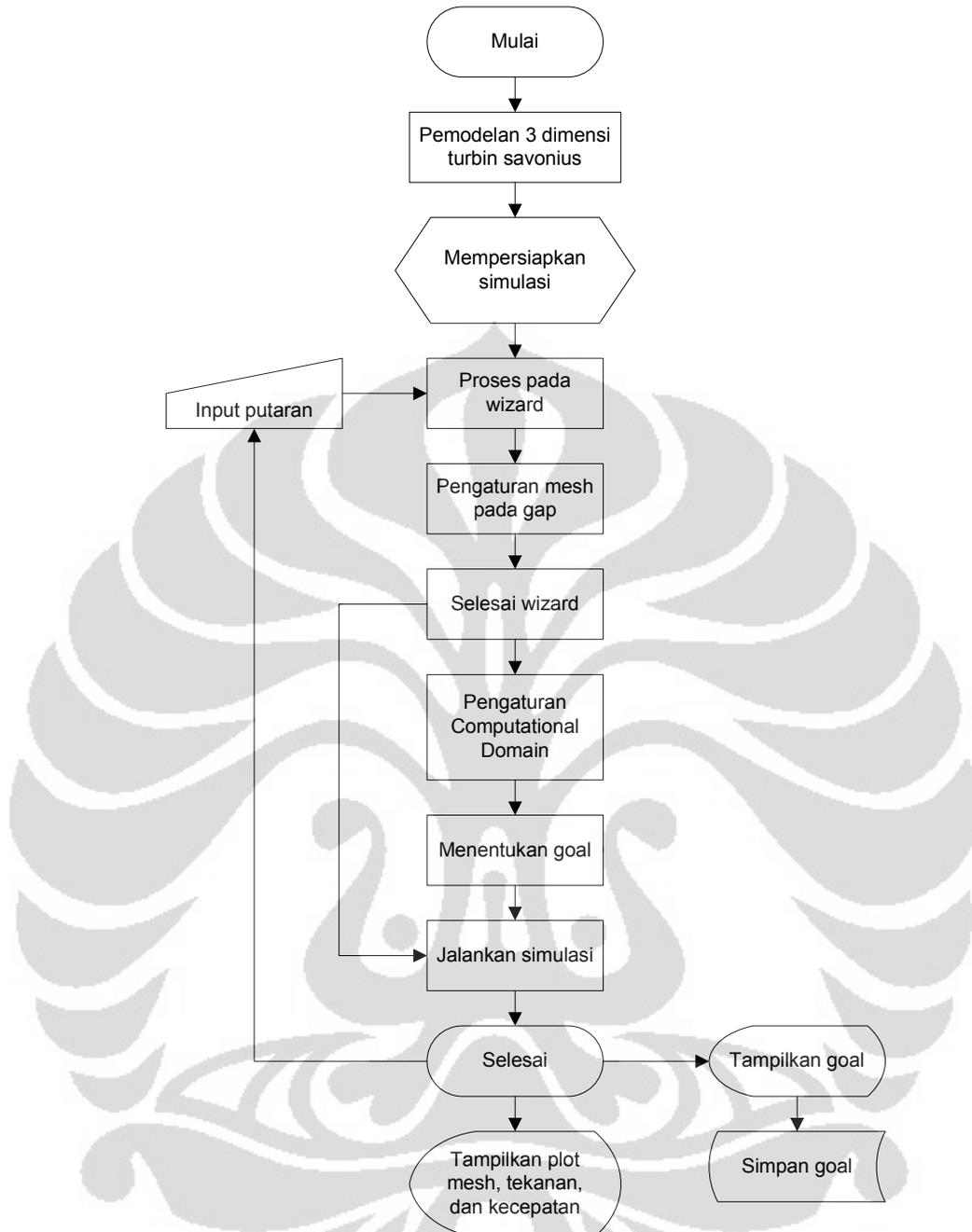
Setelah membuat model sesuai dengan langkah di atas, maka langkah selanjutnya adalah melakukan simulasi pada model-model tersebut. Hal ini dilakukan untuk mencari nilai torsi pada masing-masing model, yang nantinya akan diperoleh daya menurut perhitungan rumus 2.2. Pemodelan dilakukan dengan Solidworks 2009 dan disimulasikan secara CFD dengan Flow Simulation 2009. Setelah geometri turbin dibuat, maka langkah selanjutnya adalah melakukan simulasi dengan memasukkan input-input variabel dan parameter-parameter yang menjadi batas pada simulasi. Hasil yang didapat berupa tampilan geometri yang memiliki plot, kontur, vektor, kisaran tekanan dan kecepatan udara, dan lain sebagainya tergantung dengan apa yang akan dianalisa.

#### III.3.1 Simulasi pada Flow Simulation Solidworks

Pada langkah ini, variabel yang dimasukkan adalah data kecepatan angin rata-rata pada sumbu  $-Z$ . Fluida yang digunakan adalah udara. Asumsi dalam simulasi ini adalah lingkungan dalam kondisi ideal.

Model turbin yang telah ditentukan disimulasikan sesuai dengan variabel data. Untuk mencari nilai maksimum efisiensi yang diperoleh, maka diperlukan variasi parameter data, yaitu perubahan putaran (rpm) dari 0, -5, -10, dan seterusnya (kelipatan 5 rpm), sampai nilai daya bernilai negatif maka perhitungan daya berhenti. Nilai putaran negatif (-) karena putaran yang diinginkan berlawanan dengan putaran jarum jam. Hal ini sesuai dengan aturan tangan kiri, dimana arah angin ditunjukkan dengan arah lengan, putaran ditunjukkan dengan lingkaran jari, sedangkan torsi ditunjukkan oleh ibu jari. Apabila torsi bernilai positif, maka arahnya ke atas (sesuai dengan tangan kiri).

Langkah-langkah simulasinya adalah sebagai berikut:



**Gambar 3.6.** Flowchart simulasi.

Yang dimasukkan dalam *wizard* adalah, jenis fluida yang digunakan, kecepatan angin pada arah sumbu Z, dan input putaran yang diinginkan. Perubahan putaran dilakukan apabila telah melakukan simulasi pada model dengan putaran tertentu sebelumnya. Setelah melakukan pada *wizard*, kemudian tentukan kondisi batas pada *computational domain*, dan menentukan goal nilai torsi pada sumbu Y.

Setelah selesai, tampilkan penampakan *mesh*, tekanan, dan kecepatan untuk memperlihatkan karakteristik fluida tersebut pada daerah hitungan (*computational domain*), serta ditampilkan goal untuk selanjutnya disimpan. Apabila telah menyimpan, lanjut ke putaran selanjutnya, karena dalam simulasi ini hanya perubahan pada putaran turbin. Setelah selesai *wizard* bisa langsung jalankan simulasi, karena *computational domain* dan goal masih sama.

### III.3.2 Validasi dan Verifikasi Model Simulasi

Langkah validasi merupakan proses untuk menentukan kecocokan antara hasil simulasi CFD dan aktualnya. Untuk mendapatkan gambaran validasi rancangan turbin savonius, diperlukan referensi aktual yang membahas turbin savonius secara umum. Yang dibahas dalam validasi ini adalah grafik perubahan nilai  $C_p$  vs TSR (koefisien daya berbanding nilai tip speed ratio) turbin angin savonius secara umum dengan rancangan. Jika nilainya mendekati grafik nilai  $C_p$  vs TSR, maka turbin mampu bekerja lebih baik.

Langkah verifikasi merupakan perbandingan hasil simulasi dengan hasil perhitungan sesuai dengan teori. Yang akan dibandingkan adalah daya menurut simulasi dengan daya secara perhitungan. Daya menurut perhitungan dihitung sesuai dengan rumus 2.1. Sedangkan daya menurut simulasi didapat dari nilai torsi yang dihasilkan simulasi, kemudian dihitung berdasarkan rumus 2.2. Yang dicari dari verifikasi ini adalah nilai *error*-nya, dimana rumusnya adalah sebagai berikut:

$$\text{Error (\%)} = \left[ \frac{C_{\text{pengukuran}} - C_{\text{model}}}{C_{\text{pengukuran}}} \right] \times 100\% \quad (3.1)$$

## BAB IV

### ANALISA HASIL SIMULASI

#### IV.1 Perhitungan Daya Teoritis

Berdasarkan data yang diambil pada pengambilan data pada tanggal 28 Mei 2009:

- Fluida yang menjadi medium adalah udara yang memiliki massa jenis 1,23 kg/m<sup>3</sup>.
- Data kecepatan angin diambil rata-ratanya dan dianggap searah, yaitu  $v = 2$  m/s.

Kemudian ditambah luasan savonius yang menghadap yang dikenai angin sesuai dengan tabel 3.3.

Rumus 2.1 menunjukkan daya yang dihitung secara teoritis, aplikasinya yaitu:

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

**Tabel 4.1.** Perbandingan perolahan daya teoritis pada turbin yang memiliki gap tertentu.

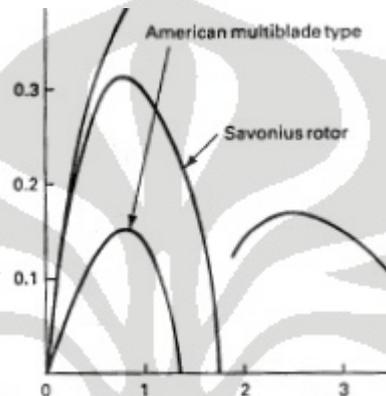
	48	60	76	89	114	140	165	216
	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23
A	0,3937692	0,3871692	0,3743692	0,3712192	0,3574692	0,3431692	0,3294192	0,3013692
v	2	2	2	2	2	2	2	2
$P_t$	0,5812033	0,5714617	0,5525689	0,5479195	0,5276245	0,5065177	0,4862227	0,4448209

Nilai  $C_p$  savonius diambil berdasarkan grafik 2.1 yang bernilai maksimum, yaitu 0,3. Nilai daya maksimum yang ditangkap oleh turbin savonius secara perhitungan teoritis adalah sesuai dengan yang ditunjukkan tabel di atas. Hubungan dengan nilai gap dengan perhitungan secara teoritis adalah nilai daya turbin savonius cenderung mengecil seiring dengan makin membesarnya nilai gap. Hal ini dikarenakan luas permukaan yang menjadi area tangkap turbin angin menjadi mengecil karena pembesaran gap, sesuai dengan rumus di atas. Rumus ini

hanya bisa memodifikasi luas permukaan saja, sedangkan kecepatan angin senantiasa berubah tergantung suhu dan iklim di tiap tempat, dan secara umum massa jenis angin tetap. Dalam hal kasus ini, kecepatan angin diambil nilai rata-ratanya dan dianggap searah.

## IV.2 Validasi Rancangan Turbin Savonius

Grafik umum karakteristik turbin savonius adalah sebagai berikut.



**Gambar 4.1.** Karakteristik turbin mengenai  $C_p$  vs TSR.

Untuk mendapatkan grafik di atas, dibutuhkan persamaan  $C_p$  dan TSR.  $C_p$  sendiri didapat menggunakan rumus 2.1 dengan nilai daya yang digunakan adalah daya simulasi, kemudian faktor pembagiannya adalah daya teoritis yang dibagi dengan  $C_p$  teoritis. Nilai TSR sesuai dengan rumus 2.3. Hasilnya berupa plot grafik yang nilainya dibawah grafik referensi (gambar 4.1).

Untuk yang pertama adalah turbin savonius gap 48 mm.

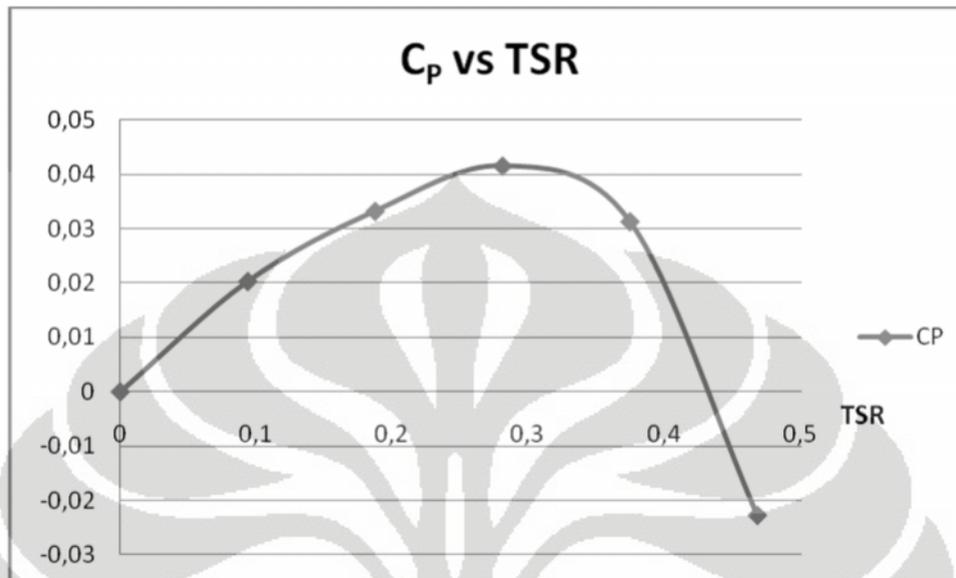
**Tabel 4.2.** Nilai tip speed ratio gap 48 mm.

No	Putaran (rpm)	TSB (m/s)	v (m/s)	TSR
1	0	0	2	0
2	5	0,18733868	2	0,09366934
3	10	0,37467736	2	0,18733868
4	15	0,56201604	2	0,28100802
5	20	0,74935472	2	0,37467736
6	25	0,9366934	2	0,4683467

**Tabel 4.3.** Nilai CP gap 48 mm.

No	Putaran (rpm)	Daya simulasi (Watt)	Daya Teoritis (Watt)	$C_p$
1	0	0	0,581203339	0
2	5	0,039306441	0,581203339	0,020289
3	10	0,06430923	0,581203339	0,033195

4	15	0,080383371	0,581203339	0,041492
5	20	0,060599052	0,581203339	0,031279
6	25	-0,044016267	0,581203339	-0,02272



**Grafik 4.1** Grafik kurva turbin savonius gap 48 mm.

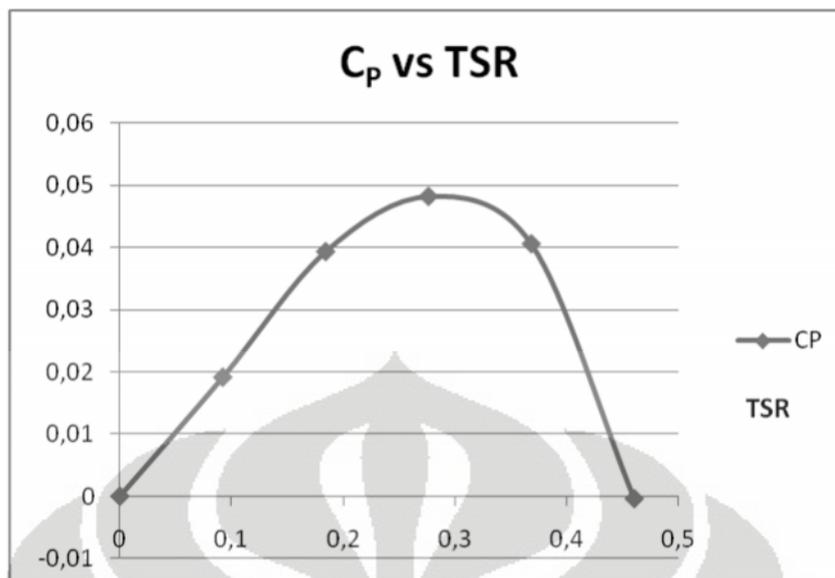
Yang kedua adalah turbin savonius gap 60 mm.

**Tabel 4.4.** Nilai tip speed ratio gap 60 mm.

No	Putaran (rpm)	TSB (m/s)	v (m/s)	TSR
1	0	0	2	0
2	5	0,18419868	2	0,09209934
3	10	0,36839736	2	0,18419868
4	15	0,55259604	2	0,27629802
5	20	0,73679472	2	0,36839736
6	25	0,9209934	2	0,4604967

**Tabel 4.5.** Nilai  $C_p$  gap 60 mm.

No	Putaran (rpm)	Daya simulasi (Watt)	Daya Simulasi (Watt)	$C_p$
1	0	0	0,571461739	0
2	5	0,036377576	0,571461739	0,019097
3	10	0,074819935	0,571461739	0,039278
4	15	0,091702633	0,571461739	0,048141
5	20	0,07720641	0,571461739	0,040531
6	25	-0,000745826	0,571461739	-0,00039



**Grafik 4.2.** Grafik kurva turbin savonius gap 60 mm.

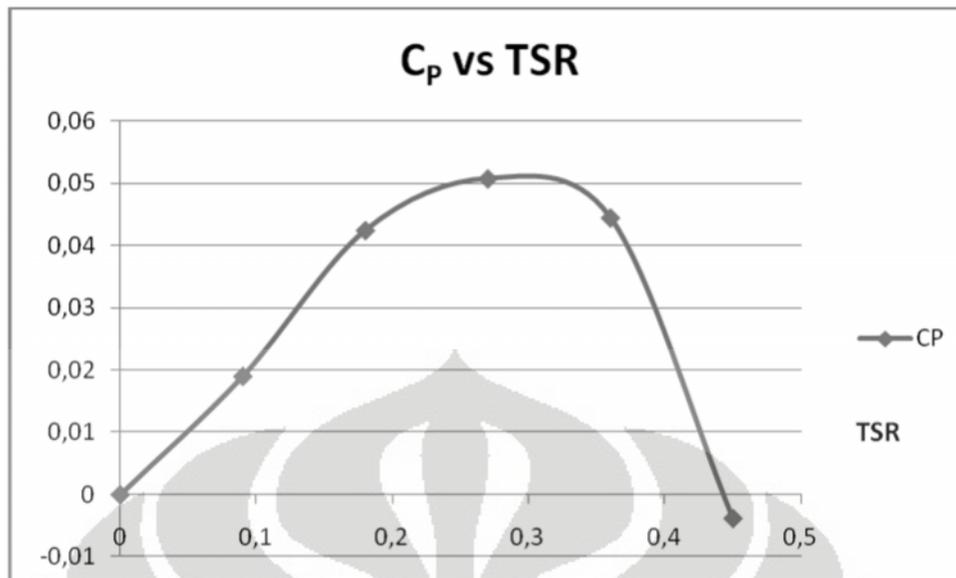
Selanjutnya adalah turbin savonius gap 76 mm.

**Tabel 4.6.** Nilai tip speed ratio gap 76 mm.

No	Putaran (rpm)	TSB (m/s)	v (m/s)	TSR
1	0	0	2	0
2	5	0,180012013	2	0,090006007
3	10	0,360024027	2	0,180012013
4	15	0,54003604	2	0,27001802
5	20	0,720048053	2	0,360024027
6	25	0,900060067	2	0,450030033

**Tabel 4.7.** Nilai  $C_p$  gap 76 mm.

No	Putaran (rpm)	Daya simulasi (Watt)	Daya Simulasi (Watt)	$C_p$
1	0	0	0,552568939	0
2	5	0,035021997	0,552568939	0,019014
3	10	0,078170648	0,552568939	0,04244
4	15	0,09344256	0,552568939	0,050732
5	20	0,081885836	0,552568939	0,044457
6	25	-0,007018319	0,552568939	-0,00381



**Grafik 4.3.** Grafik kurva turbin savonius gap 76 mm.

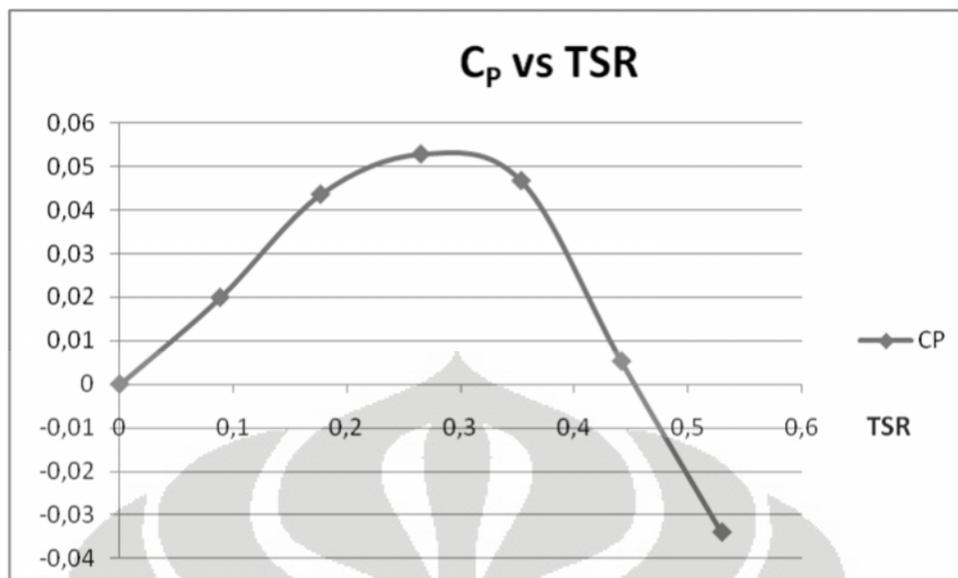
Selanjutnya adalah turbin savonius dengan gap 89 mm.

**Tabel 4.8.** Nilai tip speed ratio gap 89 mm.

No	Putaran (rpm)	TSB (m/s)	v (m/s)	TSR
1	0	0	2	0
2	5	0,176610347	2	0,088305173
3	10	0,353220693	2	0,176610347
4	15	0,52983104	2	0,26491552
5	20	0,706441387	2	0,353220693
6	25	0,883051733	2	0,441525867
7	30	1,05966208	2	0,52983104

**Tabel 4.9.** Nilai  $C_p$  gap 89 mm.

No	Putaran (rpm)	Daya simulasi (Watt)	Daya Simulasi (Watt)	$C_p$
1	0	0	0,547919539	0
2	5	0,036361985	0,547919539	0,019909
3	10	0,079687233	0,547919539	0,043631
4	15	0,096561366	0,547919539	0,05287
5	20	0,085392782	0,547919539	0,046755
6	25	0,009634516	0,547919539	0,005275
7	30	-0,062172281	0,547919539	-0,03404



**Grafik 4.4.** Grafik kurva turbin savonius gap 89 mm.

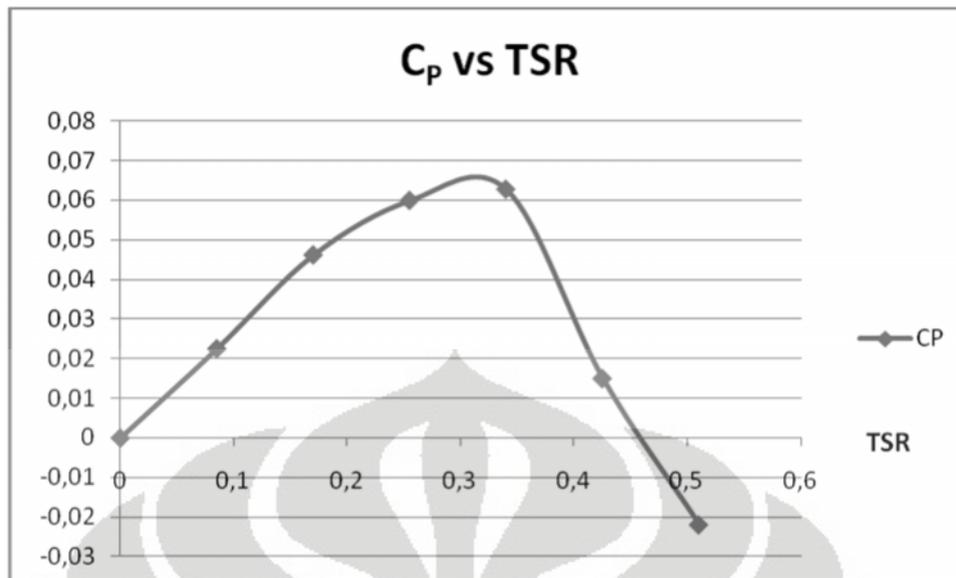
Selanjutnya adalah turbin savonius dengan gap 114 mm.

**Tabel 4.10.** Nilai tip speed ratio gap 114 mm.

No	Putaran (rpm)	TSB (m/s)	v (m/s)	TSR
1	0	0	2	0
2	5	0,17006868	2	0,08503434
3	10	0,34013736	2	0,17006868
4	15	0,51020604	2	0,25510302
5	20	0,68027472	2	0,34013736
6	25	0,8503434	2	0,4251717
7	30	1,02041208	2	0,51020604

**Tabel 4.11.** Nilai  $C_p$  gap 114 mm.

No	Putaran (rpm)	Daya simulasi (Watt)	Daya Perhitungan (Watt)	$C_p$
1	0	0	0,527624539	0
2	5	0,039618891	0,527624539	0,022527
3	10	0,081231954	0,527624539	0,046187
4	15	0,105422839	0,527624539	0,059942
5	20	0,110360406	0,527624539	0,062749
6	25	0,026394368	0,527624539	0,015007
7	30	-0,038517006	0,527624539	-0,0219



**Grafik 4.5.** Grafik kurva turbin savonius gap 114 mm.

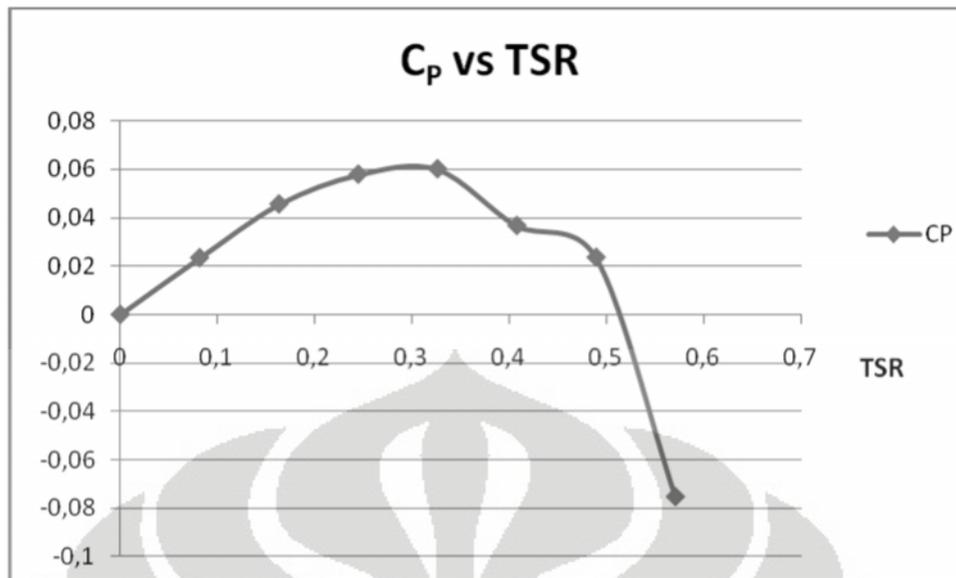
Selanjutnya adalah turbin savonius dengan gap 140 mm.

**Tabel 4.12.** Nilai tip speed ratio gap 140 mm.

No	Putaran (rpm)	TSB (m/s)	v (m/s)	TSR
1	0	0	2	0
2	5	0,163265347	2	0,081632673
3	10	0,326530693	2	0,163265347
4	15	0,48979604	2	0,24489802
5	20	0,653061387	2	0,326530693
6	25	0,816326733	2	0,408163367
7	30	0,97959208	2	0,48979604
8	35	1,142857427	2	0,571428713

**Tabel 4.13.** Nilai  $C_p$  gap 140 mm.

No	Putaran (rpm)	Daya simulasi (Watt)	Daya Simulasi (Watt)	$C_p$
1	0	0	0,506517739	0
2	5	0,039542544	0,506517739	0,0234202
3	10	0,076932513	0,506517739	0,0455655
4	15	0,097663472	0,506517739	0,0578441
5	20	0,101436272	0,506517739	0,0600786
6	25	0,061965205	0,506517739	0,0367007
7	30	0,039821352	0,506517739	0,0235854
8	35	-0,126929365	0,506517739	-0,075178



**Grafik 4.6.** Grafik kurva turbin savonius gap 140 mm.

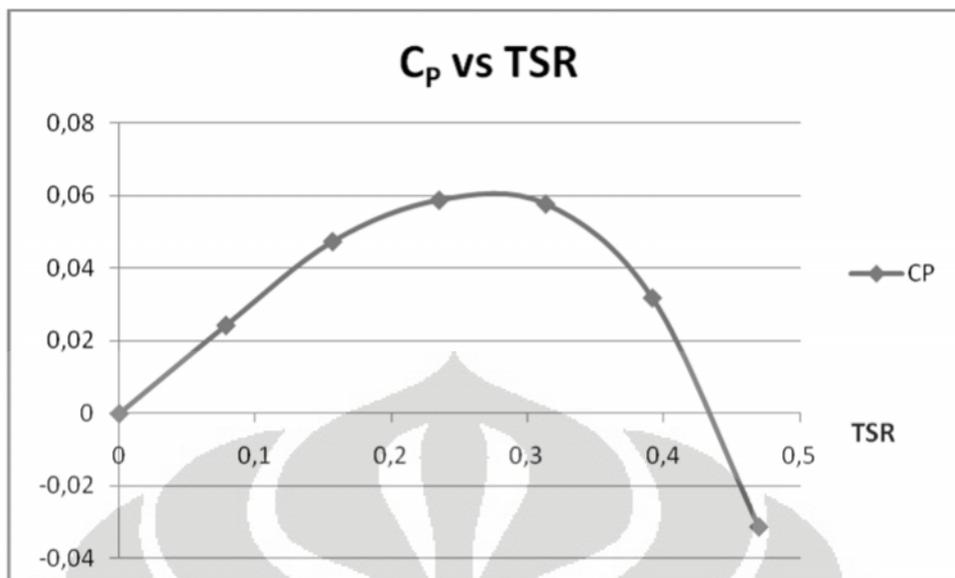
Selanjutnya adalah turbin savonius dengan gap 165 mm.

**Tabel 4.14.** Nilai tip speed ratio gap 165 mm.

No	Putaran (rpm)	TSB (m/s)	v (m/s)	TSR
1	0	0	2	0
2	5	0,15672368	2	0,07836184
3	10	0,31344736	2	0,15672368
4	15	0,47017104	2	0,23508552
5	20	0,62689472	2	0,31344736
6	25	0,7836184	2	0,3918092
7	30	0,94034208	2	0,47017104

**Tabel 4.15.** Nilai  $C_p$  gap 165 mm.

No	Putaran (rpm)	Daya simulasi (Watt)	Daya Simulasi (Watt)	$C_p$
1	0	0	0,486222739	0
2	5	0,039413634	0,486222739	0,0243183
3	10	0,076857505	0,486222739	0,0474212
4	15	0,09538581	0,486222739	0,0588532
5	20	0,093650799	0,486222739	0,0577827
6	25	0,051689769	0,486222739	0,0318926
7	30	-0,05063539	0,486222739	-0,031242



**Grafik 4.7.** Grafik kurva turbin savonius gap 165 mm.

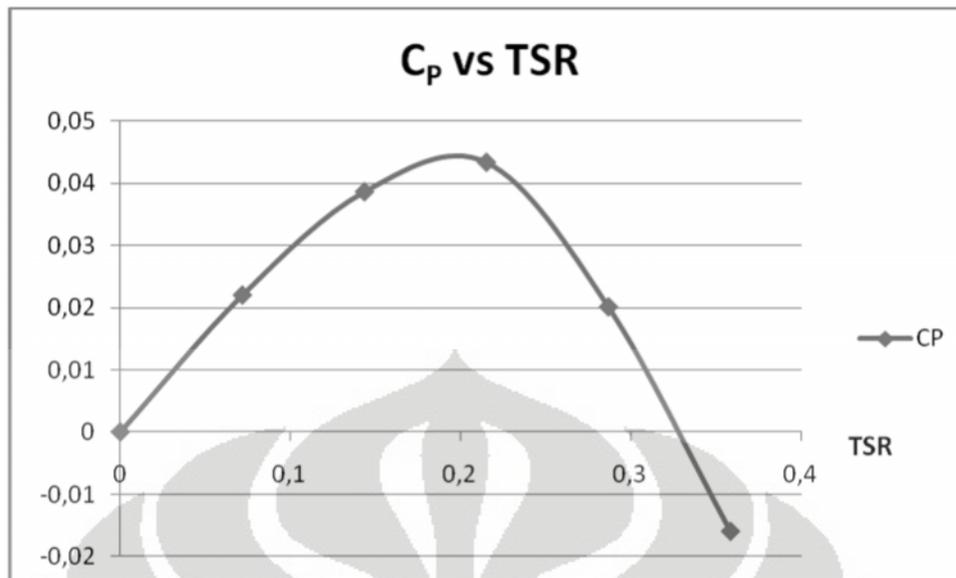
Selanjutnya adalah turbin savonius dengan gap 216 mm.

**Tabel 4.16.** Nilai tip speed ratio gap 216 mm.

No	Putaran (rpm)	TSB (m/s)	v (m/s)	TSR
1	0	0	2	0
2	5	0,14337868	2	0,07168934
3	10	0,28675736	2	0,14337868
4	15	0,43013604	2	0,21506802
5	20	0,57351472	2	0,28675736
6	25	0,7168934	2	0,3584467

**Tabel 4.17.** Nilai  $C_p$  gap 216 mm.

No	Putaran (rpm)	Daya simulasi (Watt)	Daya Simulasi (Watt)	$C_p$
1	0	0	0,444820939	0
2	5	0,032591487	0,444820939	0,0219806
3	10	0,057192636	0,444820939	0,0385724
4	15	0,064190245	0,444820939	0,0432917
5	20	0,029774676	0,444820939	0,0200809
6	25	-0,023655018	0,444820939	-0,015954



**Grafik 4.8.** Grafik kurva turbin savonius gap 216 mm.

Dari hasil validasi pemodelan berdasarkan eksentrisitas, didapatkan bahwa karakteristik rancangan turbin savonius berada di bawah kurva referensi. Artinya perhitungan sesuai dengan penelitian pada umumnya mengenai turbin savonius. Rancangan turbin savonius berdasarkan eksentrisitas ini, yang nilainya mendekati referensi kurva  $C_P$  vs TSR pada secara umum adalah yang memiliki gap 114 mm. Dimana nilai  $C_P$  terbesar adalah 0,062749 yang berada pada TSR 0,34013736 (20 rpm).

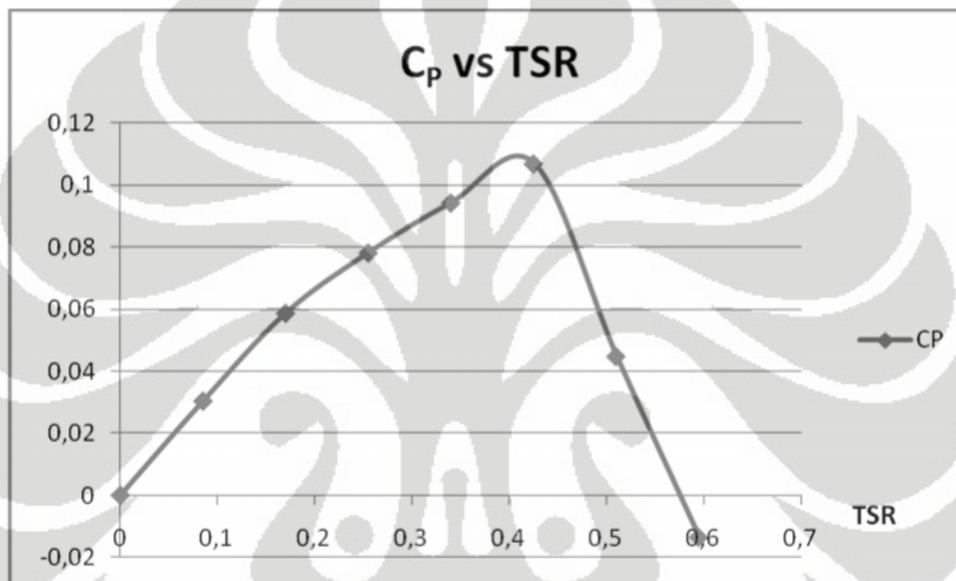
Selanjutnya adalah pemodelan turbin savonius yang dimodifikasi. Untuk yang pertama adalah model turbin savonius gap 114 mm dengan sudut serang sudu linear.

**Tabel 4.18.** Nilai tip speed ratio gap 114 mm sudut serang sudu linear.

No	Putaran (rpm)	TSB (m/s)	v (m/s)	TSR
1	0	0	2	0
2	5	0,17006868	2	0,08503434
3	10	0,34013736	2	0,17006868
4	15	0,51020604	2	0,25510302
5	20	0,68027472	2	0,34013736
6	25	0,8503434	2	0,4251717
7	30	1,02041208	2	0,51020604
8	35	1,19048076	2	0,59524038

**Tabel 4.19.** Nilai  $C_p$  gap 114 mm sudut serang sudu linear.

No	Putaran (rpm)	Daya simulasi (Watt)	Daya Simulasi (Watt)	$C_p$
1	0	0	1,582873618	0
2	5	0,160284706	1,582873618	0,030379
3	10	0,30972658	1,582873618	0,058702
4	15	0,412305805	1,582873618	0,078144
5	20	0,497323904	1,582873618	0,094257
6	25	0,563935102	1,582873618	0,106882
7	30	0,236206971	1,582873618	0,044768
8	35	-0,071827669	1,582873618	-0,01361

**Grafik 4.9.** Grafik kurva turbin savonius gap 114 mm sudut serang sudu linear.

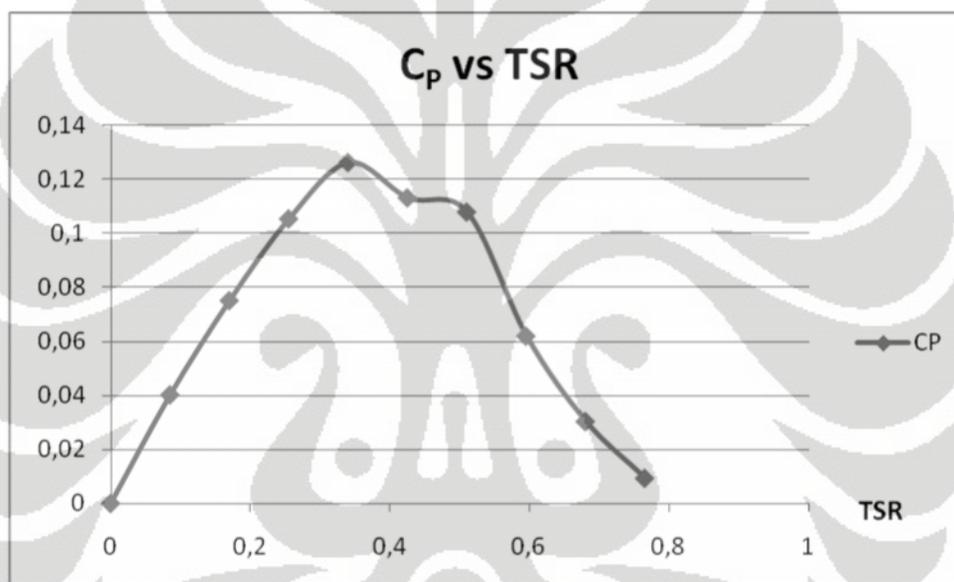
Selanjutnya adalah model turbin savonius gap 114 mm dengan sudut serang sudu  $60^\circ$ .

**Tabel 4.20.** Nilai tip speed ratio gap 114 mm sudut serang sudu  $60^\circ$ .

No	Putaran (rpm)	TSB (m/s)	v (m/s)	TSR
1	0	0	2	0
2	5	0,17006868	2	0,08503434
3	10	0,34013736	2	0,17006868
4	15	0,51020604	2	0,25510302
5	20	0,68027472	2	0,34013736
6	25	0,8503434	2	0,4251717
7	30	1,02041208	2	0,51020604
8	35	1,19048076	2	0,59524038
9	40	1,36054944	2	0,68027472
10	45	1,53061812	2	0,76530906

**Tabel 4.21.** Nilai  $C_p$  gap 114 mm sudut serang sudu  $60^\circ$ .

No	Putaran (rpm)	Daya simulasi (Watt)	Daya Simulasi (Watt)	$C_p$
1	0	0	1,582873618	0
2	5	0,212507296	1,582873618	0,04028
3	10	0,396942316	1,582873618	0,07523
4	15	0,556920772	1,582873618	0,10555
5	20	0,666869687	1,582873618	0,12639
6	25	0,59806253	1,582873618	0,11335
7	30	0,570100324	1,582873618	0,10805
8	35	0,327319622	1,582873618	0,06204
9	40	0,160209472	1,582873618	0,03036
10	45	0,049259551	1,582873618	0,00934

**Grafik 4.10.** Grafik kurva turbin savonius gap 114 mm sudut serang sudu  $60^\circ$ .

Dari hasil validasi pemodelan berdasarkan modifikasi luas permukaan, didapatkan bahwa karakteristik rancangan turbin savonius masih berada di bawah kurva referensi. Artinya perhitungan sesuai dengan penelitian pada umumnya mengenai turbin savonius. Rancangan turbin savonius berdasarkan eksentritas ini, yang nilainya mendekati referensi kurva  $C_p$  vs TSR pada secara umum adalah yang memiliki gap 114 mm dengan modifikasi sudut serang sudu  $60^\circ$ . Dimana nilai  $C_p$  terbesar adalah 0,12639 yang berada pada TSR 0,34013736 (20 rpm).

### IV.3 Perbandingan Hasil Daya Teoritis dengan Daya Simulasi dan Analisa pada Model Berdasarkan Eksentrisitas

Sebelum melakukan simulasi, dikumpulkan terlebih dahulu kondisi-kondisi lingkungan sebagai berikut, di antaranya:

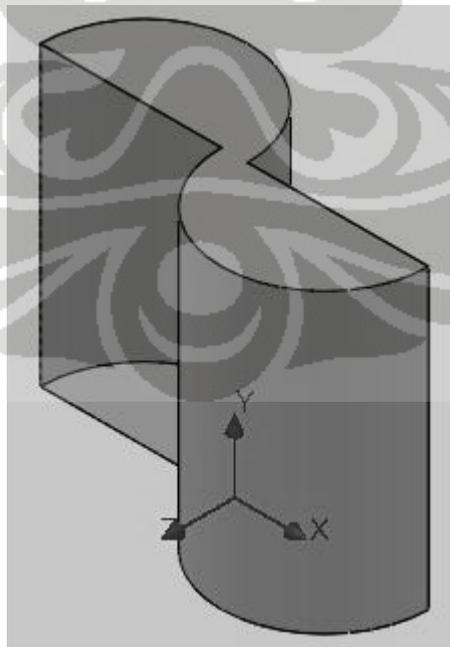
- Aliran fluida bersifat eksternal.
- Suhu lingkungan dianggap ideal.
- Fluida medium, kecepatan angin sesuai dengan perhitungan secara teoritis.

Setelah menciptakan kondisi mendekati kondisi sebenarnya, maka langkah selanjutnya adalah membuat “goal” dari simulasi ini. Yang menjadi “goal” adalah nilai torsi dari model yang telah dibuat. Dari nilai torsi ( $T$ ) tersebut akan dihitung kembali daya simulasi menurut rumus 2.2.

$$P_s = T \frac{2\pi N}{60}$$

#### IV.3.1 Model dengan Gap 48 mm

Pemodelan yang pertama yaitu yang memiliki gap 48 mm, bentuk savonius menyerupai referensi pada umumnya dengan menggunakan tutup pada bagian atas dan bagian bawahnya. Penggunaan tutup pada savonius berguna untuk menangkap angin lebih baik dibanding tidak menggunakan tutup.

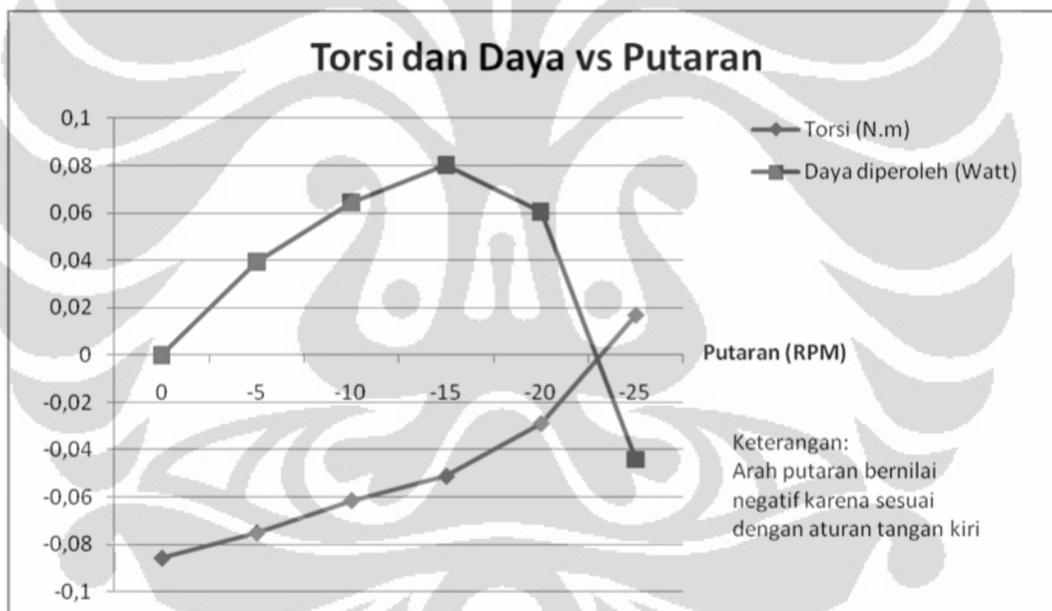


**Gambar 4.2.** Model savonius gap 48 mm.

Setelah melakukan simulasi sesuai dengan langkah simulasi yang terdapat di lampiran, *plot goal* berupa file *sheet* yang berisikan nilai torsi, dihitung manual sesuai dengan rumus 2.2. Hasilnya dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

**Tabel 4.22.** Perolehan daya pada masing-masing putaran model savonius gap 48 mm.

No	Putaran (rpm)	Torsi (N.m)	Daya diperoleh (Watt)
1	0	-0,085769144	0
2	-5	-0,075107849	0,039306441
3	-10	-0,06144194	0,06430923
4	-15	-0,051199599	0,080383371
5	-20	-0,028948592	0,060599052
6	-25	0,016821503	-0,044016267
7	-30	0,045383014	-0,142502664
8	-35	0,08419763	-0,308443986
9	-40	0,095959006	-0,401748371
10	-45	0,101924424	-0,480064036



**Grafik 4.11.** Grafik torsi dan daya vs putaran model savonius gap 48 mm.

Daya yang diperoleh pada gap 48 mm secara teoritis adalah 0,5812033 Watt. Maka *error* yang didapat adalah:

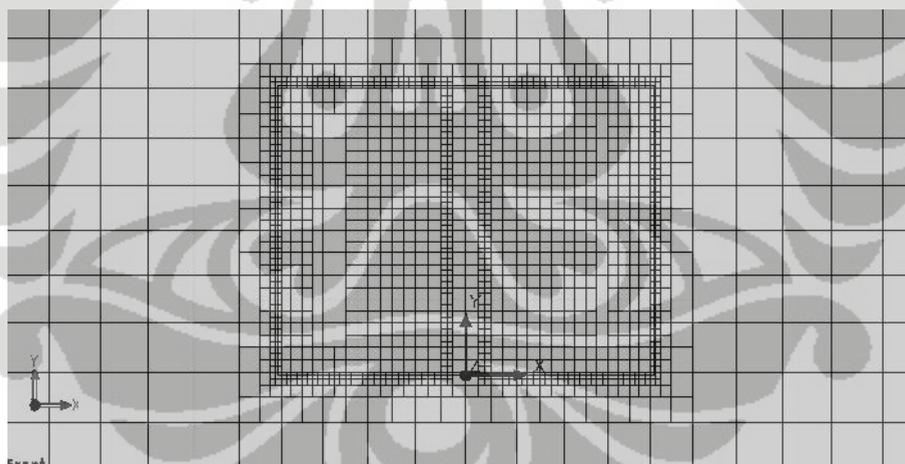
**Tabel 4.23.** Perbandingan *error* simulasi dengan teoritis model savonius gap 48 mm.

Daya Teoritis (Watt)	Daya Simulasi (Watt)	Error (%)
0,581203339	0	100
0,581203339	0,039306441	93,23705868
0,581203339	0,06430923	88,93515813
0,581203339	0,080383371	86,16949261
0,581203339	0,060599052	89,57351959

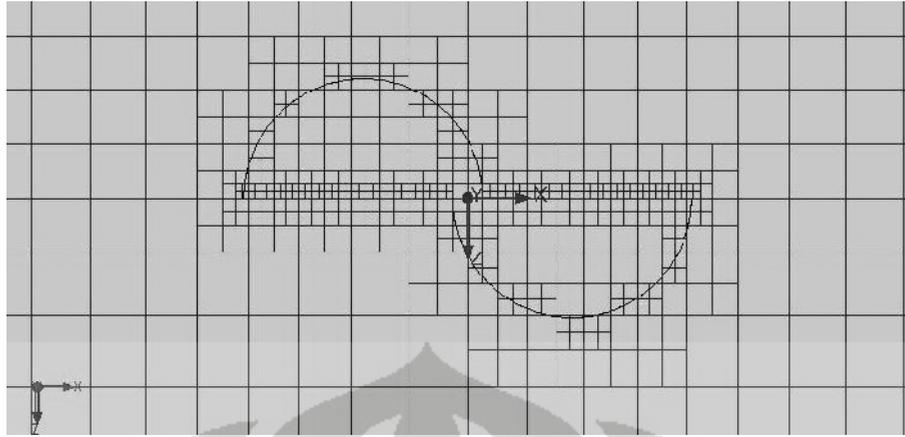
0,581203339	-0,044016267	107,5732991
0,581203339	-0,142502664	124,5185556
0,581203339	-0,308443986	153,0698923
0,581203339	-0,401748371	169,1235483
0,581203339	-0,480064036	182,5982928

Hasil simulasi menunjukkan kenaikan putaran negatif turbin membuat nilai torsi ikut meningkat. Jika nilai torsi mendapatkan nilai positif, maka turbin tidak akan berputar, karena nilai daya menjadi negatif. Torsi negatif yang mampu dicapai turbin adalah saat putaran -20 rpm. Pada model gap 48 mm ( $e = 0,067$ ), daya maksimum yang dihasilkan adalah 0,080383371 Watt pada putaran -15 rpm. Setelah itu, grafik daya turun hingga mendapat nilai daya negatif mulai dari putaran -25 rpm. Nilai *error* terkecil yang didapat adalah 86,169%. Sekarang, diamati hasil simulasi pada model pada saat putaran -15 rpm.

Pertama, dianalisa terlebih dahulu *meshing* fluida pada simulasi turbin angin ini, Karena ingin dicari tekanan dan kecepatan aliran fluida di sekitar daerah perhitungan turbin angin sesuai dengan langkah simulasi yang terdapat di lampiran.



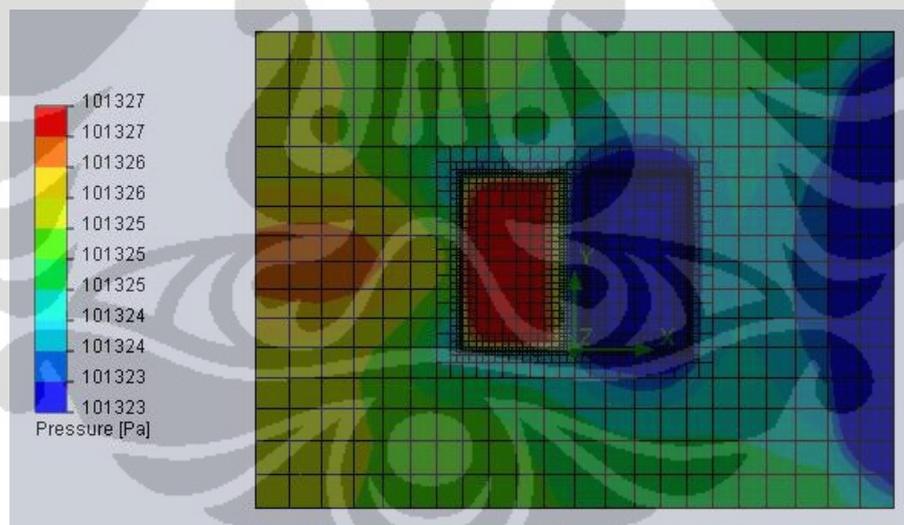
**Gambar 4.3.** Plot tampak depan *meshing* model savonius gap 48 mm.



**Gambar 4.4.** Plot tampak atas *meshing* model savonius gap 48 mm.

Pada gambar yang pertama (tampak depan), kerapatan perhitungan terjadi pada bagian batas fluida dengan turbin. Pada bagian gap (terlihat pada gambar tampak atas), *meshing* sedikit merenggang dibanding pada bagian batas turbin. Pada bagian melengkung turbin, penampakan *meshing* juga seperti pada nilai gap.

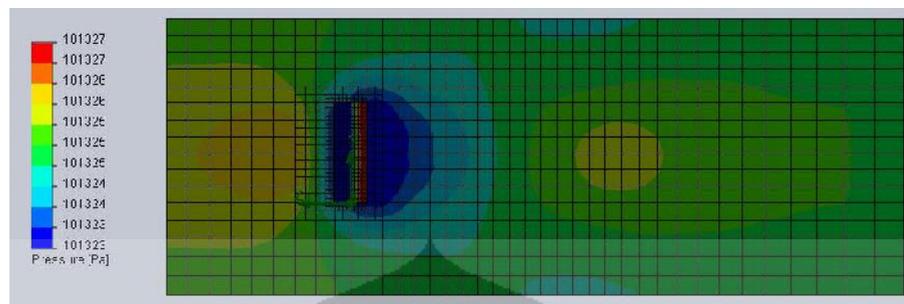
Untuk analisa tekanan, ditampilkan juga penampakan *meshing*, agar terlihat pada bagian yang dihitung mengalami ketelitian simulasi. Penampakan tekanan yang dilihat dibatasi pada nilai 101323 – 101327 Pa.



**Gambar 4.5.** Plot tampak depan tekanan model savonius gap 48 mm.

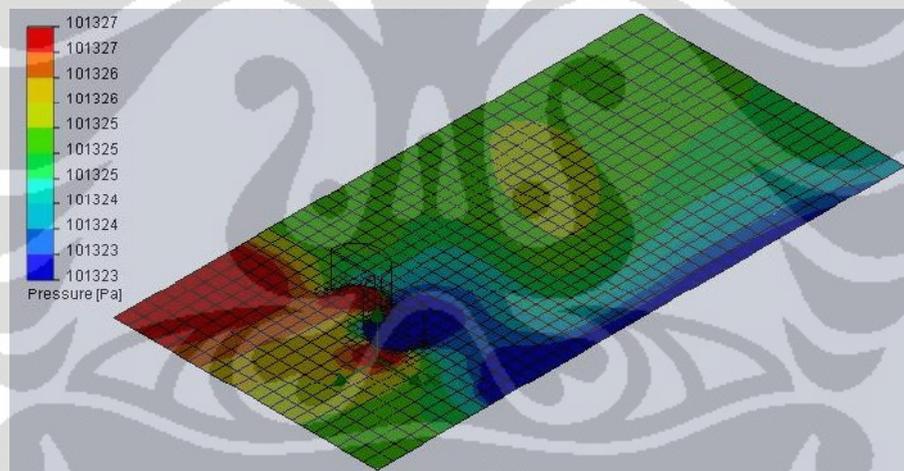
Pada tampak depan di atas, tekanan terbesar terjadi pada bagian lengkungan dalam, karena pada bagian ini turbin secara langsung seperti menangkap aliran angin yang memiliki tekanan tertentu. Tekanan tertinggi ini tampak merata di hampir keseluruhan lengkungan dalam, kecuali pada bagian batas turbin dengan fluida. Pada bagian lengkungan luar terlihat lebih rendah dibanding lengkungan dalam, hal ini menunjukkan bahwa turbin mampu berputar

karena bantuan tekanan angin yang mengalir, sehingga membuat turbin berputar berlawanan arah jarum jam.



**Gambar 4.6.** Plot tampak samping tekanan model savonius gap 48 mm.

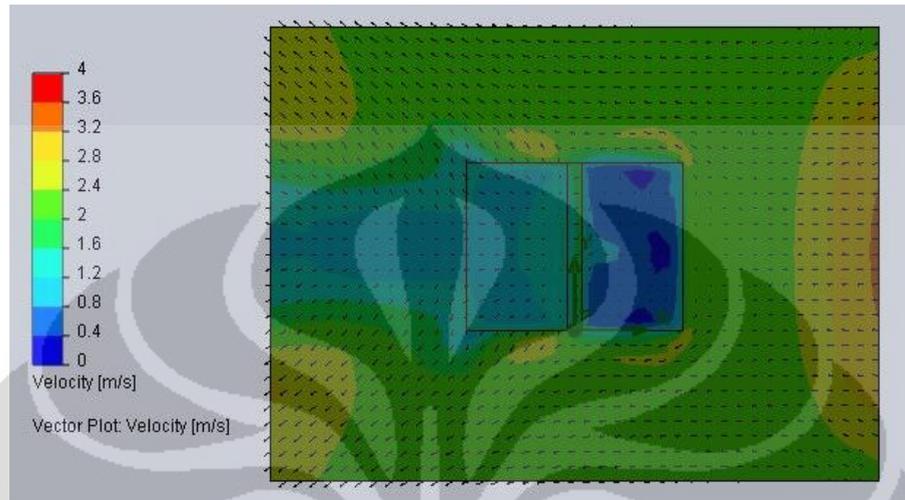
Pada tampak samping di atas, tekanan terbesar terjadi pada saat angin menumbuk permukaan lengkung dalam turbin. Pada permukaan lengkung luar terlihat lebih rendah tekanannya dibanding lengkung dalam, sehingga membuat turbin mampu berputar. Penampakan tekanan besar juga terjadi saat angin akan melewati turbin dan pada jarak tertentu setelah melewati turbin, hal ini dikarenakan turbin mengalami turbulensi pada lokasi tersebut.



**Gambar 4.7.** Plot tampak atas tekanan model savonius gap 48 mm.

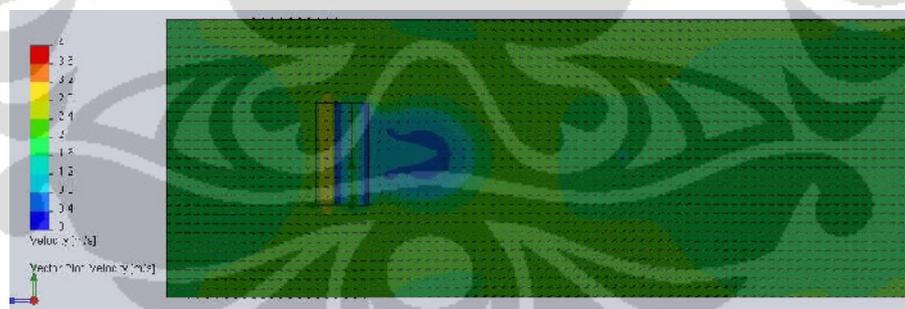
Pada tampak atas yang ditampilkan secara isometri ini, penampakan difokuskan pada bagian tengah turbin. Tekanan besar terjadi pada bagian kiri depan dan tidak pada bagian kanan depan, hal ini dikarenakan pada bagian kiri depan terdapat lengkungan dalam turbin yang menangkap aliran angin. Tekanan besar juga terjadi pada bagian lengkungan dalam dan lengkungan luar, akan tetapi pada bagian lengkungan luar tekanannya tidak sebesar lengkungan dalam. Besarnya luas permukaan tekanan pada bagian lengkungan dalam dibanding pada bagian lengkungan luar membuat turbin mampu berputar.

Selanjutnya beralih ke analisa kecepatan aliran angin. Pada bagian ini ditampilkan juga vektor angin, sehingga mampu memvisualisasikan bagaimana aliran itu terjadi sebenarnya pada tampak tersebut. Pada bagian ini dibatasi penampakannya pada kecepatan 0 – 4 m/s.



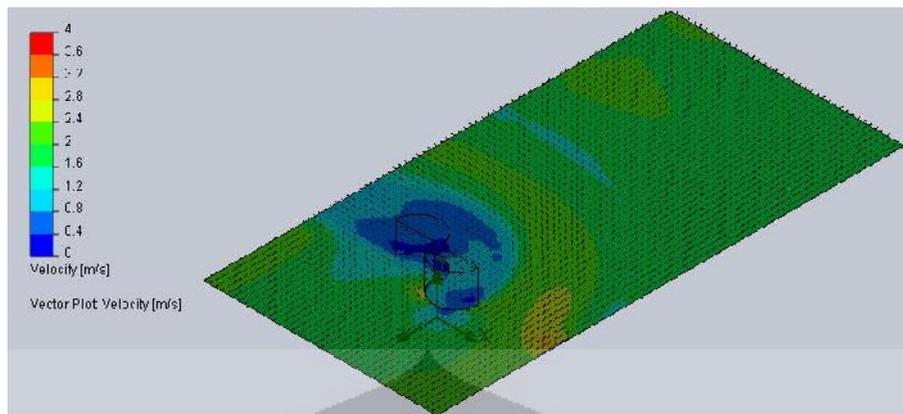
**Gambar 4.8.** Plot tampak depan kecepatan angin model savonius gap 48 mm.

Pada tampak depan, ini, aliran udara menjadi rendah pada turbin dibanding daerah di luar turbin, hal ini dikarenakan fluida tertahan oleh bentuk turbin, pengecualian pada bagian kiri turbin. Aliran terendah terjadi pada bagian lengkung luar turbin angin, hal ini dikarenakan pada bagian ini angin tidak langsung melewati daerah ini karena terhalang lengkung luar turbin.



**Gambar 4.9.** Plot tampak samping kecepatan angin model savonius gap 48 mm.

Pada tampak samping ini, kecepatan aliran udara pada bagian belakang turbin tampak rendah dibanding lingkungan sekitar. Hal ini dikarenakan karena bentuknya yang tidak aerodinamis pada tampak samping dan kosongnya area di belakang turbin, sehingga terjadi turbulensi pada daerah tersebut.

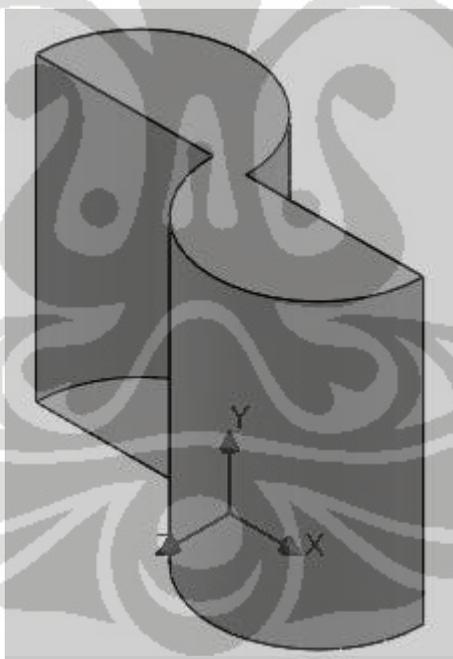


**Gambar 4.10.** Plot tampak atas kecepatan angin model savonius gap 48 mm.

Pada tampak atas yang ditampilkan secara isometri ini, terlihat kecepatan udara terendah ada pada bagian yang terhalang turbin secara langsung. Aliran udara terlihat membelok ke kiri, sesuai yang ditunjukkan vektor kecepatan di atas.

#### IV.3.2 Model dengan Gap 60 mm

Pemodelan selanjutnya yaitu yang memiliki gap 60 mm.

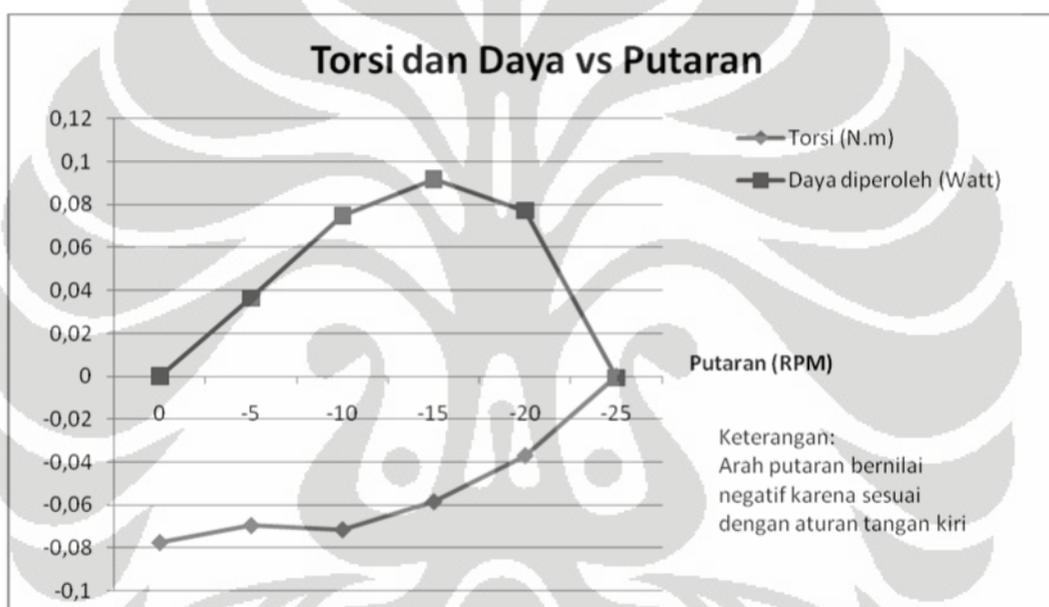


**Gambar 4.11.** Model savonius gap 60 mm.

Setelah melakukan simulasi sesuai dengan langkah simulasi yang terdapat di lampiran, *plot* goal berupa file *sheet* yang berisikan nilai torsi, dihitung manual sesuai dengan rumus 2.2. Hasilnya dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

**Tabel 4.24.** Perolehan daya pada masing-masing putaran model savonius gap 60 mm.

No	Putaran (rpm)	Torsi (N.m)	Daya diperoleh (Watt)
1	0	-0,077475658	0
2	-5	-0,069511292	0,036377576
3	-10	-0,071484015	0,074819935
4	-15	-0,05840932	0,091702633
5	-20	-0,036882043	0,07720641
6	-25	0,000285029	-0,000745826
7	-30	0,03846318	-0,120774387
8	-35	0,049870825	-0,182693457
9	-40	0,072320402	-0,302781415
10	-45	0,082507659	-0,388611073

**Grafik 4.12.** Grafik torsi dan daya vs putaran model savonius gap 60 mm.

Daya yang diperoleh pada gap 60 mm secara teoritis adalah 0,5714617 Watt. Maka *error* yang didapat adalah:

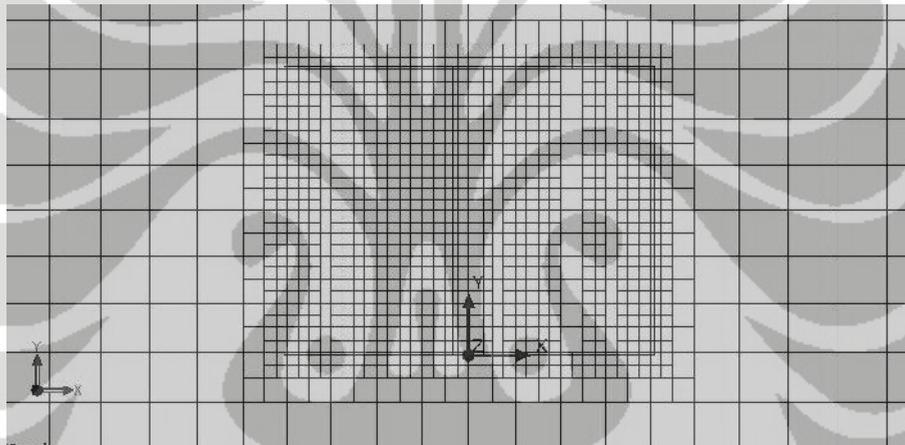
**Tabel 4.25.** Perbandingan *error* simulasi dengan teoritis model savonius gap 60 mm.

Daya Teoritis (Watt)	Daya Simulasi (Watt)	Error (%)
0,571461739	0	100
0,571461739	0,036377576	93,63429365
0,571461739	0,074819935	86,90727126
0,571461739	0,091702633	83,95297072
0,571461739	0,07720641	86,48966245
0,571461739	-0,000745826	100,1305119
0,571461739	-0,120774387	121,1342909
0,571461739	-0,182693457	131,9694994
0,571461739	-0,302781415	152,9836723

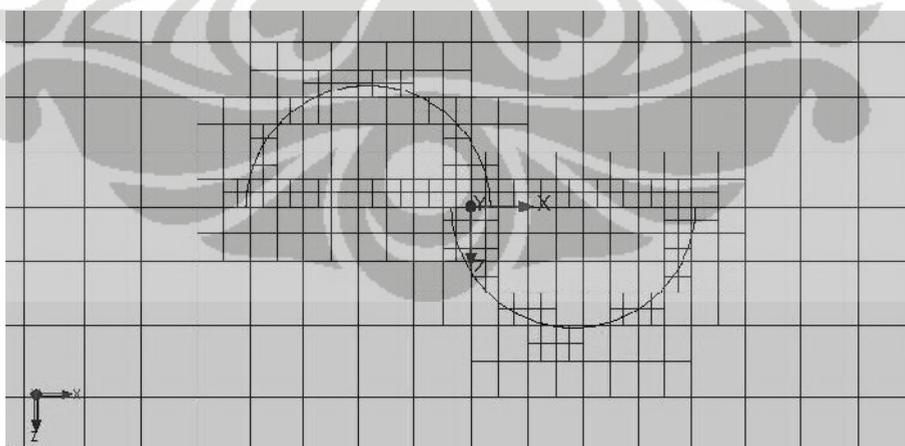
0,571461739	-0,388611073	168,0029907
-------------	--------------	-------------

Dari grafik di atas, torsi negatif yang mampu dicapai turbin adalah saat putaran -20 rpm. Pada model gap 60 mm ( $e = 0,085$ ), daya maksimum yang dihasilkan adalah 0,091702633 Watt pada putaran -15 rpm. Setelah itu, grafik daya turun hingga mendapat nilai daya negatif mulai dari putaran -25 rpm. Nilai *error* terkecil yang didapat adalah 83,953%. Sekarang, diamati hasil simulasi pada model pada saat putaran -15 rpm.

Pertama, dianalisa terlebih dahulu *meshing* fluida pada simulasi turbin angin ini, Karena ingin dicari tekanan dan kecepatan aliran fluida di sekitar daerah perhitungan turbin angin sesuai dengan langkah simulasi yang terdapat di lampiran.



**Gambar 4.12.** Plot tampak depan *meshing* model savonius gap 60 mm.

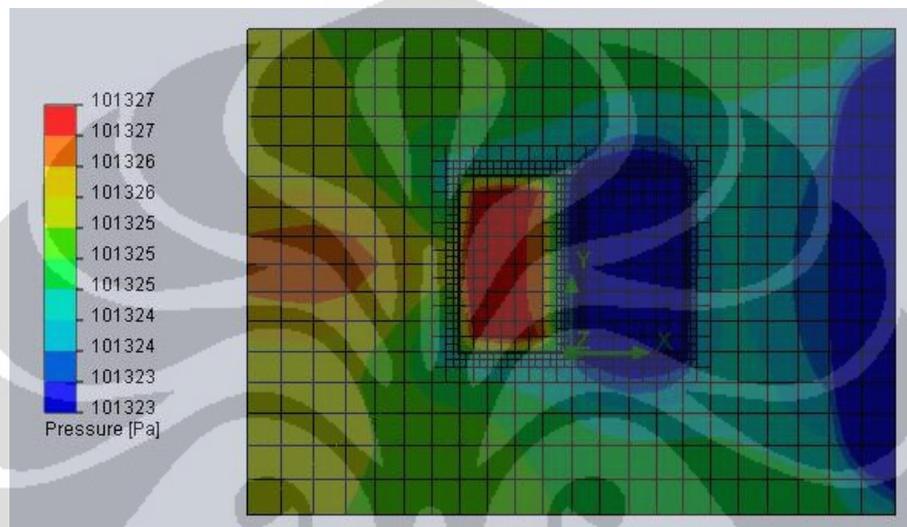


**Gambar 4.13.** Plot tampak atas *meshing* model savonius gap 60 mm.

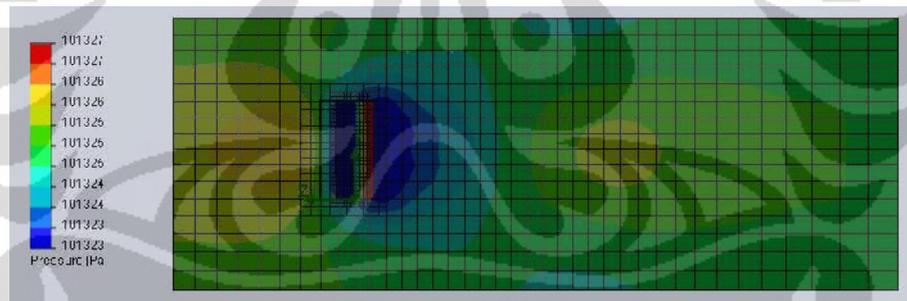
Untuk *meshing* gap 60, terlihat sedikit lebih renggang dibanding pada bagian batas fluida dengan turbin. Akan tetapi kerapatan perhitungan tetap terjadi

pada bagian tersebut dibanding area lainnya, karena daerah tersebut merupakan daerah persinggungan fluida dengan turbin. Pada bagian melengkung turbin, penampakan *meshing* juga seperti pada nilai gap.

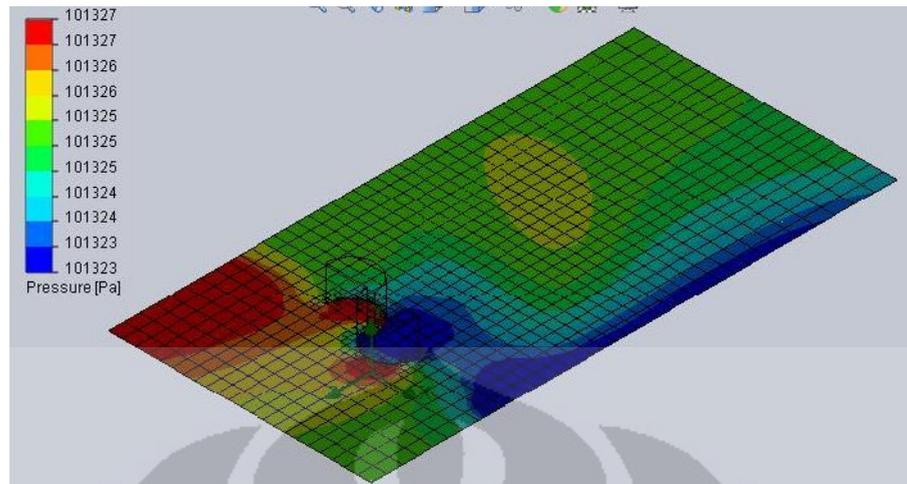
Serupa dengan gap 48, untuk analisa tekanan ditampilkan juga penampakan *meshing*, agar terlihat pada bagian yang dihitung mengalami ketelitian simulasi. Penampakan tekanan yang dilihat dibatasi pada nilai 101323 – 101327 Pa.



**Gambar 4.14.** Plot tampak depan tekanan model savonius gap 60 mm.



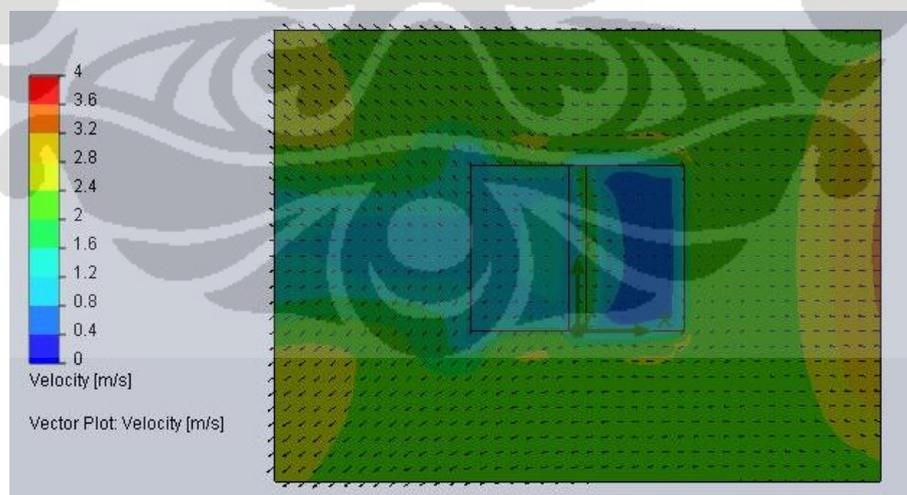
**Gambar 4.15.** Plot tampak samping tekanan model savonius gap 60 mm.



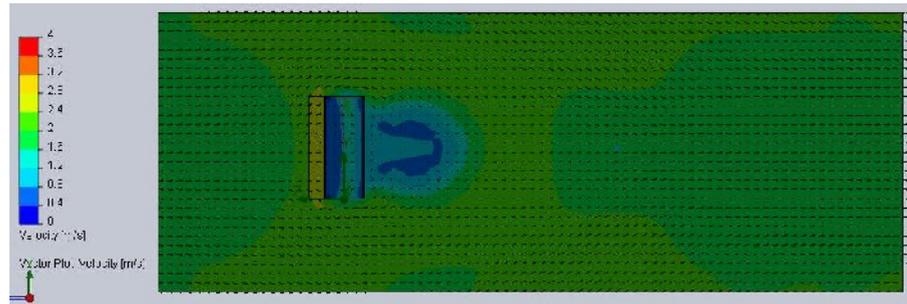
**Gambar 4.16.** Plot tampak atas tekanan model savonius gap 60 mm.

Hampir serupa dengan plot tampak depan pada gap 48 mm, perbedaannya hanya pada bagian lengkung dalam luas permukaan untuk tekanan yang lebih tinggi cenderung berkurang dibanding gap 48. Hal ini disebabkan karena luas permukaan lengkung dalam mengecil karena perbesaran gap, sehingga tekanan yang terjadi tidak seluas gap 48. Penampakan turbulensi pun terlihat pada tampak samping, dimana pola aliran apabila dilihat secara horizontal dari kiri ke kanan berupa plot tekanan tinggi – mengenai turbin – tekanan rendah – dan tekanan tinggi lagi setelah terjadi turbulensi.

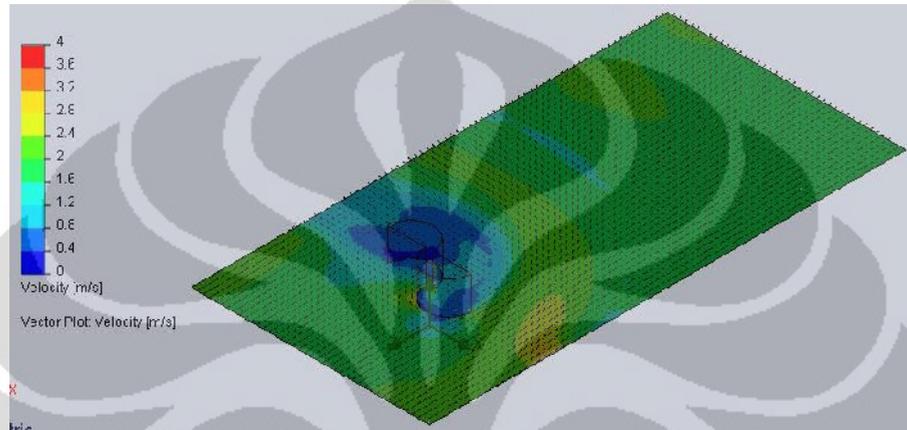
Kemudian diamati plot kecepatan udara beserta vektornya dengan cara yang sama dengan gap 48. Batasan kecepatan juga pada 0 – 4 m/s.



**Gambar 4.17.** Plot tampak depan kecepatan angin model savonius gap 60 mm.



**Gambar 4.18.** Plot tampak samping kecepatan angin model savonius gap 60 mm.

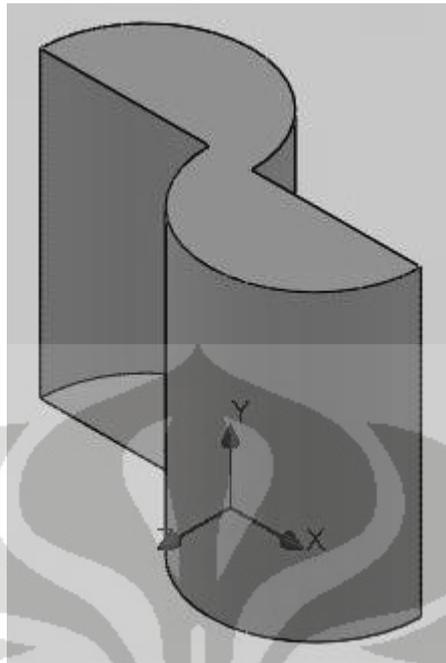


**Gambar 4.19.** Plot tampak atas kecepatan angin model savonius gap 60 mm.

Pola aliran kecepatan udara cenderung serupa dengan gap 48 mm. Sedikit perbedaan pada bagian lengkung luar dimana luas permukaan untuk area dengan kecepatan angin rendah menjadi berkurang.

#### IV.3.3 Model dengan Gap 76 mm

Pemodelan selanjutnya yaitu yang memiliki gap 76 mm.

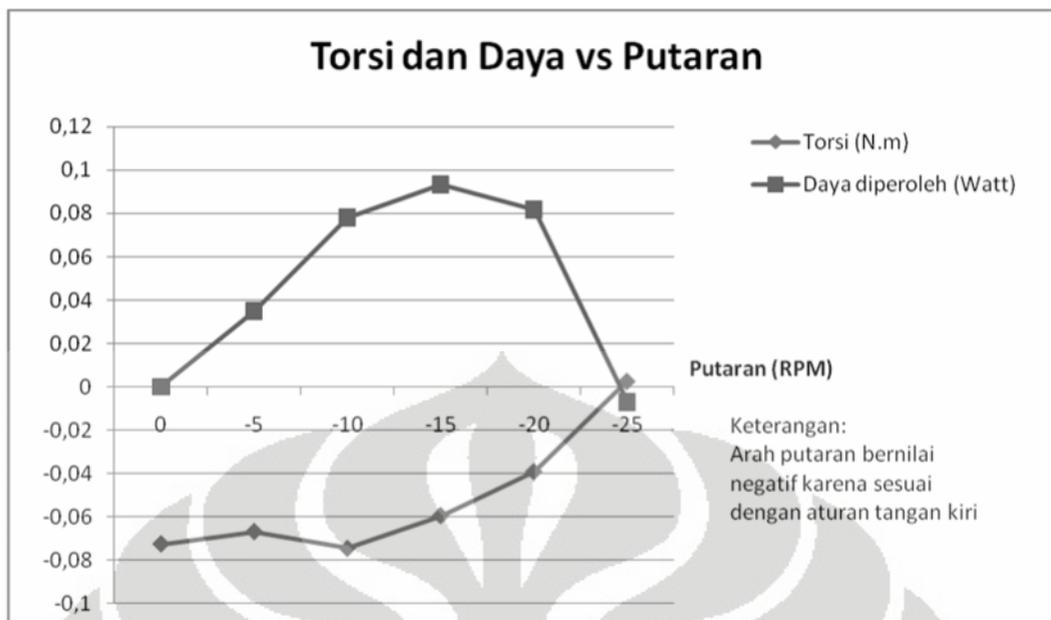


**Gambar 4.20.** Model savonius gap 76 mm.

Setelah melakukan simulasi sesuai dengan langkah simulasi yang terdapat di lampiran, *plot* goal berupa file *sheet* yang berisikan nilai torsi, dihitung manual sesuai dengan rumus 2.2. Hasilnya dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

**Tabel 4.26.** Perolehan daya pada masing-masing putaran model savonius gap 76 mm.

No	Putaran (rpm)	Torsi (N.m)	Daya diperoleh (Watt)
1	0	-0,07259715	0
2	-5	-0,066921013	0,035021997
3	-10	-0,074685333	0,078170648
4	-15	-0,059517554	0,09344256
5	-20	-0,039117438	0,081885836
6	-25	0,00268216	-0,007018319
7	-30	0,02880751	-0,09045558
8	-35	0,050630153	-0,185475126
9	-40	0,070149061	-0,293690736
10	-45	0,077323533	-0,36419384



**Grafik 4.13.** Grafik torsi dan daya vs putaran model savonius gap 76 mm.

Daya yang diperoleh pada gap 76 mm secara teoritis adalah 0,5525689 Watt. Maka *error* yang didapat adalah:

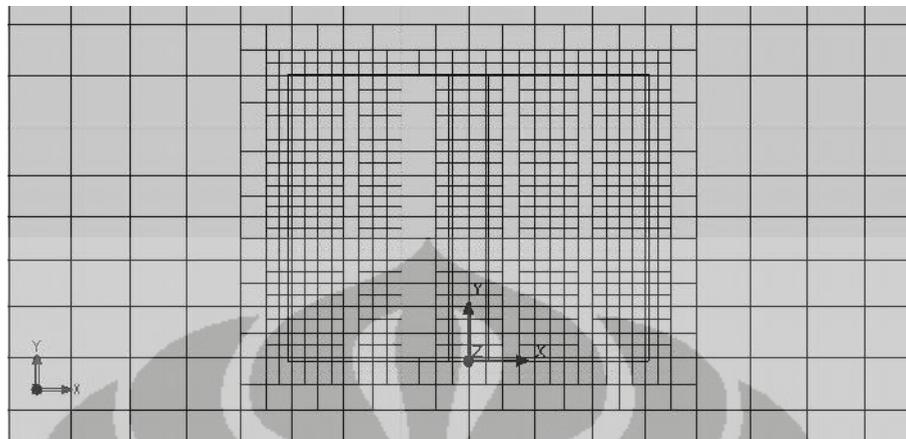
**Tabel 4.27.** Perbandingan *error* simulasi dengan teoritis model savonius gap 76 mm.

Daya Teoritis (Watt)	Daya Simulasi (Watt)	Error (%)
0,552568939	0	100
0,552568939	0,035021997	93,66196789
0,552568939	0,078170648	85,85323159
0,552568939	0,09344256	83,08942943
0,552568939	0,081885836	85,18088327
0,552568939	-0,007018319	101,2701255
0,552568939	-0,09045558	116,3700081
0,552568939	-0,185475126	133,5659703
0,552568939	-0,293690736	153,1500623
0,552568939	-0,36419384	165,9092132

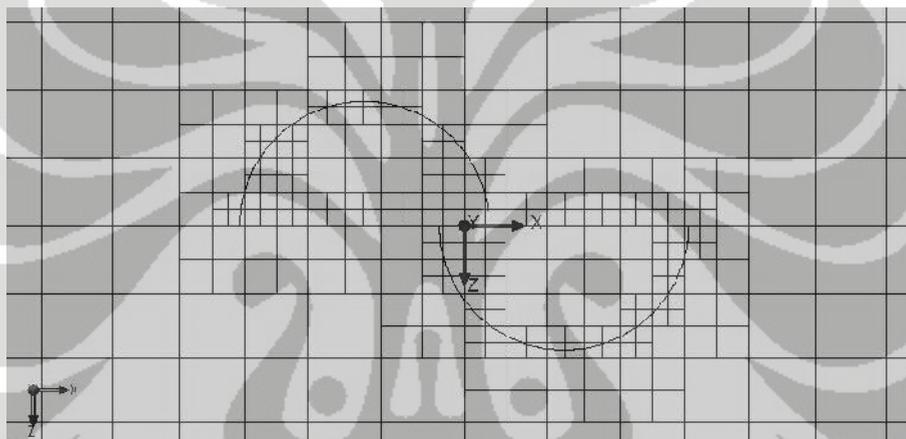
Dari grafik di atas, torsi negatif yang mampu dicapai turbin adalah saat putaran -20 rpm. Pada model gap 76 mm ( $e = 0,11$ ), daya maksimum yang dihasilkan adalah 0,09344256 Watt pada putaran -15 rpm. Setelah itu, grafik daya turun hingga mendapat nilai daya negatif mulai dari putaran -25 rpm. Nilai *error* terkecil yang didapat adalah 83,089%. Sekarang, diamati hasil simulasi pada model pada saat putaran -15 rpm.

Pertama, dianalisa terlebih dahulu *meshing* fluida pada simulasi turbin angin ini, Karena ingin dicari tekanan dan kecepatan aliran fluida di sekitar daerah

perhitungan turbin angin sesuai dengan langkah simulasi yang terdapat di lampiran.



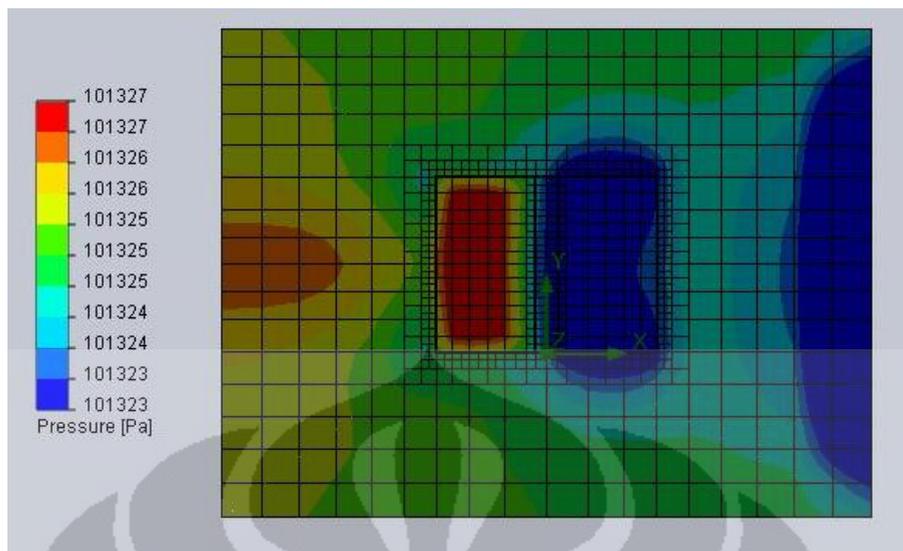
**Gambar 4.21.** Plot tampak depan *meshing* model savonius gap 76 mm.



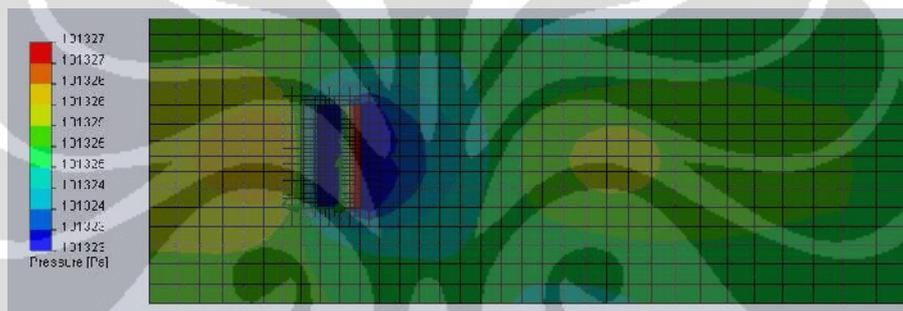
**Gambar 4.22.** Plot tampak atas *meshing* model savonius gap 76 mm.

Untuk *meshing* gap 76, terlihat sedikit lebih renggang pada tampak depan dibanding. Untuk tampak atas, kerapatan *meshing* tetap terlihat pada daerah batas antara fluida dengan turbin.

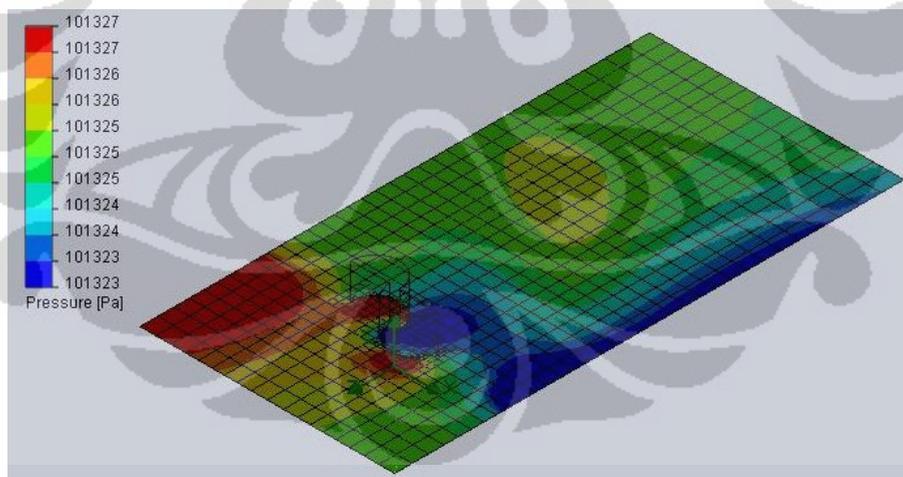
Serupa dengan 2 model sebelumnya, untuk analisa tekanan ditampilkan juga penampakan *meshing*, agar terlihat pada bagian yang dihitung mengalami ketelitian simulasi. Penampakan tekanan yang dilihat dibatasi pada nilai 101323 – 101327 Pa.



**Gambar 4.23.** Plot tampak depan tekanan model savonius gap 76 mm.



**Gambar 4.24.** Plot tampak samping tekanan model savonius gap 76 mm.

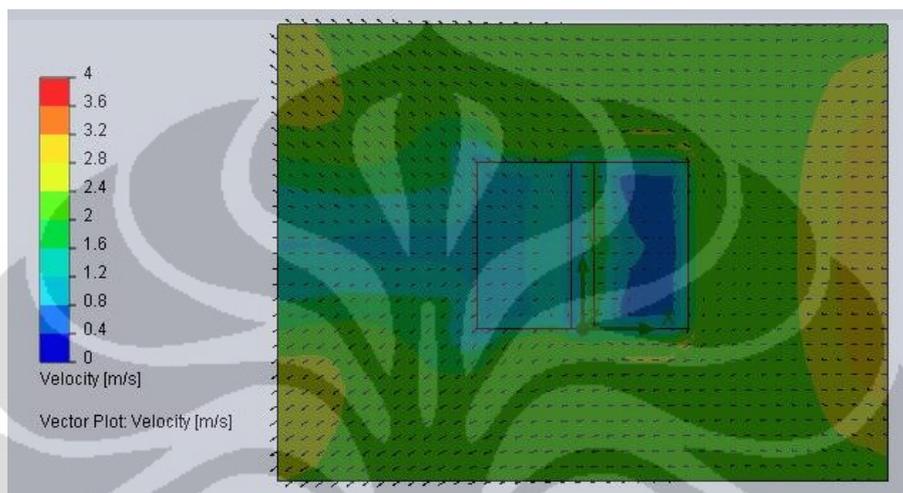


**Gambar 4.25.** Plot tampak atas tekanan model savonius gap 76 mm.

Hampir serupa dengan plot tampak depan pada dua model sebelumnya, perbedaannya hanya pada bagian lengkung dalam luas permukaan untuk tekanan yang lebih tinggi cenderung berkurang dibanding dua model sebelumnya. Hal ini disebabkan karena luas permukaan lengkung dalam mengecil karena perbesaran gap, sehingga tekanan yang terjadi tidak seluas dua model sebelumnya.

Penampakan turbulensi pun terlihat pada tampak samping, dimana pola aliran apabila dilihat secara horizontal dari kiri ke kanan berupa plot tekanan tinggi – mengenai turbin – tekanan rendah – dan tekanan tinggi lagi setelah terjadi turbulensi.

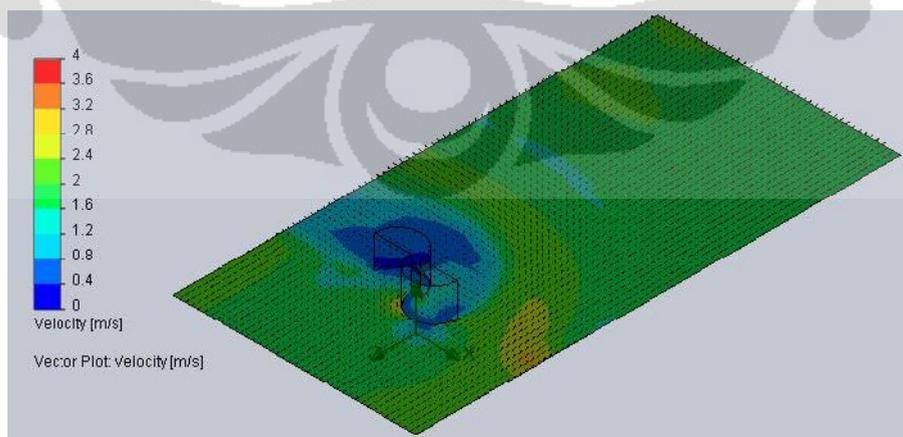
Kemudian diamati plot kecepatan udara beserta vektornya dengan cara yang sama dengan gap 48. Batasan kecepatan juga pada 0 – 4 m/s.



**Gambar 4.26.** Plot tampak depan kecepatan angin model savonius gap 76 mm.



**Gambar 4.27.** Plot tampak samping kecepatan angin model savonius gap 76 mm.

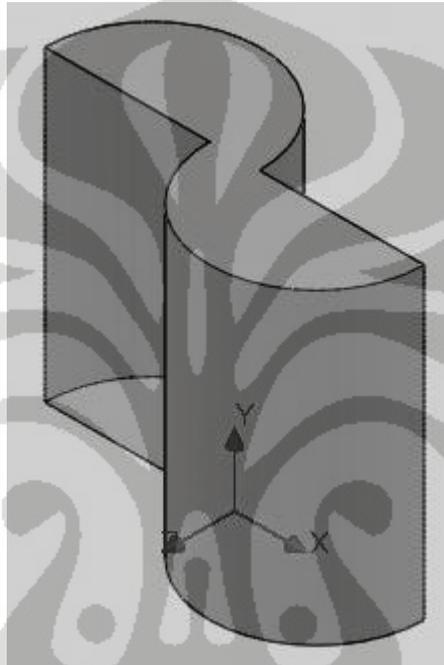


**Gambar 4.28.** Plot tampak atas kecepatan angin model savonius gap 76 mm.

Pola aliran kecepatan udara cenderung serupa dengan gap dua model sebelumnya. Sedikit perbedaan pada bagian lengkung luar dimana luas permukaan untuk area dengan kecepatan angin rendah menjadi berkurang dibanding dua model sebelumnya.

#### IV.3.4 Model dengan Gap 89 mm

Pemodelan selanjutnya yaitu yang memiliki gap 89 mm.

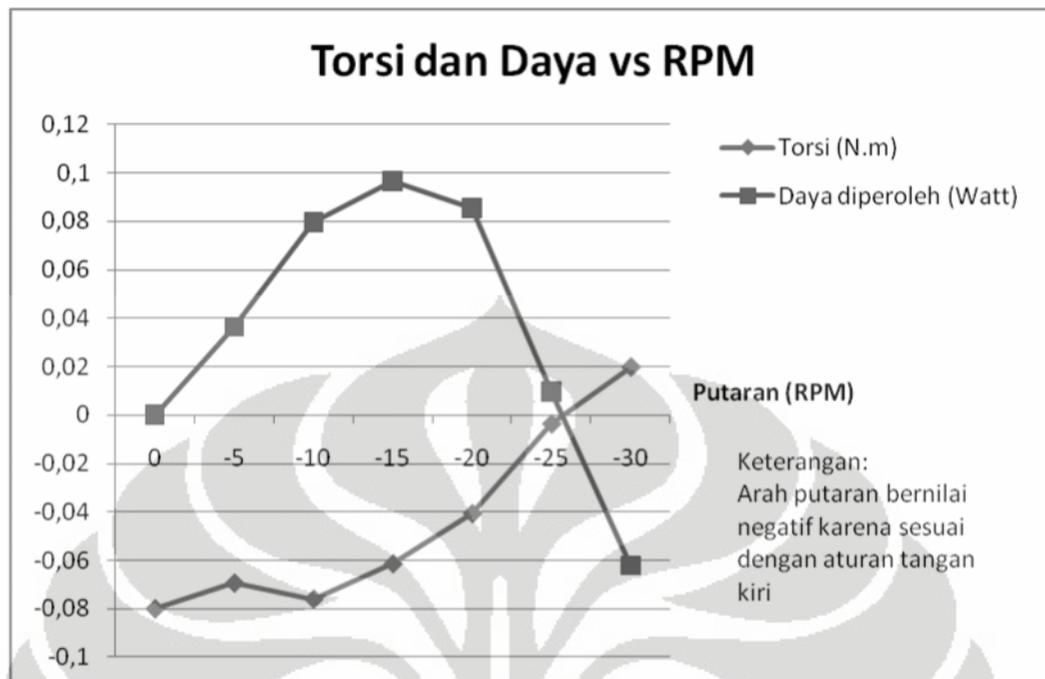


Gambar 4.29. Model savonius gap 89 mm.

Setelah melakukan simulasi sesuai dengan langkah simulasi yang terdapat di lampiran, *plot* goal berupa file *sheet* yang berisikan nilai torsi, dihitung manual sesuai dengan rumus 2.2. Hasilnya dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 4.28. Perolehan daya pada masing-masing putaran model savonius gap 89 mm.

No	Putaran (rpm)	Torsi (N.m)	Daya diperoleh (Watt)
1	0	-0,080099509	0
2	-5	-0,0694815	0,036361985
3	-10	-0,076134299	0,079687233
4	-15	-0,061504055	0,096561366
5	-20	-0,04079273	0,085392782
6	-25	-0,003681981	0,009634516
7	-30	0,019800089	-0,062172281
8	-35	0,044601315	-0,163389484
9	-40	0,059409576	-0,248728091
10	-45	0,073890589	-0,348024672



**Grafik 4.14.** Grafik torsi dan daya vs putaran model savonius gap 89 mm.

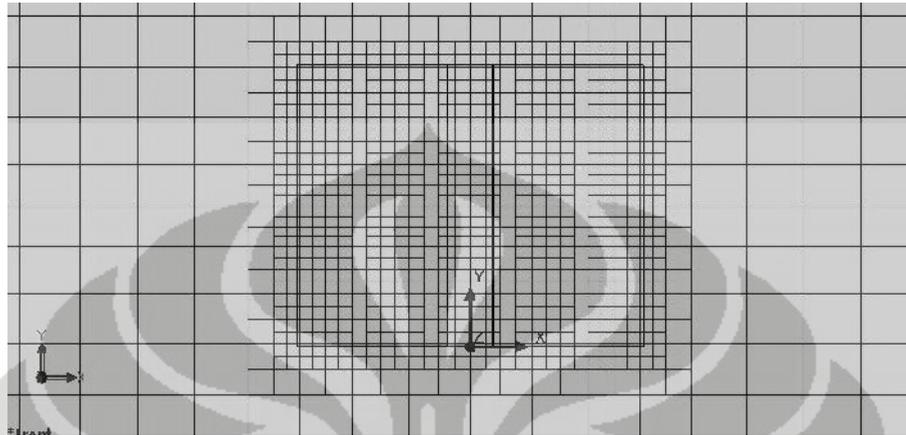
Daya yang diperoleh pada gap 89 mm secara teoritis adalah 0,5479195 Watt. Maka *error* yang didapat adalah:

**Tabel 4.29.** Perbandingan *error* simulasi dengan teoritis model savonius gap 89 mm.

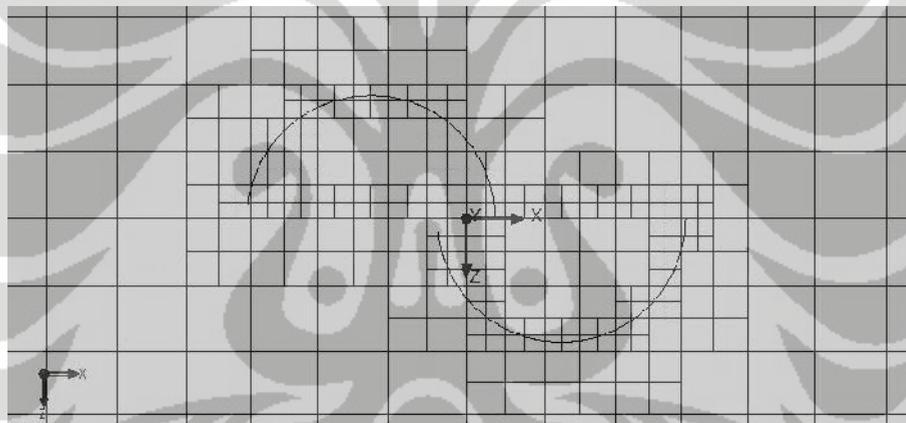
Daya Teoritis (Watt)	Daya Simulasi (Watt)	Error (%)
0,547919539	0	100
0,547919539	0,036361985	93,36362686
0,547919539	0,079687233	85,45639868
0,547919539	0,096561366	82,37672519
0,547919539	0,085392782	84,41508735
0,547919539	0,009634516	98,24161838
0,547919539	-0,062172281	111,3469727
0,547919539	-0,163389484	129,8199775
0,547919539	-0,248728091	145,395003
0,547919539	-0,348024672	163,5174779

Dari grafik di atas, torsi negatif yang mampu dicapai turbin adalah saat putaran -25 rpm. Pada model gap 89 mm ( $e = 0,132$ ), daya maksimum yang dihasilkan adalah 0,096561366 Watt pada putaran -15 rpm. Setelah itu, grafik daya turun hingga mendapat nilai daya negatif mulai dari putaran -30 rpm. Nilai *error* terkecil yang didapat adalah 82,377%. Sekarang, diamati hasil simulasi pada model pada saat putaran -15 rpm.

Pertama, dianalisa terlebih dahulu *meshing* fluida pada simulasi turbin angin ini, Karena ingin dicari tekanan dan kecepatan aliran fluida di sekitar daerah perhitungan turbin angin sesuai dengan langkah simulasi yang terdapat di lampiran.



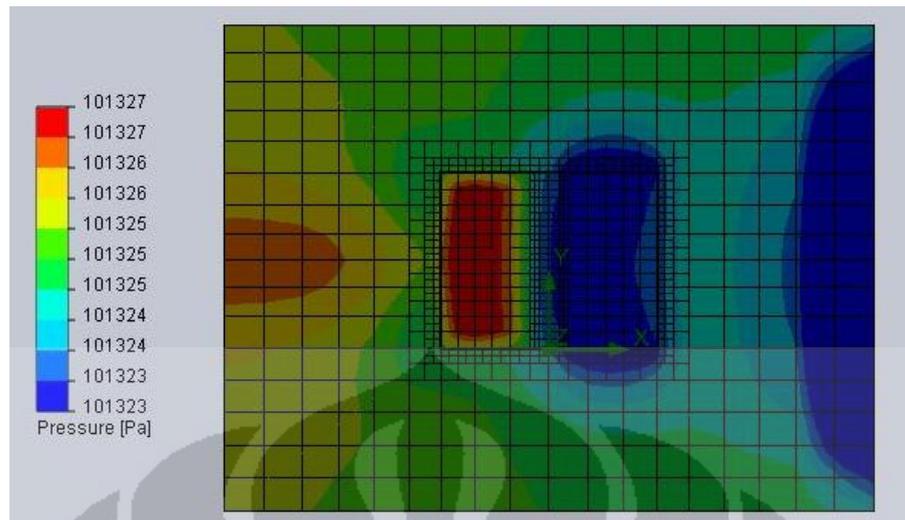
**Gambar 4.30.** Plot tampak depan *meshing* model savonius gap 89 mm.



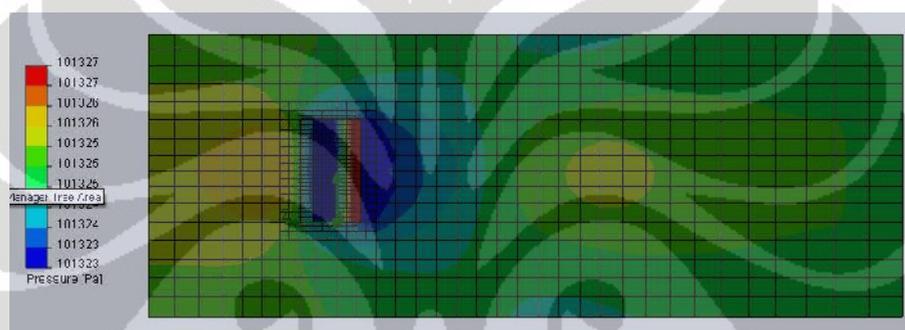
**Gambar 4.31.** Plot tampak atas *meshing* model savonius gap 89 mm.

Untuk *meshing* gap 89, hampir terlihat sama dengan gap 76, perbedaannya hanya pada bagian tengah lengkung dalam lebih rapat pada satu bagian saja. Perhitungan tetap terjadi pada bagian turbin yang bersinggungan fluida dengan turbin. Pada bagian lengkungan turbin, penampakan *meshing* juga seperti pada nilai gap.

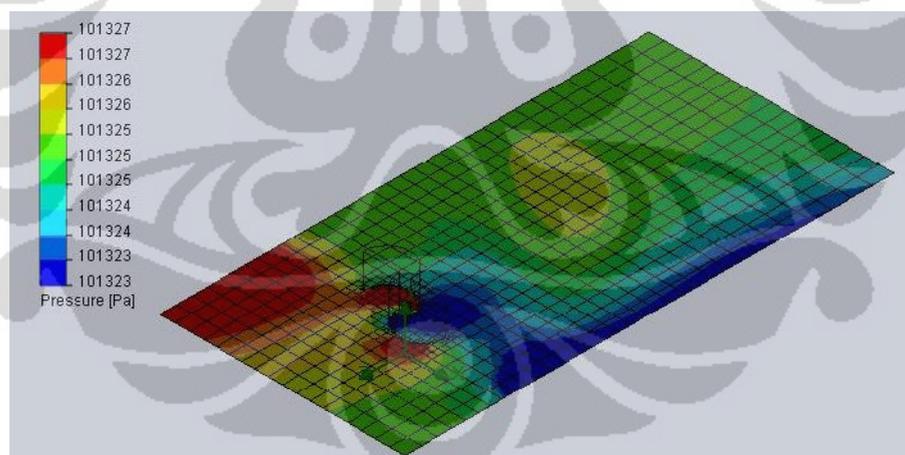
Penampakan tekanan yang dilihat dibatasi pada nilai 101323 – 101327 Pa disertai juga penampakan *meshing* untuk memperlihatkan ketelitian simulasi.



**Gambar 4.32.** Plot tampak depan tekanan model savonius gap 89 mm.



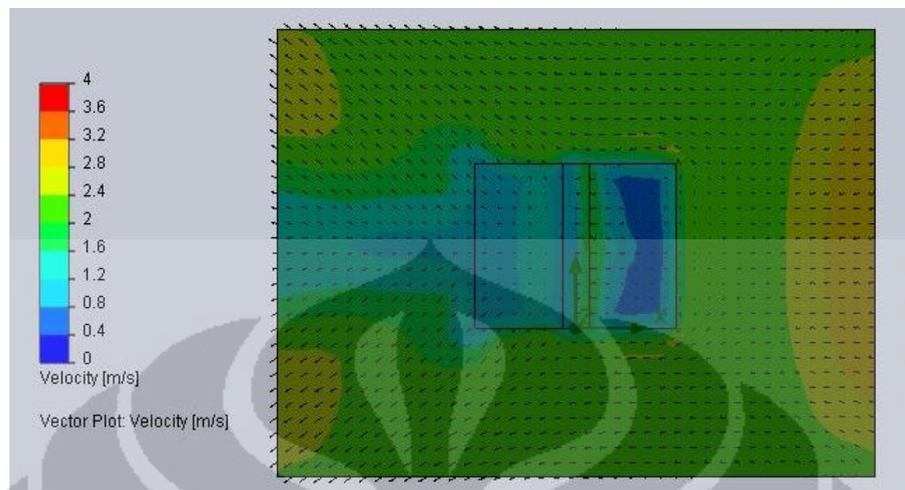
**Gambar 4.33.** Plot tampak samping tekanan model savonius gap 89 mm.



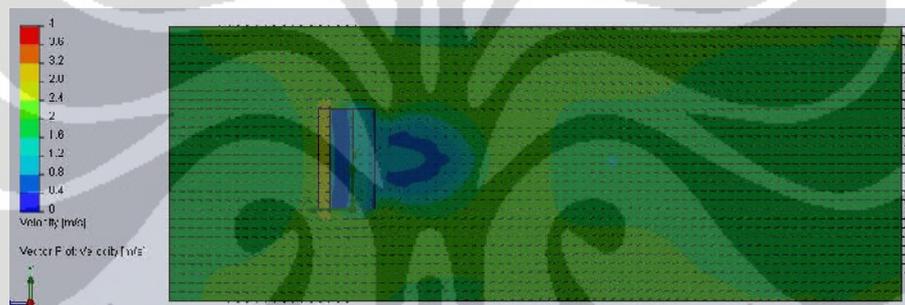
**Gambar 4.34.** Plot tampak atas tekanan model savonius gap 89 mm.

Pada penampakan plot tekanan hampir tidak ada bedanya dengan model-model sebelumnya. Tekanan besar terdapat pada permukaan lengkung dalam, sedikit pada lengkung luar yang langsung menghadap arah angin, dan daerah yang ada di kiri turbin. Turbulensi juga terjadi di belakang turbin.

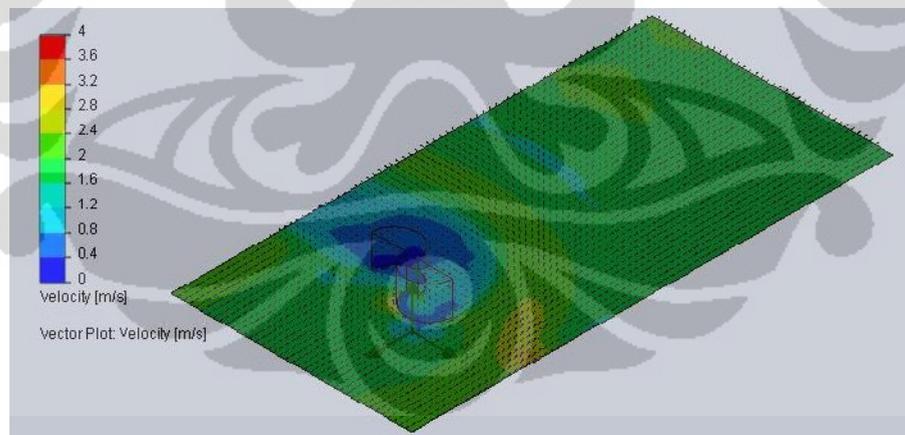
Kemudian diamati plot kecepatan udara beserta vektornya dengan cara yang sama dengan gap 48. Batasan kecepatan juga pada 0 – 4 m/s.



**Gambar 4.35.** Plot tampak depan kecepatan angin model savonius gap 89 mm.



**Gambar 4.36.** Plot tampak samping kecepatan angin model savonius gap 89 mm.



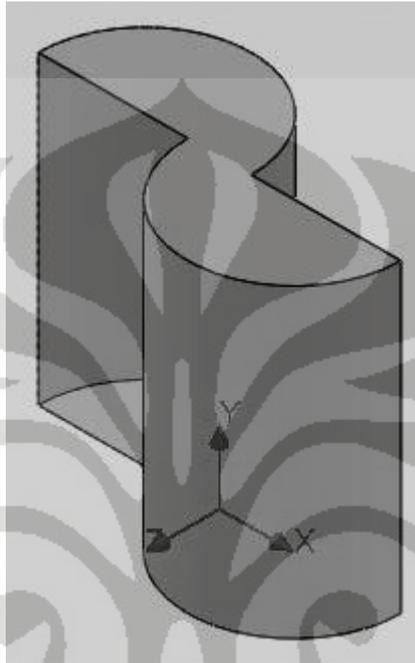
**Gambar 4.37.** Plot tampak atas kecepatan angin model savonius gap 89 mm.

Secara umum, gambaran plot kecepatan aliran udara hampir sama dengan model-model sebelumnya, dimana kecepatan terendah ada di bagian yang tidak menghadap turbin, dan kecepatan rendah juga terjadi pada bagian kiri turbin. Arah aliran angin juga sama dengan model-model sebelumnya, angin tersebut

membelok ke kiri karena pengaruh bentuk turbin savonius yang berputar berlawanan arah jarum jam.

#### IV.3.5 Model dengan Gap 114 mm

Pemodelan selanjutnya yaitu yang memiliki gap 114 mm.

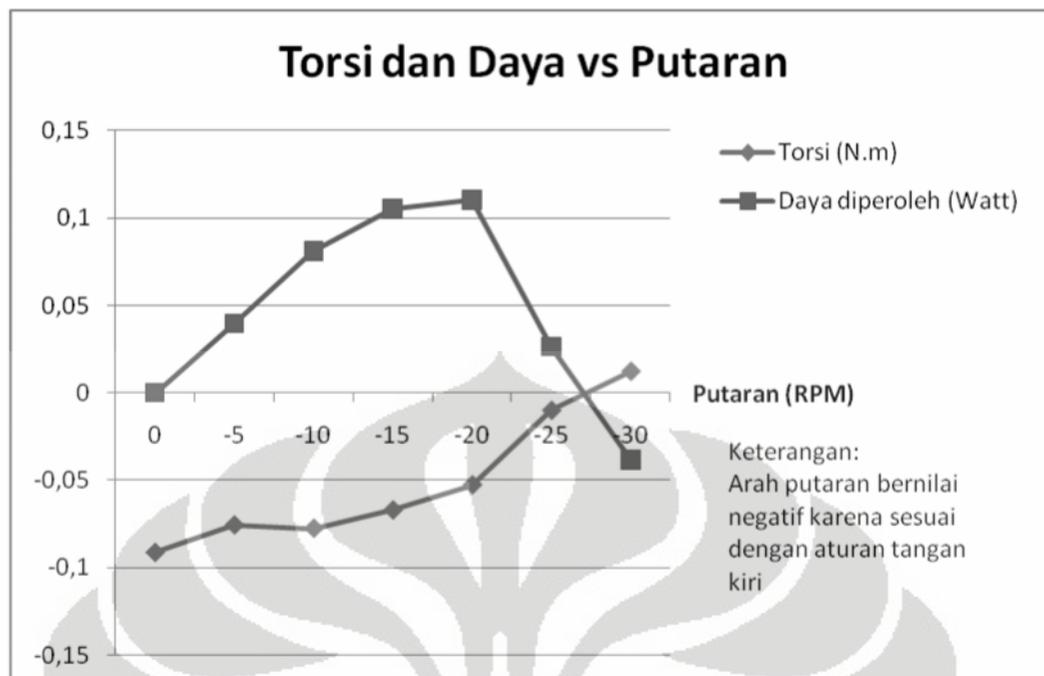


**Gambar 4.38.** Model savonius gap 114 mm.

Setelah melakukan simulasi sesuai dengan langkah simulasi yang terdapat di lampiran, *plot goal* berupa file *sheet* yang berisikan nilai torsi, dihitung manual sesuai dengan rumus 2.2. Hasilnya dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

**Tabel 4.30.** Perolehan daya pada masing-masing putaran model savonius gap 114 mm.

No	Putaran (rpm)	Torsi (N.m)	Daya diperoleh (Watt)
1	0	-0,091424761	0
2	-5	-0,075704887	0,039618891
3	-10	-0,077610147	0,081231954
4	-15	-0,067148305	0,105422839
5	-20	-0,052719939	0,110360406
6	-25	-0,010087019	0,026394368
7	-30	0,012266562	-0,038517006
8	-35	0,040158787	-0,147115022
9	-40	0,049241816	-0,20615907
10	-45	0,052552029	-0,247520056



**Grafik 4.15.** Grafik torsi dan daya vs putaran model savonius gap 114 mm.

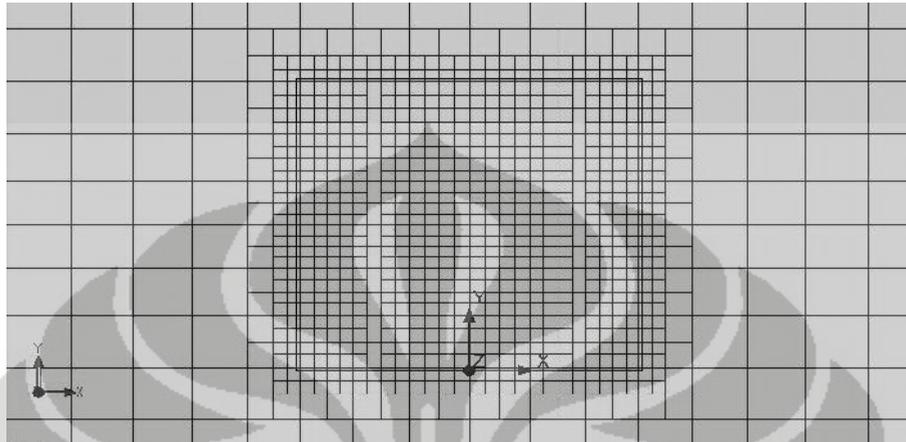
Daya yang diperoleh pada gap 114 mm secara teoritis adalah 0,5276245 Watt. Maka *error* yang didapat adalah:

**Tabel 4.31.** Perbandingan *error* simulasi dengan teoritis model savonius gap 114 mm.

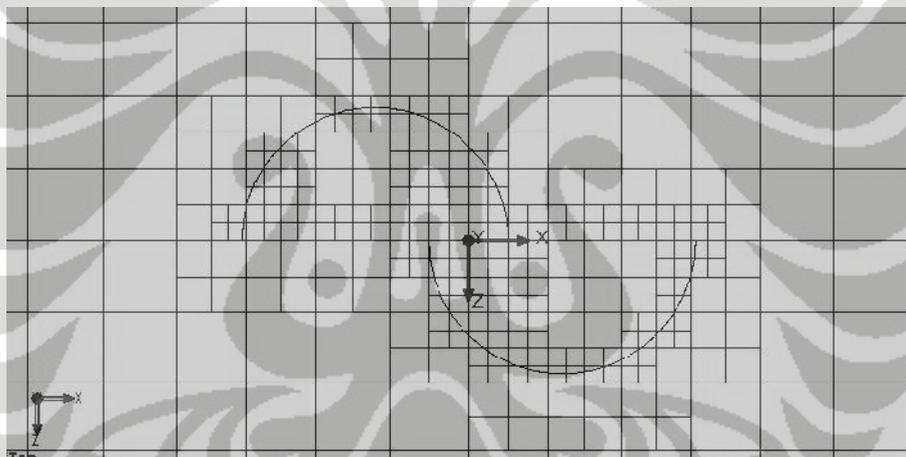
Daya Teoritis (Watt)	Daya Simulasi (Watt)	Error (%)
0,527624539	0	100
0,527624539	0,039618891	92,49108258
0,527624539	0,081231954	84,60421223
0,527624539	0,105422839	80,01934492
0,527624539	0,110360406	79,08353424
0,527624539	0,026394368	94,99750947
0,527624539	-0,038517006	107,3000786
0,527624539	-0,147115022	127,8825208
0,527624539	-0,20615907	139,0730633
0,527624539	-0,247520056	146,9121576

Dari grafik di atas, torsi negatif yang mampu dicapai turbin adalah saat putaran -25 rpm. Pada model gap 114 mm ( $e = 0,175$ ), daya maksimum yang dihasilkan adalah 0,110360406 Watt pada putaran -20 rpm. Setelah itu, grafik daya turun hingga mendapat nilai daya negatif mulai dari putaran -30 rpm. Nilai *error* terkecil yang didapat adalah 79,084%. Sekarang, diamati hasil simulasi pada model pada saat putaran -20 rpm.

Pertama, dianalisa terlebih dahulu *meshing* fluida pada simulasi turbin angin ini, Karena ingin dicari tekanan dan kecepatan aliran fluida di sekitar daerah perhitungan turbin angin sesuai dengan langkah simulasi yang terdapat di lampiran.



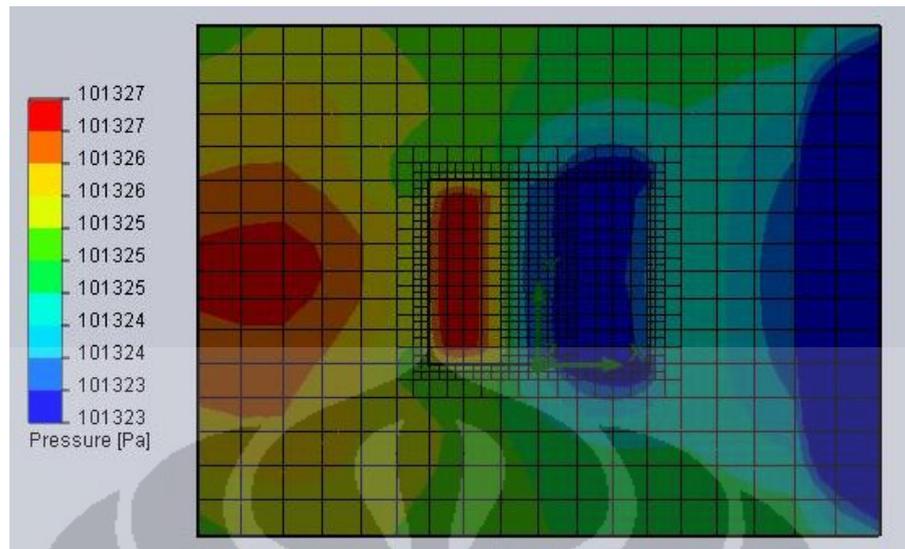
**Gambar 4.39.** Plot tampak depan *meshing* model savonius gap 114 mm.



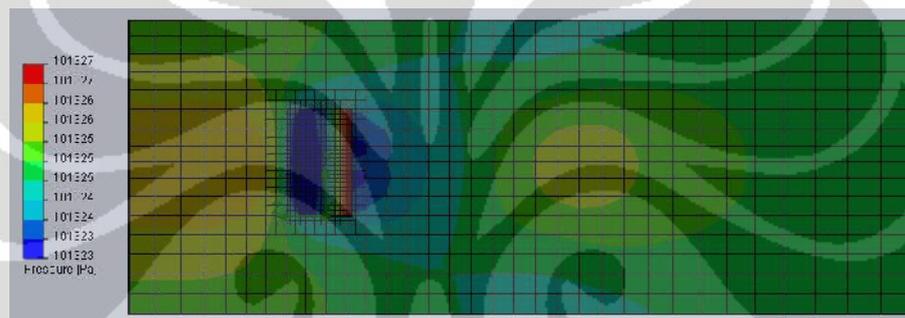
**Gambar 4.40.** Plot tampak atas *meshing* model savonius gap 114 mm.

Untuk penampakan *meshing* terlihat rapat di hampir semua bagian turbin yang terbentuk, bahkan pada gap pun terlihat rapat pada bagian batas permukaan lengkung. Kerapatan *meshing* juga terlihat pada bagian yang menjadi lengkungan dan batas fluida dengan turbin.

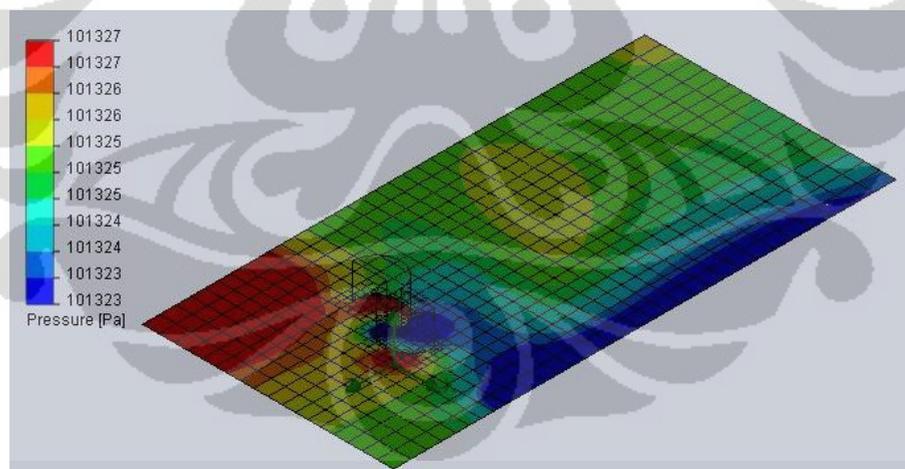
Serupa dengan model-model sebelumnya, untuk analisa tekanan ditampilkan juga penampakan *meshing*, agar terlihat pada bagian yang dihitung mengalami ketelitian simulasi. Penampakan tekanan yang dilihat dibatasi pada nilai 101323 – 101327 Pa.



**Gambar 4.41.** Plot tampak depan tekanan model savonius gap 114 mm.



**Gambar 4.42.** Plot tampak samping tekanan model savonius gap 114 mm.

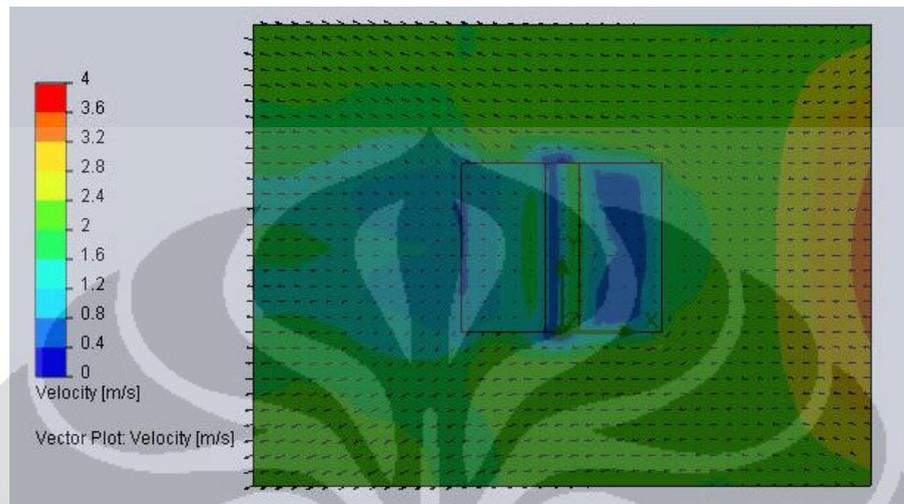


**Gambar 4.43.** Plot tampak atas tekanan model savonius gap 114 mm.

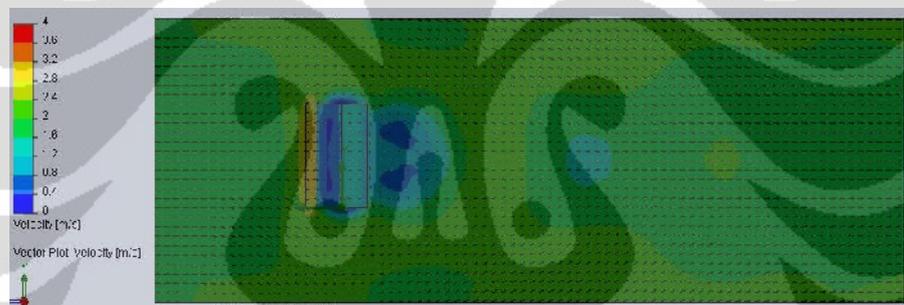
Perbedaan penampakan plot tekanan mulai terlihat pada gap 114 mm, dimana area tekanan tinggi lebih besar dibanding sebelumnya. Daerah-daerah yang menjadi tekanan tinggi masih di tempat yang sama, yaitu di daerah kiri turbin, lengkung dalam dan lengkung luar yang berhadapan langsung dengan arah

angin, namun tidak sebesar lengkung dalam. Turbulensi juga terjadi pada daerah belakang turbin, dan luas areanya sedikit lebih besar dibanding sebelumnya.

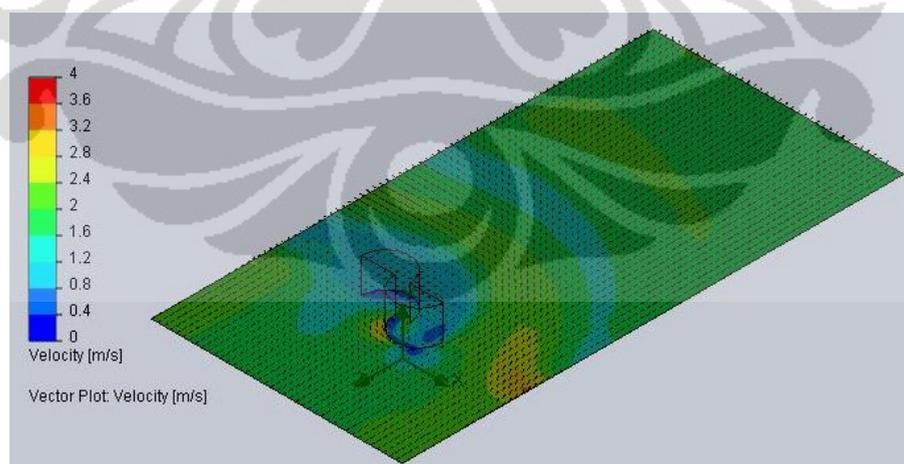
Kemudian diamati plot kecepatan udara beserta vektornya dengan cara yang sama dengan gap 48. Batasan kecepatan juga pada 0 – 4 m/s.



**Gambar 4.44.** Plot tampak depan kecepatan angin model savonius gap 114 mm.



**Gambar 4.45.** Plot tampak samping kecepatan angin model savonius gap 114 mm.



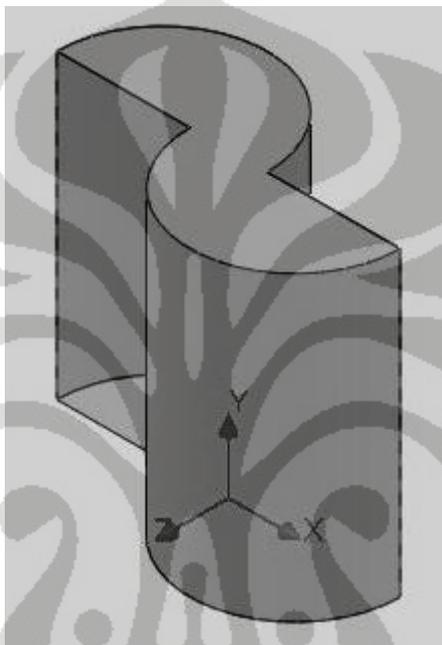
**Gambar 4.46.** Plot tampak atas kecepatan angin model savonius gap 114 mm.

Penampakan plot kecepatan juga terlihat berbeda dengan sebelumnya, dimana area yang kecepataannya terendah menjadi berkurang dibanding

sebelumnya. Penampakan unik mulai terlihat di jarak tertentu di belakang turbin, dimana kecepatan angin berkurang menjadi seperti serupa dengan area di belakang turbin. Hal ini dikarenakan turbulensi yang terjadi pada area belakang turbin.

#### IV.3.6 Model dengan Gap 140 mm

Pemodelan selanjutnya yaitu yang memiliki gap 140 mm.

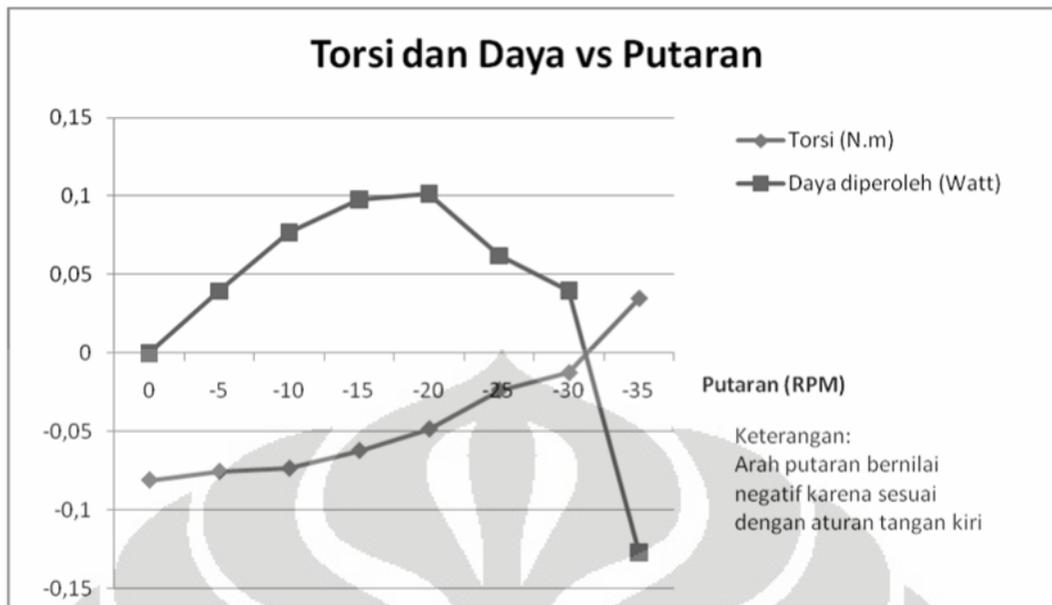


**Gambar 4.47.** Model savonius gap 140 mm.

Setelah melakukan simulasi sesuai dengan langkah simulasi yang terdapat di lampiran, *plot* goal berupa file *sheet* yang berisikan nilai torsi, dihitung manual sesuai dengan rumus 2.2. Hasilnya dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

**Tabel 4.32.** Perolehan daya pada masing-masing putaran model savonius gap 140 mm.

No	Putaran (rpm)	Torsi (N.m)	Daya diperoleh (Watt)
1	0	-0,081009365	0
2	-5	-0,075559002	0,039542544
3	-10	-0,073502401	0,076932513
4	-15	-0,062206033	0,097663472
5	-20	-0,048456818	0,101436272
6	-25	-0,02368097	0,061965205
7	-30	-0,012681959	0,039821352
8	-35	0,034648598	-0,126929365
9	-40	0,036101258	-0,151143932
10	-45	0,041933388	-0,197506257



**Grafik 4.16.** Grafik torsi dan daya vs putaran model savonius gap 140 mm.

Daya yang diperoleh pada gap 140 mm secara teoritis adalah 0,5065177 Watt. Maka *error* yang didapat adalah:

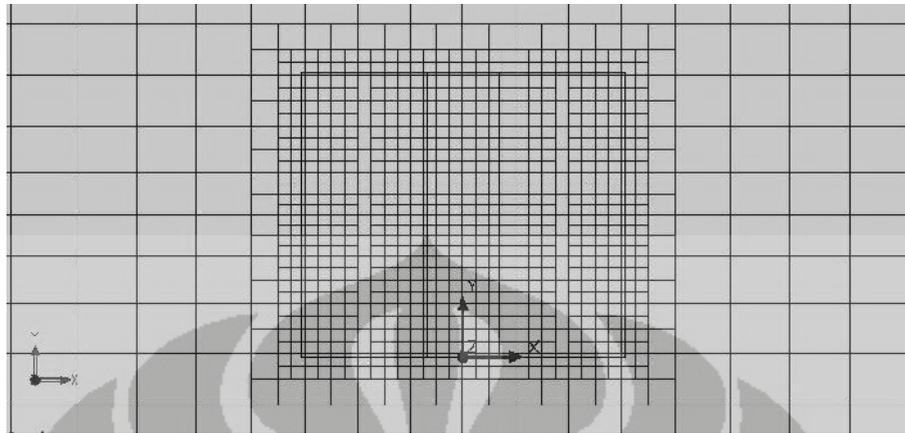
**Tabel 4.33.** Perbandingan *error* simulasi dengan teoritis model savonius gap 140 mm.

Daya Teoritis (Watt)	Daya Simulasi (Watt)	Error (%)
0,506517739	0	100
0,506517739	0,039542544	92,19325579
0,506517739	0,076932513	84,81148697
0,506517739	0,097663472	80,71864728
0,506517739	0,101436272	79,97379669
0,506517739	0,061965205	87,76642948
0,506517739	0,039821352	92,13821185
0,506517739	-0,126929365	125,0592142
0,506517739	-0,151143932	129,8398102
0,506517739	-0,197506257	138,9929595

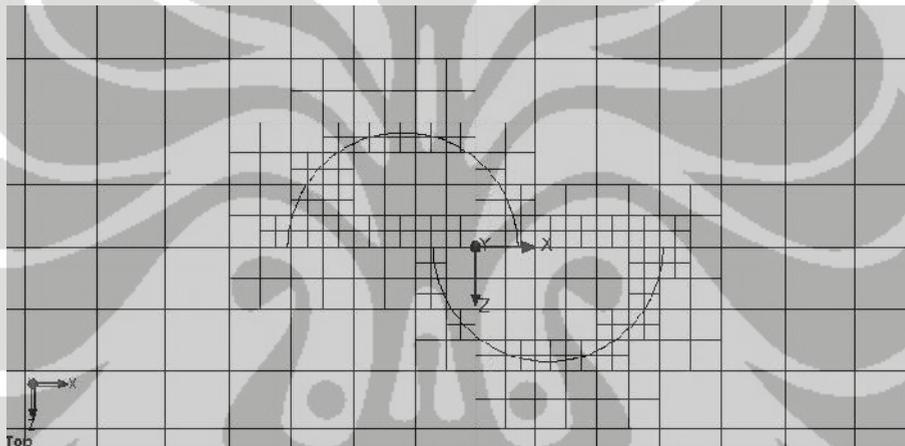
Dari grafik di atas, torsi negatif yang mampu dicapai turbin adalah saat putaran -30 rpm. Pada model gap 140 mm ( $e = 0,224$ ), daya maksimum yang dihasilkan adalah 0,101436272 Watt pada putaran -20 rpm. Setelah itu, grafik daya turun hingga mendapat nilai daya negatif mulai dari putaran -35 rpm. Nilai *error* terkecil yang didapat adalah 79,974%. Sekarang, diamati hasil simulasi pada model pada saat putaran -20 rpm.

Pertama, dianalisa terlebih dahulu *meshing* fluida pada simulasi turbin angin ini, Karena ingin dicari tekanan dan kecepatan aliran fluida di sekitar daerah

perhitungan turbin angin sesuai dengan langkah simulasi yang terdapat di lampiran.



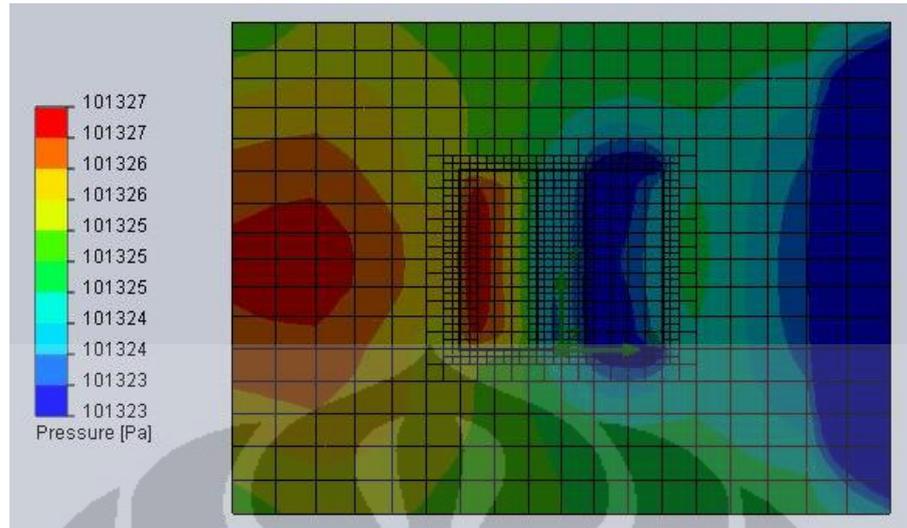
**Gambar 4.48.** Plot tampak depan *meshing* model savonius gap 140 mm.



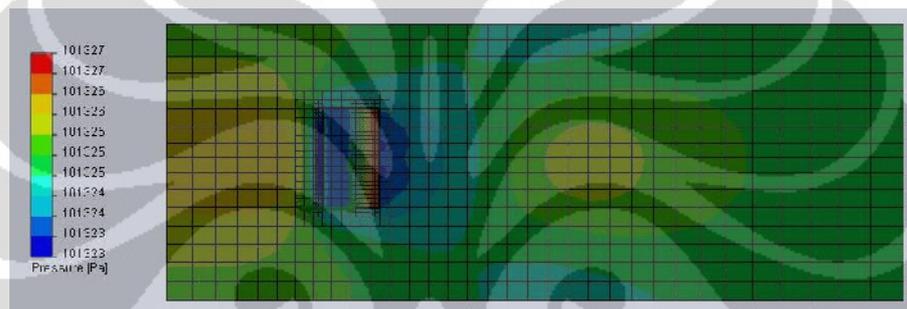
**Gambar 4.49.** Plot tampak atas *meshing* model savonius gap 140 mm.

Untuk *meshing* gap 140 mm, pada tampak depan terlihat sama dengan gap 114 mm. Untuk tampak atas, kerapatan *meshing* tetap terlihat pada daerah batas antara fluida dengan turbin.

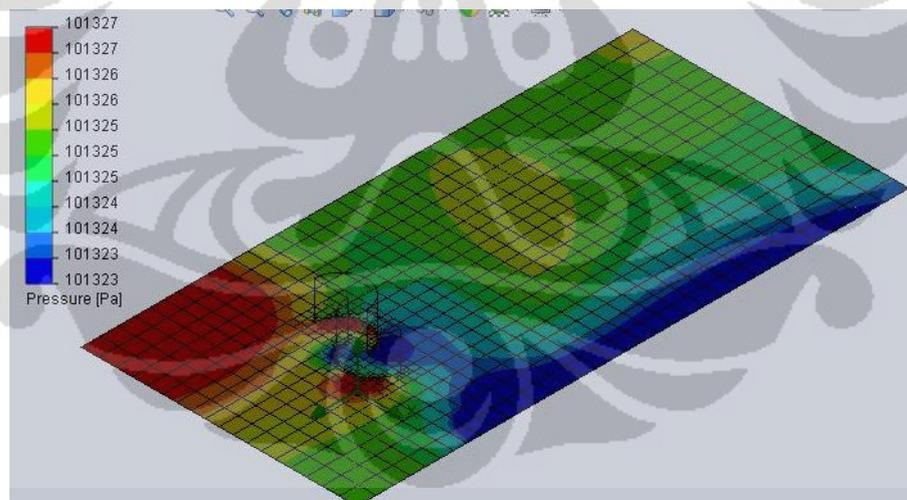
Untuk analisa tekanan ditampilkan juga penampakan *meshing*, agar terlihat pada bagian yang dihitung mengalami ketelitian simulasi. Penampakan tekanan yang dilihat dibatasi pada nilai 101323 – 101327 Pa.



**Gambar 4.50.** Plot tampak depan tekanan model savonius gap 140 mm.



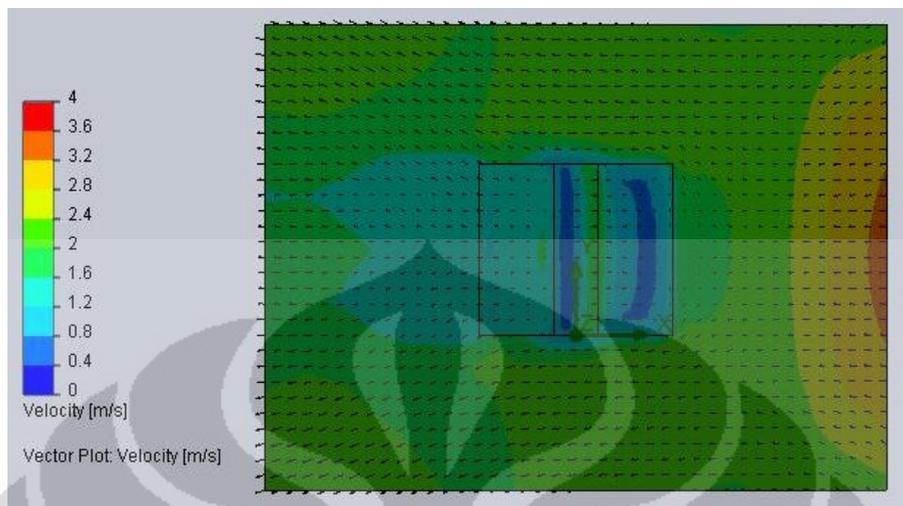
**Gambar 4.51.** Plot tampak samping tekanan model savonius gap 140 mm.



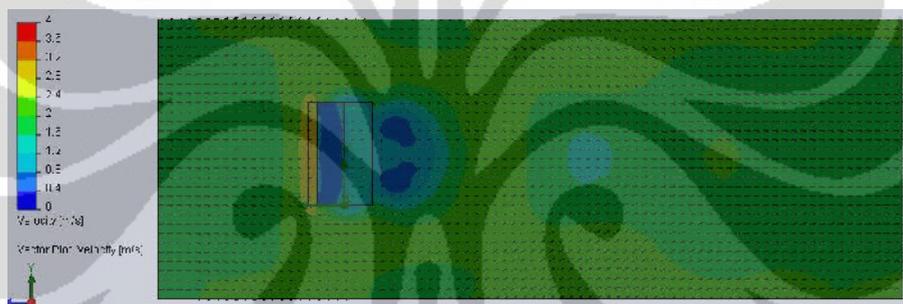
**Gambar 4.52.** Plot tampak atas tekanan model savonius gap 140 mm.

Pola penampakan daerah bertekanan tinggi dan rendah hampir sama dengan sebelumnya, hampir tidak ada bedanya. Daerah lengkung dalam turbin mendapat tekanan yang lebih besar dibanding lengkung luar. Daerah kiri turbin juga masih bertekanan tinggi. Turbulensi juga terjadi di belakang turbin, namun areanya lebih luas dibanding sebelumnya.

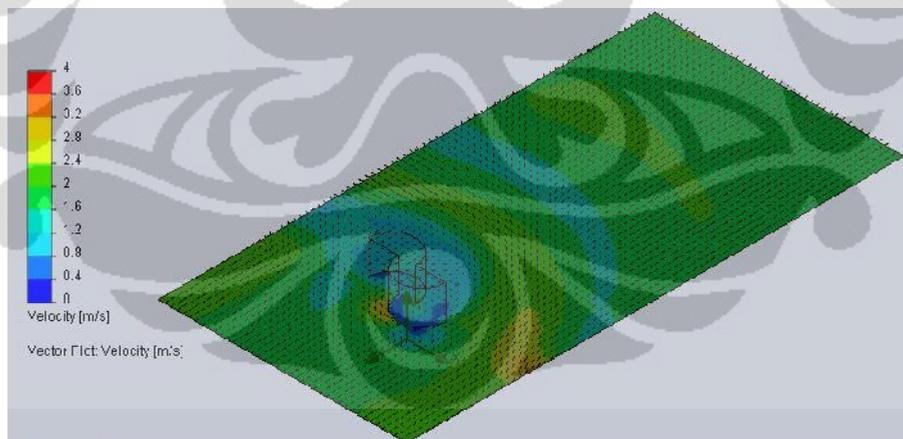
Kemudian diamati plot kecepatan udara beserta vektornya dengan cara yang sama dengan gap 48. Batasan kecepatan juga pada 0 – 4 m/s.



**Gambar 4.53.** Plot tampak depan kecepatan angin model savonius gap 140 mm.



**Gambar 4.54.** Plot tampak samping kecepatan angin model savonius gap 140 mm.

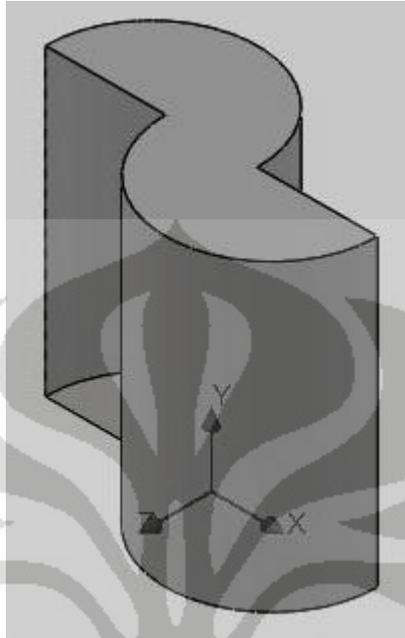


**Gambar 4.55.** Plot tampak atas kecepatan angin model savonius gap 140 mm.

Penampakan aliran terendah mulai berkurang, kecuali di lengkung luar bagian yang terhalang turbin. Arah aliran juga sama dengan model-model sebelumnya yang mengarah ke kiri turbin.

### IV.3.7 Model dengan Gap 165 mm

Pemodelan selanjutnya yaitu yang memiliki gap 165 mm.

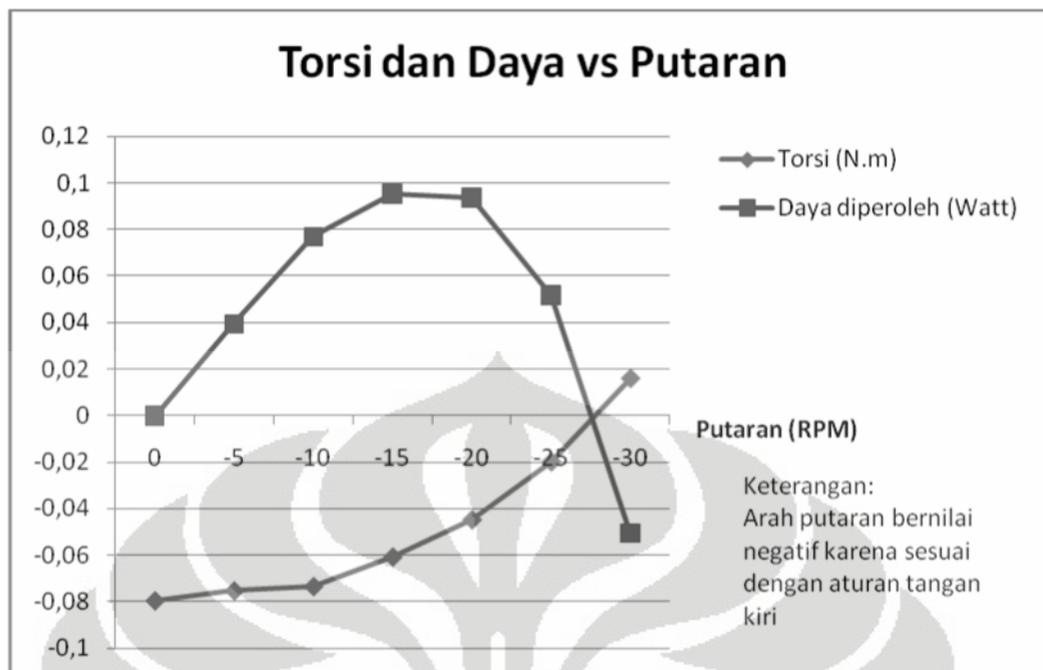


**Gambar 4.56.** Model savonius gap 165 mm.

Setelah melakukan simulasi sesuai dengan langkah simulasi yang terdapat di lampiran, *plot* goal berupa file *sheet* yang berisikan nilai torsi, dihitung manual sesuai dengan rumus 2.2. Hasilnya dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

**Tabel 4.34.** Perolehan daya pada masing-masing putaran model savonius gap 165 mm.

No	Putaran (rpm)	Torsi (N.m)	Daya diperoleh (Watt)
1	0	-0,079575398	0
2	-5	-0,075312677	0,039413634
3	-10	-0,073430737	0,076857505
4	-15	-0,060755293	0,09538581
5	-20	-0,044737643	0,093650799
6	-25	-0,019754052	0,051689769
7	-30	0,016125921	-0,05063539
8	-35	0,026962026	-0,09877089
9	-40	0,030501909	-0,127701326
10	-45	0,035127339	-0,165449768



**Grafik 4.17.** Grafik torsi dan daya vs putaran model savonius gap 165 mm.

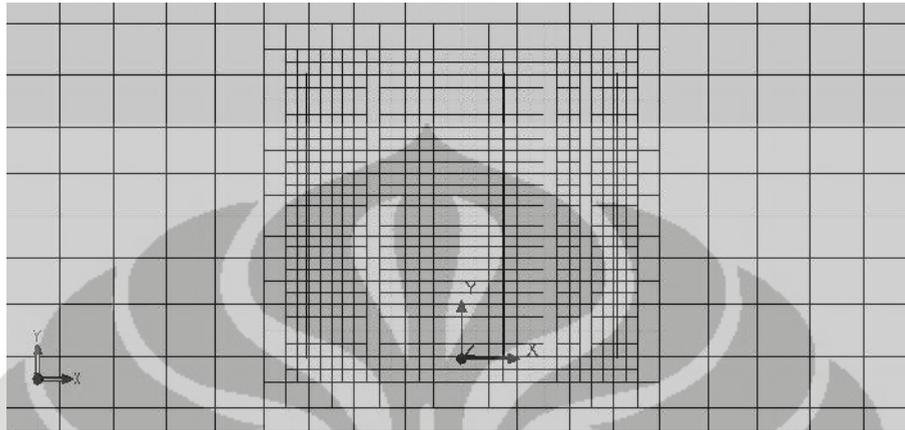
Daya yang diperoleh pada gap 165 mm secara teoritis adalah 0,4862227 Watt. Maka *error* yang didapat adalah:

**Tabel 4.35.** Perbandingan *error* simulasi dengan teoritis model savonius gap 165 mm.

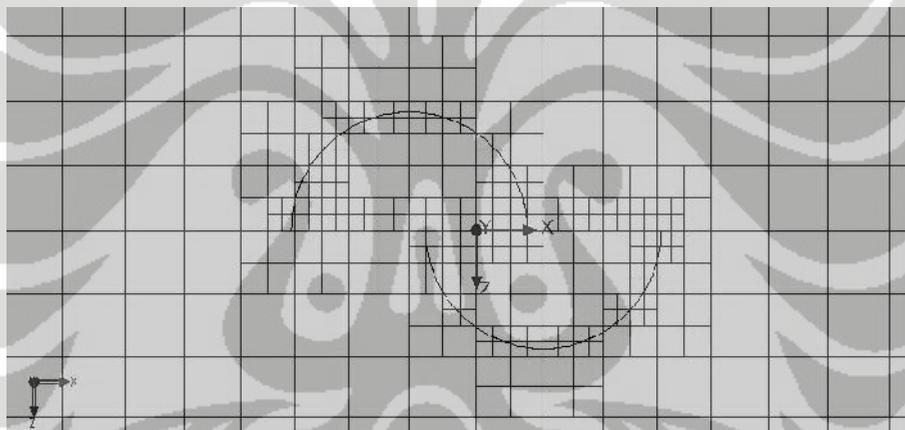
Daya Teoritis (Watt)	Daya Simulasi (Watt)	Error (%)
0,486222739	0	100
0,486222739	0,039413634	91,89391387
0,486222739	0,076857505	84,19294308
0,486222739	0,09538581	80,38228112
0,486222739	0,093650799	80,73911571
0,486222739	0,051689769	89,36911726
0,486222739	-0,05063539	110,4140317
0,486222739	-0,09877089	120,3139182
0,486222739	-0,127701326	126,2639559
0,486222739	-0,165449768	134,0275669

Dari grafik di atas, torsi negatif yang mampu dicapai turbin adalah saat putaran -25 rpm. Pada model gap 165 mm ( $e = 0,275$ ), daya maksimum yang dihasilkan adalah 0,09538581 Watt pada putaran -15 rpm. Setelah itu, grafik daya turun hingga mendapat nilai daya negatif mulai dari putaran -30 rpm. Nilai *error* terkecil yang didapat adalah 80,739%. Sekarang, diamati hasil simulasi pada model pada saat putaran -15 rpm.

Pertama, dianalisa terlebih dahulu *meshing* fluida pada simulasi turbin angin ini, Karena ingin dicari tekanan dan kecepatan aliran fluida di sekitar daerah perhitungan turbin angin sesuai dengan langkah simulasi yang terdapat di lampiran.



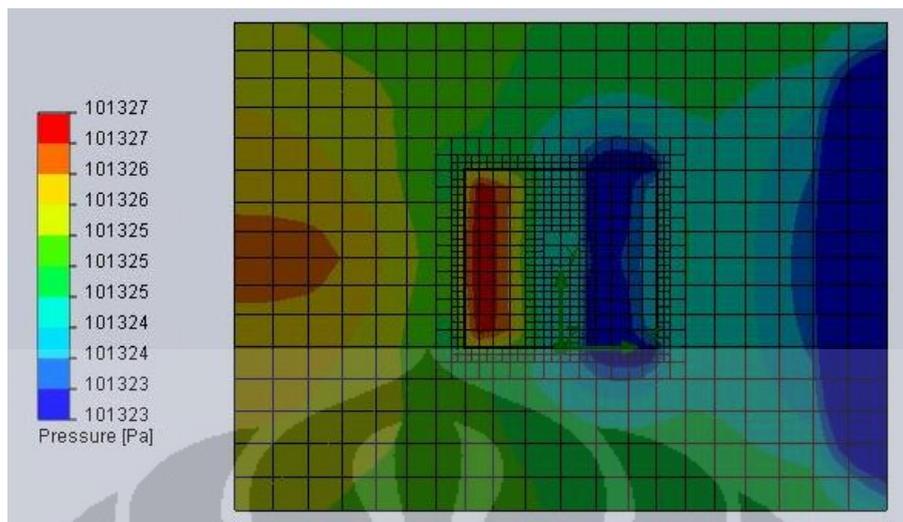
**Gambar 4.57.** Plot tampak depan *meshing* model savonius gap 165 mm.



**Gambar 4.58.** Plot tampak atas *meshing* model savonius gap 165 mm.

Untuk *meshing* gap 165, terlihat sedikit lebih renggang pada tampak depan dibanding sebelumnya. Untuk tampak atas, kerapatan *meshing* tetap terlihat pada daerah batas antara fluida dengan turbin.

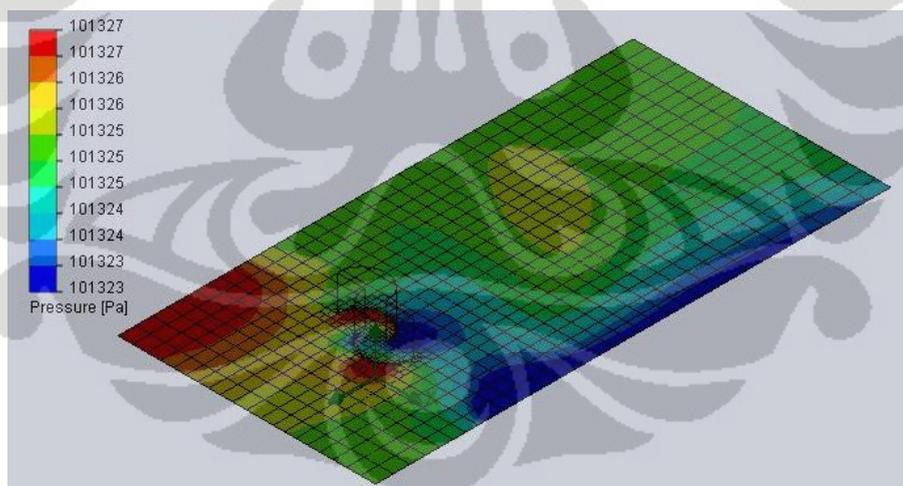
Untuk analisa tekanan ditampilkan juga penampakan *meshing*, agar terlihat pada bagian yang dihitung mengalami ketelitian simulasi. Penampakan tekanan yang dilihat dibatasi pada nilai 101323 – 101327 Pa.



**Gambar 4.59.** Plot tampak depan tekanan model savonius gap 165 mm.



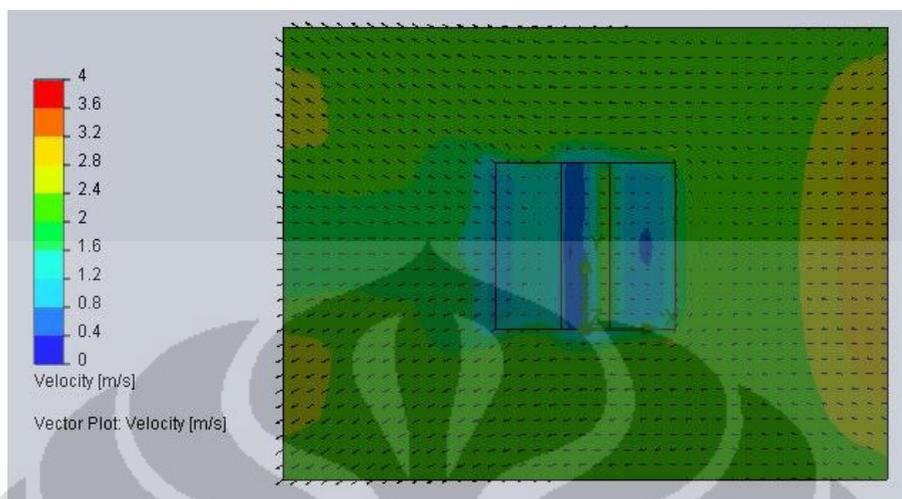
**Gambar 4.60.** Plot tampak samping tekanan model savonius gap 165 mm.



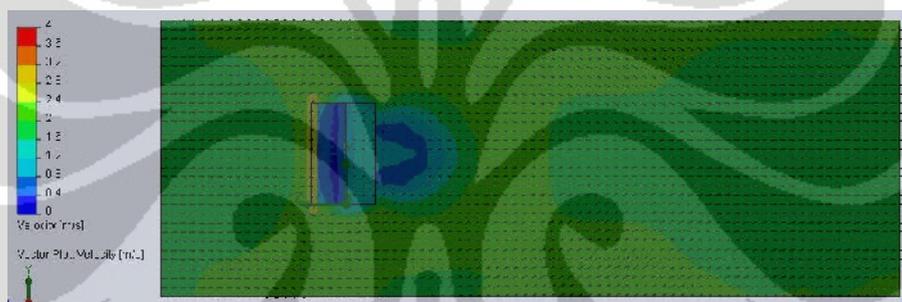
**Gambar 4.61.** Plot tampak atas tekanan model savonius gap 165 mm.

Perubahan luas permukaan daerah bertekanan tinggi maupun rendah mulai berkurang, tetapi penampakan tekanan tinggi masih tetap terlihat pada daerah lengkung dalam maupun lengkung luar pada bagian yang berhadapan langsung dengan arah aliran angin. Penampakan turbulensi juga tetap terjadi pada daerah belakang turbin.

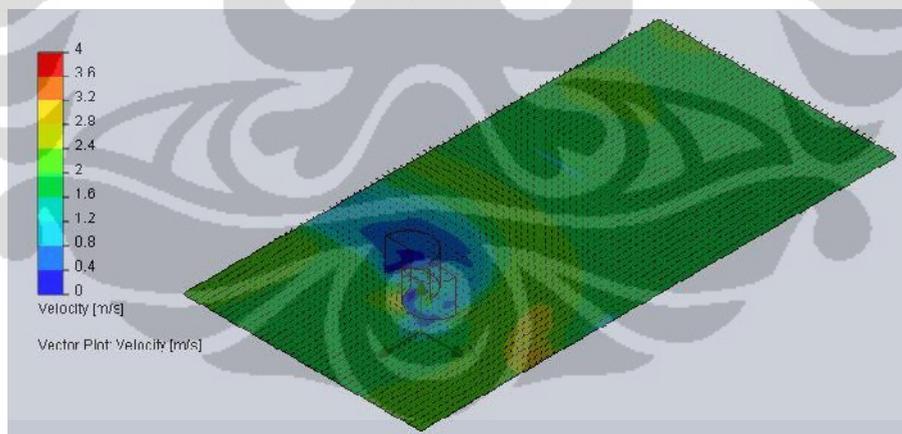
Kemudian diamati plot kecepatan udara beserta vektornya dengan cara yang sama dengan gap 48. Batasan kecepatan juga pada 0 – 4 m/s.



**Gambar 4.62.** Plot tampak depan kecepatan angin model savonius gap 165 mm.



**Gambar 4.63.** Plot tampak samping kecepatan angin model savonius gap 165 mm.



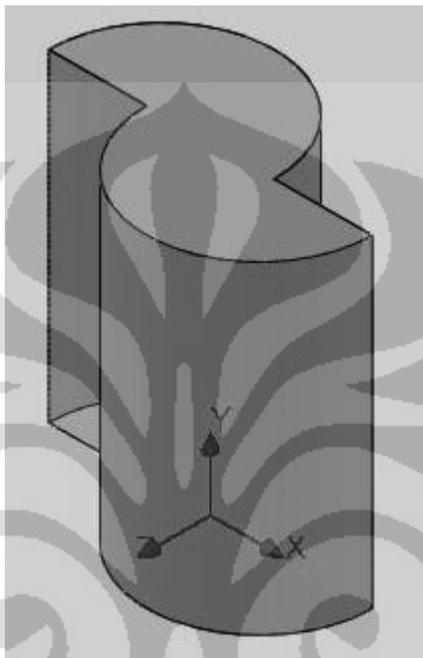
**Gambar 4.64.** Plot tampak atas kecepatan angin model savonius gap 165 mm.

Penampakan udara berkecepatan rendah sudah tidak terlihat pada bagian belakang turbin pada jarak tertentu. Untuk udara kecepatan terendah tetap terlihat pada bagian yang terhalang turbin secara langsung. Aliran terendah juga terlihat

pada gap yang terhalang turbin, pada gap ini udara mengalir dari lengkung dalam menuju lengkung luar.

#### IV.3.8 Model dengan Gap 216 mm

Pemodelan selanjutnya yaitu yang memiliki gap 216 mm.

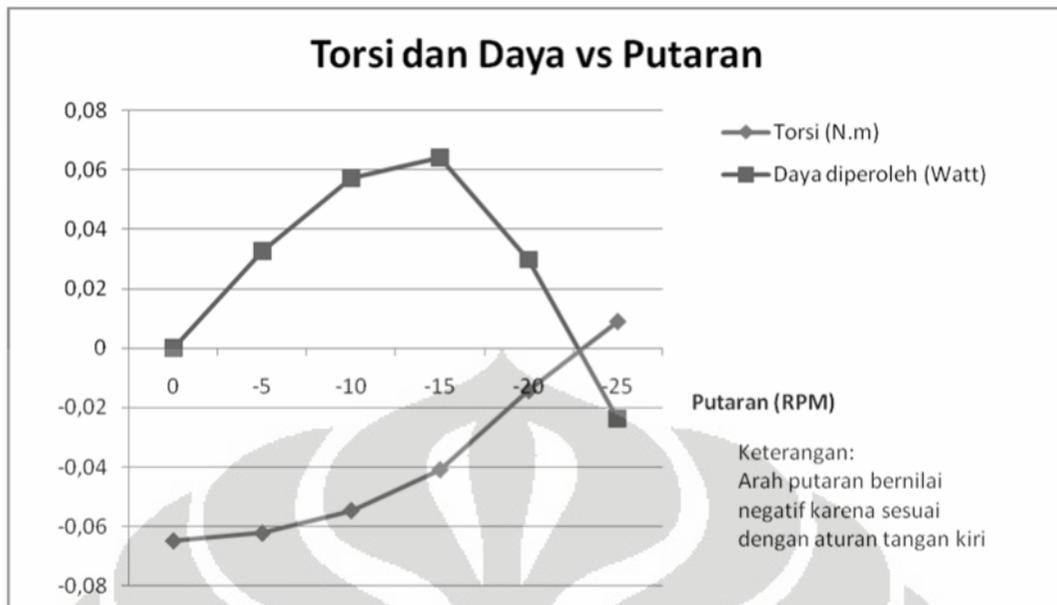


**Gambar 4.65.** Model savonius gap 216 mm.

Setelah melakukan simulasi sesuai dengan langkah simulasi yang terdapat di lampiran, *plot goal* berupa file *sheet* yang berisikan nilai torsi, dihitung manual sesuai dengan rumus 2.2. Hasilnya dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

**Tabel 4.36.** Perolehan daya pada masing-masing putaran model savonius gap 216 mm.

No	Putaran (rpm)	Torsi (N.m)	Daya diperoleh (Watt)
1	0	-0,064871503	0
2	-5	-0,062276727	0,032591487
3	-10	-0,054642646	0,057192636
4	-15	-0,040885506	0,064190245
5	-20	-0,014223571	0,029774676
6	-25	0,009040134	-0,023655018
7	-30	0,0063624	-0,019977937
8	-35	0,009789466	-0,035862077
9	-40	0,012197305	-0,051066051
10	-45	0,013282499	-0,062560568



**Grafik 4.18.** Grafik torsi dan daya vs putaran model savonius gap 216 mm.

Daya yang diperoleh pada gap 216 mm secara teoritis adalah 0,4448209 Watt. Maka *error* yang didapat adalah:

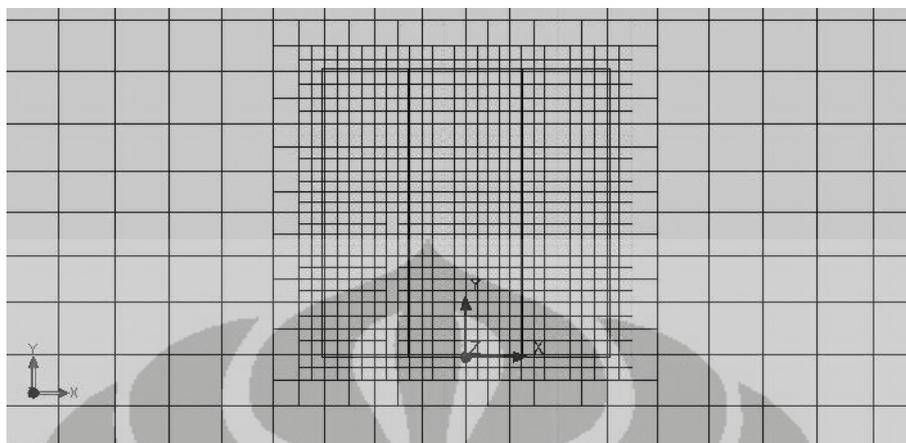
**Tabel 4.37.** Perbandingan *error* simulasi dengan teoritis model savonius gap 216 mm.

Daya Teoritis (Watt)	Daya Simulasi (Watt)	Error (%)
0,444820939	0	100
0,444820939	0,032591487	92,67312205
0,444820939	0,057192636	87,14254855
0,444820939	0,064190245	85,56941918
0,444820939	0,029774676	93,30636811
0,444820939	-0,023655018	105,3178741
0,444820939	-0,019977937	104,4912311
0,444820939	-0,035862077	108,0621377
0,444820939	-0,051066051	111,4801366
0,444820939	-0,062560568	114,0642138

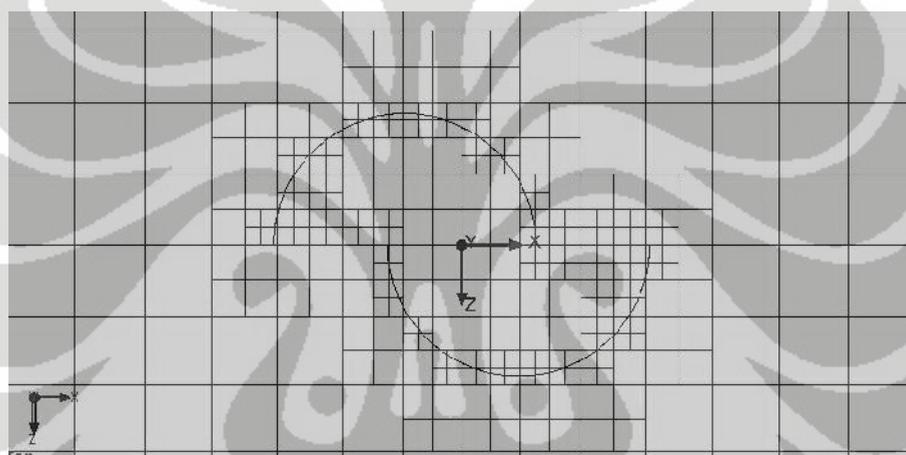
Dari grafik di atas, torsi negatif yang mampu dicapai turbin adalah saat putaran -20 rpm. Pada model gap 216 mm ( $e = 0,394$ ), daya maksimum yang dihasilkan adalah 0,064190245 Watt pada putaran -15 rpm. Setelah itu, grafik daya turun hingga mendapat nilai daya negatif mulai dari putaran -25 rpm. Nilai *error* terkecil yang didapat adalah 85,569%. Sekarang, diamati hasil simulasi pada model pada saat putaran -15 rpm.

Pertama, dianalisa terlebih dahulu *meshing* fluida pada simulasi turbin angin ini, Karena ingin dicari tekanan dan kecepatan aliran fluida di sekitar daerah

perhitungan turbin angin sesuai dengan langkah simulasi yang terdapat di lampiran.



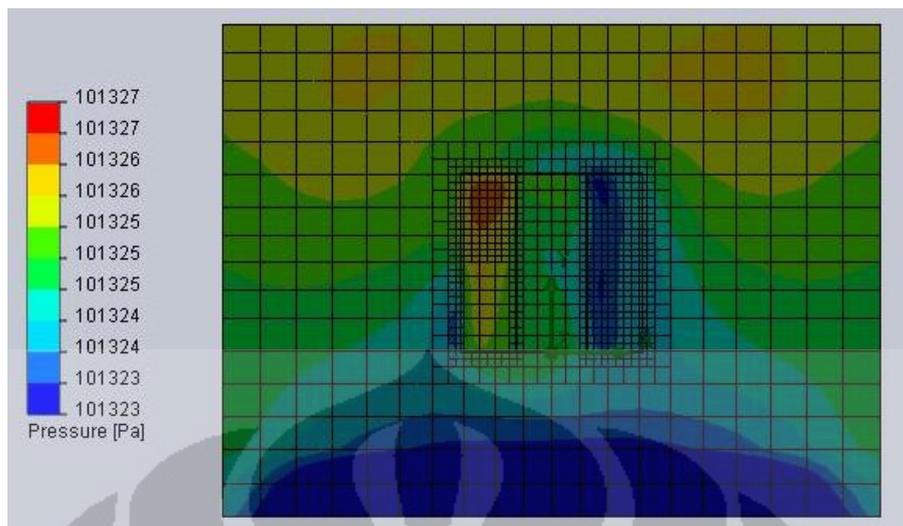
**Gambar 4.66.** Plot tampak depan *meshing* model savonius gap 216 mm.



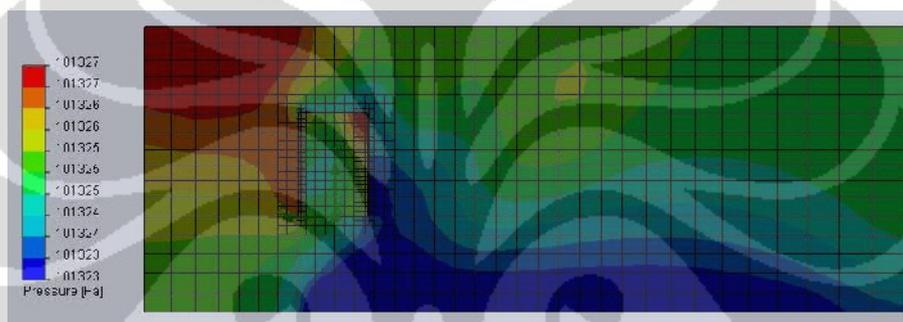
**Gambar 4.67.** Plot tampak atas *meshing* model savonius gap 216 mm.

Karena besarnya gap yang dimiliki model ini melebihi jari-jari satu sudu turbin savonius, maka penampakan meshing pada tampak atas terlihat jauh lebih renggang dibanding model-model sebelumnya. Perhitungan kerapatan meshing tetap terlihat pada batas antara fluida dengan turbin, terutama di bagian lengkungan.

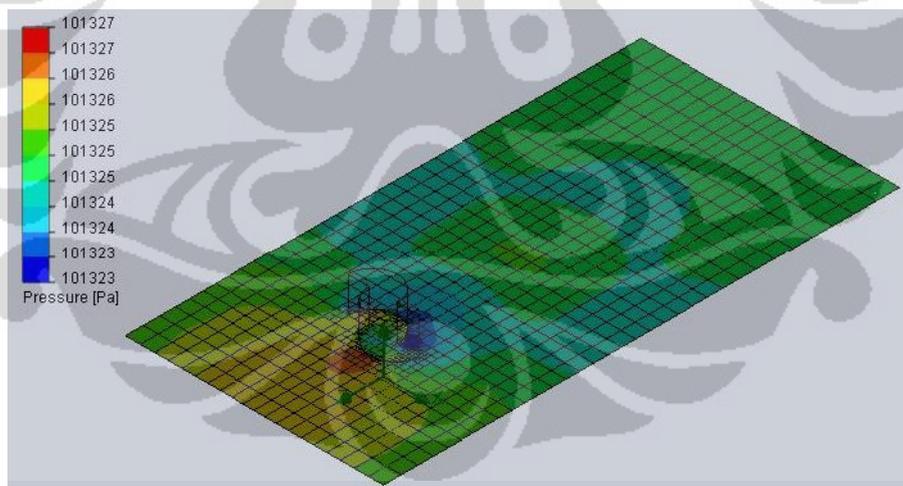
Untuk analisa tekanan ditampilkan juga penampakan meshing, agar terlihat pada bagian yang dihitung mengalami ketelitian simulasi. Penampakan tekanan yang dilihat dibatasi pada nilai 101323 – 101327 Pa.



**Gambar 4.68.** Plot tampak depan tekanan model savonius gap 216 mm.



**Gambar 4.69.** Plot tampak samping tekanan model savonius gap 216 mm.

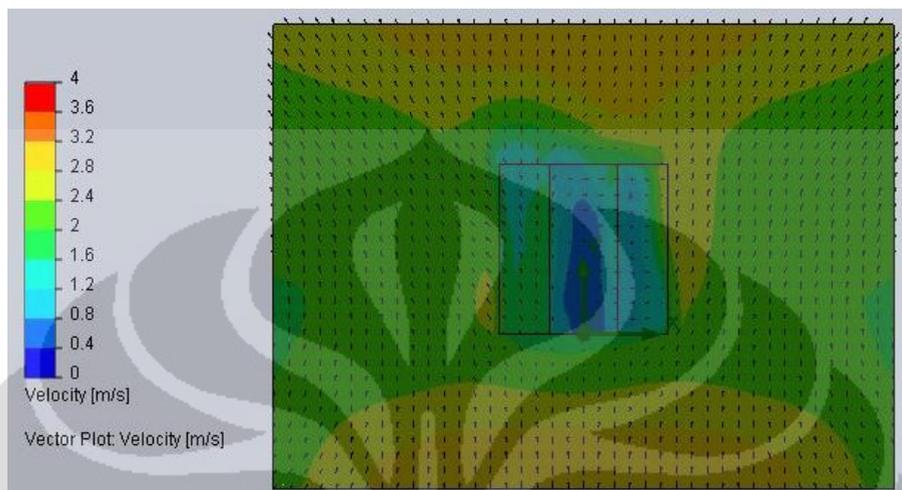


**Gambar 4.70.** Plot tampak atas tekanan model savonius gap 216 mm.

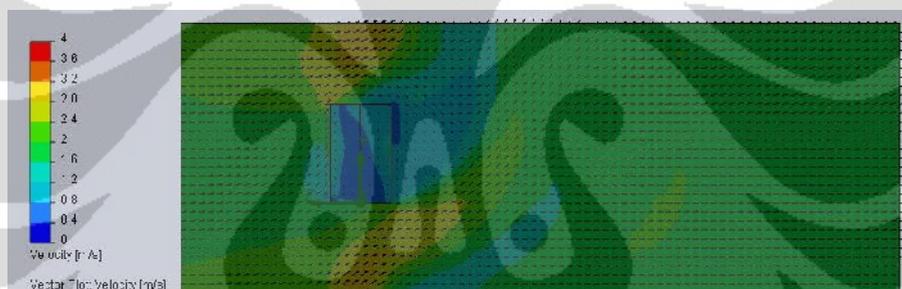
Pada penempatan tekanan gap 216 ini, sangat berbeda dengan model-model sebelumnya, dimana daerah bertekanan rendah terdapat pada bagian bawah belakang turbin. Tekanan tinggi terjadi pada bagian depan atas belakang turbin. Tekanan tetap terlihat pada lengkung dalam turbin namun tidak sebesar model sebelumnya, bahkan pada bagian lengkung dalam ini terlihat lebih kecil dibanding

lengkung luar. Hal ini dikarenakan bentuk gap yang melebihi jari-jari satu sudu savonius dimana luas area yg ditangkap oleh satu sudu turbin menjadi lebih kecil.

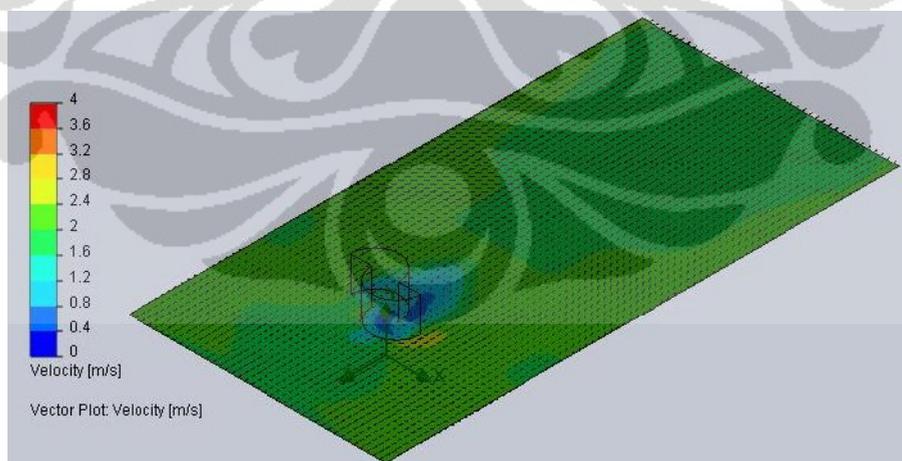
Kemudian diamati plot kecepatan udara beserta vektornya dengan cara yang sama dengan gap 48. Batasan kecepatan juga pada 0 – 4 m/s.



**Gambar 4.71.** Plot tampak depan kecepatan angin model savonius gap 216 mm.



**Gambar 4.72.** Plot tampak samping kecepatan angin model savonius gap 216 mm.



**Gambar 4.73.** Plot tampak atas kecepatan angin model savonius gap 216 mm.

Penampakan plot kecepatan terlihat sangat berbeda dibanding model-model sebelumnya, dimana aliran udara rendah menjadi lebih sedikit dibanding

sebelumnya. Dari tampak samping terlihat angin mengarah ke atas turbin. Area di belakang turbin tetap merupakan aliran terendah karena terhalang secara langsung. Yang menarik adalah daerah di gap turbin dimana terdapat luas permukaan aliran udara rendah yang cukup besar. Hal ini dikarenakan gap turbin yang melebihi jari-jari savonius satu sudu, sehingga terdapat celah kosong saat angin melewati gap

#### IV.4 Perbandingan Hasil Daya Teoritis dengan Daya Simulasi dan Analisa pada Model Berdasarkan Bentuk

Pada simulasi model berdasarkan bentuk ini, cara yang dilakukan serupa dengan model berdasarkan eksentrisitas. Perbedaannya terdapat pada bentuknya yang menjadi 3 kali luas permukaan. Model yang diambil adalah model dengan gap 114 mm. Hal ini dikarenakan turbin ini memiliki *error* terkecil pada putaran - 20 rpm, yakni sekitar 79,084%. Kemudian dari model gap 114 mm ini, dibuat 2 modifikasi model turbin savonius. Untuk model yang pertama tidak ada perubahan sudut serang sudu turbin, yang kedua dengan memberikan perbedaan sudut 60° pada tiap lapisannya.

Secara teoritis, turbin 3 lapis ini bisa dihitung perkiraan daya yang dihasilkannya dengan menggunakan rumus 2.1. Nilai  $C_p$  yang diambil adalah 0,3.

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

**Tabel 4.38.** Perbandingan perolahan daya teoritis pada turbin sudu linear dan 60°.

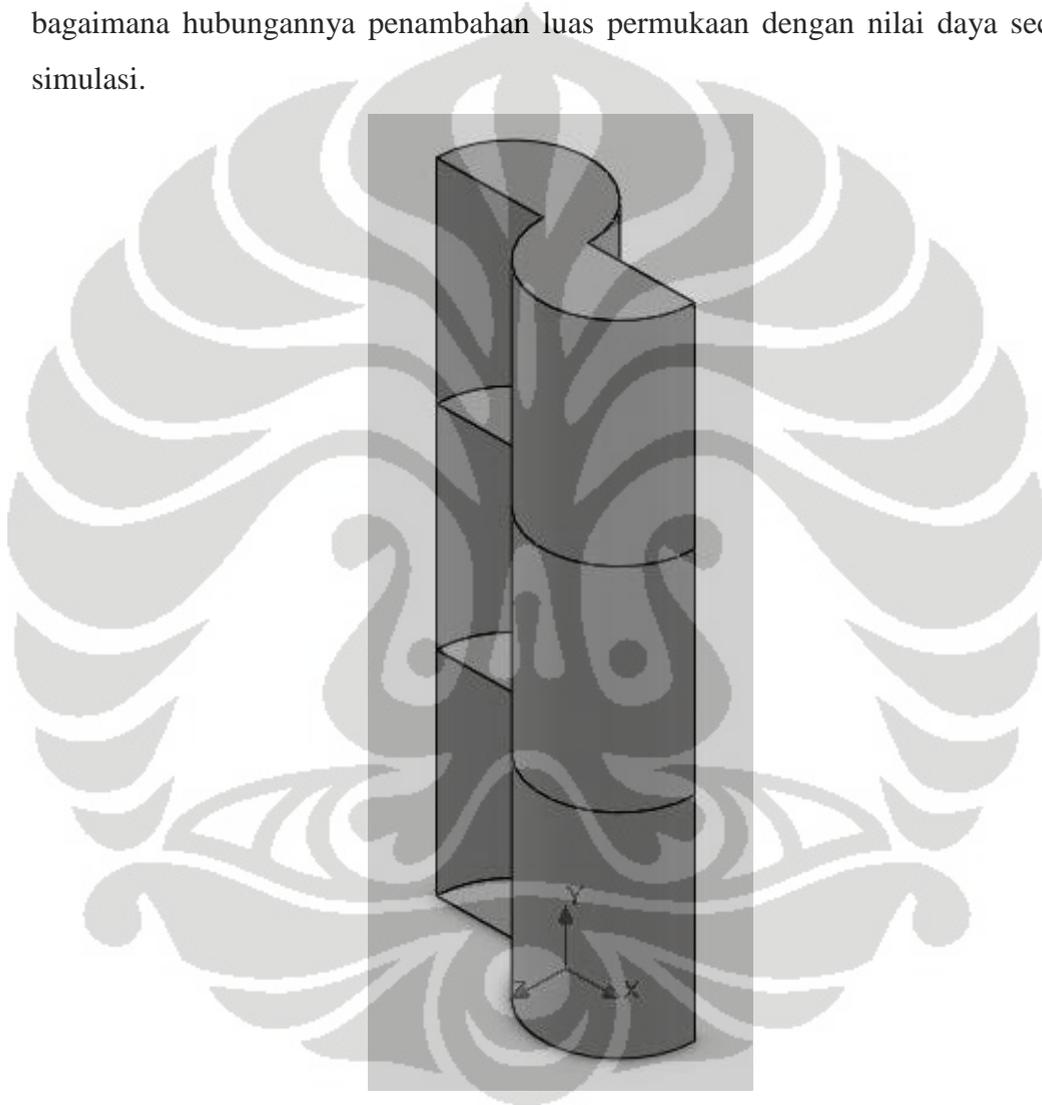
	linear	60°
	1,23	1,23
A	1,0724076	1,0724076
v	2	2
$P_t$	1,5828736	1,5828736

Rumus perhitungannya masih menggunakan rumus 2.2.

$$P_s = T \frac{2\pi N}{60}$$

#### IV.4.1 Model dengan Sudut Serang Sudu Linear 3 Lapis

Pemodelan yang pertama tiga lapis ini adalah yang linear dahulu. Pemodelan dengan menambah luas permukaan ini bertujuan menambah luas area permukaan yang akan menangkap angin yang datang dari arah tertentu. Dengan menggunakan rumus 2.1, maka nilai daya secara teoritis akan bertambah, karena nilai daya sebanding luas permukaan turbin. Dalam hal ini, akan diujikan bagaimana hubungannya penambahan luas permukaan dengan nilai daya secara simulasi.

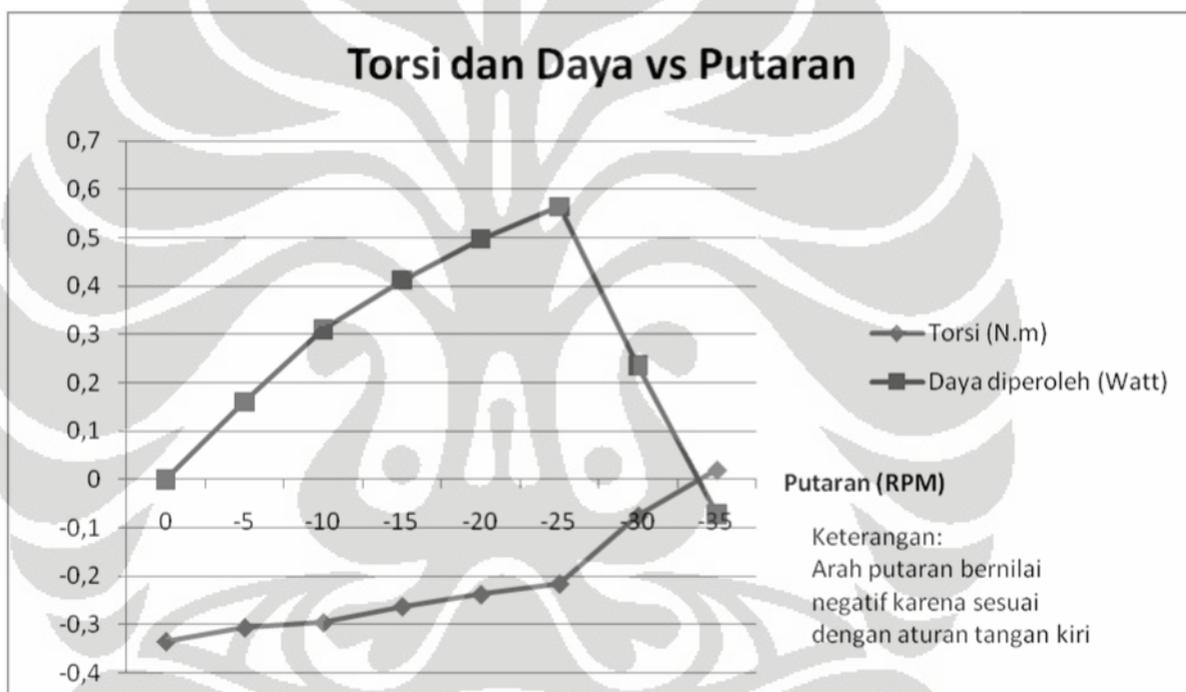


**Gambar 4.74.** Model savonius sudut sudu linear.

Setelah melakukan simulasi sesuai dengan langkah simulasi yang terdapat di lampiran, *plot* goal berupa file *sheet* yang berisikan nilai torsi, dihitung manual sesuai dengan rumus 2.2. Hasilnya dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

**Tabel 4.39.** Perolehan daya pada masing-masing putaran model savonius sudut sudu linear.

No	Putaran (rpm)	Torsi (N.m)	Daya diperoleh (Watt)
1	0	-0,334868748	0
2	-5	-0,306276508	0,160284706
3	-10	-0,295917115	0,30972658
4	-15	-0,262615163	0,412305805
5	-20	-0,237575113	0,497323904
6	-25	-0,2155166	0,563935102
7	-30	-0,07522515	0,236206971
8	-35	0,019607189	-0,071827669
9	-40	0,059664274	-0,249794426
10	-45	0,093458751	-0,440190716

**Grafik 4.19.** Grafik torsi dan daya vs putaran model savonius sudut sudu linear.

Daya yang diperoleh turbin model linear ini secara teoritis adalah 1,5828736 Watt. Maka *error* yang didapat adalah:

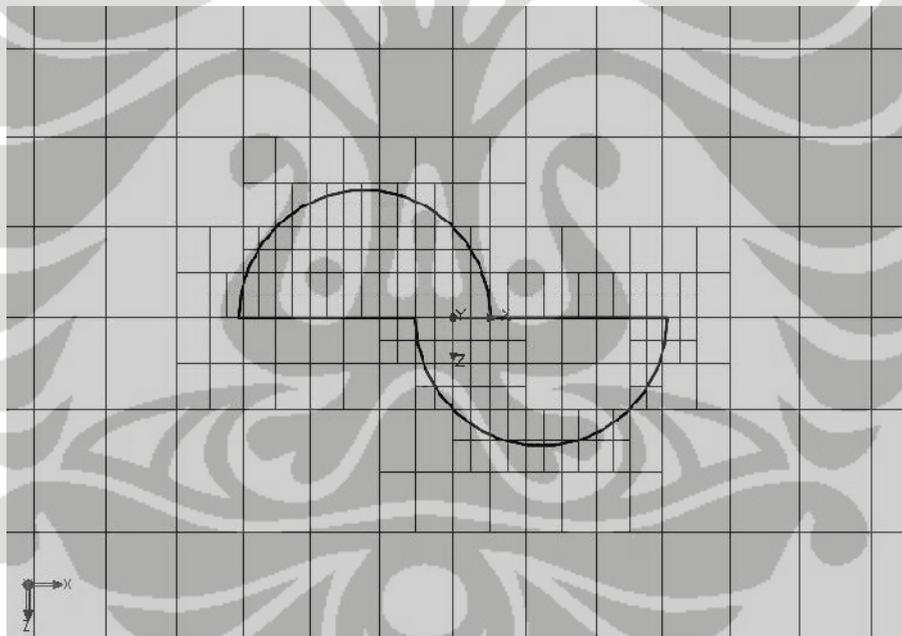
**Tabel 4.40.** Perbandingan *error* simulasi dengan teoritis model savonius sudut sudu linear.

Daya Teoritis (Watt)	Daya Simulasi (Watt)	Error (%)
1,582873618	0	100
1,582873618	0,160284706	89,87381532
1,582873618	0,30972658	80,43263993
1,582873618	0,412305805	73,95207041
1,582873618	0,497323904	68,5809468
1,582873618	0,563935102	64,3727019
1,582873618	0,236206971	85,07733224

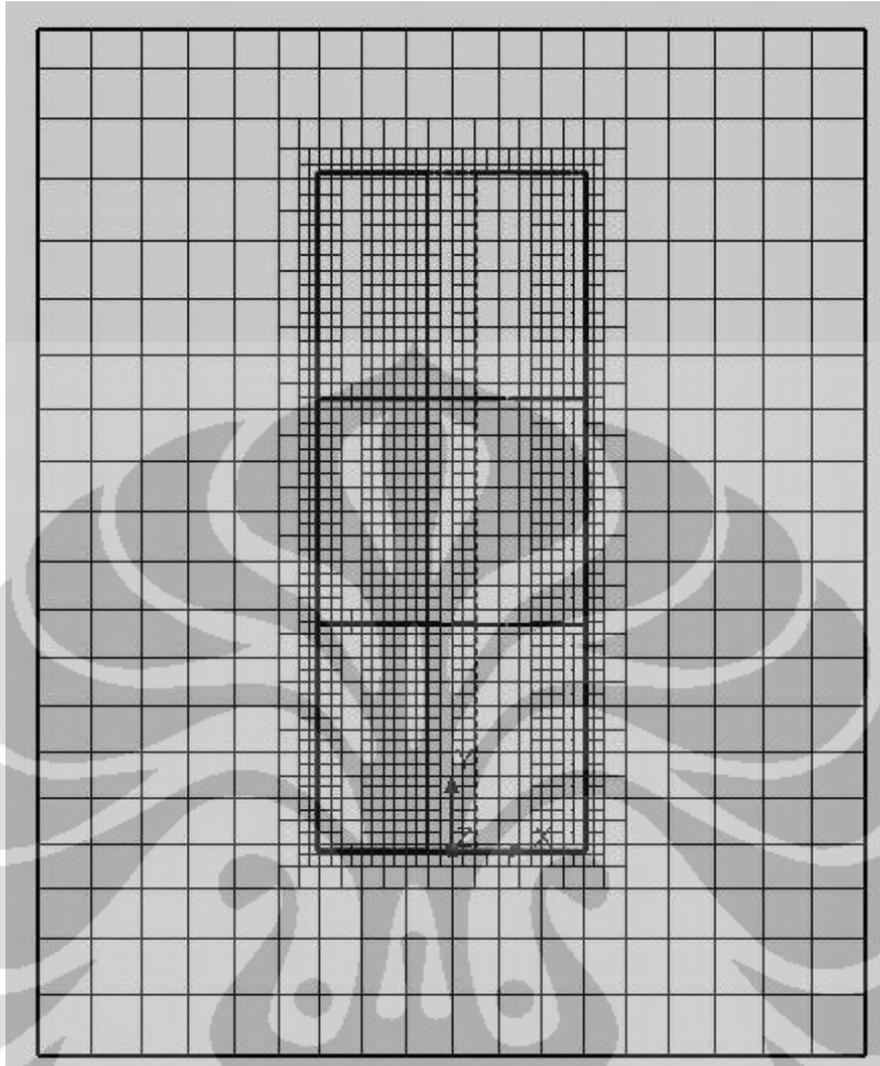
1,582873618	-0,071827669	104,5378019
1,582873618	-0,249794426	115,781072
1,582873618	-0,440190716	127,8095933

Dari grafik di atas, torsi negatif yang mampu dicapai turbin adalah saat putaran -30 rpm. Pada model linear ini, daya maksimum yang dihasilkan adalah 0,563935102 Watt pada putaran -25 rpm. Setelah itu, grafik daya turun hingga mendapat nilai daya negatif mulai dari putaran -35 rpm. Nilai *error* terkecil yang didapat adalah 64,373%. Sekarang, diamati hasil simulasi pada model pada saat putaran -25 rpm.

Pertama, dianalisa terlebih dahulu *meshing* fluida pada simulasi turbin angin ini, Karena ingin dicari tekanan dan kecepatan aliran fluida di sekitar daerah perhitungan turbin angin sesuai dengan langkah simulasi yang terdapat di lampiran.



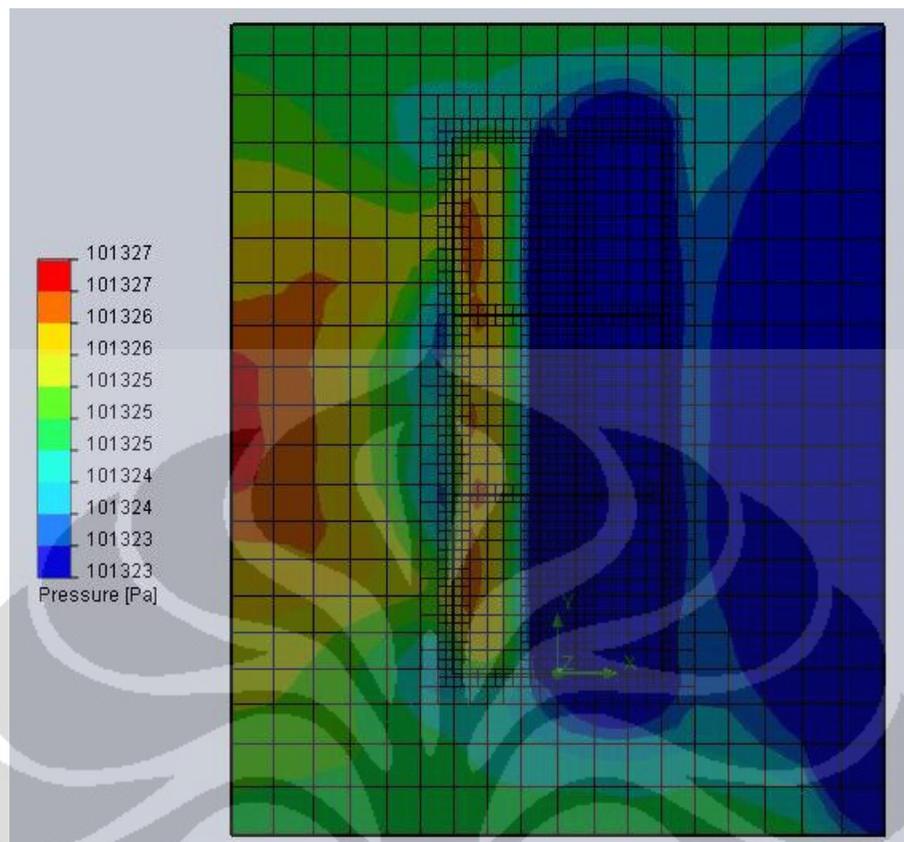
**Gambar 4.75.** Plot tampak atas *meshing* model savonius sudut sudu linear.



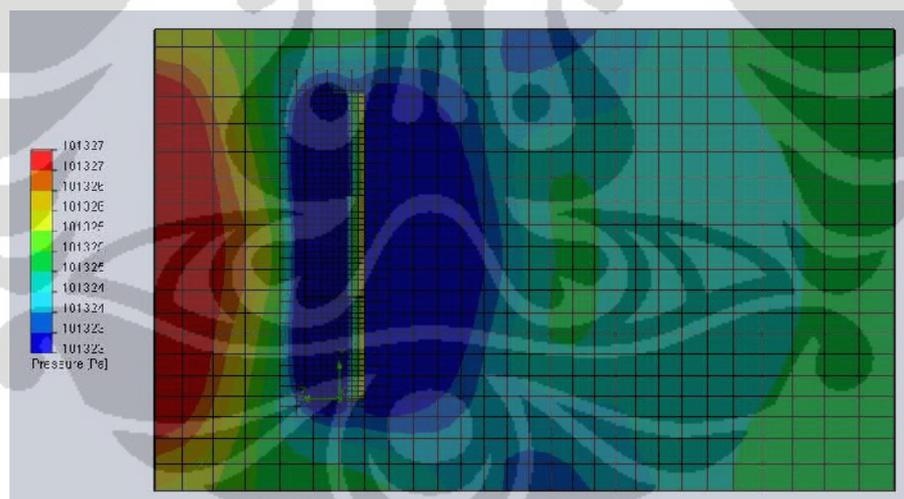
**Gambar 4.76.** Plot tampak depan *meshing* model savonius sudut sudu linear.

Permukaan *meshing* yang rapat terlihat pada daerah yang menjadi batas fluida dengan turbin, karena di daerah ini udara bersinggungan secara langsung. Daerah gap juga terlihat rapat seperti pada batas turbin.

Penyeragaman plot tekanan seperti pada model sebelumnya, dimana batas penampakan mulai dari 101323 – 101327 Pa. Penampakan *meshing* juga diperlihatkan pada plot tekanan ini.

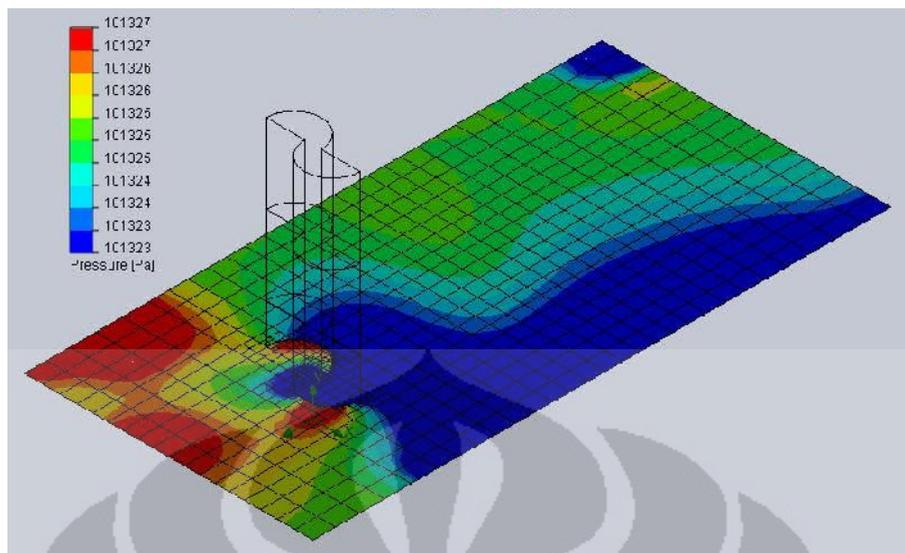


**Gambar 4.77.** Plot tampak depan tekanan model savonius sudut sudu linear.

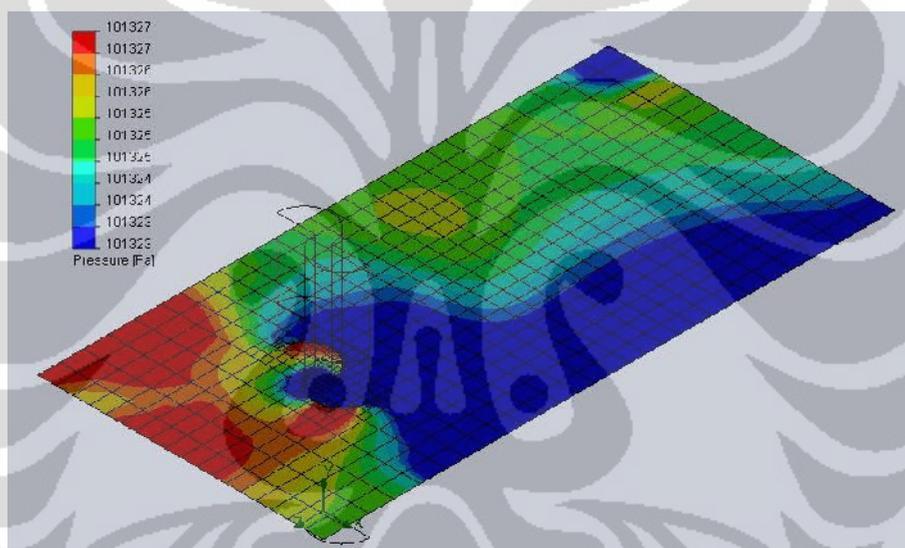


**Gambar 4.78.** Plot tampak samping tekanan model savonius sudut sudu linear.

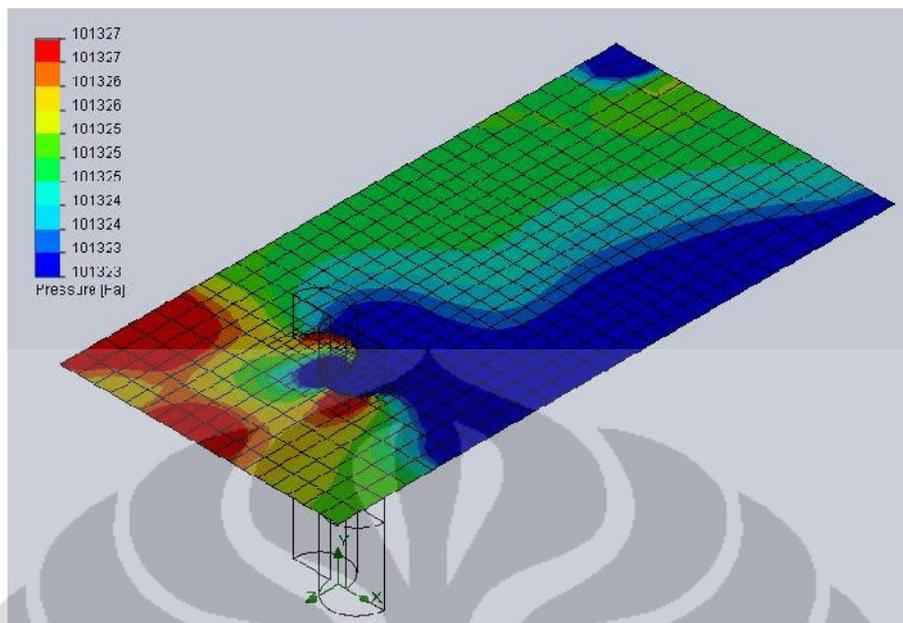
Pada tampak samping dan depan, dapat dilihat bahwa tekanan tinggi terdapat bagian lengkung dalam, namun luasnya tak sebesar pada saat sebelum menghadap turbin dan di kiri turbin. Area yang memiliki tekanan rendah terdapat di belakang turbin dan lengkung luar karena terhalang secara langsung oleh turbin.



**Gambar 4.79.** Plot tampak atas tekanan lapisan bawah model savonius sudut sudu linear.



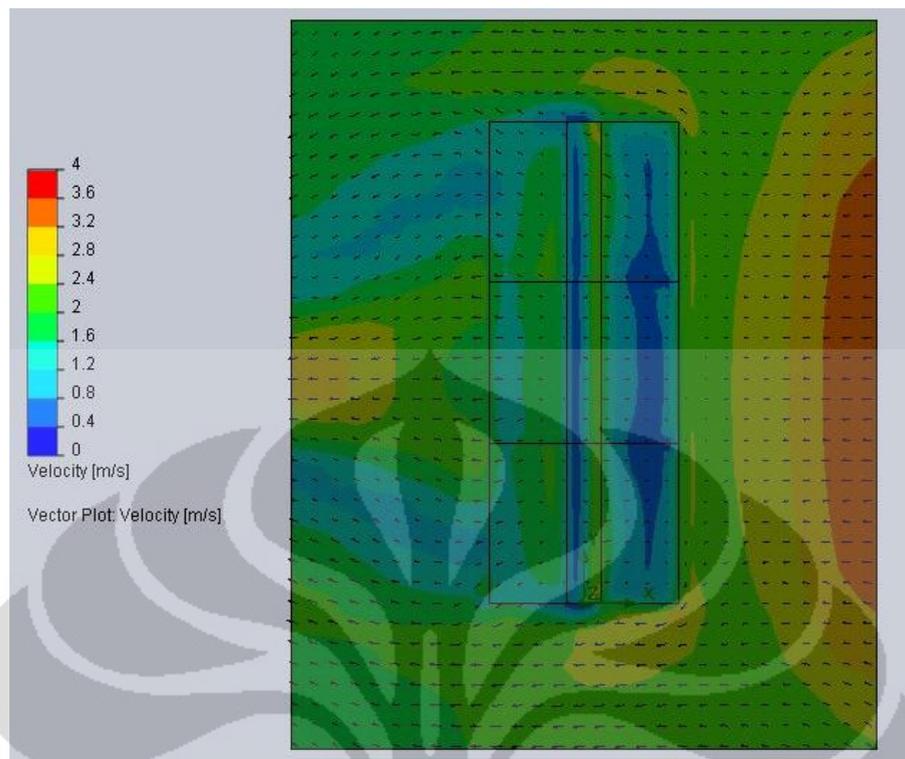
**Gambar 4.80.** Plot tampak atas tekanan lapisan tengah model savonius sudut sudu linear.



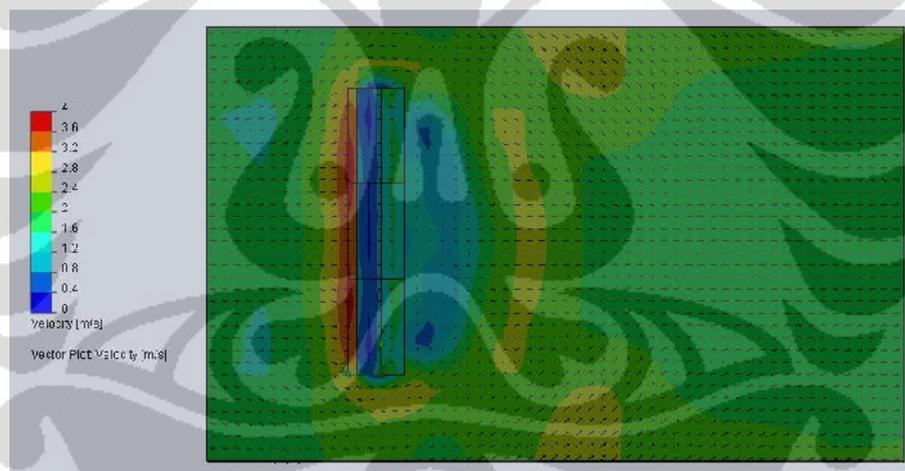
**Gambar 4.81.** Plot tampak atas tekanan lapisan atas model savonius sudut sudu linear.

Untuk tampak atas, ditampilkan tiga lapis, karena akan diamati perbedaan plot tekanan pada masing-masing lapisan. Pada lapisan bawah dan atas hampir tidak ada bedanya, penampakan tekanan besar terdapat di area yang menghadap langsung dengan turbin (lengkung dalam maupun luar), serta di area yang terdapat di depan dan kiri turbin. Tekanan rendah terdapat di belakang turbin karena terhalang turbin itu sendiri. Pada lapisan tengah sedikit berbeda dengan dua penampakan lainnya, dimana luas tekanan tinggi lebih besar. Terlihat juga tekanan yang sedikit tinggi di belakang turbin pada jarak tertentu.

Kemudian diamati plot kecepatan udara beserta vektornya dengan cara yang sama dengan model-model sebelumnya. Batasan kecepatan juga pada 0 – 4 m/s.

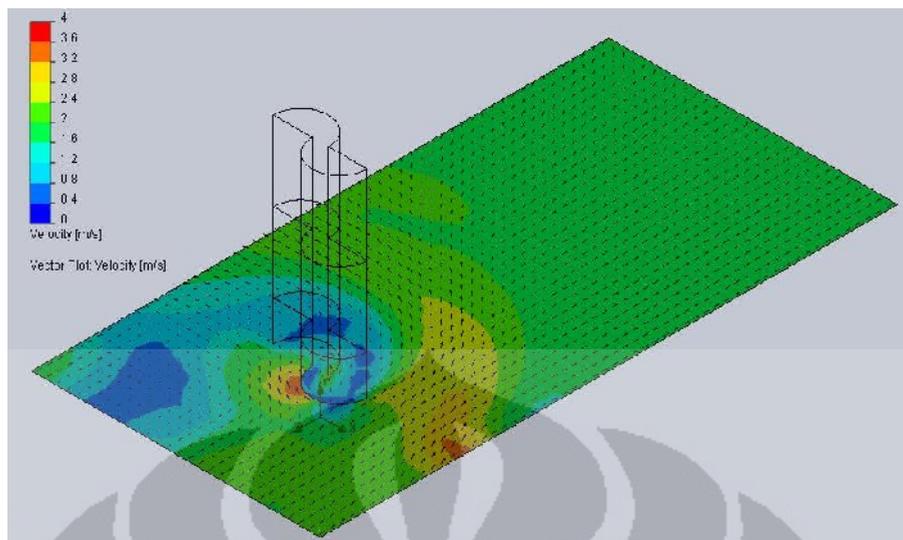


**Gambar 4.82.** Plot tampak depan kecepatan angin model savonius sudut sudu linear.

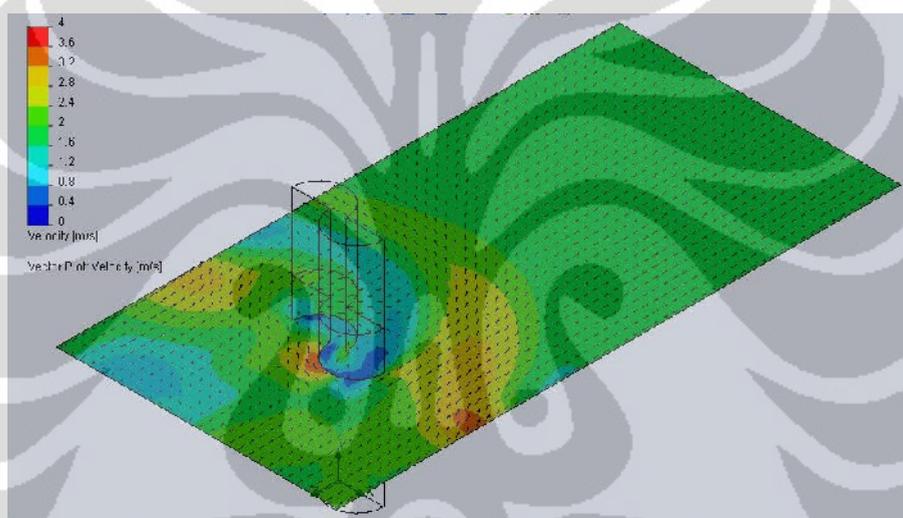


**Gambar 4.83.** Plot tampak samping kecepatan angin model savonius sudut sudu linear.

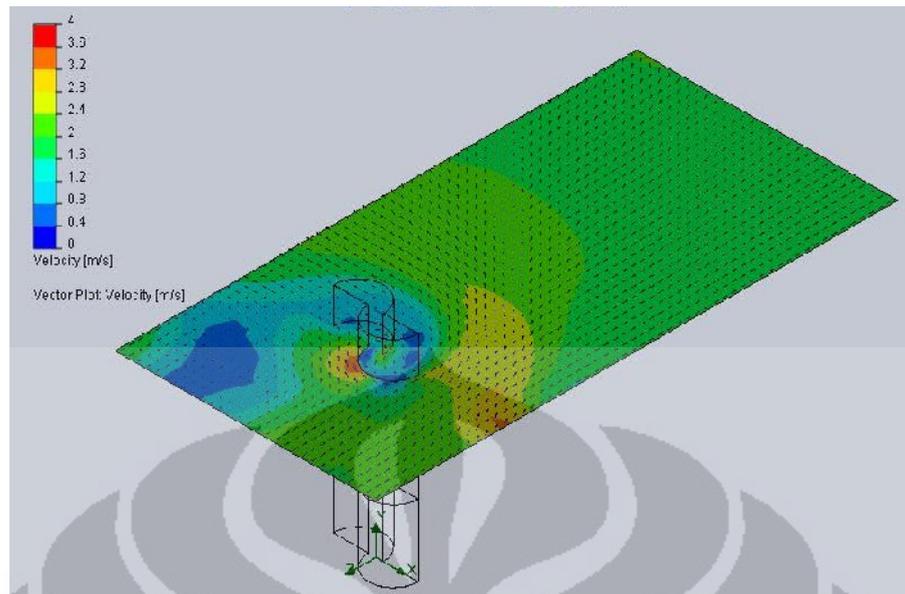
Pada plot tampak atas dan samping kecepatan angin dan vektor, terlihat angin kecepatan tinggi ada di kanan turbin dimana angin dapat mengalir langsung karena bentuk lengkung luar yang tidak menangkap angin, sehingga aliran angin mampu melewati turbin. Di bagian gap, terlihat angin kecepatan rendah, karena di daerah ini tidak langsung kena angin, melainkan melalui pantulan sudu savonius. Di belakang turbin tetap menjadi daerah dengan kecepatan angin rendah.



**Gambar 4.84.** Plot tampak atas kecepatan angin lapisan bawah model savonius sudut sudu linear.



**Gambar 4.85.** Plot tampak atas kecepatan angin lapisan tengah model savonius sudut sudu linear.

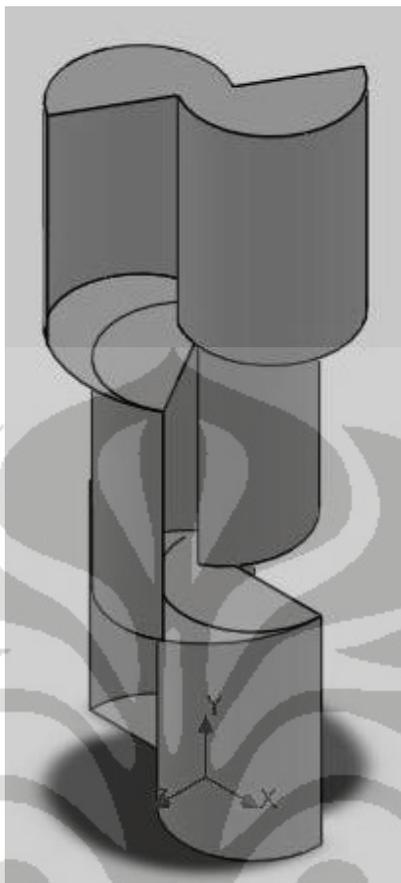


**Gambar 4.86.** Plot tampak atas kecepatan angin lapisan atas model savonius sudut sudu linear.

Sama seperti penampakan tekanan pada tampak atas lapis atas dan bawah, dimana pola plot hampir sama. Kecepatan angin tertinggi terdapat di kanan turbin serta di daerah lengkung luar kiri, karena di daerah ini tidak menangkap angin, melainkan hanya melewatkan saja. Kecepatan rendah terjadi di depan kiri turbin. Kecepatan rendah juga terjadi di daerah belakang turbin yang tidak langsung menghadap arah angin.

#### **IV.4.2 Model dengan Sudut Serang Sudu $60^\circ$ 3 Lapis**

Pemodelan selanjutnya adalah model 3 lapis dengan dengan sudut  $60^\circ$ .

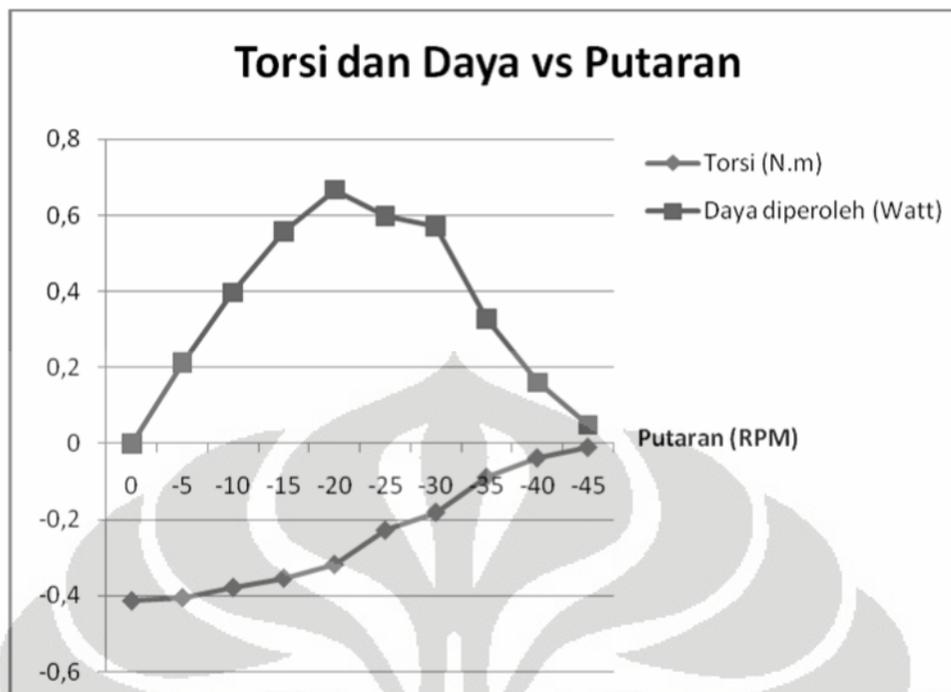


**Gambar 4.87.** Model savonius sudut sudu  $60^\circ$ .

Setelah melakukan simulasi sesuai dengan langkah simulasi yang terdapat di lampiran, *plot goal* berupa file *sheet* yang berisikan nilai torsi, dihitung manual sesuai dengan rumus 2.2. Hasilnya dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

**Tabel 4.41.** Perolehan daya pada masing-masing putaran model savonius sudut sudu  $60^\circ$ .

No	Putaran (rpm)	Torsi (N.m)	Daya diperoleh (Watt)
1	0	-0,414225906	0
2	-5	-0,406064897	0,212507296
3	-10	-0,379244251	0,396942316
4	-15	-0,354726606	0,556920772
5	-20	-0,318568322	0,666869687
6	-25	-0,228558929	0,59806253
7	-30	-0,181560613	0,570100324
8	-35	-0,089350215	0,327319622
9	-40	-0,038266594	0,160209472
10	-45	-0,010458503	0,049259551



**Grafik 4.20.** Grafik torsi dan daya vs putaran model savonius sudut sudu  $60^\circ$ .

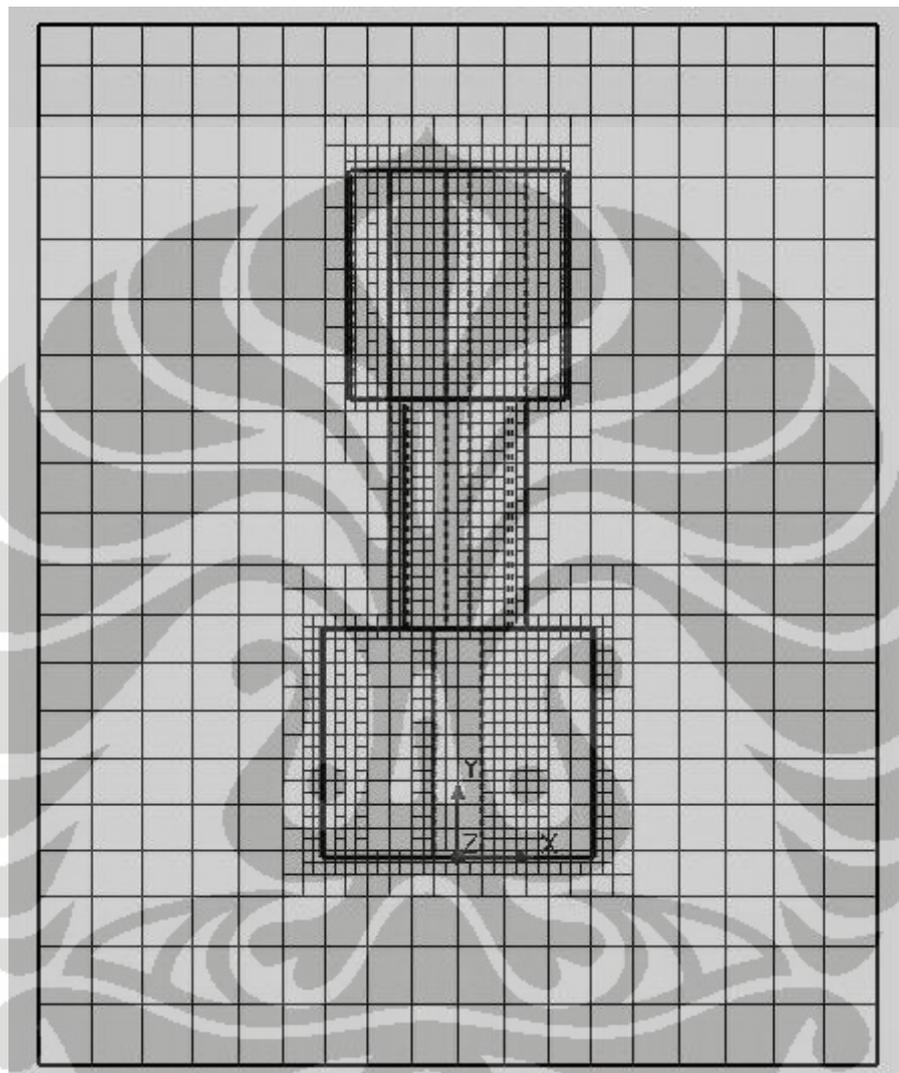
Daya yang diperoleh turbin model linear ini secara teoritis adalah 1,5828736 Watt. Maka *error* terkecil yang didapat adalah:

**Tabel 4.42.** Perbandingan *error* simulasi dengan teoritis model savonius sudut sudu  $60^\circ$ .

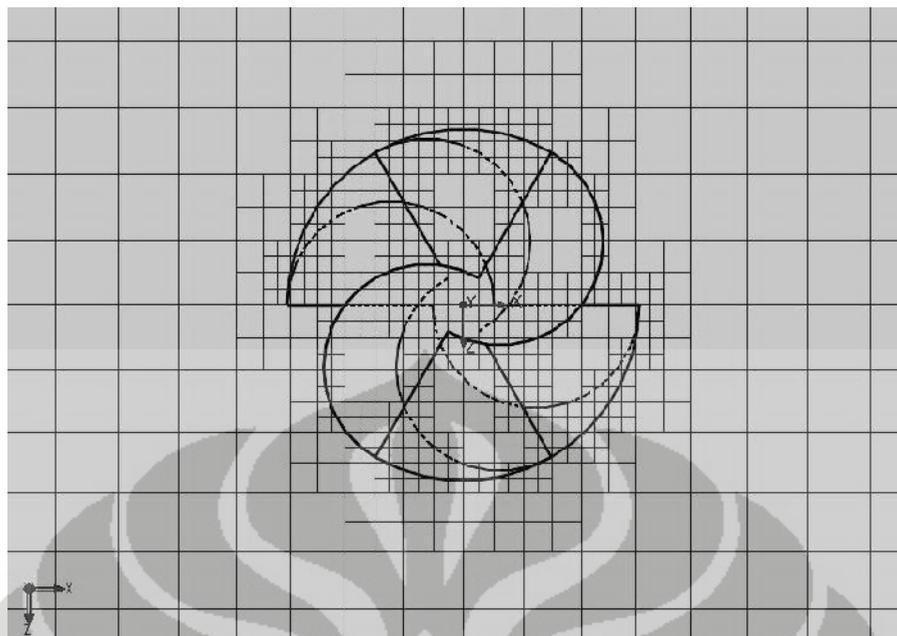
Daya Teoritis (Watt)	Daya Simulasi (Watt)	Error (%)
1,582873618	0	100
1,582873618	0,212507296	86,57458854
1,582873618	0,396942316	74,92267785
1,582873618	0,556920772	64,8158409
1,582873618	0,666869687	57,86968211
1,582873618	0,59806253	62,21665939
1,582873618	0,570100324	63,98320637
1,582873618	0,327319622	79,32117775
1,582873618	0,160209472	89,87856829
1,582873618	0,049259551	96,88796688

Batasan putaran yang sampai -45 rpm, mampu membuat turbin tetap mendapat nilai daya positif pada batas itu. Pada model sudut  $60^\circ$  ini, daya maksimum yang dihasilkan adalah 0,666869687 Watt pada putaran -20 rpm. Setelah itu, grafik daya turun menuju batas putaran. Nilai *error* terkecil yang didapat adalah 57,87%. Sekarang, diamati hasil simulasi pada model pada saat putaran -20 rpm.

Pertama, dianalisa terlebih dahulu *meshing* fluida pada simulasi turbin angin ini, Karena ingin dicari tekanan dan kecepatan aliran fluida di sekitar daerah perhitungan turbin angin sesuai dengan langkah simulasi yang terdapat di lampiran.



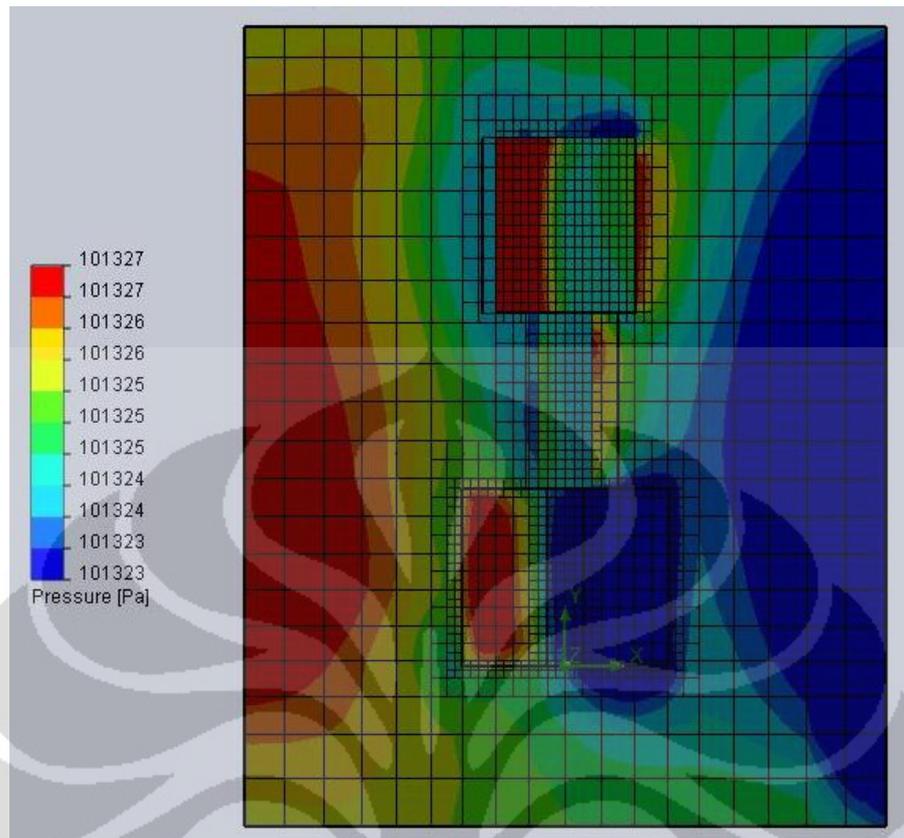
**Gambar 4.88.** Plot tampak depan *meshing* model savonius sudut sudu  $60^\circ$ .



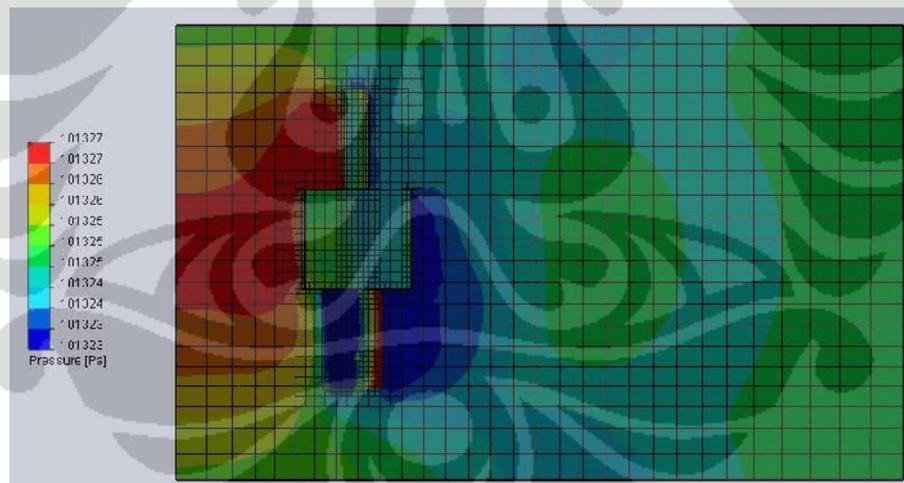
**Gambar 4.89.** Plot tampak atas *meshing* model savonius sudut sudu  $60^\circ$ .

Sama dengan model sebelumnya, permukaan *meshing* yang rapat terlihat pada daerah yang menjadi batas fluida dengan turbin, karena di daerah ini udara bersinggungan secara langsung. Daerah gap juga terlihat rapat seperti pada batas turbin.

Penyeragaman plot tekanan seperti pada model sebelumnya, dimana batas penampakan mulai dari 101323 – 101327 Pa. Penampakan *meshing* juga diperlihatkan pada plot tekanan ini.

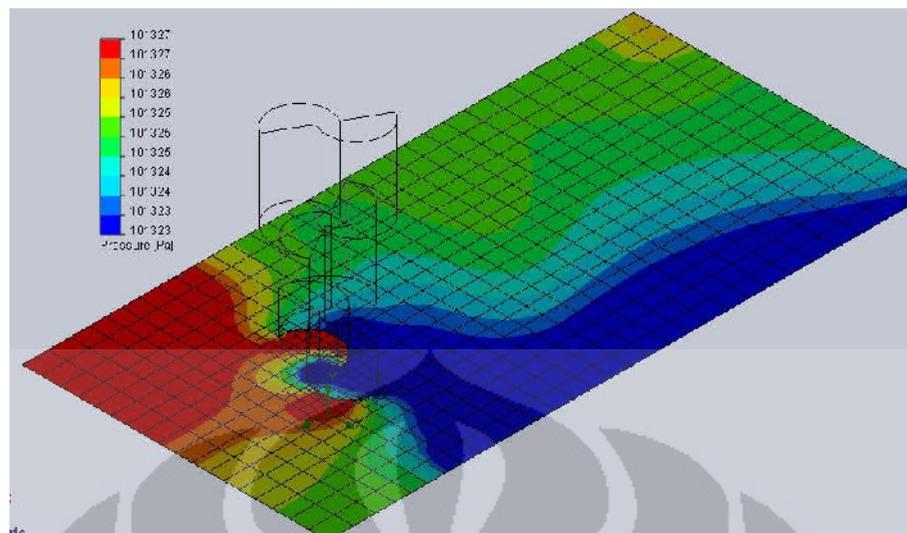


**Gambar 4.90.** Plot tampak depan tekanan model savonius sudut sudu  $60^\circ$ .

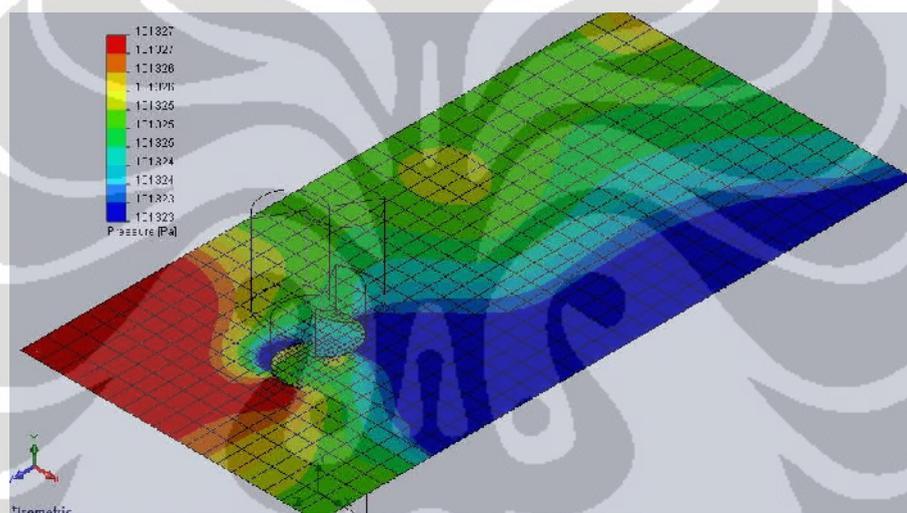


**Gambar 4.91.** Plot tampak samping tekanan model savonius sudut sudu  $60^\circ$ .

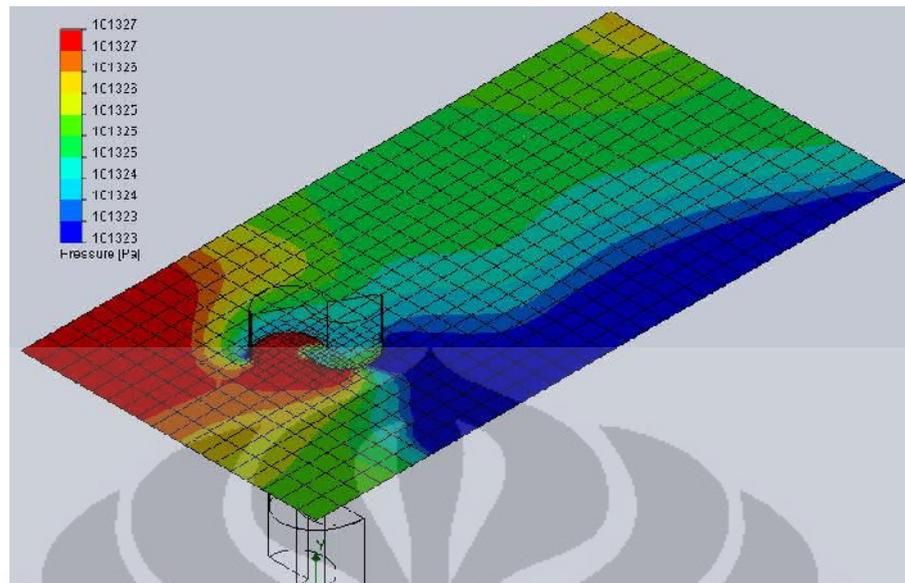
Pada tampak depan dan samping, dapat dilihat bahwa tekanan tinggi terdapat bagian lengkung dalam, namun luasnya tak sebesar pada saat sebelum menghadap turbin dan di kiri turbin. Tapi luasan area tekanan tinggi di lengkung dalam turbin lebih besar dibanding model lapis linear. Area yang memiliki tekanan rendah terdapat di belakang turbin dan lengkung luar karena terhalang secara langsung oleh turbin.



**Gambar 4.92.** Plot tampak atas tekanan lapisan bawah model savonius sudut sudu  $60^\circ$ .



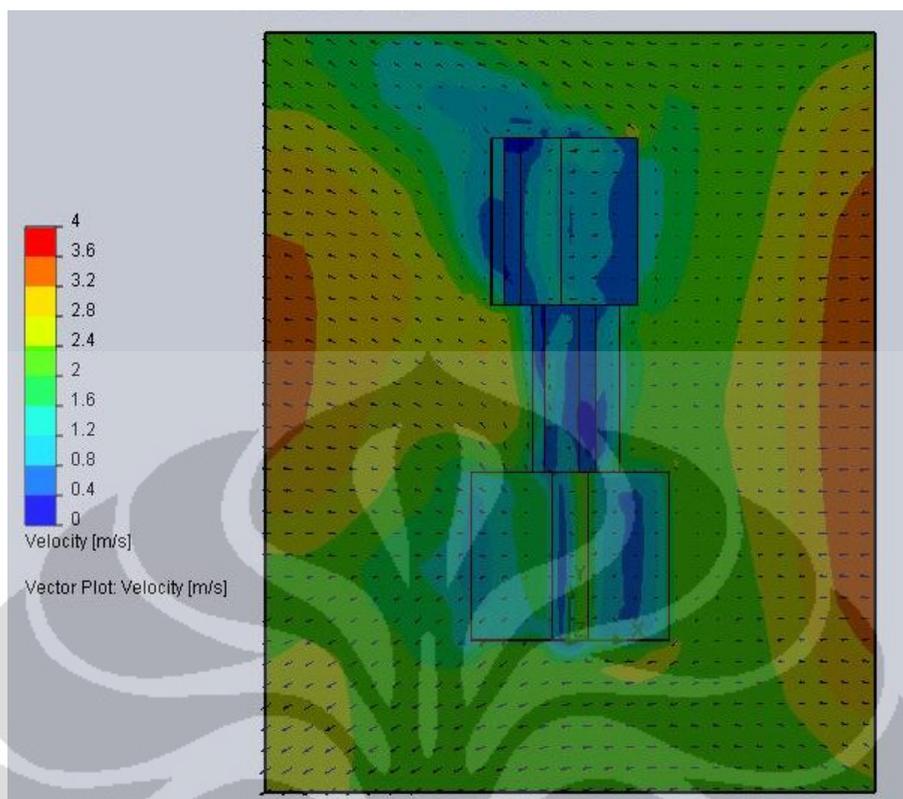
**Gambar 4.93.** Plot tampak atas tekanan lapisan tengah model savonius sudut sudu  $60^\circ$ .



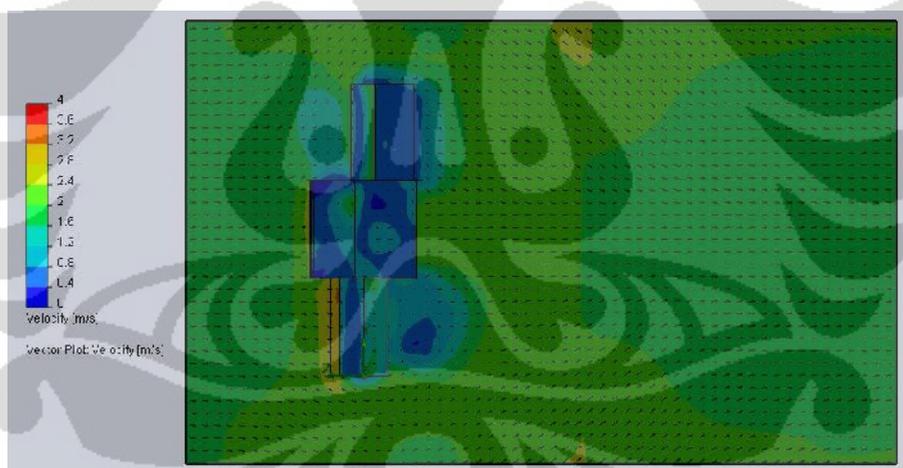
**Gambar 4.94.** Plot tampak atas tekanan lapisan atas model savonius sudut sudu  $60^\circ$ .

Pada penampakan tekanan tampak atas yang ditampilkan isometri ini, terlihat bahwa masing-masing lapisan memainkan peranan turbin untuk menjaga torsi turbin tetap stabil. Hal ini ditunjukkan dengan penampakan tekanan tinggi pada bagian lengkung dalam masing-masing, angin memberikan tekanan melalui alirannya sehingga membuat turbin bergerak cenderung dinamis. Saat lengkung dalam itu menjauhi arah aliran angin (gambar 4.93), tekanan angin masih memberikan efeknya, namun tak sebesar saat lengkung dalam itu berhadapan langsung dengan arah angin. Tekanan angin masih terjadi di kiri depan turbin, dimana angin akan ditangkap oleh lengkung dalam tersebut, dan di kanan belakang turbin merupakan area bertekanan rendah karena angin dapat dengan mudah melewati bentuk lengkung luar yang berbentuk tabung.

Kemudian diamati plot kecepatan udara beserta vektornya dengan cara yang sama dengan model-model sebelumnya. Batasan kecepatan juga pada  $0 - 4$  m/s.

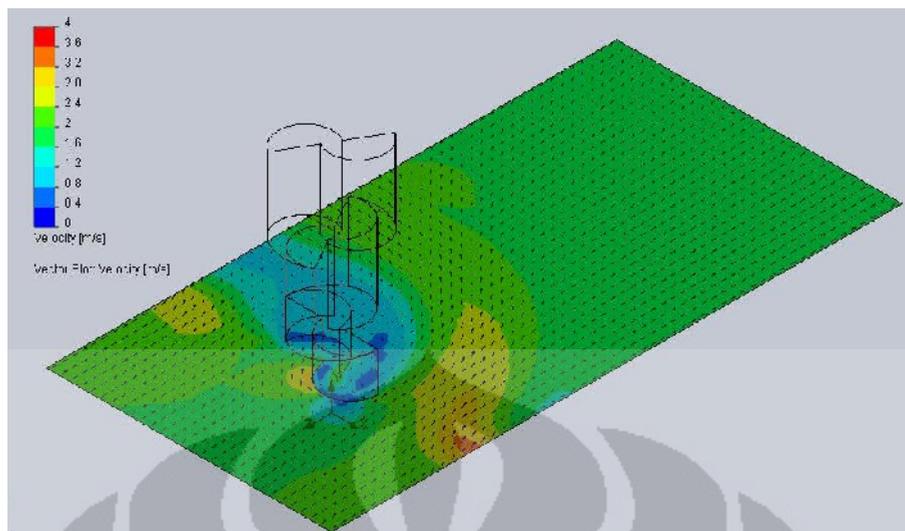


**Gambar 4.95.** Plot tampak depan kecepatan angin model savonius sudut sudu  $60^\circ$ .

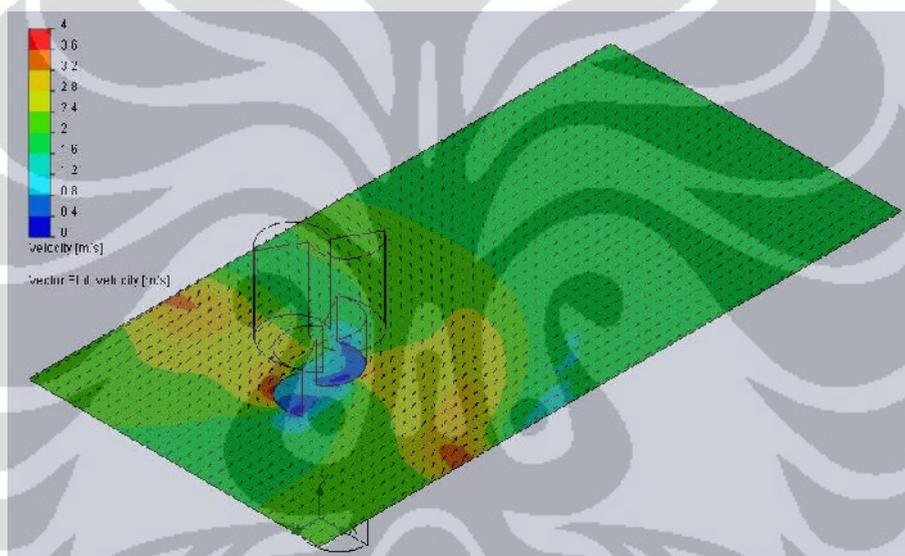


**Gambar 4.96.** Plot tampak samping kecepatan angin model savonius sudut sudu  $60^\circ$ .

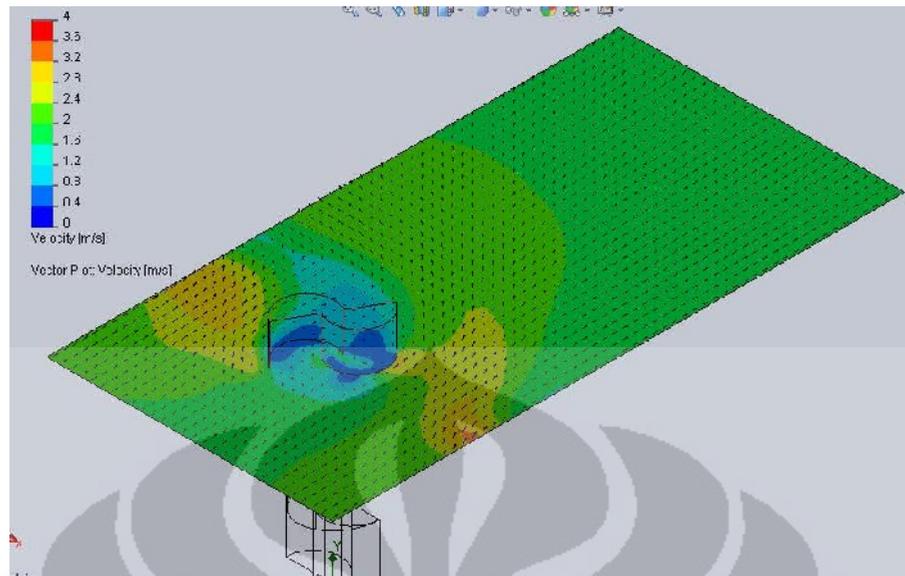
Area yang bertekanan tinggi terdapat di kanan dan kiri turbin, karena turbin ini memiliki bentuk yang berbeda sudutnya pada tiap lapisan, sehingga angin mampu melewati turbin, terutama pada bagian tengah. Daerah yang di plot tekanan terlihat bertekanan tinggi, di plot kecepatan terlihat berkecepatan rendah. Hal ini karena saat udara menumbuk lengkung dalam turbin menjadi terhambat karena akan mendorong turbin itu sendiri. Daerah di belakang turbin juga menjadi daerah berkecepatan rendah.



**Gambar 4.97.** Plot tampak atas kecepatan angin lapisan bawah model savonius sudut sudu  $60^\circ$ .



**Gambar 4.98.** Plot tampak atas kecepatan angin lapisan tengah model savonius sudut sudu  $60^\circ$ .



**Gambar 4.99.** Plot tampak atas kecepatan angin lapisan atas model savonius sudut sudu  $60^\circ$ .

Untuk tampak atas yang ditampilkan isometri, terlihat bahwa saat lapisan bawah menghadap menyerupai model yang ditampilkan satu lapis. Saat di lapisan tengah dan atas terdapat kecepatan angin yang tinggi. Karena saat posisi tersebut, angin mampu melewati turbin. Bagian lengkung dalam masing-masing lapisan memiliki kecepatan angin yang rendah, karena angin tersebut memberikan tekanan pada bagian lengkung dalam. Daerah di belakang turbin juga memiliki kecepatan rendah. Namun tidak serendah di bagian lengkung dalam, karena di daerah ini angin tidak mendorong turbin.

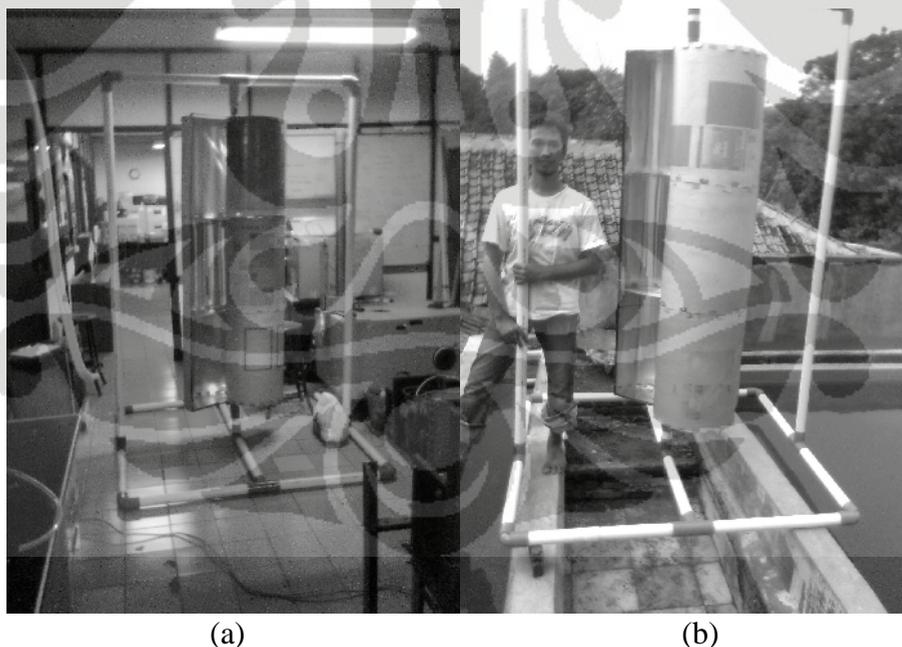
#### **IV.5 Analisa Aplikasi Turbin Savonius pada ZEB**

Setelah melakukan simulasi pada turbin yang dimodifikasi luas permukaannya, didapat bahwa turbin angin savonius dengan memodifikasi luas permukaan jauh lebih baik dibanding yang memiliki satu lapis. Hasilnya dapat dilihat daya yang dicapai berbeda. Dalam penelitian ini, simulasi turbin angin dengan gap 114 mm diambil sebagai contoh berdasarkan hasil simulasi yang menunjukkan nilai *error* terkecil ada di turbin ini. Kemudian modifikasi selanjutnya diterapkan, dengan tanpa perbedaan sudut dan sudut  $60^\circ$  pada sudu turbin. Hasilnya, turbin angin dengan modifikasi sudut  $60^\circ$  memiliki *error* terkecil lebih baik dibanding model tanpa sudut ataupun model sederhananya. Penilaian terhadap validasi pun terlihat bahwa turbin yang memiliki gap 114 mm dengan modifikasi sudut  $60^\circ$  memiliki nilai yang mendekati turbin savonius referensi.

**Tabel 4.43.** Perbandingan daya simulasi dan *error* model savonius gap 114 mm.

No	Putaran (rpm)	model 1 lapis gap 114 mm		model 3 lapis sudut linear gap 114 mm		model 1 lapis sudut 60° gap 114 mm	
		Daya Simulasi (Watt)	Error (%)	Daya Simulasi (Watt)	Error (%)	Daya Simulasi (Watt)	Error (%)
1	0	0	100	0	100	0	100
2	-5	0,039618891	92,49108258	0,160284706	89,87381532	0,212507296	86,57458854
3	-10	0,081231954	84,60421223	0,30972658	80,43263993	0,396942316	74,92267785
4	-15	0,105422839	80,01934492	0,412305805	73,95207041	0,556920772	64,8158409
5	-20	0,110360406	79,08353424	0,497323904	68,5809468	0,666869687	57,86968211
6	-25	0,026394368	94,99750947	0,563935102	64,3727019	0,59806253	62,21665939
7	-30	-0,038517006	107,3000786	0,236206971	85,07733224	0,570100324	63,98320637
8	-35	-0,147115022	127,8825208	-0,071827669	104,5378019	0,327319622	79,32117775
9	-40	-0,20615907	139,0730633	-0,249794426	115,781072	0,160209472	89,87856829
10	-45	-0,247520056	146,9121576	-0,440190716	127,8095933	0,049259551	96,88796688

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa penambahan luas permukaan turbin memberikan efek meningkatnya nilai daya sebagai akibat dari meningkatnya nilai torsi. Nilai *error* berkurang dari model awal, dimana *error* 79,084% menurun menjadi 64,373% pada model sudut linear, dan 57,87% pada model sudut 60°.

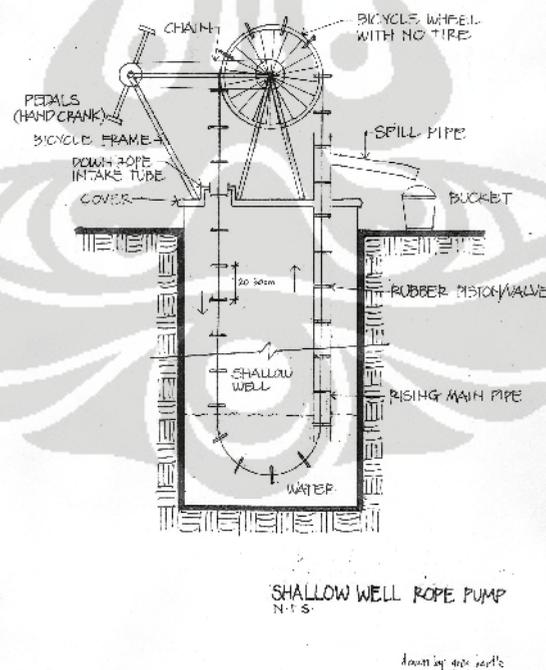


**Gambar 4.100.** (a) Proses manufaktur turbin savonius di Lab Mekanika Fluida. (b) Pengujian dengan menempatkan turbin savonius di rumah X.

Berangkat dari simulasi pada model di atas, maka model sudut  $60^\circ$  lebih baik dalam memerankan peranan sebagai metode dalam penerapan *Zero Energi Building* (ZEB). Karena *error* yang dimiliki semakin mengecil.

Sebagai aplikasi pada bangunan ZEB, maka dibuat lah turbin angin savonius untuk mendapatkan gambaran bagaimana ZEB itu bekerja. Rancangan dalam penelitian ini hanya sebatas merancang bentuk turbin angin savonius berdasarkan eksentristas dan modifikasi bentuk saja. Turbin angin ini sendiri akan digunakan untuk mengkopel *rope pump* yang bertujuan menaikkan air dari lantai bawah ke atas. Energi angin yang diterima turbin savonius diubah menjadi energi mekanik turbin melalui porosnya. Kemudian diteruskan melalui *pulley* yang dihubungkan semacam tali menuju *rope pump*. Nantinya *rope pump* tersebut akan menaikkan air dari lantai bawah ke atas.

*Rope pump* adalah sebuah pompa yang bekerja menggunakan tali berpiston, dimana tali yang menuju ke air ke bawah bersifat renggang dan naik ke atas membawa air. Prinsip kerjanya tali yang diletakkan melalui semacam roda digerakkan oleh gaya torsi. Gaya yang bekerja inilah yang nantinya akan dipakai pada turbin savonius.



**Gambar 4.101.** Prinsip kerja *rope pump*.

(Sumber: <http://www.scn.org/cmp/ex-illu.htm>, Greg Bartle: 2007)



**Gambar 4.102.** *Rope pump* yang akan disatukan dengan turbin angin hasil rancangan.

Dengan adanya pengkopelan energi mekanik dari turbin angin ke sistem mekanikal, diharapkan mampu mengurangi penggunaan energi yang tidak diperbaharui pada rumah yang akan menerapkan sistem ZEB. Sesuai dengan tujuan dari ZEB adalah mengurangi energi yang tidak dapat diperbaharui dengan menggunakan energi yang ada di lingkungan sekitar. Energi gerak angin ditangkap turbin, kemudian diubah menjadi energi mekanik turbin angin, yang dimanfaatkan untuk menggerakkan *rope pump* yang bekerja memindahkan fluida berupa air yang akan mendinginkan bangunan dengan media berupa kolam-kolam yang ada di rumah X.

## BAB V

### PENUTUP

#### IV.1 Kesimpulan

Dari hasil pemodelan dan simulasi yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Nilai daya yang didapat pada masing-masing model dengan menggunakan rumus 2.1, bahwa semakin besar gap yang dimiliki maka nilai daya akan semakin kecil. Hasil perhitungan teoritis dapat dilihat pada Tabel 4.1.
2. Nilai daya yang didapat secara simulasi tidak se-linear secara teoritis, melainkan berubah pada gap dan putaran tertentu. Daya tinggi tertinggi ada pada gap 114 mm dan daya tinggi terendah ada pada gap 216 mm.
3. Daya tertinggi secara simulasi ada pada gap 114 mm, dengan besar daya 0,110360406 Watt pada putaran -20 rpm dan torsi -0,052719939 N.m. *Error*-nya sebesar 79,084%.
4. Secara umum, karakter *meshing* model hampir sama, dimana yang rapat terdapat di daerah batas fluida dengan turbin dan di gap. Penampakan tekanan tinggi terlihat pada area yang berhadapan langsung dengan arah aliran angin, terutama pada area lengkung dalam yang berguna menangkap angin. Plot angin berkecepatan rendah terlihat pada area di belakang turbin, terutama di lengkung luar turbin dan gap. Arah aliran angin cenderung ke kiri. Satu hal yang menarik adalah karakter *meshing*, tekanan, dan kecepatan udara pada gap 216 mm sangat berbeda dibanding model-model sebelumnya.
5. Validasi pada model yang mendekati nilai referensi adalah model dengan gap 114 mm, dengan nilai  $C_p$  terbesar adalah 0,062749 yang berada pada TSR 0,34013736 (20 rpm).
6. Setelah melakukan penambahan luas permukaan dan modifikasi sudut serang sudu turbin, didapat peningkatan efisiensi dibanding model yang

satu lapis sudu. *Error* terkecil diperoleh turbin savonius model sudut serang sudu  $60^\circ$  dengan nilai 57,87% dan daya menurut simulasi 0,666869687 Watt. Sedangkan *error* turbin savonius model sudut serang sudu linear tertinggi adalah 64,373% dengan daya 0,563935102 Watt. Nilai validasi pada turbin savonius dengan peningkatan luas permukaan, yang mendekati grafik referensi adalah yang berupa model sudut serang sudu  $60^\circ$  dengan nilai  $C_p$  terbesar adalah 0,12639 yang berada pada TSR 0,34013736 (20 rpm).

7. Dalam penerapannya terhadap ZEB, yaitu mengurangi penggunaan energi yang tidak dapat diperbaharui dapat menjadi salah satu metode dalam ZEB. Energi gerak angin ditangkap turbin, kemudian diubah menjadi energi mekanik turbin angin, yang dimanfaatkan untuk menggerakkan *rope pump* yang bekerja memindahkan fluida berupa air yang akan mendinginkan bangunan dengan media berupa kolam-kolam yang ada di rumah X.

#### IV.2 Saran

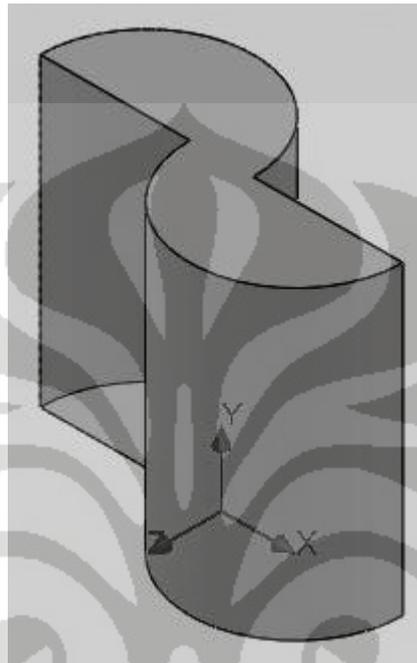
Saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Pada pengamatan *meshing*, diharapkan menggunakan perangkat komputasi dengan spesifikasi *hardware* tinggi, agar mampu menghitung elemen-elemen pada masing *grid* yang menjadi daerah perhitungan lebih mendekati nilai nyata.
2. Modifikasi berupa penambahan jumlah sudu dalam kaitannya dengan perubahan nilai efisiensi.

## Daftar Referensi

- Baden, S., et al. (Agustus 2006). *Hurdling Financial Barriers to Lower energy Buildings: Experiences from the USA and Europe on Financial Incentives and Monetizing Building Energy Savings in Private Investment Decisions*. Proceedings of 2006 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, American Council for an Energy Efficient Economy, Washington DC.
- Ball, Matt. (2009). *Turbine review*. Dibuka 6 November 2009. <<https://wiki.duke.edu/display/wtw/Turbine+review>>
- Clarke, S.. (September 2003). *Electricity Generation Using Small Wind Turbines at Your Home or Farm*. Government of Ontario. Dibuka 17 April 2009. <[www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/03-047.htm](http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/03-047.htm)>
- Givalda, Jna., Massons, J., dan Diaz, F.. (1991). *Wind Engineering vol. 15: Drag and Lift Coefficients of the Savonius Wind Machine*.
- H. Grassmann, M.L.Ganis.. (2009). dari Departemen Fisika Univ. di Udine Italia. *CFD Modeling for Wind Turbines*. Dibuka 18 Februari 2009. <[http://www.cd-adapco.com/press\\_room/dynamics/21/wind\\_turbines.html](http://www.cd-adapco.com/press_room/dynamics/21/wind_turbines.html)>
- Islam, A.K.M.. (1995). *Wind Engineering vol. 19: Static Torque and Drag Characteristics of an S-Shaped Savonius Rotor and Prediction of Dynamics Characteristics*.
- Moustoglou, A. dan Weng, Y.. (1995). *Wind Engineering vol. 19: Performance Tests of a Benesh Wind Turbine Rotor and Savonius Rotor*.
- Natural Resources Management and Environment Department. *Water Lifting Devices*. Dibuka 19 September 2009. <<http://www.fao.org/docrep/010/ah810e/AH810E10.htm>>
- Oktrianto, A., et.al. (2005). *Pengembangan Kincir Angin Jenis Savonius sebagai Pembangkit Listrik untuk Pengisian Ulang Baterai pada "Mobile Devices"*. Tugas Merancang: DTM FTUI.
- Sawada, T., Nakamura, M., Kamada, S.. (1986). *Bulletin of JSME vol. 29: Blade Force Measurement and Flow Visualization of Savonius Rotors*.
- Sony. (1998). *Analisa Pengaruh Eksentrisitas Sudu Terhadap Karakteristik Aerodinamis Rotor Savonius*. Skripsi: DTM FTUI.

## **Pemodelan dan Simulasi Turbin Savonius untuk Mendapatkan Nilai Torsi Turbin sebagai Goal**



Dalam melakukan penelitian ini, akan dijelaskan langkah-langkah bagaimana memodelkan dan mensimulasikan turbin angin savonius. Turbin savonius ini akan diaplikasikan dalam ZEB, dimana pemanfaatan bentuk energi mekanik pada turbin savonius akan dimanfaatkan untuk menggerakkan benda lainnya. Untuk itu diperlukan nilai daya dan efisiensi sebagai acuan dalam menentukan apakah model turbin savonius yang dibuat, layak untuk dibuat benda jadinya.

### **I. Pemodelan Turbin Savonius**

Sebelum memodelkan turbin savonius, pertama kita tentukan dahulu savonius seperti apa yang akan dimodelkan. Savonius yang mau dimodelkan dalam tutorial ini adalah berdasarkan eksentrisitas dan berupa modifikasi luas permukaan.

Pemodelan dilakukan dengan menyederhanakan bentuk turbin. Penyederhanaan ini dilakukan karena keterbatasan perangkat lunak Flow

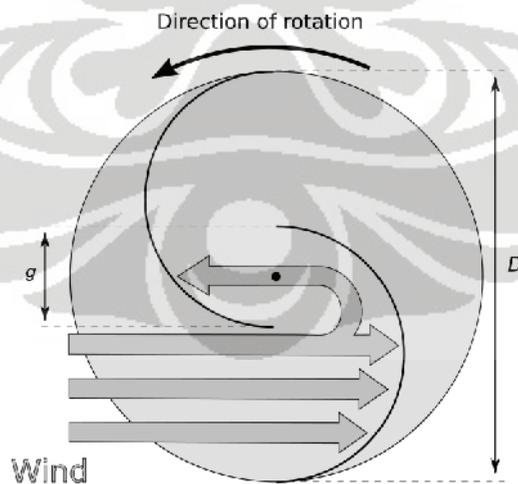
Simulation 2009 yang tidak mampu mensimulasikan *assembly* model, maka dari itu disederhanakanlah dengan membuat sudu turbin savoniusnya saja.

### I.1 Pemodelan Berdasarkan Eksentrisitas

Pemodelan berdasarkan eksentrisitas didasarkan bahwa bentuk savonius yang memiliki gap. Sudu savonius dibuat berdasarkan model plat yang tersedia. Diambil model plat dengan tinggi 550 mm, dan keliling setengah lingkaran 600 mm (bukan 650 mm, karena terdapat pengurangan untuk memasang paku keeling). Nilai gap sendiri berdasarkan “Pipa Wavin Standard AW”, yang dimulai dari pipa 1 1/2”, dimana

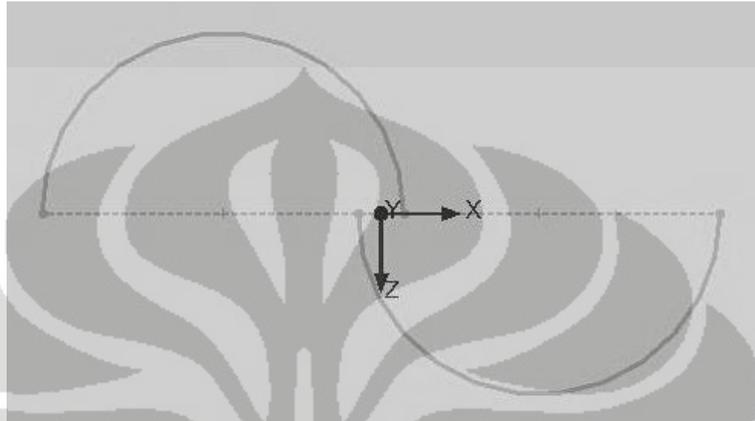
Pipa Wavin Standard AW

CLASS	DIAMETER		TEBAL DINDING Wall Thickness mm	PANJANG Length (mtr)	SISTEM SAMBUNG Joining System	KODE PRODUK Product Code
	Inch	mm				
AW (10kg/ cm <sup>2</sup> )	1/2	22	1,5	4	SC	210.022.001
	3/4	26	1,8	4	SC	210.026.001
	1	32	2,0	4	SC	210.032.001
	1 1/4	42	2,3	4	SC	210.042.001
	1 1/2	48	2,3	4	SC	210.048.001
	2	60	2,3	4	SC	210.060.001
	2 1/2	76	2,6	4	SC	210.076.001
	3	89	3,1	4	SC	210.089.001
	4	114	4,1	4	SC	210.114.001
	5	140	5,4	4	SC	210.140.001
6	165	6,4	4	SC	210.165.001	
8	216	8,3	4	SC	210.216.001	

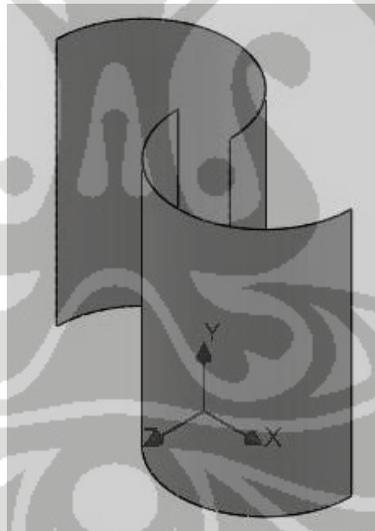


Adapun langkah-langkah dalam membuat model seperti di atas, adalah sebagai berikut.

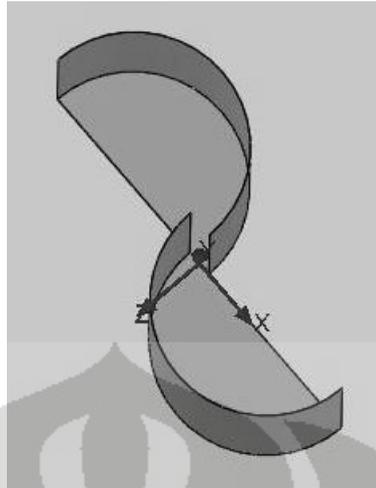
1. Membuat bentuk setengah lingkaran untuk satu sudu turbin, dengan keliling setengah lingkaran 600 mm.
2. Membuat gap untuk menentukan jarak sudu turbin satu dengan sudu turbin dua, jarak gap sesuai dengan diameter pipa wavin standard AW.
3. Membuat setengah lingkaran kedua, sama seperti langkah pertama.



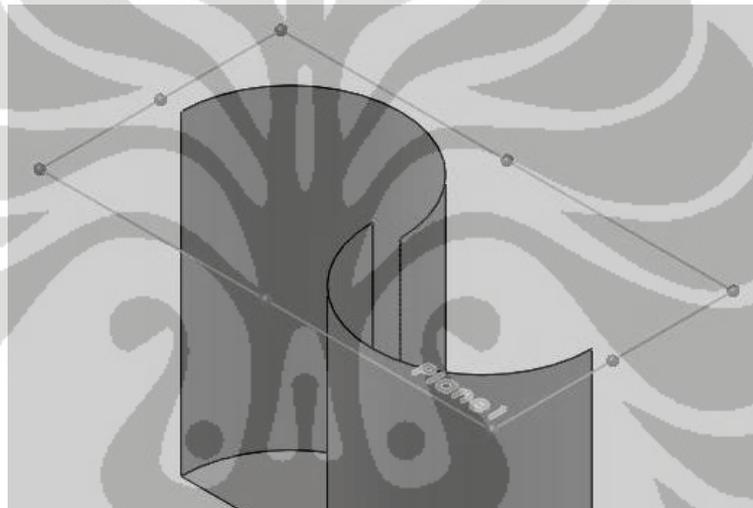
4. Buat ketebalan (*thickness*) pada masing-masing sudu, tebalnya 0,1 mm.
5. *Extrude* dua setengah lingkaran yang telah dibuat, tingginya 550 mm.



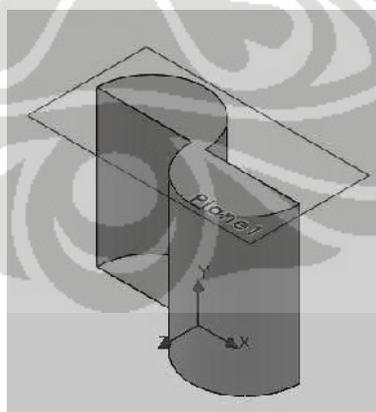
6. Buat tutup pada bagian bawah.



7. Buat *plane* baru di bagian atas.



8. Buat tutup pada bagian atas.



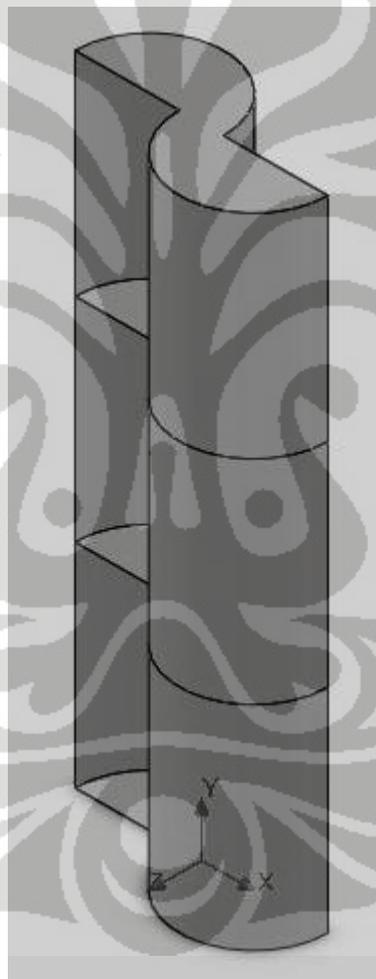
## I.2 Pemodelan Berdasarkan Bentuk

Sebaiknya langkah ini dilakukan setelah turbin savonius disimulasikan, karena nilai gap yang memiliki efisiensi tertinggi pada putaran tertentu akan

dibuat modifikasinya dengan menambah luas permukaan menjadi tiga kalinya. Disini akan dilihat bagaimana pengaruhnya penambahan luas terhadap nilai daya menurut simulasi.

Dalam penambahan luas permukaan ini, modifikasi yang akan dilakukan adalah dengan mengubah sudut serang sudu, pertama dengan sudut serang sudu linear, kedua dengan beda sudut serang sudu  $60^\circ$ .

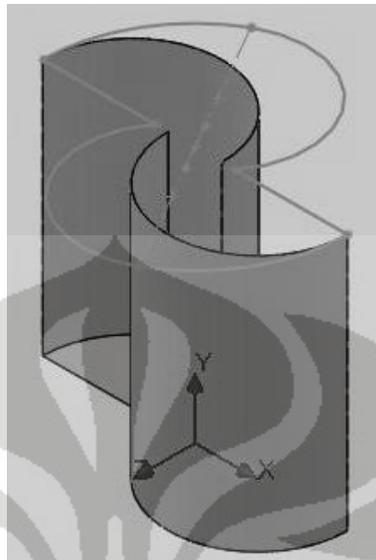
Pada model sudut serang sudu linear, cara yang dilakukan sama dengan membuat model satu tingkat, perbedaannya adalah dengan menambah dua kali lagi modelnya tanpa perbedaan sudut pada tiap tingkat.



Pemodelan selanjutnya adalah dengan beda sudut  $60^\circ$ , dengan mengubah sudut serang tiap tingkatnya akan diketahui karakteristik perbedaannya. Cara melakukannya hampir sama dengan sudut serang sudu linear, perbedaannya hanya terdapat pada pembuatan tutup atas maupun bawah pada bagian tengahnya.

Cara pembuatan tutup pada bagian tengahnya adalah sebagai berikut.

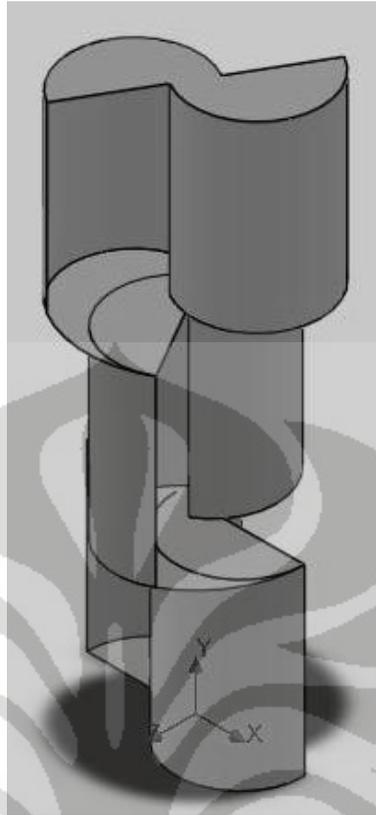
1. Buat sudu pertama (serupa dengan model 1 lapis).
2. Buat sudut serang sudu  $60^\circ$ .



3. *Extrude* tutupnya.
4. Buat sudu kedua dengan sebelumnya membuat *plane* baru, kemudian membuat pola sama seperti membuat sudu turbin satu lapis.
5. Buat lagi sudut serang sudu  $60^\circ$ .



6. *Extrude* tutupnya.
7. Buat sudu ketiga.



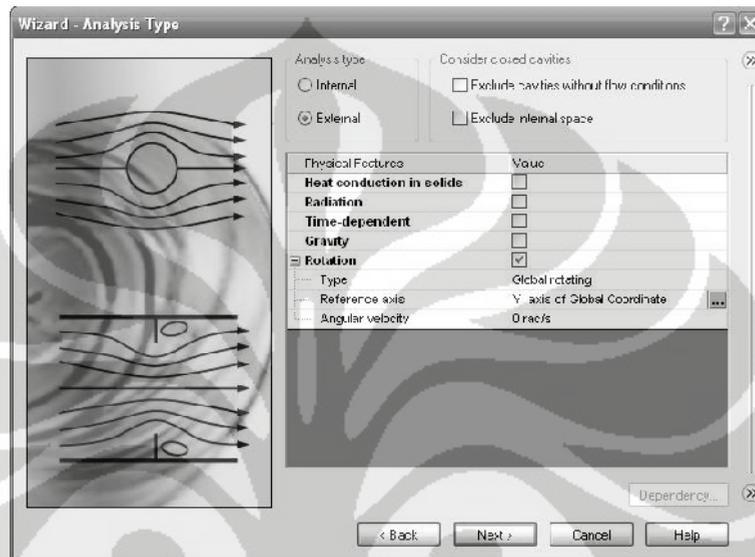
## II. Simulasi Turbin Savonius

Dalam simulasi ini mencakup proses pemberian masukan (*input*) melalui *wizard*, kemudian menentukan *meshing* beserta minimum gapnya, menentukan kondisi batas, serta menentukan *goal* dari simulasi ini. Setelah melakukan simulasi, dilakukan penampilan hasil simulasi, berupa penampakan *meshing*, tekanan, kecepatan aliran udara, dan hasil dari simulasi berupa nilai torsi yang dihasilkan. Yang dilakukan dalam semua model adalah sama, kecuali pada bagian modifikasi luas permukaan untuk *computational domain*-nya. Karena mendapatkan penambahan luas permukaan, maka tinggi *computational domain*-nya harus ditambah.

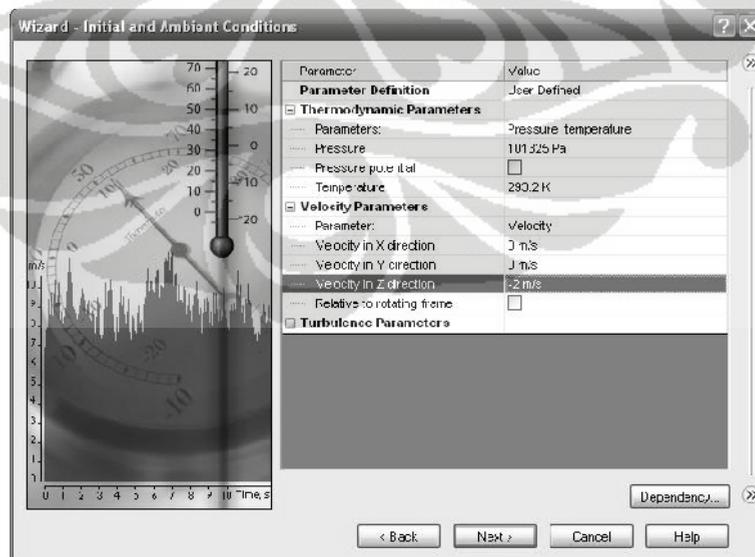
Berikut langkah-langkah yang dilakukan pada *wizard*:

1. Aktifkan *add-ins* menu Flow Simulation 2009 dengan meng-klik *Tools* → *Add-Ins*, kemudian beri centang pada bagian Solidworks Flow Simulation 2009. Tutup dengan klik OK.
2. Klik *Flow Simulatin* → *Wizard*.
3. Membuat langkah awal dengan *create new*.

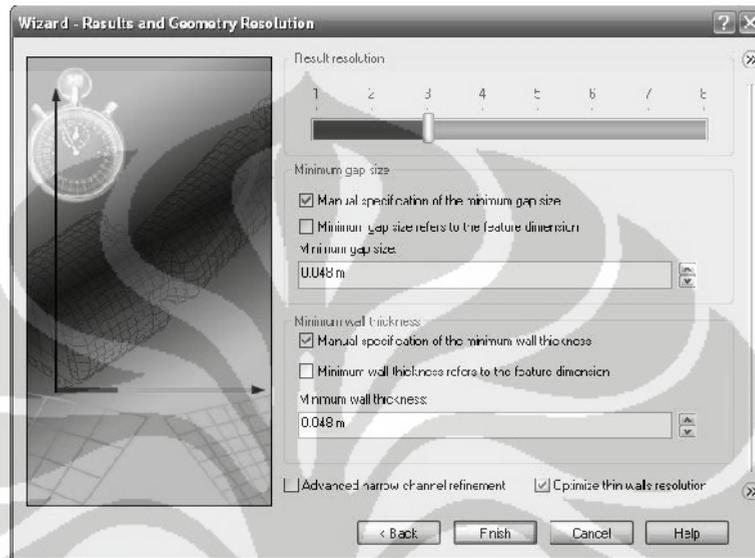
4. Satuan yang digunakan adalah SI.
5. Untuk analisis yang digunakan adalah *external type*. Pada bagian *rotation type*, pilih *global rotating*, *references axis*-nya adalah sumbu-Y. Yang akan diubah *setting*-annya adalah *angular velocity*, mulai dari 0 rpm, -5 rpm, -10 rpm, dan seterusnya dengan selisih -5 rpm, sampai dengan -45 rpm.



6. Fluida yang di-input adalah *air* (udara). Sisanya dibiarkan *default*.
7. *Wall conditions* dibiarkan secara *default*.
8. Untuk *initial and ambient conditions*, hanya mengubah *velocity in Z direction* menjadi -2 m/s.



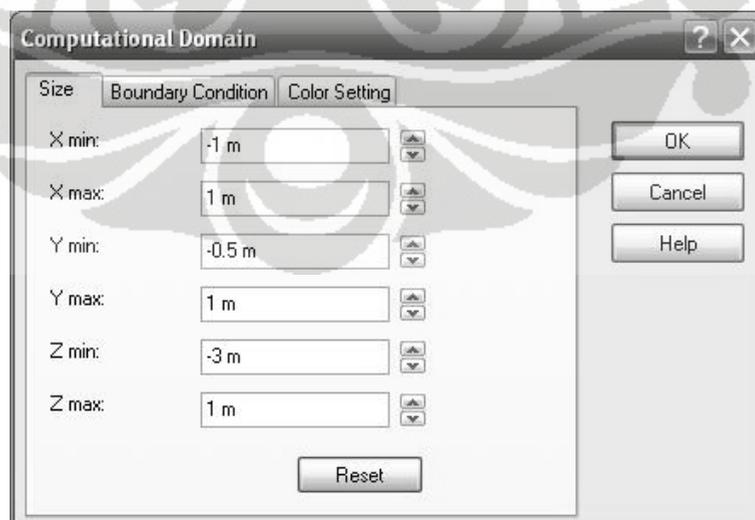
9. *Result resolution* yang digunakan adalah 3. Pengaturan yang dilakukan selanjutnya adalah *manual specification of the minimum gap size* adalah sesuai dengan gap yang sedang dimodelkan, sedangkan *manual specification of the minimum wall thickness* adalah 0,0001 mm (sesuai dengan ketebalan sudu turbin).



10. Selesai *wizard* dengan klik *finish*.

Setelah selesai pada *wizard*, dilanjutkan dengan memodelkan parameter-parameter yang menjadi bagian dari simulasi ini. Langkah-langkahnya adalah sebagai berikut:

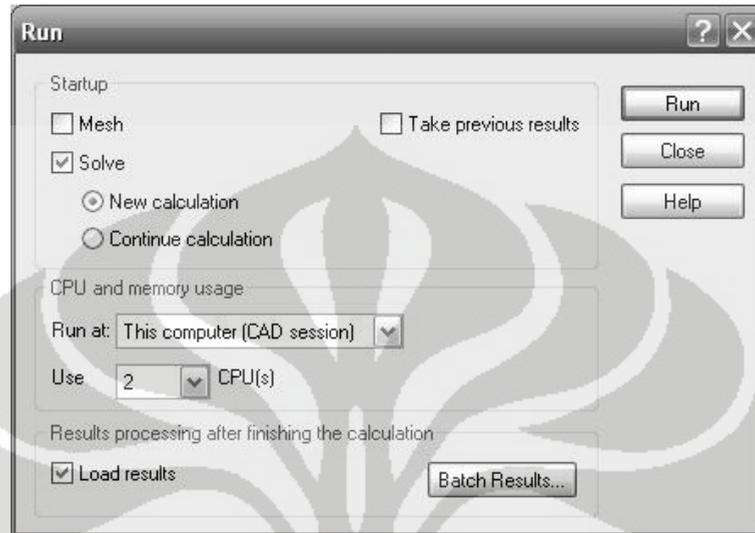
1. Klik kanan *computational domain*, klik *edit definition*. Ubah *computational domain* menjadi seperti gambar di bawah ini.



Pada model yang mengubah luasan permukaan, nilai *Y max* menjadi 2 m.

- Selanjutnya adalah mengatur *goals*. Klik kanan *goals*, klik *insert global goals*. Beri tanda centang pada bagian *Y – component of torque*.

Setelah kondisi sesuai dengan variabel dan parameter yang diinginkan, maka dilakukan perhitungan dengan *Flow Simulation* → *Solve* → *Run*.

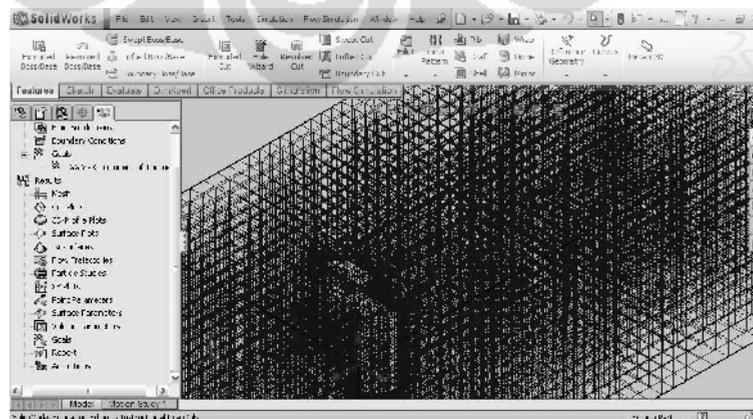


Setelah selesai melakukan perhitungan dapat memperhatikan hasil-hasil berikut:

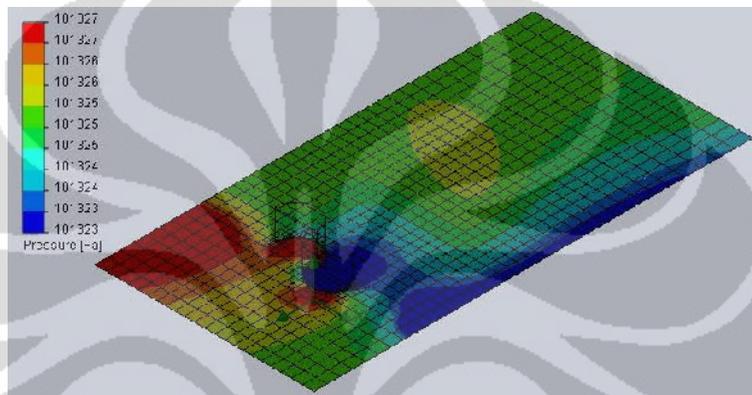
- Hasil *goal*. Klik kanan *goal*, klik *insert*. Beri centang pada bagian *goal*-nya, klik OK. Hasilnya berupa file *sheet* seperti pada gambar berikut.

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress (%)	Use In Convergence	Delta
GG Y - Component of Torq	(N*m)	-0.051199595	-0.048345905	-0.05166561	-0.040443753	100	Yes	0.011221362
<b>Iterations: 78</b>								
<b>Analysis interval: 28</b>								

- Penampakan hasil *meshing*. Klik kanan *mesh*, klik *3D view*. Pada bagian *fluid cells*, ubah nilai menjadi *all*, klik OK. Hasilnya adalah sebagai berikut.



- Penampakan *plot* berupa tekanan. Klik kanan *cut plots*, klik *insert*. Pilih *plane* yang akan diamati pada bagian *selection*. Jika ingin mengubah jarak pandang *plane*, geser *slide* yang ada dibawahnya, bisa juga dengan mengubah nilainya (sepanjang batas *computational domain*). Kemudian klik *View Settings*, pada *tab Contours*, ubah *parameter* menjadi *pressure*, ubah nilai *minimum* menjadi 101323 Pa, dan *maximum* menjadi 101327 Pa. Klik OK, kemudian tutup *dialog box* dengan klik tanda centang. Hasilnya adalah sebagai berikut.



- Penampakan *plot* berupa kecepatan. Klik kanan *cut plots*, klik *insert*. Pilih *plane* yang akan diamati pada bagian *selection*. Jika ingin mengubah jarak pandang *plane*, geser *slide* yang ada dibawahnya, bisa juga dengan mengubah nilainya (sepanjang batas *computational domain*). Kemudian klik *View Settings*, pada *tab Contours*, ubah *parameter* menjadi *velocity*, ubah nilai *minimum* menjadi 0 m/s, dan *maximum* menjadi 4 m/s. Klik OK, kemudian tutup *dialog box* dengan klik tanda centang. Hasilnya adalah sebagai berikut.

