



TUGAS AKHIR TF-181801

**ANALISIS BEBAN DINAMIK DAN
HIDROELASTISITAS TERHADAP BENTUK DAN
MATERIAL ARM PADA VERTICAL AXIS
HYDROKINETIC TURBINE STRAIGHT BLADE
CASCADED (VAHT-SBC)**

**IQBAL ISMAIL
0231154000004**

Dosen Pembimbing
Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.
Erna Septyaningrum, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



FINAL PROJECT TF-181801
EFFECT ANALYSIS OF DYNAMIC LOADS AND
HYDROELASTIC TO SHAPE AND MATERIAL
ARM IN VERTICAL AXIS HYDROKINETIC
TURBINE STRAIGHT BLADE CASCADED (VAHT-
SBC)

IQBAL ISMAIL
0231154000004

Supervisors
Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.
Erna Septyaningrum, S.T., M.T.

DEPARTEMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan dibawah ini

Nama : Iqbal Ismail
NRP : 02311540000004
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S-1
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Analisis Beban Dinamik dan Hidroelastisitas Terhadap Bentuk dan Material Arm Pada *Vertical Axis Hydrokinetic Turbine Straight Blade Cascaded (VAHT-SBC)*” adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila dikemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya

Surabaya 23 Juli 2019
Yang membuat pernyataan

Iqbal Ismail
NRP. 02311540000004

**ANALISIS BEBAN DINAMIK DAN HIDROELASTISITAS
TERHADAP BENTUK DAN MATERIAL ARM PADA
VERTICAL AXIS HYDROKINETIC TURBINE STRAIGHT
BLADE CASCADED (VAHT-SBC)**

TUGAS AKHIR

Oleh :

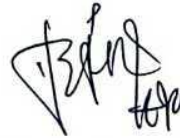
IQBAL ISMAIL

NRP. 0231154000004

**Surabaya, 23 Juli 2019
Mengetahui/Menyetujui**

Pembimbing I,

Pembimbing II,



Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.

NIP. 19761223 2005012 1 001

Erna Septyaningrum, S.T., M.T.

NPP. 1992201912073

**Kepala Departemen,
Teknik Fisika FTI-ITS**



Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D

NIP. 19780902 200312 1 002

**ANALISIS BEBAN DINAMIK DAN HIDROELASTISITAS
TERHADAP BENTUK DAN MATERIAL ARM PADA
VERTICAL AXIS HYDROKINETIC TURBINE STRAIGHT
BLADE CASCADED (VAHT-SBC)**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada


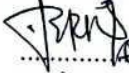


Bidang Studi Rekayasa Energi Dan Pengkondisian Lingkungan
Program Studi S-1 Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industry
Institute Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

IQBAL ISMAIL

Nrp. 02311540000004

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir

1. Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.  (Pembimbing I)
2. Erna Septyningrum, S.T., M.T.  (Pembimbing II)
3. Ir. Sarwono, MM  (Ketua Penguji)
4. Dr. Suyanto, ST, MT.  (Penguji I)

**SURABAYA
25 Juli 2019**

**ANALISIS BEBAN DINAMIK DAN HIDROELASTISITAS
TERHADAP BENTUK DAN MATERIAL ARM PADA
VERTICAL AXIS HYDROKINETIC TURBINE STRAIGHT
BLADE CASCADED (VAHT-SBC)**

Nama Mahasiswa : IQBAL ISMAIL.
NRP : 02311540000100
Departemen : Teknik Fisika FTI - ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.
Erna Septyaningrum, S.T., M.T.

Abstrak

Indonesia dengan wilayah $2/3$ adalah lautan cocok untuk mengembangkan sumber energi tenaga arus laut. Energi arus laut dapat dimanfaatkan dengan menggunakan turbin *Vertical Axis Hydrokinetic Turbine Straight Blade Cascaded* (VAHT-SBC). Untuk melakukan instalasi turbin dengan jangka panjang harus diperhatikan *supporting structure* dari turbin tersebut. Salah satu *supporting structure* turbin adalah turbin arm. Bentuk arm dan material turbin berpengaruh terhadap kekuatan struktur dari arm itu sendiri. Untuk mengetahui bagaimana pengaruh arm tersebut dilakukan studi hidroelastisitas dengan menggunakan metode *fluid structure interaction* (FSI). Telah dilakukan simulasi *fluid structure interaction* (FSI) untuk mengetahui kekuatan struktur penyokong turbin yaitu arm. Pada penelitian ini dilakukan variasi bentuk geometri dan material penyusun struktur. Bentuk geometri plat, ellips dan airfoil digunakan sebagai bentuk arm turbin VAHT – SBC. Material yang digunakan adalah material baja S235JR, S355JR, S355 dan SS400. Perubahan bentuk geometri arm berpengaruh pada beban dinamik yaitu torsi dan gaya yang bekerja pada arm turbin. Beban dinamik tersebut kemudian dianalisa untuk melihat hidroelastisitas masing masing bentuk geometri tersebut yang dilihat dari variabel deformasi dan *shear stress* yang terjadi. Berdasarkan analisis hidroelastisitas dapat ditentukan kekuatan struktur dengan variabel *factor of safety* (FOS). Hasil dari penelitian ini didapatkan geometri arm yang paling kuat yaitu

geometri plat dengan material SS400. Nilai rata rata FOS yang terjadi adalah 12.65 dan deformasi terjadi sebesar 0.65 mm

Kata Kunci: Arm turbin, Beban dinamik, FSI, Hidroelastisitas, Kekuatan struktur, VAHT-SBC

EFFECT ANALYSIS OF DYNAMIC LOADS AND HYDROELASTIC TO SHAPE AND MATERIAL ARM IN VERTICAL AXIS HYDROKINETIC TURBINE STRAIGHT BLADE CASCADED (VAHT-SBC)

Student's Name : IQBAL ISMAIL
NRP : 0231154000004
Departement : Teknik Fisika FTI - ITS
Supervisors : Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.
Erna Septyaningrum, S.T., M.T.

Abstract

Indonesia with a 2/3 region is a sea suitable for developing ocean current energy. Ocean current energy can be utilized by using Vertical Axis Hydrokinetic Turbine Straight Blade Cascaded (VAHT-SBC). To install a turbine that runs for a long-term supporting structure of the turbine have to be considered. One of the supporting structures of the turbine is the turbine arm. The geometry of the arm and the turbine material affect the strength of the structure of the arm itself. To find out how the arm affects the hydroelasticity study is carried out using the fluid structure interaction (FSI) method. A fluid structure interaction (FSI) simulation has been carried out to know the strength of the turbine supporting structure, the arm. In this study, variations in geometric shapes and structural materials were carried out. The shape of plate geometry, ellipses and airfoil is used as VAHT - SBC turbine arm. The material used is steel material S235JR, S355JR, S355 and SS400. Changes in the shape of the geometry of the arm affect the dynamic load, namely the torque and force acting on the turbine arm. The dynamic load is then analyzed to see the hydroelasticity of each shape as seen from the deformation and shear stress variables that occur. Based on hydroelasticity analysis, we can determine the strength of the structure with the factor of safety variable (FOS). The results of this study found that the strongest geometry arm is the plate geometry with SS400 material. The

average FOS value that occurs is 12.65 and the deformation occurs at 0.65 mm

Keyword: *Dynamic load, FSI, Hydroelasticity, Strength structure Turbine arm, VAHT-SBC*

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT karena atas Ilmu-Nya lah penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir yang berjudul “Analisis beban dinamik dan hidroelastisitas terhadap bentuk dan material arm pada *vertical axis hydrokinetic turbine straight blade cascaded* (VAHT-SBC)”.

Proses pengerjaan serta penulisan penelitian ini penulis dibantu dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Kedua orangtua dan keluarga penulis yang tidak hentinya memberikan semangat serta bantuan moril maupun materi kepada penulis.
2. Bapak Agus Muhamad Hatta, ST, MSi, Ph.D, selaku Kepala Departemen Teknik Fisika ITS yang telah menyetujui keperluan administrasi tugas akhir
3. Bapak Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T. dan Ibu Erna Septyaningrum S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang senantiasa memberikan bimbingan, saran dan motivasi untuk penulis dalam pengerjaan penelitian ini
4. Bapak Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D selaku kepala laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan yang memberikan dukungan kepada penulis
5. Bapak Prof. Dr. Ir. Sekartedjo, MSc selaku dosen wali yang memberikan ilmu dan cerita inspiratif selama penulis menjalani kehidupan kuliah di Teknik Fisika ITS
6. Bapak Ibu dosen yang telah memberikan ilmu dan bimbingan selama penulis menuntut ilmu di Teknik Fisika ITS
7. Tim hidrokinetik turbin yaitu Cesa, Fernando, Mas Ricky dan Rizal yang telah berjuang bersama untuk menyelesaikan penelitian ini
8. Seluruh teman teman asisten Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan yang telah

menemani penulis selama menempuh kehidupan di Teknik Fisika ITS

9. Seluruh teman teman Transcendent Frontier yang telah bersama penulis sejak tahun 2015
10. Serta teman teman penulis angkatan 2013, 2014, 2016 dan 2017 yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah memberikan kesan selama menempuh kehidupan perkuliahan ini

Penulis berharap laporan ini dapat menambah wawasan dan bermanfaat bagi orang yang membacanya. Penulis juga menyadari bahwa laporan ini masih memiliki banyak kekurangan. Oleh karena itu kritik dan saran yang membangun sangat dibutuhkan untuk menyempurnakan tugas laporan ini.

DAFTAR ISI

| | |
|--|-------|
| HALAMAN JUDUL..... | i |
| HALAMAN PENGESAHAN..... | iv |
| ABSTRAK..... | vi |
| <i>ABSTRACT</i> | viii |
| KATA PENGANTAR..... | x |
| DAFTAR ISI..... | xii |
| DAFTAR GAMBAR..... | xv |
| DAFTAR TABEL..... | xviii |
| BAB I PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1 Latar Belakang..... | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah..... | 3 |
| 1.3 Tujuan..... | 3 |
| 1.4 Batasan Masalah..... | 3 |
| 1.5 Sistematika Laporan..... | 4 |
| BAB II DASAR TEORI..... | 5 |
| 2.1 Energi Hidrokinetik..... | 5 |
| 2.2 <i>Vertical Axis Hydrokinetic Turbine Straight Blade Cascaded (VAHT-SBC)</i> | 7 |
| 2.3 Hidrodinamika..... | 9 |
| 2.3.1 Hidroelastisitas..... | 10 |
| 2.4 Sifat Mekanik Material..... | 11 |
| 2.5 <i>Factor of Safety (FOS)</i> | 13 |
| 2.6 Analisis Modal..... | 15 |
| BAB III METODOLOGI PENELITIAN..... | 17 |
| 3.1 Diagram Alir Penelitian..... | 17 |
| 3.2 Pengambilan Data Sebelumnya..... | 19 |

| | |
|---|-----------|
| 3.3 Pembuatan Geometri Turbin | 20 |
| 3.4 Simulasi CFD | 24 |
| 3.5 Simulasi <i>Transient Structural</i> | 29 |
| BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN | 32 |
| 4.1 Validasi Hasil Simulasi | 32 |
| 4.2 Pengaruh Geometri Arm Terhadap <i>Pressure Distribution</i> | 34 |
| 4.3 Pengaruh Geometri Arm Terhadap Gaya yang Dialami ... | 36 |
| 4.4 Pengaruh Geometri Arm Terhadap Torsi..... | 41 |
| 4.5 Pengaruh Material Penyusun Terhadap Deformasi Arm .. | 43 |
| 4.5.1 Bentuk Geometri Plat | 43 |
| 4.5.2 Bentuk Geometri Ellips | 45 |
| 4.5.3 Bentuk Geometri Airfoil..... | 46 |
| 4.6 Pengaruh Material Penyusun Terhadap Maximum <i>Shear-Stress</i> Dan Maximum <i>Shear Elastic Strength</i> | 48 |
| 4.6.1 Bentuk Geometri Plat | 49 |
| 4.6.2 Bentuk Geometri Ellips | 52 |
| 4.6.3 Bentuk Geometri Airfoil..... | 55 |
| 4.7 <i>Factor of Safety</i> (FOS) Tiap Variasi | 58 |
| 4.7.1 Bentuk Geometri Plat | 59 |
| 4.7.2 Bentuk Geometri Ellips | 60 |
| 4.7.3 Bentuk Geometri Airfoil..... | 62 |
| 4.8 Pengaruh Bentuk Geometri Terhadap Kekuatan Shaft | 63 |
| 4.8.1 Deformasi | 64 |
| 4.8.2 Shear Stress | 65 |
| 4.8.3 FOS | 66 |
| 4.9 Pengaruh 2 Fixed Support Terhadap Kekuatan Struktur... .. | 66 |
| 4.9.1 Deformasi | 67 |

| | |
|--|-----------|
| 4.9.2 Shear Stress | 68 |
| 4.9.3 FOS | 69 |
| 4.10 Frekuensi Natural Dan Bentuk Moda | 69 |
| 4.11 Diskusi | 74 |
| BAB V PENUTUP | 83 |
| 5.1 Kesimpulan | 83 |
| 5.2 Saran | 83 |
| Daftar Pustaka | 85 |
| LAMPIRAN..... | 87 |
| BIODATA PENULIS | 106 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| Gambar 2. 1 VAHT-SBC..... | 8 |
| Gambar 2. 2 Mekanisme passive-pitch | 9 |
| Gambar 2. 3 a) one-way coupling b) two-way coupling | 10 |
| Gambar 2. 4 DBBT..... | 13 |
| Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian | 17 |
| Gambar 3. 2 Geometri Arm Plat | 20 |
| Gambar 3. 3 Geometri Arm Elliptical..... | 21 |
| Gambar 3. 4 Geometri Arm Airfoil..... | 22 |
| Gambar 3. 5 Domain Rotor..... | 23 |
| Gambar 3. 6 Domain Stator | 24 |
| Gambar 3. 7 Hasil Meshing | 25 |
| Gambar 3. 8 Meshing Domain Stator | 26 |
| Gambar 3. 9 Meshing Domain Rotor..... | 26 |
| Gambar 3. 10 Meshing Turbin..... | 27 |
| Gambar 3. 11 Data disiapkan dengan External Data..... | 29 |
| Gambar 3. 12 Sifat mekanik diatur | 30 |
| Gambar 3. 13 Meshing turbin transient structural..... | 31 |
| Gambar 4. 1 Persebaran Tekanan Arm Plat. a) sudut azimuth 7.2^0 b) sudut azimuth 180^0 c) sudut azimuth 360^0 | 34 |
| Gambar 4. 2 Persebaran Tekanan Arm Ellips. a) sudut azimuth 7.2^0 b) sudut azimuth 180^0 c) sudut azimuth 360^0 | 35 |
| Gambar 4. 3 Persebaran Tekanan Arm Airfoil. a) sudut azimuth 7.2^0 b) sudut azimuth 180^0 c) sudut azimuth 360^0 | 35 |
| Gambar 4. 4 Grafik gaya sumbu x pada arm atas..... | 37 |
| Gambar 4. 5 Grafik gaya sumbu x pada arm bawah | 37 |
| Gambar 4. 6 Gaya pada Sumbu Z | 38 |
| Gambar 4. 7 Arah putar dan posisi azimuth turbin | 38 |
| Gambar 4. 8 Grafik Gaya Normal pada Arm | 39 |
| Gambar 4. 9 Gaya Tangensial pada Arm | 39 |
| Gambar 4. 10 Grafik gaya sumbu y arm atas | 40 |
| Gambar 4. 11 Grafik gaya sumbu y arm bawah..... | 41 |
| Gambar 4. 12 Grafik torsi pada arm atas | 42 |
| Gambar 4. 13 Grafik torsi pada arm bawah | 42 |
| Gambar 4. 14 Deformasi geometri plat arm atas..... | 43 |
| Gambar 4. 15 Deformasi geometri plat arm bawah..... | 44 |

| | | |
|---------------------|---|----|
| Gambar 4. 14 | Deformasi geometri ellipsis arm atas | 45 |
| Gambar 4. 15 | Deformasi geometri ellipsis arm bawah | 45 |
| Gambar 4. 18 | Deformasi geometri airfoil arm atas | 47 |
| Gambar 4. 19 | Deformasi geometri airfoil arm bawah | 47 |
| Gambar 4. 20 | Maximum shear stress dan strain pada arm atas . | 50 |
| Gambar 4. 21 | Maximum shear stress dan strain pada arm bawah | 51 |
| Gambar 4. 22 | Maximum shear stress dan strain pada arm atas . | 53 |
| Gambar 4. 23 | Maximum shear stress dan strain pada arm bawah | 54 |
| Gambar 4. 24 | Maximum shear stress dan strain pada arm atas . | 56 |
| Gambar 4. 25 | Maximum shear stress dan strain pada arm bawah | 57 |
| Gambar 4. 26 | FOS pada arm atas | 59 |
| Gambar 4. 27 | FOS pada arm bawah | 59 |
| Gambar 4. 28 | Nilai FOS pada arm atas..... | 61 |
| Gambar 4. 29 | Nilai FOS pada arm bawah | 61 |
| Gambar 4. 30 | Nilai FOS pada arm atas..... | 62 |
| Gambar 4. 31 | Nilai FOS pada arm bawah | 62 |
| Gambar 4. 32 | Deformasi shaft akibat perubahan geometri arm | 64 |
| Gambar 4. 33 | Shear stress shaft akibat perubahan geometri arm | 65 |
| Gambar 4. 34 | FOS pada shaft akibat perubahan geometri arm . | 66 |
| Gambar 4. 35 | Deformasi yang terjadi ketika 2 fixed support digunakan..... | 67 |
| Gambar 4. 36 | Shear stress yang terjadi ketika 2 fixed support digunakan..... | 68 |
| Gambar 4. 37 | FOS yang terjadi ketika 2 fixed support digunakan | 69 |
| Gambar 4. 38 | Grafik frekuensi natural dan bentuk moda struktur plat | 71 |
| Gambar 4. 39 | Grafik frekuensi natural dan bentuk moda pada geometri ellipsis..... | 72 |
| Gambar 4. 40 | Grafik frekuensi natural dan bentuk moda pada geometri airfoil | 73 |

| | |
|---|----|
| Gambar 4. 41 Pengaruh bentuk geometri terhadap deformasi pada arm atas..... | 75 |
| Gambar 4. 42 Pengaruh bentuk geometri terhadap deformasi pada arm bawah..... | 76 |
| Gambar 4. 43 Beban dinamik pada arm atas (a)Strain vs azimuth (b) Shear Stress vs azimuth..... | 77 |
| Gambar 4. 44 Beban dinamik pada arm bawah (a)Strain vs azimuth (b) Shear Stress vs azimuth | 78 |
| Gambar 4. 45 FOS pada arm atas | 80 |
| Gambar 4. 46 FOS pada arm bawah | 80 |

DAFTAR TABEL

| | | |
|-------------------|--|----|
| Tabel 3. 1 | Data Ukuran Turbin | 19 |
| Tabel 3. 2 | Hasil Eksperimen Penelitian Sebelumnya..... | 20 |
| Tabel 3. 3 | Kondisi Batas Simulasi CFD | 28 |
| Tabel 3. 4 | Properti komponen turbin | 31 |
| Tabel 4. 1 | Rata –rata hasil pengukuran torsi dan RPM..... | 32 |
| Tabel 4. 2 | Kondisi Mesh Dan Model Turbulensi..... | 33 |
| Tabel 4. 3 | Tekanan rata rata pada arm | 36 |

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penggunaan energi listrik memiliki peran penting dalam pertumbuhan ekonomi dan perkembangan kehidupan manusia. Namun penggunaan bahan bakar fosil yang berlebihan telah menghasilkan emisi karbon yang mengakibatkan polusi lingkungan dan *greenhouse effect* (UCAR, 2011). Oleh karena itu, sumber energi baru yang berkelanjutan harus dikembangkan untuk mengganti kegunaan energi fosil. Beberapa sumber energi baru yang telah dikembangkan di Indonesia adalah *geothermal*, *hydro power*, angin, ombak dan sinar matahari.

Indonesia dengan wilayah 2/3 adalah lautan cocok untuk mengembangkan sumber energi tenaga laut. Kecepatan arus laut di Indonesia umumnya mencapai kecepatan 1.5 m/s dengan pengecualian pada daerah sekitar Bali, Lombok dan Nusa Tenggara Timur mencapai kecepatan hingga 2.5-3.4 m/s (Yuningsih, 2011). Profil arus laut seperti ini dapat digunakan sebagai pembangkit energi dengan memanfaatkan turbin.

Salah satu penelitian yang telah dilakukan untuk memanfaatkan sumber energi ini adalah penelitian yang telah dilakukan oleh Hantoro (Hantoro, 2018) yang berjudul “*Novel Design of a Vertical Axis Hydrokinetic Turbine – Straight-Blade Cascaded (VAHT-SBC): Experimental and Numerical Simulation*”. Pada penelitian ini digunakan turbin tipe darrieus dengan menggunakan kombinasi bilah bertumpuk dan disusun dengan mekanisme *passive variable pitch* dan *fixed pitch*. Beberapa penelitian juga telah dilakukan seperti menentukan jumlah bilah, melihat profil aliran *wake* dsb. Berdasarkan hasil penelitian didapatkan nilai efisiensi tertinggi terdapat pada jumlah bilah 9 dengan nilai daya koefisien (C_p) sebesar 0.42. Turbin inilah yang digunakan pada penelitian ini.

Untuk melakukan instalasi turbin dengan jangka panjang selain memperhatikan bilah dari turbin juga harus diperhatikan *supporting structure* dari turbin tersebut. Penelitian tentang

supporting structure dari turbin ini dianggap penting karena resiko kegagalan yang diakibatkan karena hancurnya *supporting structure* besar. Salah satu *supporting structure* turbin adalah turbine arm. Arm adalah bagian turbin yang menyambungkan bilah dengan *shaft* untuk menyokong struktur. Arm tidak dapat dielakkan lagi mempengaruhi daya keluaran dari turbin dengan menambahkan gaya *drag* pada turbin dan mengimbaskan interaksi hidrodinamik disekitar arm, *shaft* dan bilah (Ye Li, 2010).

Studi untuk menganalisis tingkah laku dari benda fleksibel yang bergerak pada lingkungan cairan disebut dengan hidroelastisitas. Studi ini dilakukan untuk menentukan tekanan, gerakan dan deformasi akibat beban dinamik yang dialami benda tercelup. Untuk melakukan studi ini digunakan fenomena *fluid structure interaction*.

Salah satu penelitian hidroelastis dilakukan oleh Asghar (Asghar, 2017). Pada penelitian ini dilakukan analisis respon deformasi dari bilah turbin angin dengan variasi *tip speed ratio*. Didapatkan hasil bahwa dengan berubahnya *tip speed ratio* maka torsi yang dialami turbin juga berubah hal ini mengakibatkan *equivalent stress* yang bekerja pada turbin berubah dan mengakibatkan deformasi pada bilah. Deformasi yang terjadi berbanding lurus dengan *equivalent stress* yang bekerja pada bilah.

Kyoungsoo Lee (Lee, 2017) juga melakukan penelitian *fluid structure interaction* pada turbin angin horizontal NREL VI. Variasi tekanan dilakukan untuk melihat respon deformasi pada bilah. Didapatkan bahwa deformasi bilah yang terjadi disebabkan terutama akibat *thrust force* dan deformasi akibat gaya putar tidak terlihat.

Penelitian tentang hidroelastis juga dilakukan oleh Arnold (Arnold, 2017) pada turbin arus laut. Pada penelitian ini digunakan turbin dengan model horizontal. Penulis bertujuan untuk melihat respon hidroelastis turbin ketika turbin berputar dengan kecepatan konstan. Digunakan metode FSI *two-way transfer* untuk menjalankan penelitian ini. Beban hidrodinamika yang ditinjau adalah torsi dan gaya yang terjadi pada tiap sambungan turbin seperti pada rotor-tower, rotor-nacelle dsb. Pada penelitian ini

dapat disimpulkan bahwa modifikasi geometri dapat mengurangi beban dinamik yang terjadi pada turbin.

Oleh karena itu pada studi kali ini dilakukan penelitian tentang efek perubahan geometri bentuk arm dan material penyusun terhadap kekuatan struktur dari arm. Penelitian ini dapat menentukan bentuk geometri dan material arm yang bisa meredam deformasi yang terjadi sehingga turbin tidak mudah rusak.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas maka dapat dirumuskan permasalahan pada penelitan kali ini adalah:

- a. Bagaimana pengaruh bentuk geometri arm terhadap beban dinamik yang diakibatkan oleh aliran fluida?
- b. Bagaimana pengaruh material penyusun arm terhadap kekuatan struktur?

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah diatas, maka tujuan dilaksanakan penelitian ini adalah:

- a. Menganalisis pengaruh bentuk geometri arm terhadap beban dinamik yang diakibatkan oleh aliran fluida
- b. Menganalisis pengaruh material penyusun arm terhadap kekuatan struktur

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Turbin yang digunakan adalah jenis *Vertical Axis Straight Blade Cascade*
- b. Dasar melakukan simulasi adalah berdasarkan eksperimen sebelumnya
- c. Penelitian dilakukan dengan variasi bentuk geometri arm dan material
- d. Beban hidrodinamik yang ditinjau adalah tekanan, torsi dan gaya yang terjadi pada turbin
- e. Kekuatan material struktur diukur dengan meninjau *stress*, *strain*, *deformation* dan *factor of safety* yang terjadi

1.5 Sistematika Laporan

Laporan tugas akhir ini tersusun dari 5 bab dengan rincian sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Pada bagian ini dijelaskan mengenai latar belakang dilakukannya penelitian ini, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan serta sistematika penulisan laporan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKAN

Pada bab ini dijelaskan beberapa teori – teori yang menunjang penelitian ini. Beberapa teori yang dijelaskan pada bab ini adalah: *Hydrokinetic Energy*, *Vertical Axis Hydrokinetic Turbine Straight Blade Cascaded*, Hidrodinamika dan Sifat Mekanik Material.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bagian ini dijelaskan secara detil tahapan – tahapan yang dilakukan di penelitian ini.

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini dilakukan analisa data dari simulasi yang telah dilakukan. Data yang dianalisa adalah distribusi tekanan, gaya, torsi, deformasi, *shear stress*, *strain*, FOS dan frekuensi natural dan bentuk moda

BAB V PENUTUP

BAB II

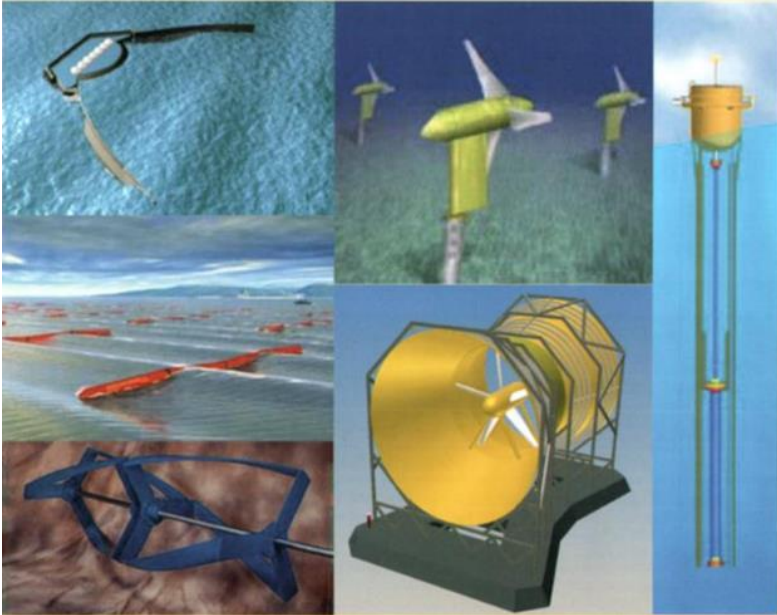
DASAR TEORI

2.1 Energi Hidrokinetik

70% bagian dari bumi merupakan air, dengan jumlah yang sangat masif tersebut energi air memiliki potensi sebagai sumber energi untuk masa depan. Untuk memanfaatkan energi ini berbagai macam cara telah dikembangkan. Dua perkembangan teknologi yang paling umum digunakan adalah dengan memanfaatkan ketinggian air dan kecepatan air. Pemanfaatan ketinggian air sebagai sumber energi sering kali disertai dengan biaya yang mahal untuk konstruksi bangunan pendukung seperti bendungan (Canda, 2016). Pembangunan bendungan ini biasanya digunakan pada daerah – daerah sungai yang memiliki perbedaan ketinggian rendah atau bahkan yang tidak memiliki perbedaan ketinggian sama sekali.

Pemanfaatan energi kecepatan air (hidrokinetik) dapat digunakan pada wilayah – wilayah sungai yang memiliki sedikit atau tidak ada perbedaan ketinggian. Teknologi ini menghasilkan listrik dengan menggunakan desain turbin angin pada bawah air untuk mengekstrak energi kinetik air sebagai ganti energi potensial air. Sehingga penggunaan hidrokinetik ini tidak diperlukan konstruksi bendungan tambahan (Koko, 2015). Teknologi hidrokinetik dapat menangkap energi dari gelombang, arus, aliran dari sungai ataupun kanal buatan (Guney, 2010).

Daya hidrokinetik yang dapat dihasilkan bergantung pada kecepatan aliran sungai, laut maupun arus laut. Pemanfaatan energi hidrokinetik memiliki dua cara yaitu dengan turbin maupun tanpa turbin. Beberapa contoh sistem tanpa turbin adalah *flutter vane*, *oscillating airfoil*, *piezoelectric*, *vortex induced vibration* dan *sails*. Sistem yang menggunakan turbin adalah menggunakan turbin sumbu vertikal, turbin sumbu horizontal dan *cross-flow* turbin (Khan, 2009)



Gambar 2. 1 Contoh konversi energi kinetik dan laut pada DOE workshop (Canda, 2016)

Arus minimum yang dibutuhkan untuk mengoperasikan hidrokinetik divais biasanya adalah 1-2 m/s, tetapi dapat juga beroperasi pada kecepatan 0,5 m/s bergantung pada teknologi konversi yang digunakan (Johnson, 2010). Energi yang diekstrak pada hidrokinetik divais adalah energi kinetik dari aliran air yang ditulis dengan persamaan:

$$E_k = \frac{1}{2} mv^2 \quad (1)$$

dimana m = massa air (kg), v = kecepatan air (m/s)

Sehingga, daya dari air yang mengalir dapat ditulis seperti berikut:

$$P_w = \frac{dE_k}{dt} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2)$$

dimana ρ adalah densitas air (1000 kg/m^3), A = luas sapuan turbin (m^2).

$$A = \pi r^2 \quad (3)$$

dengan r adalah jari jari turbin (m)

Turbin hidrokinetik hanya mampu memanfaatkan sebagian dari total daya kinetik akibat adanya *losses*. Sehingga turbin memiliki koefisien daya yang ditulis dengan persamaan:

$$C_p = \frac{P_M}{P_W} \quad C_p < 1 \quad (4)$$

dengan P_M adalah daya mekanik yang dihasilkan turbin. Berdasarkan hukum betz C_p maksimal dari sebuah turbin adalah $16/27$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2) ke persamaan (4), maka daya mekanik yang dihasilkan turbin adalah:

$$P_M = \frac{1}{2} C_p \rho A v^3 \quad (5)$$

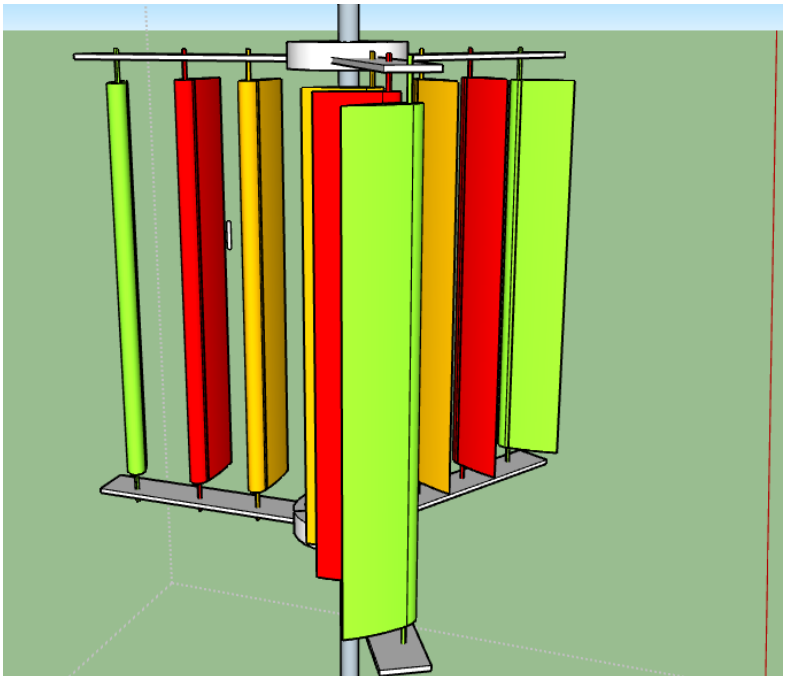
2.2 Vertical Axis Hydrokinetic Turbine Straight Blade Cascaded (VAHT-SBC)

Energi kinetik arus air dapat dimanfaatkan pada arus sungai dan arus laut. Untuk mengkonversi energi tersebut menjadi energi putaran adalah turbin hidrokinetik. Turbin ini mengadopsi konsep dari desain turbin angin. Sama seperti turbin angin, turbin hidrokinetik juga dibagi berdasarkan sumbu putarnya yaitu horizontal axis, vertical axis dan *cross-flow*. Energi putaran dari hidrokinetik turbin selanjutnya dikonversi menjadi listrik menggunakan generator.

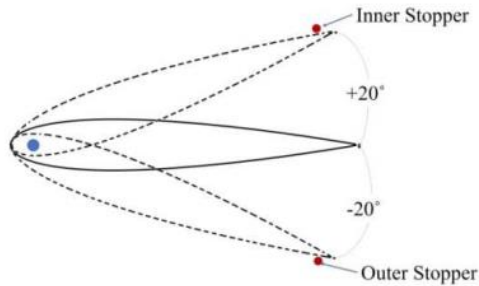
Pada penelitian ini turbin yang digunakan vertical axis dengan tipe darrieus. Turbin jenis ini memiliki jumlah bilah yang berputar pada sumbu yang tegak lurus dengan arah aliran. Turbin ini dapat menerima aliran fluida dari segala arah, selama aliran tersebut tegak lurus terhadap sumbu putaran (Septyaningrum, 2015). Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengoptimasi karakteristik daripada turbin vertical axis contohnya adalah yang dilakukan oleh Hwang (Hwang, 2009). Pada penelitian ini dilakukan variasi jenis airfoil, sudut pitch dan soliditas.

Selanjutnya, penelitian Hantoro (Hantoro, 2018) dilakukan susunan bilah bertumpuk (*cascaded*) dan mekanisme *passive-pitch* untuk menaikkan efisiensi dan kemampuan *self-strat* turbin. Turbin ini disebut dengan *Vertical Axis Hydorkinetic Turbine Straight Blade Cascaded*

(VAHT – SBC). Turbin ini memiliki 3 buah arm dengan jumlah bilah 3 pada tiap arm. Turbin ini digunakan NACA 0018 sebagai hidrofoil. Bilah terluar pada tiap arm ini menggunakan mekanisme *passive-pitch*. Mekanisme *passive-pitch* memberikan kebebasan bergerak kepada bilah untuk menyesuaikan sudut *pitch* dengan rentang -20° – 20° . Performa turbin direpresentasikan dengan koefisien performansi (C_p), yaitu rasio antara daya mekanik turbin dengan daya air. Turbin ini memiliki nilai c_p 0.42 pada TSR 2.19 sehingga turbin ini dapat dengan baik beroperasi pada arus lemah.



Gambar 2. 1 VAHT-SBC



Gambar 2. 2 Mekanisme passive-pitch (*Hantoro, 2018*)

2.3 Hidrodinamika

Ketika terdapat benda yang berada didadalam suatu fluida maka benda tersebut mengalami gaya – gaya yang diakibatkan aliran fluida tersebut. Persamaan aliran fluida diturunkan oleh hukum konservasi fisika yaitu konservasi massa, konservasi momentum dan konservasi energi (Salman, 2014). Untuk fluida newtonian kompresibel hukum tersebut dapat ditulis dengan persamaan

Konservasi massa:

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \vartheta) = 0 \quad (6)$$

Konservasi momentum:

$$\frac{\partial \rho_f \vartheta}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \vartheta \vartheta - \tau_f) = f_f \quad (7)$$

Konservasi energi:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \vartheta h) \\ = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\vartheta \cdot t) + \vartheta \cdot \rho f_f + S_E \end{aligned} \quad (8)$$

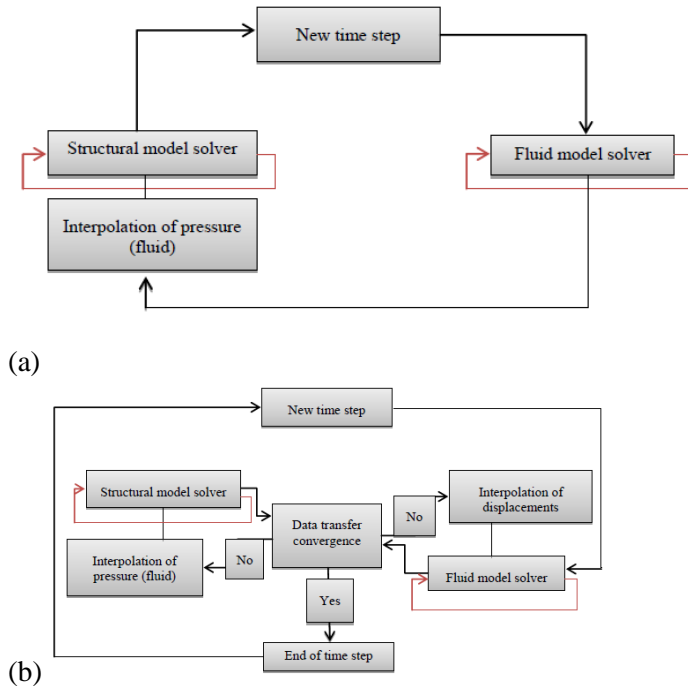
Pada persamaan diatas t adalah waktu, f_f adalah *volume force*, ρ_f adalah densitas fluida, ϑ adalah kecepatan fluida, h adalah total entalpi dari fluida, λ adalah konduktivitas termal, S_E adalah sumber energi dan τ_f adalah *shear stress* yang bisa di tulis dengan persamaan

$$\tau_f = (-p + \mu \nabla \cdot \vartheta)I + 2\mu \left(\frac{1}{2} (\nabla \vartheta + \nabla \vartheta^T) \right) \quad (9)$$

2.3.1 Hidroelastisitas

Hidroelastisitas adalah bidang studi yang mempelajari tingkah laku dari benda fleksibel yang bergerak pada lingkungan cairan. Studi ini dapat digunakan untuk menentukan tekanan, gerakan dan distorsi akibat beban dinamik yang dialami benda. Untuk melakukan studi hidroelastisitas digunakan fenomena *fluid structure interaction*.

Fluid Structure Interaction merupakan fenomena multifisika sistem yangmana aliran fluida menyebabkan deformasi pada struktur solid objek sehingga merubah kondisi batas (*boundary condition*) dari fluida (Rammohan, 2012). Adapun pada simulasi FSI terdapat berbagai metode pendekatan yaitu *one-way coupling* dan *two-way coupling*.



Gambar 2. 3 a) one-way coupling b) two-way coupling
(Rammohan, 2012)

Secara umum one way coupling merupakan metode couple dengan salah satu interaksi terhadap interaksi lain diabaikan, misal gerakan fluida mempengaruhi struktur objek namun reaksi objek terhadap fluida akan diabaikan begitu pula sebaliknya. Sedangkan pada two- way coupling gerakan fluida yang mempengaruhi struktur objek akan secara bersamaan terpengaruh interaksi reaksi dari struktur objek.

Persamaan yang merepresentasikan fenomena ini adalah sebagai berikut (Zienkiewicz, 2010):

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ \rho Q^T & E \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & A \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K & Q \\ 0 & H \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f1 \\ f2 \end{Bmatrix} \quad (10)$$

Untuk menghindari kesulitan, solusi skema partisi dilakukan menurut Maki dan Lee (Maki KJ, 2011). Sehingga persamaan diatas dibagi menjadi sistem orde kedua:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = f1 - Qp \quad (11)$$

$$E\ddot{p} + A\dot{p} + Hp = f2 - \rho Q^T \ddot{X} \quad (12)$$

Dimana M, C dan K adalah massa struktur, damping dan kekakuan pada domain solid. E, A dan H adalah inersia, damping dan kekakuan pada domain *fluid*. Q adalah matriks kopling pada antarmuka fluida dan struktur yang biasa disebut *added mass*. X adalah perpindahan pada struktur dan p adalah tekanan pada domain fluida. F1 dan f2 adalah gaya yang bekerja pada struktur dan fluida

Pada studi hidroelastisitas gaya f2 dianggap diketahui. Selanjutnya gaya f1 dihitung menggunakan persamaan 11 dan 12

2.4 Sifat Mekanik Material

Untuk menguji sifat material dilakukan uji tensi yaitu dengan memberikan beban pada material yang ditahan pada salah satu ujung. Semakin besar beban yang diberikan maka deformasi yang terjadi pada material akan semakin besar. Semakin lama, material uji akan terjadi patahan.

Untuk mengekspersikan kekuatan material biasanya digunakan persamaan

$$\sigma_f = \frac{P_f}{A_o} \quad (13)$$

dimana σ_f adalah *ultimate tensile strength* (UTS), P_f adalah beban saat patah dan A_o adalah luas area yang diberi beban. UTS adalah *stress* maksimum yang dapat diterima material sebelum material tersebut patah. UTS memiliki satuan N/m² atau Pascal (Pa).

Selain terjadi *stress*, saat material dilakukan uji tensi material juga mengalami deformasi. Deformasi terjadi akibat adanya kekakuan dari material saat diberi beban. Hooke membuat hubungan antara beban yang diberikan terhadap deformasi yang terjadi dengan persamaan:

$$P = k\delta \quad (14)$$

dimana k adalah konstanta kekakuan (N/m) dan δ adalah deformasi yang terjadi.

Deformasi dan *stress* terjadi secara bersamaan, maka menurut Young *stress* dan deformasi berhubungan proporsional. Sehingga hubungan antara *stress* dan deformasi yang terjadi dapat ditulis dengan:

$$\frac{P}{A_o} = E \frac{\delta}{L_o} \quad (15)$$

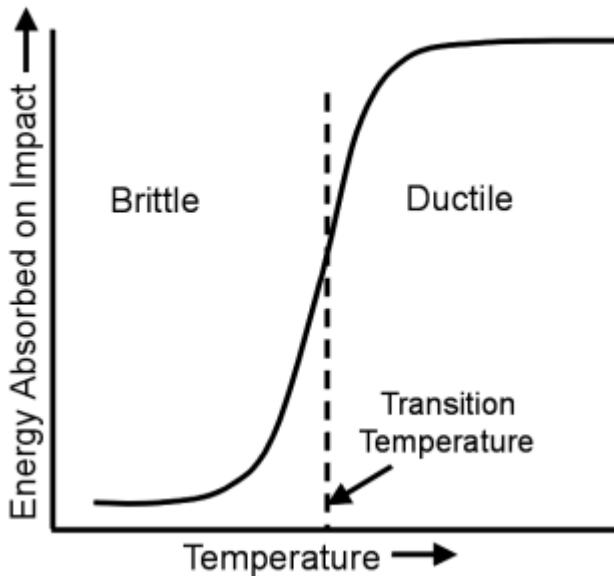
$$\delta = \frac{PL_o}{A_o E} \quad (16)$$

dimana E adalah modulus Young.

Perhatikan bahwa *stress* yang terjadi, $\sigma = P/A$ terjadi karena material tes diberikan beban konstan dan tidak bergantung dengan sifat material, sedangkan deformasi bergantung pada sifat material E (Roycastle, 2008).

Untuk material elastis sifat material lain yang perlu diperhatikan adalah *yield strength*. Yield strength hampir sama dengan UTS yaitu *stress* maksimal yang dapat diterima material sebelum terjadi deformasi permanen (plastis).

Terdapat juga material yang memiliki sifat elastis dan rapuh seperti material baja. Pada material ini terdapat sifat mekanik lain yang disebut dengan *ductile to brittle transition temperature* (DBTT). DBTT adalah temperatur minimum yang dimiliki material untuk menyerap energi tanpa patah (Sparta, 2014).



Gambar 2. 4 DBBT

Semakin rendah temperatur pada material tersebut bekerja maka semakin rendah energi yang dapat diserap atau ditahan. Pada temperatur dibawah temperatur transisi maka material akan patah ketika menerima energi diatas energi yang dapat diserap.

Untuk material baja biasanya terdapat informasi tambahan yang menunjukkan energi yang dapat diserap pada temperatur transisi. Contohnya adalah anotasi 'JR' menunjukkan bahwa material dapat menyerap energi sebesar 27J pada temperatur 25°

2.5 Factor of Safety (FOS)

Beban maksimum yang diperbolehkan pada suatu komponen struktur pada kondisi normal jauh lebih kecil dibandingkan dengan beban maksimum yang dapat diterima struktur sebelum hancur (*ultimate load*). Beban yang kecil ini sering disebut juga *allowable load* atau *working load*. Dengan demikian, hanya sebagian kecil dari *ultimate load* yang digunakan ketika *allowable load*

diaplikasikan. Sisa kapasitas dari *ultimate load* digunakan untuk memastikan keamanan kinerja struktur. Rasio antara *ultimate load* dengan *allowable load* digunakan untuk menentukan *factor of safety* (Johnston, 2015).

$$Factor\ of\ Safety\ (FOS) = \frac{ultimate\ load}{allowable\ load} \quad (17)$$

Berdasarkan pengertian FOS diatas, teori kegagalan untuk benda elastis mengadopsi variabel tersebut. Pada benda elastis yang menyebabkan pergeseran (*bending*) adalah tegangang geser pada struktur. Oleh karena itu, *yield strength* (S_{sy}) adalah parameter kekuatan dari benda elastis untuk melakukan perancangan. Salah satu teori kegagalan yang umum digunakan untuk benda elastis adalah *maximum shear stress theory*.

Maximum shear stress theory menyatakan bahwa kegagalan terjadi ketika *maximum shear stress* (τ_{max}) sama atau melebihi *yield strength* material. Sehingga nilai FOS untuk teori ini menjadi

$$Factor\ of\ Safety\ (FOS) = \frac{S_{sy}}{\tau_{max}} \quad (18)$$

Dimana $\tau_{max} \leq S_{sy}$. Jika nilai FOS kurang dari 1 maka material tersebut akan mengalami kegagalan plastis (University).

Pemilihan nilai FOS bergantung pada kebutuhan struktur yang digunakan. Nilai FOS yang terlalu kecil akan menyebabkan kemungkinan kegagalan menjadi besar. Sedangkan nilai FOS yang terlalu besar membuat manufaktur struktur tidak ekonomis.

Menurut Johnston dalam bukunya *Mechanics of Materials* terdapat beberapa faktor yang menjadi pertimbangan untuk menentukan nilai FOS

1. Variasi yang mungkin terjadi pada struktur. Proses variasi yang dilakukan saat melakukan manufaktur akan mengubah sifat dari material asalnya, seperti dilakukan proses pemanasan, deformasi dan sebagainya.
2. Jumlah beban yang disangka selama struktur berjalan. Material akan mengalami pengurangan nilai *ultimate stress* seiring dengan jumlah beban siklus yang bertambah

3. Tipe beban yang direncanakan saat melakukan desain. FOS yang besar dibutuhkan untuk beban dinamik, bersiklus, atau impulsif
4. Tipe kegagalan
5. Ketidakpastian akibat metode analisis
6. Kerusakan yang mungkin terjadi di masa depan akibat perawatan yang buruk atau penyebab alami

Pada penelitian yang dilakukan oleh Kumar (Kumar, 2016) menyatakan bahwa turbin hidrokinetik savonius pada kecepatan aliran 0.3m/s sampai 0.9m/s memiliki nilai FOS 15 atau lebih. Oleh karena itu, turbin savonius beroperasi dibawah batas kegagalan. Sedangkan nilai minimum FOS didapatkan sebesar 1.63 sampai 1.94 pada kecepatan aliran 4 m/s

2.6 Analisis Modal

Struktur dapat beresonansi seperti gaya yang kecil dapat menghasilkan deformasi yang besar dan memungkinkan menghasilkan kerusakan pada struktur. Resonansi adalah getaran yang dihasilkan dengan resonansi yang berlebihan. Getaran resonansi terjadi akibat interaksi antara sifat inersia dan elastis dari bahan dalam suatu struktur. Resonansi sering menjadi penyebab atau salah satu faktor terhadap masalah kebisingan dan getaran yang terjadi pada mesin yang beroperasi. Untuk memahami peristiwa ini frekuensi resonansi harus diidentifikasi dan diukur. Untuk saat ini analisis modal telah menjadi metode yang dipakai luas untuk menemukan moda getaran dari mesin atau struktur.

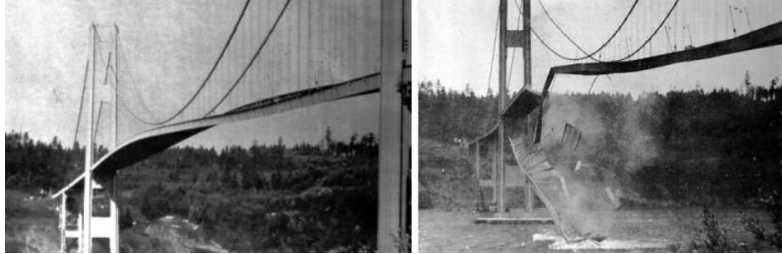
Moda adalah sifat bawaan dari struktur dan ditentukan oleh sifat material (massa, damping, kekakuan) dan kondisi struktur. Setiap moda didefinisikan oleh frekuensi natural, damping moda dan bentuk moda. Jika sifat material atau kondisi struktur diubah maka moda yang dihasilkan juga berubah. Untuk melakukan analisis ini maka digunakan konsep sistem *single* dan *multi degree of freedom*.

Pada atau dekat frekuensi natural dari suatu moda, bentuk getaran dari struktur akan didominasi dengan bentuk moda resonansi. Dengan memberikan gaya, r pada frekuensi putar yang

sama dengan frekuensi natural dari moda, ω_n maka vektor *displacement* yang terjadi dapat ditulis sebagai berikut

$$X(\omega_n) = \frac{\psi_n \psi_n(r)}{\sigma} F_r(\omega_n) \quad (19)$$

Dimana $X(\omega_n)$ adalah *displacement* pada frekuensi natural. Proporsional dengan vektor bentuk moda, ψ_n dan σ adalah *damping ratio* (Guillame, 2006).



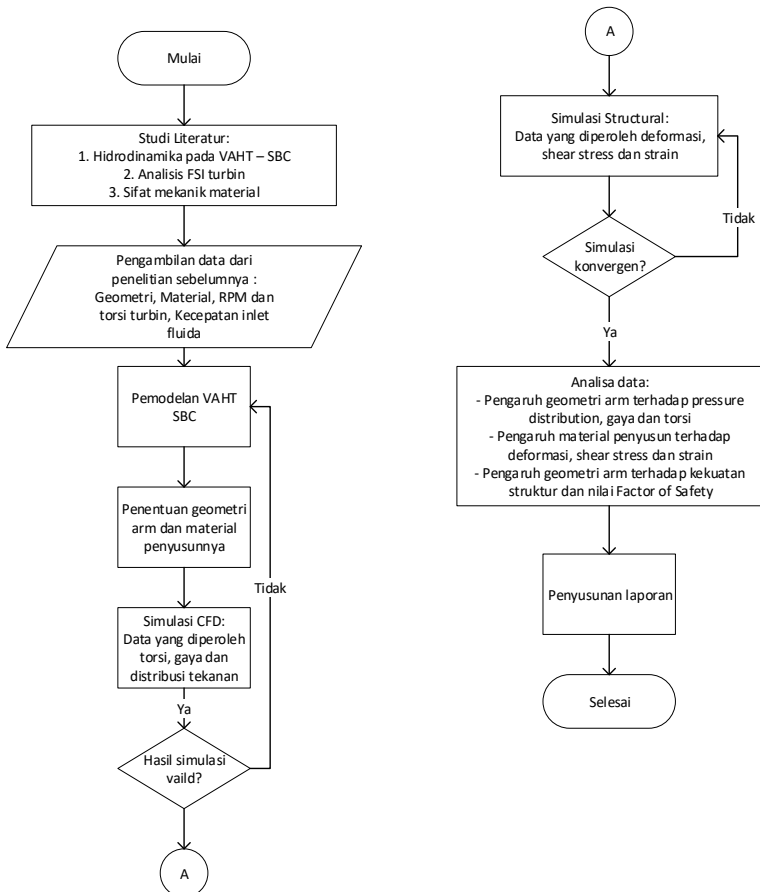
Gambar 2. 5 Bencana Jembatan Tacoma

Gambar 2.5 merupakan salah satu contoh fenomena resonansi. Kejadian tersebut terjadi pada tanggal 7 Nopember 1940. Jembatan tersebut hancur akibat vibrasi yang diakibatkan oleh aliran angin.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian yang dilakukan pada tugas akhir ini ditunjukkan pada gambar 3.1. Pada gambar tersebut dapat diketahui langkah – langkah yang dilakukan saat penelitian dilaksanakan.

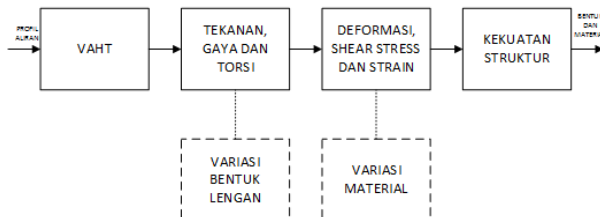


Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian diawali dengan melakukan studi literatur. Studi literatur bertujuan untuk meningkatkan pemahaman penulis tentang topik penelitian yang dilakukan. Studi literatur dilakukan dengan membaca buku, mereview jurnal, laporan dan berbagai media yang mendukung. Topik yang dipelajari pada studi literatur adalah *vertical axis hydrokinetic turbine*, konsep hidrodinamika dan hidroelastisitas, simulasi CFD dan *Transient Structural*, analisis *fluid structure interaction*, geometri arm pada turbin dan material penyusun turbin. Hasil dari studi literatur selanjutnya direview dan ditulis agar memudahkan pemahaman penulis.

Selanjutnya dilakukan pengambilan data yang menunjang untuk penelitian ini. Data diambil berdasarkan penelitian – penelitian turbin *vertical axis hydrokinetic turbine* sebelumnya yang telah dilakukan. Data yang diambil adalah kecepatan putar turbin, torsi turbin, kecepatan *inlet*, kecepatan *outlet* aliran, dimensi turbin, geometri turbin dan material penyusun turbin.

Simulasi dilakukan untuk melakukan analisis *fluid structure interaction*. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *software Computational Fluid Dynamics (CFD)* dan *Transient Structural*. Simulasi dilakukan dengan melakukan pembuatan geometri turbin, *meshing*, *pre-processing*, *processing* dan *post-processing*. Data yang diperoleh dari hasil simulasi adalah kontur *pressure*, grafik gaya pada sumbu x dan y, grafik torsi, kontur deformasi dan bentuk moda pada sepuluh frekuensi natural. Pada penelitian ini, peneliti melakukan variasi tiga bentuk geometri arm turbin yaitu plat, elliptical dan airfoil dan variasi empat material penyusun yaitu S355, S355JR, S235JR, SS400. Hasil simulasi ini kemudian dianalisa.



Gambar 3. 2 Diagram Blok Penelitian

Gambar 3.2 merupakan diagram blok penelitian yang dilakukan pada penelitian ini. Profil aliran yang diambil dari eksperimen penelitian sebelumnya menjadi inputan untuk turbin. Profil aliran tersebut mengakibatkan adanya persebaran tekanan, gaya dan torsi yang menjadi beban dinamik. Beban dinamik tersebut berubah seiring dengan terjadinya variasi pada bagian arm. Beban dinamik menyebabkan deformasi, shear stress dan strain terhadap struktur sesuai dengan material yang dipilih. Hasil deformasi shear stress dan strain dianalisis untuk menghitung kekuatan strukturnya.

3.2 Pengambilan Data Sebelumnya

Data yang diambil berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Seno Widya Manggala tahun 2016. Data yang diambil adalah geometri turbin yang disajikan pada Tabel 3.1. Data tersebut menjadi acuan untuk melakukan variasi bentuk geometri yang dilakukan pada penelitian ini

Data pengaturan eksperimen dan hasil eksperimen juga diambil dan disajikan pada Tabel 3.2. Data ini digunakan sebagai acuan pengaturan simulasi dan validasi simulasi.

Tabel 3. 1 Data Ukuran Turbin

| Parameter | Ukuran (cm) |
|-------------------------------------|-------------|
| Panjang Shaft | 110 |
| Diameter Shaft | 4 |
| Diameter turbin | 80 |
| Tinggi turbin | 80 |
| Tebal Arm | 1 |
| Lebar Arm | 10 |
| Panjang chord blade (tipe NACA0018) | 10 |
| Panjang span blade (tipe NACA0018) | 80 |
| Jarak antar blade | 10 |

Tabel 3. 2 Hasil Eksperimen Penelitian Sebelumnya

| Parameter | Nilai |
|------------------------|-----------|
| Inlet | 1.2 m/s |
| Outlet | 0.69 m/s |
| Kecepatan putar turbin | 60.67 RPM |
| Torsi | 30.18 Nm |

3.3 Pembuatan Geometri Turbin

Geometri turbin dibuat dengan menggunakan perangkat lunak *Autodesk Fusion 360 (Education License)*. Ukuran dari turbin dibuat berdasarkan acuan eksperimen yang telah dilakukan. Variasi geometri dilakukan dengan mengunci variabel ketebalan arm. Geometri turbin yang dibuat terdiri dari *shaft*, arm turbin atas bawah dan 3 buah bilah agar menghemat sumber daya komputasi.

**Gambar 3. 3** Geometri Arm Plat



Gambar 3. 4 Geometri Arm Elliptical

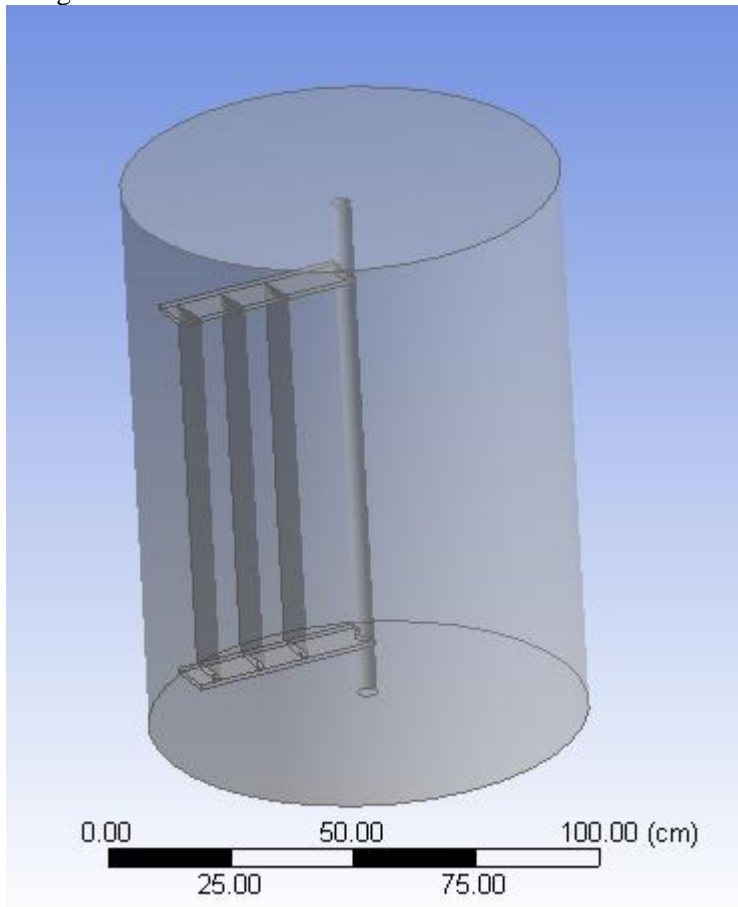


Gambar 3. 5 Geometri Arm Airfoil

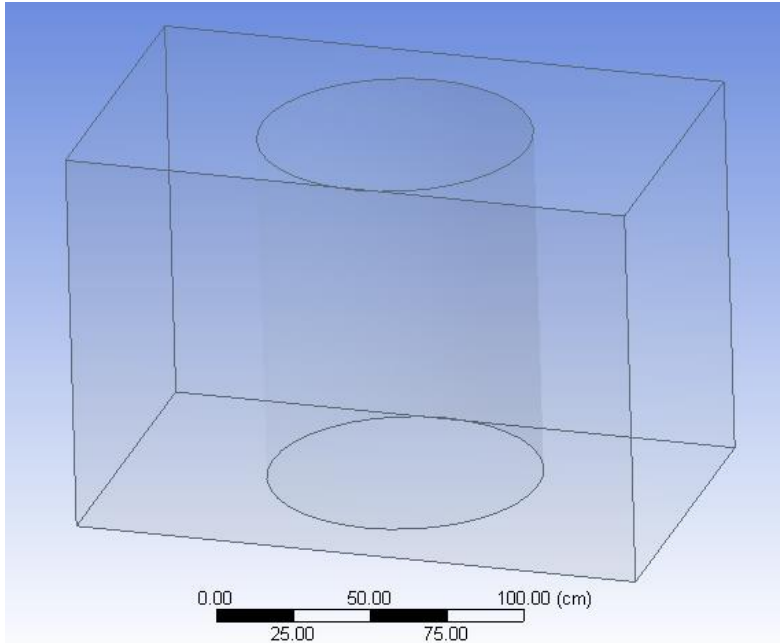
Selanjutnya geometri diimport ke perangkat lunak CFD. Pada perangkat lunak CFD dibuat domain rotor dan domain stator. Domain rotor merepresentasikan turbin yang berputar sedangkan domain stator merepresentasikan aliran air yang mengenai turbin. Domain rotor dibuat dengan bentuk tabung dengan diameter 90 cm. Domain stator dibuat dengan bentuk balok. Domain rotor terletak didalam domain stator sehingga domain stator memiliki lubang yang memiliki diameter sama dengan domain rotor.

Domain stator disesuaikan dengan pengaturan pengambilan data eksperimen sebelumnya. Lebar balok dan tinggi balok disesuaikan dengan lebar kanal yaitu 100 cm dan 130 cm masing masing. Jarak antara balok dan domain rotor terluar dibuat sesuai

dengan pengukuran kecepatan inlet dan outlet yaitu 50 cm masing masing.



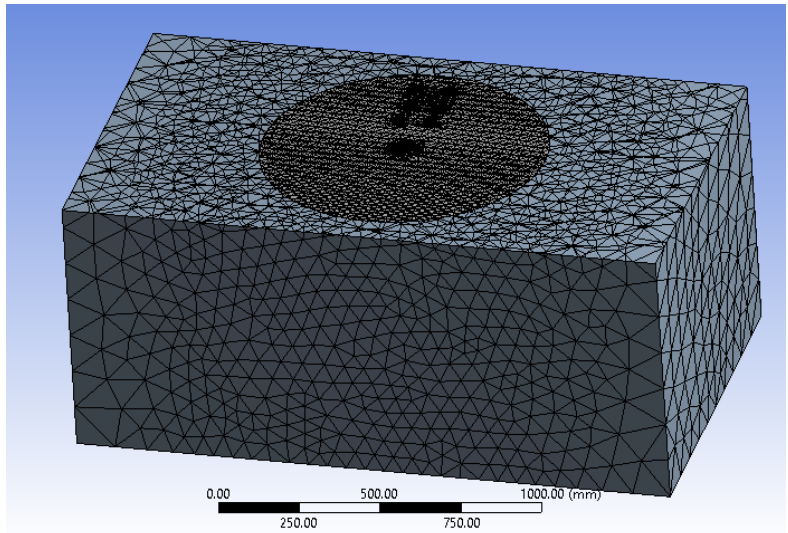
Gambar 3. 6 Domain Rotor



Gambar 3. 7 Domain Stator

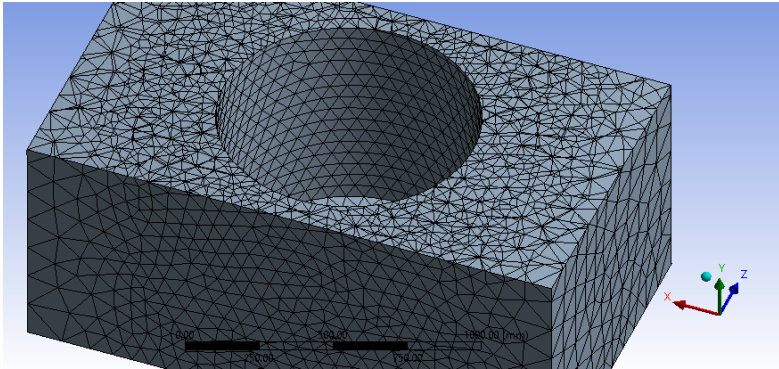
3.4 Simulasi CFD

Simulasi CFD diawali dengan melakukan *meshing* terhadap domain yang telah dibuat. *Meshing* merupakan proses pembagian geometri menjadi volum – volum kecil yang disebut dengan *control volume*. Persamaan – persamaan konversi energi dan momentum diterapkan pada tiap *control volume* yang dibuat. Semakin kecil ukuran *mesh* maka semakin valid hasil simulasi dengan beban komputasi semakin berat. Pada penelitian kali ini digunakan ukuran mesh sebesar 200 mm dengan *modul turbulence* dicoba dengan variasi *Laminar*, *K epsilon*, *SST*, *BSL Reynold Stress* dan *SSG Reynold Stress*

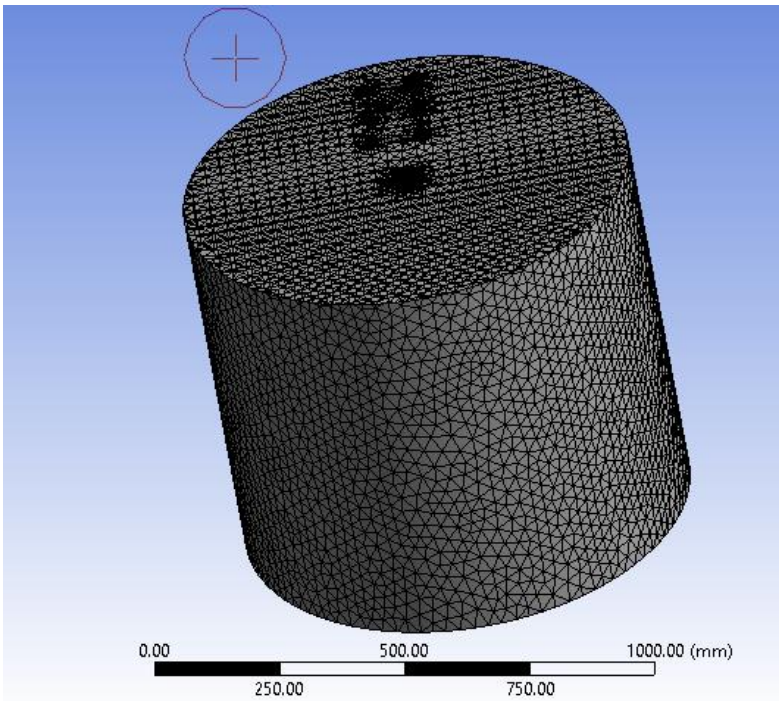


Gambar 3. 8 Hasil Meshing

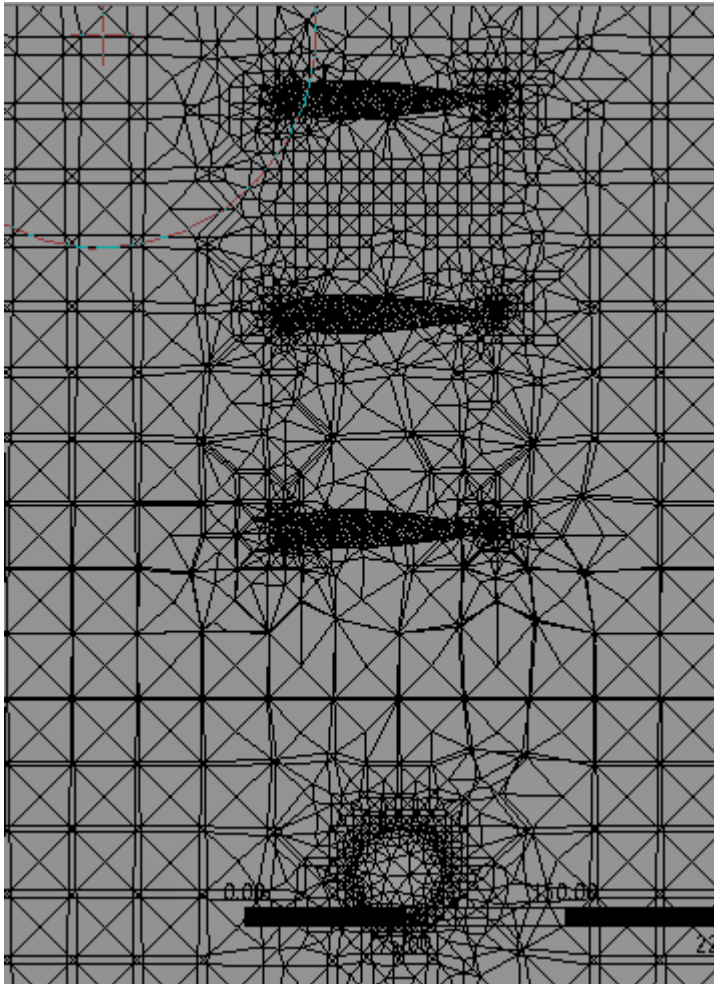
Untuk mengatasi tantangan ini maka tiap bagian geometri diatur pengaturan mesh yang berbeda. Bagian domain stator memiliki ukuran mesh yang lebih besar dengan bentuk tetrahedron. Bagian domain rotor, khususnya pada bagian turbin memiliki ukuran mesh yang lebih kecil karena pada bagian ini merupakan lokasi pengambilan data penelitian ini sehingga dibutuhkan perhitungan yang detail



Gambar 3. 9 Meshing Domain Stator



Gambar 3. 10 Meshing Domain Rotor



Gambar 3. 11 Meshing Turbin

Pada simulasi CFD didapatkan data – data distribusi tekanan, gaya sumbu x, gaya sumbu y dan torsi. Data ini kemudian dianalisa tiap variasi. Data distribusi tekanan dijadikan data masukkan pada simulasi *transient structural*

Tabel 3. 3 Kondisi Batas Simulasi CFD

| No | Kondisi Batas | Lokasi | Kondisi |
|---------------|---------------|---|---|
| Domain Stator | | | |
| 1 | Inlet | <i>Face</i> pada sumbu $-x$ domain stator | Kecepatan sesuai dengan eksperimen yaitu 1.2m/s dengan model turbulensi SST |
| 2 | Opening | <i>Face</i> pada sumbu $+y$ domain stator | Opening pressure dengan 1 atm |
| 3 | Outlet | <i>Face</i> pada sumbu $+x$ domain stator | Kecepatan sesuai dengan eksperimen yaitu 0.69m/s |
| 4 | Wall | <i>Face</i> pada sumbu $-z$, $+z$ dan $-y$ domain stator | <i>No slip wall</i> |
| Domain Rotor | | | |
| 1 | Wall | <i>Face</i> yang menyusun arm atas turbin | <i>No slip wall</i> |
| 2 | Wall | <i>Face</i> yang menyusun arm bawah turbin | <i>No slip wall</i> |
| 3 | Wall | <i>Face</i> yang menyusun bilah turbin | <i>No slip wall</i> |
| 4 | Wall | <i>Face</i> yang menyusun <i>shaft</i> turbin | <i>No slip wall</i> |

3.5 Simulasi *Transient Structural*

Simulasi *transient* diawali dengan menyiapkan data hasil distribusi tekanan dari simulasi CFD sebelumnya. Data diolah dengan menggunakan *toolbox external data*. Data disiapkan dengan memilah data tiap lokasi dan tiap *timestep*.

Sifat mekanik dari variasi material disiapkan. Pada penelitian ini variasi material yang dilakukan adalah material baja S355, S355JR, S235JR dan SS400 yang merupakan material – material yang umum digunakan pada struktur bawah laut (Igwemezie, 2018)

The image shows two windows from the ANSYS Workbench software. The top window, titled 'Table of File - E:\tpp bale\CFD\cfv\plot\arm-down_PRES.csv | Desktop - 17', displays a table with columns A through E. The rows list data sources for different locations: A (X Coordinate), B (Y Coordinate), C (Z Coordinate), D (Pressure), and E (Pressure). The bottom window, titled 'Preview of File - E:\tpp bale\CFD\cfv\plot\plot-arm-down_PRES.csv', shows a detailed view of the data for 'arm-down_PRES.csv'. It has columns A through F, with A being X Coordinate, B being Y Coordinate, C being Z Coordinate, D being Pressure, and E and F also being Pressure. The data rows show numerical values for these variables at various timesteps.

Gambar 3. 12 Data disiapkan dengan *External Data*

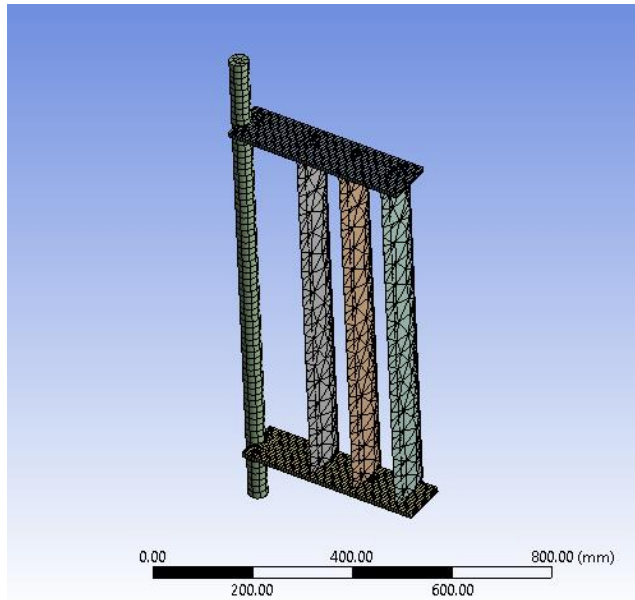
The image shows two screenshots from the ANSYS software interface. The top screenshot displays the 'Outline of Schematic A2, D2, E2: Engineering Data' window. It shows a tree view of engineering data with columns A, B, C, and D. Row 4 is highlighted, showing 'S235JR' material. The bottom screenshot shows the 'Properties of Outline Row 4: S235JR' window, which is a table of material properties. The table has columns A, B, C, D, and E. Row 2 is highlighted, showing 'Material Field Variables' with a 'Table' value. Rows 3 through 11 list various mechanical properties such as Density, Isotropic Elasticity, Young's Modulus, Poisson's Ratio, Bulk Modulus, Shear Modulus, Tensile Yield Strength, and Tensile Ultimate Strength, each with its corresponding value and unit.

| | A | B | C | D |
|---|------------------------------|---|---|----------------------------|
| 1 | Contents of Engineering Data | | | Source |
| 2 | Material | | | |
| 3 | Carbon Fiber | | | E:\tip bale\FEA\data mater |
| 4 | S235JR | | | E:\tip bale\FEA\data mater |
| 5 | S355 | | | E:\tip bale\FEA\data mater |
| 6 | S355JR | | | E:\tip bale\FEA\data mater |
| 7 | SS400 | | | E:\tip bale\FEA\data mater |

| | A | B | C | D | E |
|----|---------------------------|------------|--------------------|---|---|
| 1 | Property | Value | Unit | | |
| 2 | Material Field Variables | Table | | | |
| 3 | Density | 7850 | kg m ⁻³ | | |
| 4 | Isotropic Elasticity | | | | |
| 5 | Derive from | Young'... | | | |
| 6 | Young's Modulus | 2.1E+11 | Pa | | |
| 7 | Poisson's Ratio | 0.3 | | | |
| 8 | Bulk Modulus | 1.75E+11 | Pa | | |
| 9 | Shear Modulus | 8.0769E+10 | Pa | | |
| 10 | Tensile Yield Strength | 2.35E+08 | Pa | | |
| 11 | Tensile Ultimate Strength | 5.1E+08 | Pa | | |

Gambar 3. 13 Sifat mekanik diatur

Selanjutnya geometri turbin *dimeshing*. Pada proses *meshing* di simulasi *transient structural* tidak perlu membuat domain tambahan. Data dari *external data* diimport pada tiap bagian.



Gambar 3. 14 *Meshing turbin transient structural*

Berikut merupakan tabel properti dari tiap komponen turbin.

Tabel 3. 4 Properti komponen turbin

| Komponen | Material |
|--------------|---|
| Arm atas | Variasi material (S355,S355JR, S235JR & S400) |
| Arm bawah | Variasi material (S355,S355JR, S235JR & S400) |
| Shaft | Structural steel |
| Blades | Carbon fibre |
| Besi sisipan | Structural steel |

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Validasi Hasil Simulasi

Validasi data dilakukan untuk melihat kesesuaian hasil simulasi dengan kondisi sebenarnya. Validasi penting dilakukan untuk memastikan bahwa simulasi dapat merepresentasikan hal yang terjadi pada kenyataan.

Validasi pada penelitian ini dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi torsi turbin dengan data eksperimen sebelumnya (Manggala, 2016). Validasi dilakukan dengan menentukan model turbulensi serta *meshing*.

Tabel 4. 1 Rata –rata hasil pengukuran torsi dan RPM

| Kecepatan Aliran (m/s) | 3 Blade | | 6 Blade | | 9 Blade | |
|------------------------|------------|-------|------------|-------|--------------|--------------|
| | Torsi (Nm) | RPM | Torsi (Nm) | RPM | Torsi (Nm) | RPM |
| 1.1 | 16.56 | 67.3 | 23.58 | 61.4 | 29.76 | 57.4 |
| 1.2 | 17.07 | 67.89 | 24.32 | 63.11 | 30.18 | 60.67 |
| 1.3 | 17.82 | 68.4 | 25.33 | 63.6 | 31.21 | 62.6 |

Pada penelitian ini digunakan data torsi eksperimen pada kecepatan aliran 1.2 m/s dan 9 blade dengan RPM 60.67 yaitu 30.18 Nm.

Penelitian ini menggunakan metode *trial and error* untuk menentukan kondisi mesh yang cocok. Pada Gambar 4.1 didapatkan kondisi mesh paling cocok.

Setelah didapatkan kondisi mesh yang cocok maka dilakukan variasi model turbulensi untuk mencari model turbulensi mana yang memiliki error paling kecil.

Dari tabel 4.2 didapatkan bahwa error paling kecil didapatkan kondisi mesh yang paling baik adalah mesh kondisi *fine* dengan model turbulensi SST. *Error* didapatkan pada kondisi ini sebesar 2.9%. Hal ini menunjukkan kondisi ini dapat merepresentasikan kondisi nyata sehingga, kondisi ini dapat digunakan pada penelitian ini.

Tabel 4. 2 Kondisi Mesh Dan Model Turbulensi

| Setting | Jumlah Mesh | Skewness Rata Rata | Model Turbulensi | Torsi Simulasi (Nm) | Selisih (%) |
|---------|-------------|--------------------|--------------------|---------------------|-------------|
| Coarse | 3141062 | 0.57 | Laminar | 20 | 33.73 |
| | | | K epsilon | 22.5 | 25.44 |
| | | | SST | 25.4 | 15.83 |
| | | | BSL Reynold Stress | 23.6 | 21.80 |
| | | | SSG Reynold Stress | 24.7 | 18.15 |
| Medium | 3512214 | 0.48 | Laminar | 25.3 | 16.15 |
| | | | K epsilon | 26.2 | 13.10 |
| | | | SST | 29.2 | 3.18 |
| | | | BSL Reynold Stress | 26.4 | 12.52 |
| | | | SSG Reynold Stress | 25.8 | 14.51 |
| Fine | 4862183 | 0.30 | Laminar | 27 | 10.53 |
| | | | K epsilon | 28 | 7.22 |
| | | | SST | 29.3 | 2.91 |
| | | | BSL Reynold Stress | 28.6 | 5.23 |
| | | | SSG Reynold Stress | 26.2 | 13.18 |

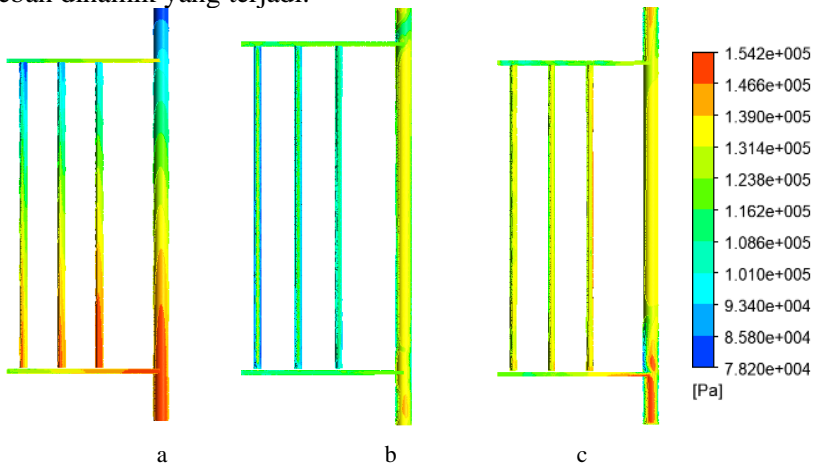
Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan sebelumnya (Arnold, 2017). Pada simulasi yang dilakukan oleh

Arnold. Kondisi yang paling *presentative* untuk simulasi *fluid solid interaction* adalah dengan menggunakan model turbulensi SST. Model turbulensi SST merupakan penggabungan dua model turbulensi sebelumnya yaitu model k- ω dan k- ϵ . Model ini mengoptimalkan kelebihan dari masing – masing model turbulensi dan menghilangkan kelemahan yang dimiliki.

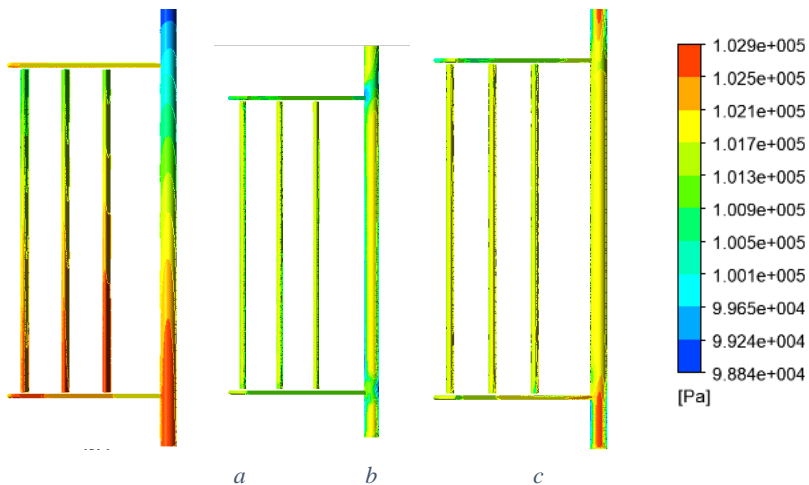
Pada penelitian ini terlihat pula bahwa *setting* dari mesh memengaruhi error yang dihasilkan. Error terkecil terjadi ketika mesh berada pada kondisi *fine*. Pada kondisi ini, mesh akan memiliki ukuran yang lebih kecil sehingga hasil komputasi akan semakin detil. Pada kondisi mesh *coarse* error yang didapatkan cukup tinggi walaupun dengan model turbulensi SST. Hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi *coarse* komputasi yang dilakukan tidak akurat dan tidak dapat digunakan pada penelitian ini.

4.2 Pengaruh Geometri Arm Terhadap *Pressure Distribution*

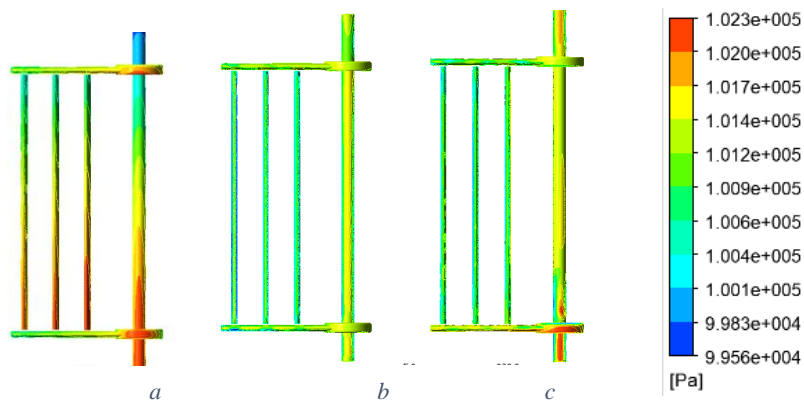
Tekanan yang dialami pada turbin akan memengaruhi beban dinamik yang terjadi.



Gambar 4. 1 Persebaran Tekanan Arm Plat. a) sudut azimuth 7.2° b) sudut azimuth 180° c) sudut azimuth 360°



Gambar 4. 2 Persebaran Tekanan Arm Ellips. a) sudut azimuth 7.2^0 b) sudut azimuth 180^0 c) sudut azimuth 360^0



Gambar 4. 3 Persebaran Tekanan Arm Airfoil. a) sudut azimuth 7.2^0 b) sudut azimuth 180^0 c) sudut azimuth 360^0

Gambar 4.1 sampai 4.3 adalah profil persebaran tekanan yang terjadi pada sudut azimuth 7.2^0 , 180^0 dan 360^0 . Dilihat bahwa profil persebaran tekanan pada tiap variasi bentuk geometri turbin sama. Tekanan maksimum terjadi pada bagian bawah turbin. Tekanan

maksimum tersebut terjadi karena tekanan dipengaruhi kedalaman dari domain laut.

Tabel 4. 3 Tekanan rata rata pada arm

| No | Bentuk Geometri | Arm atas | Arm bawah |
|----|-----------------|-----------------|------------------|
| 1 | Plat | 101067.57 Pa | 1012459.22 Pa |
| 2 | Ellips | 100939.20 Pa | 101049.05 Pa |
| 3 | Airfoil | 101004.30 Pa | 101054.71 Pa |

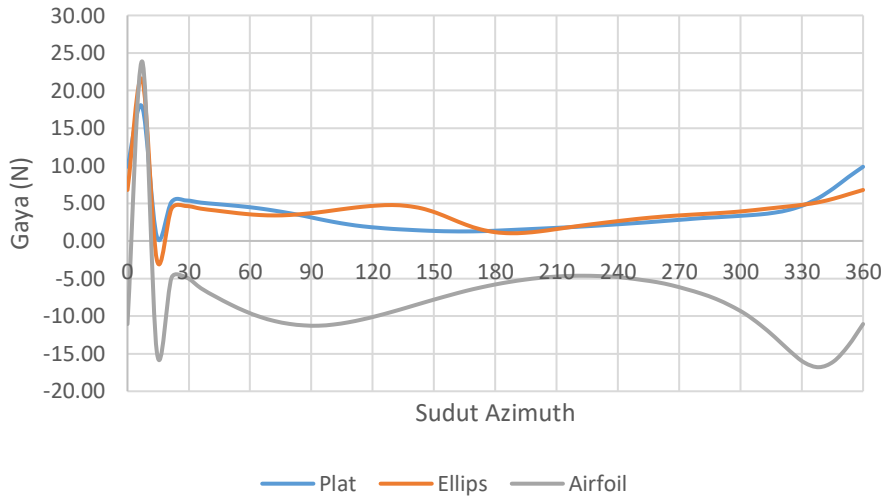
Dari tabel 4.3 terlihat bahwa walaupun profil persebaran tekanan pada variasi bentuk geometri sama tetapi memiliki nilai rata-rata yang berbeda. Perbedaan nilai ini diakibatkan area perpotongan dengan fluida (*cross-section area*) berbeda.

Tekanan rata rata minimum terjadi pada geometri ellips. Hal ini terjadi karena pada geometri ellips area yang berpotongan dengan fluida berbentuk lengkungan sehingga bentuk tersebut lebih hidrodinamis dan membuat tekanan pada arm akan berkurang. Hal yang sama juga terjadi pada geometri airfoil yang memiliki lengkungan pada area yang tegak lurus dengan aliran air

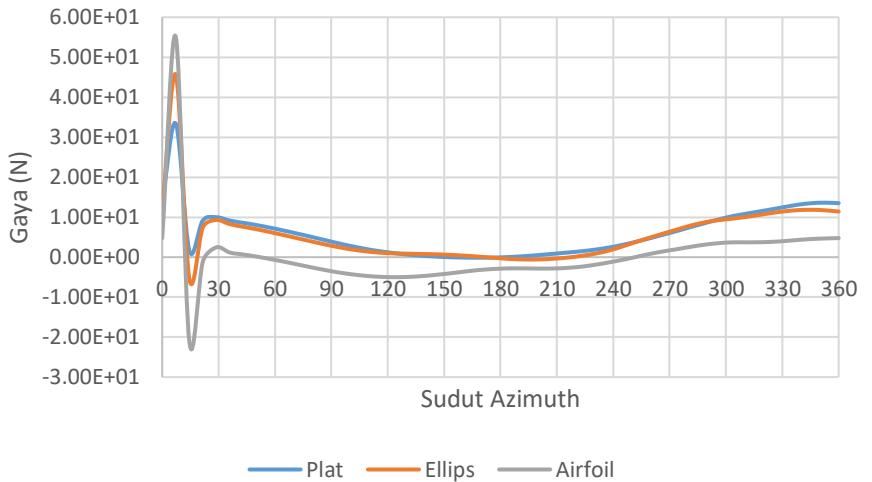
Tekanan rata rata maksimum terjadi pada geometri plat. Hal ini diakibatkan pada geometri plat area yang tegak lurus terhadap arah aliran air berbentuk persegi panjang sehingga tidak hidrodinamis. Hal ini mengakibatkan adanya penambahan tekanan pada arm.

4.3 Pengaruh Geometri Arm Terhadap Gaya yang Dialami

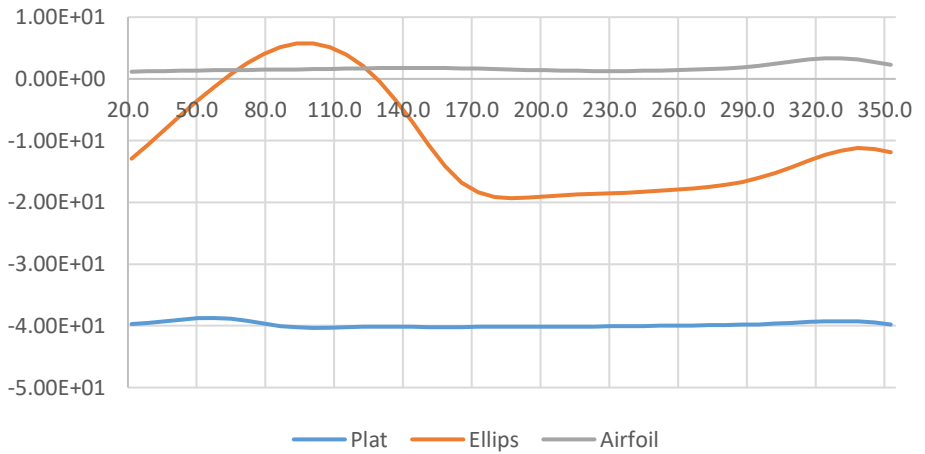
Gaya – gaya yang terjadi pada arm turbin diakibatkan karena distribusi tekanan pada turbin. Terdapat dua jenis gaya yang terjadi yaitu gaya yang terjadi pada sumbu x dan sumbu y. Masing masing gaya ini akan memengaruhi torsi turbin.



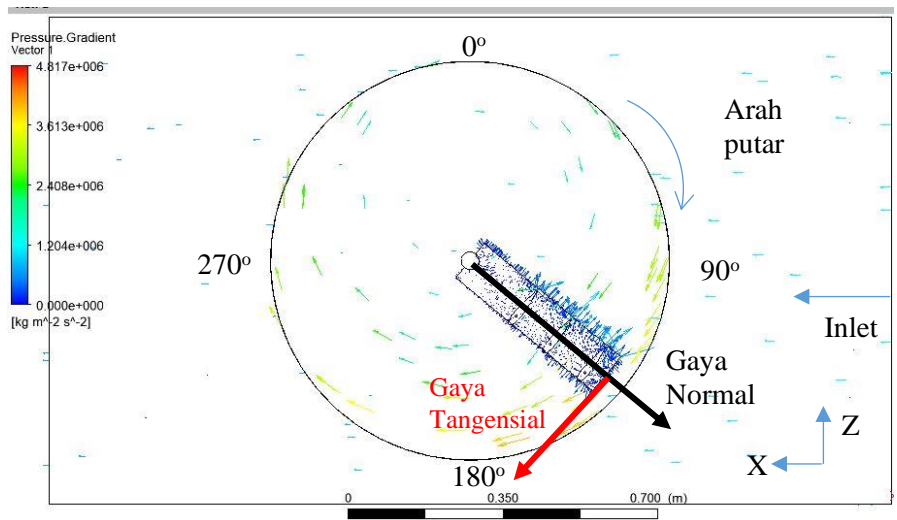
Gambar 4. 4 Grafik gaya sumbu x pada arm atas



Gambar 4. 5 Grafik gaya sumbu x pada arm bawah



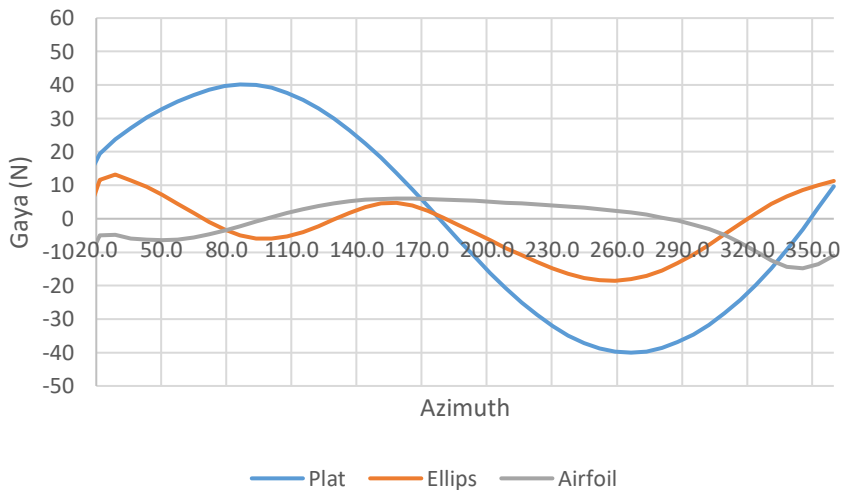
Gambar 4. 6 Gaya pada Sumbu Z



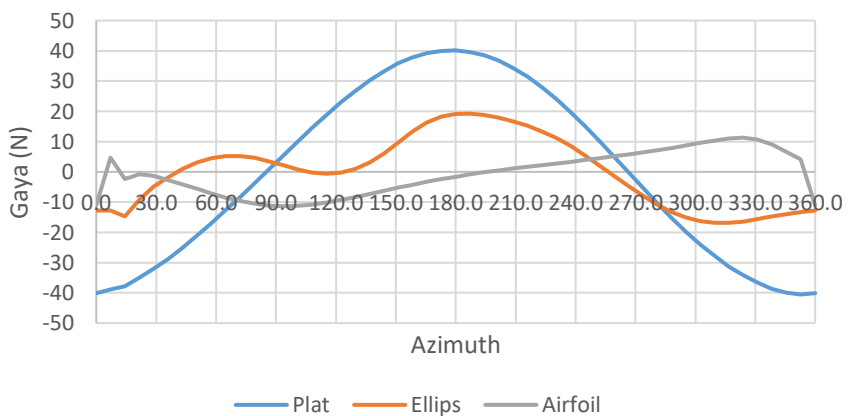
Gambar 4. 7 Arah putar dan posisi azimuth turbin

Pada Gambar 4.4 dan 4.5 merupakan grafik gaya sumbu x pada arm atas dan bawah masing masing. Untuk melihat beban

dinamik dapat dilihat dengan menghitung gaya normal dan gaya tangensial. Menurut penelitian (Rossander, 2015) bahwa gaya normal yang terjadi pada struktur akan mengakibatkan *bending*. Sedangkan gaya tangensial yang terjadi akan mengakibatkan *twisting*.



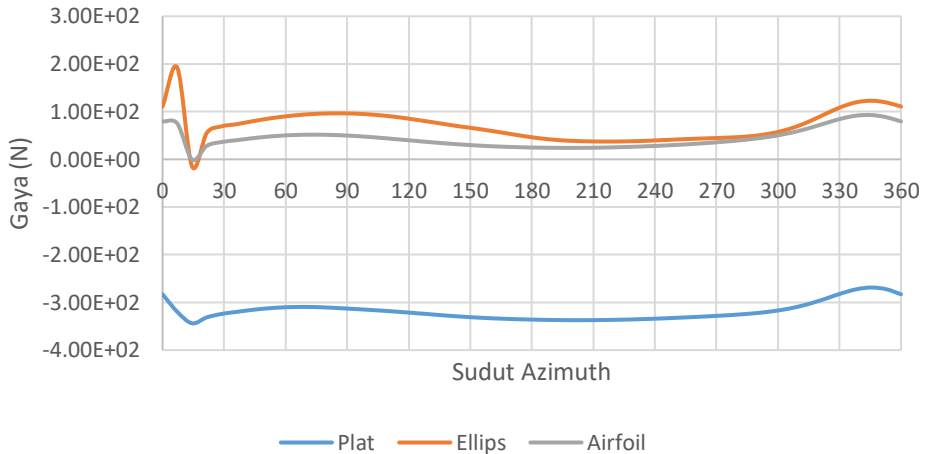
Gambar 4. 8 Grafik Gaya Normal pada Arm



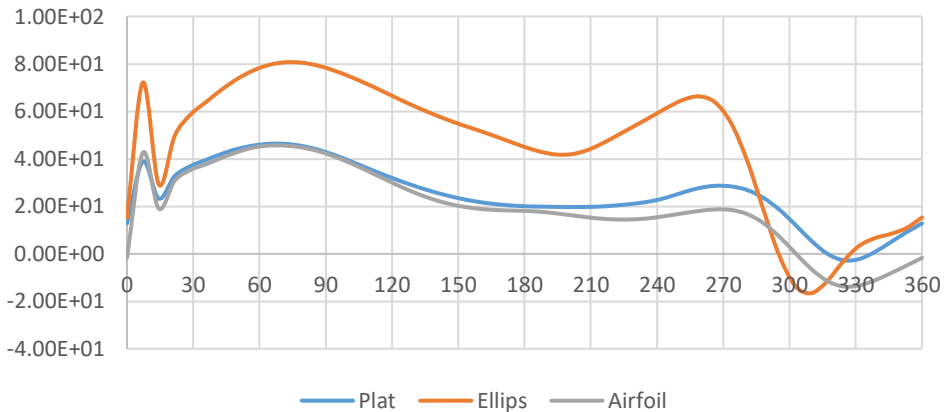
Gambar 4. 9 Gaya Tangensial pada Arm

Gambar 4.8 dan 4.9 menunjukkan gaya normal dan tangensial pada masing masing arm. Dari dua buah grafik tersebut dapat dilihat bahwa plat mendapatkan beban yang paling besar. Pada gaya normal gaya terbesar terjadi pada sudut 90° dan 270° karena pada sudut ini arm terletak searah pada inlet. Rata – rata gaya pada plat bernilai 25 N. Penambahan nilai gaya ini mendapatkan sekitar 77%.

Sedangkan gaya tangensial terjadi pada sudut 0° dan 180° . Pada sudut ini arm sejajar dengan aliran fluida. Pada sudut ini arm akan mendapatkan beban *twisting* yang paling besar. Nilai gaya tangensial rata rata yang terjadi adalah 25 N. Perbedaan nilai gaya tangensial mencapai 75.6%.



Gambar 4. 10 Grafik gaya sumbu y arm atas



Gambar 4.11 Grafik gaya sumbu y arm bawah

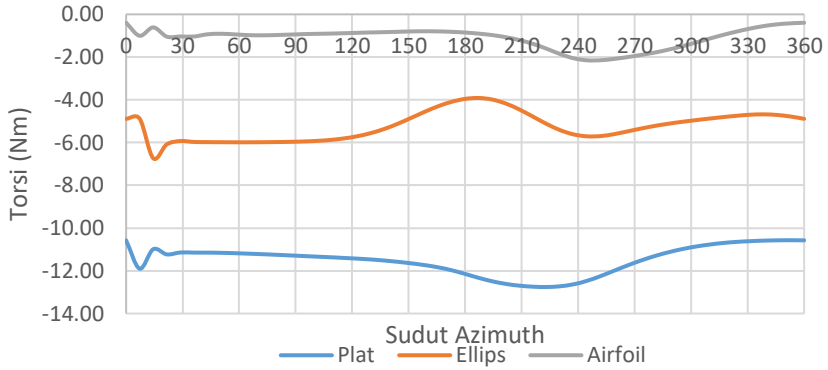
Gambar 4.10 dan Gambar 4.11 menunjukkan gaya sumbu y pada arm atas dan bawah masing masing. Pada gaya sumbu y menunjukkan kecenderungan arm untuk bergerak atas bawah. Dapat dilihat bahwa grafik arm atas dan bawah menunjukkan profil yang berbeda. Hal ini diakibatkan pada gaya sumbu ini dipengaruhi juga oleh kecenderungan gerakan dan beban pada blade.

Pada arm atas gaya pada sumbu y terbesar terjadi pada arm bentuk plat. Nilai rata rata pada arm adalah sebesar -318.57 N. Perbedaan nilai rata rata terjadi hingga 86%.

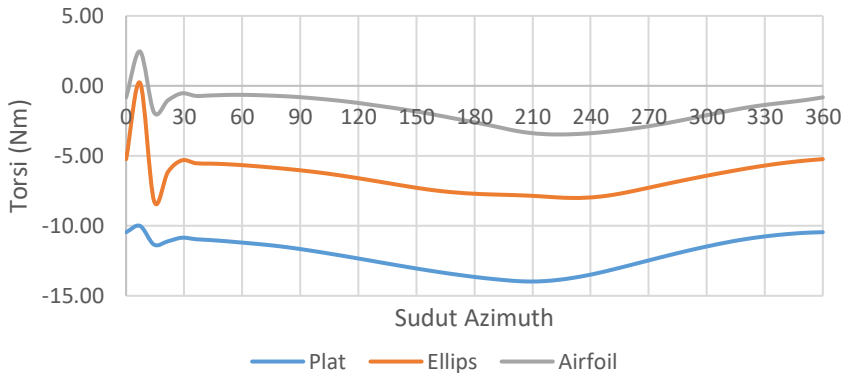
Sedangkan pada arm bawah gaya sumbu y terbesar terjadi pada arm ellips. Nilai rata rata gaya yang terbesar adalah 46.37 N. Perbedaan nilai ini terjadi hingga 58%.

4.4 Pengaruh Geometri Arm Terhadap Torsi

Gaya yang bekerja pada turbin mengakibatkan torsi pada turbin. Torsi ini kemudian menjadi beban dinamik pada turbin.



Gambar 4.12 Grafik torsi pada arm atas



Gambar 4.13 Grafik torsi pada arm bawah

Nilai torsi bernilai negatif sama seperti hasil pada variabel penelitian lain yaitu torsi yang terjadi melawan arah putar turbin. Sehingga turbin harus mampu melawan torsi yang terjadi pada turbin. Semakin besar nilai torsi semakin berat kerja turbin untuk berputar.

Gambar 4.7 dan 4.8 menunjukkan torsi pada arm atas dan bawah tiap sudut azimuth masing masing. Berdasarkan kedua

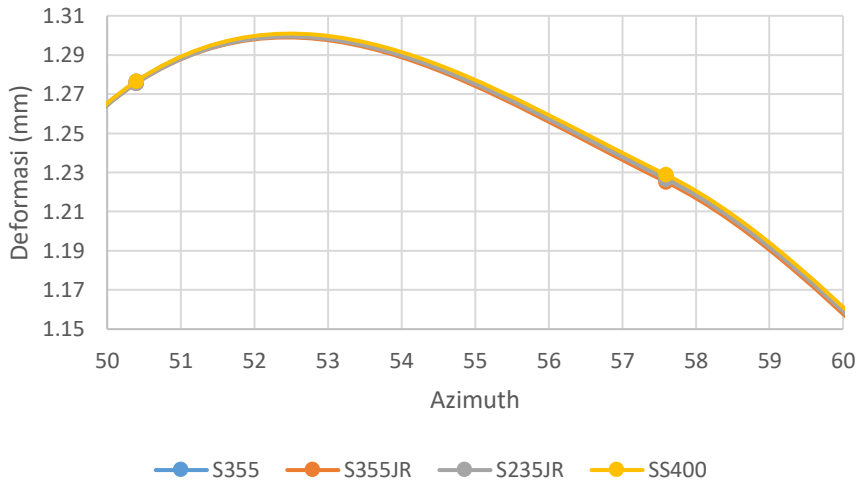
gambar tersebut dapat dilihat bahwa torsi paling besar terjadi pada bentuk geometri plat. Nilai torsi maksimum arm atas terjadi pada sudut 223° dengan nilai -12.76 Nm. Sedangkan nilai torsi maksimum pada arm bawah terjadi pada sudut 216° dengan nilai torsi sekitar -14 Nm. Hal ini sesuai dengan hasil hasil lain yang menunjukkan bahwa geometri plat mengalami beban dinamik paling besar

Sedangkan torsi minimum terjadi pada geometri airfoil. Pada arm atas maupun arm bawah geometri airfoil memiliki torsi yang paling kecil jika dibandingkan dengan tiga variasi lain. Nilai maksimum torsi atas terjadi pada sudut 245° dengan nilai -2.15 Nm. Sedangkan pada gambar 4. 11 torsi bawah nilai maksimum torsi bawah terjadi pada sudut 216° dengan nilai -3.45 Nm.

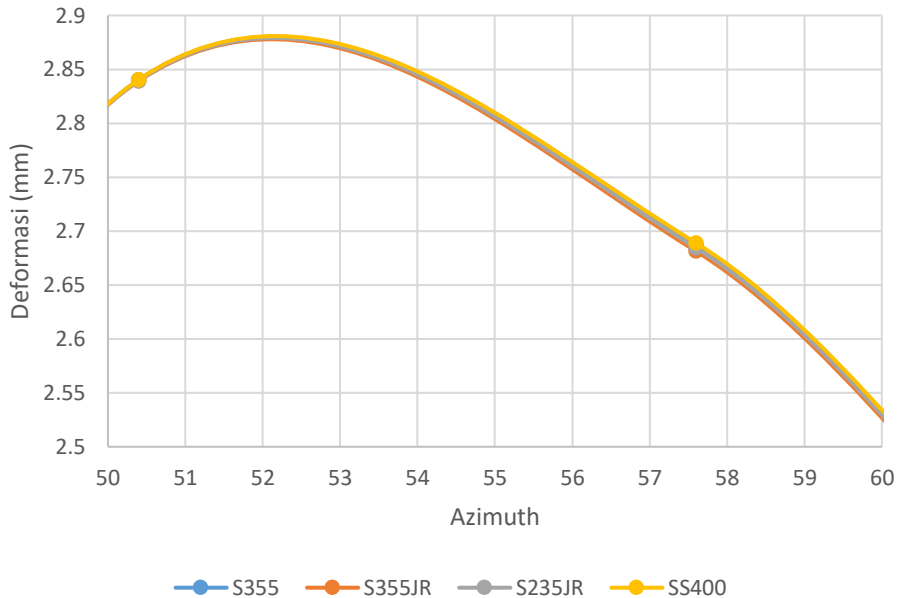
4.5 Pengaruh Material Penyusun Terhadap Deformasi Arm

Deformasi arm adalah seberapa jauh arm akan bengkak. Deformasi ini terjadi bergantung pada distribusi tekanan pada arm dan juga material penyusun arm tersebut. Pada penelitian ini dilakukan empat variasi material penyusun yaitu material baja S355, S355JR, S235JR dan SS400.

4.5.1 Bentuk Geometri Plat



Gambar 4. 14 Deformasi geometri plat arm atas

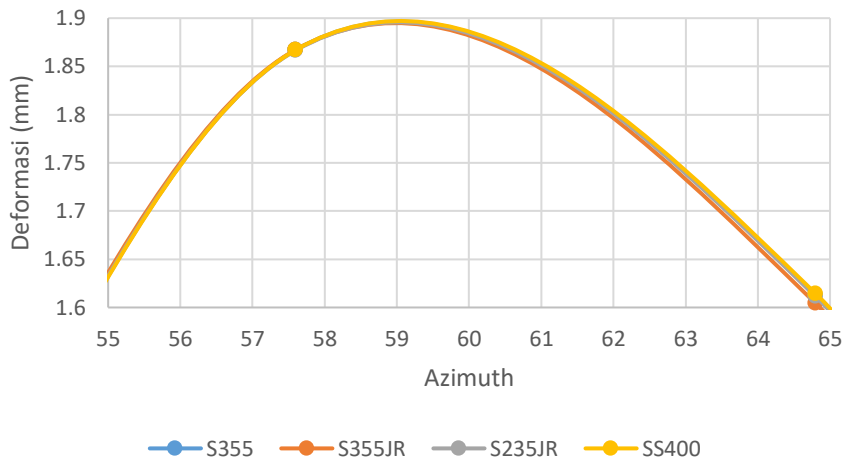


Gambar 4. 15 Deformasi geometri plat arm bawah

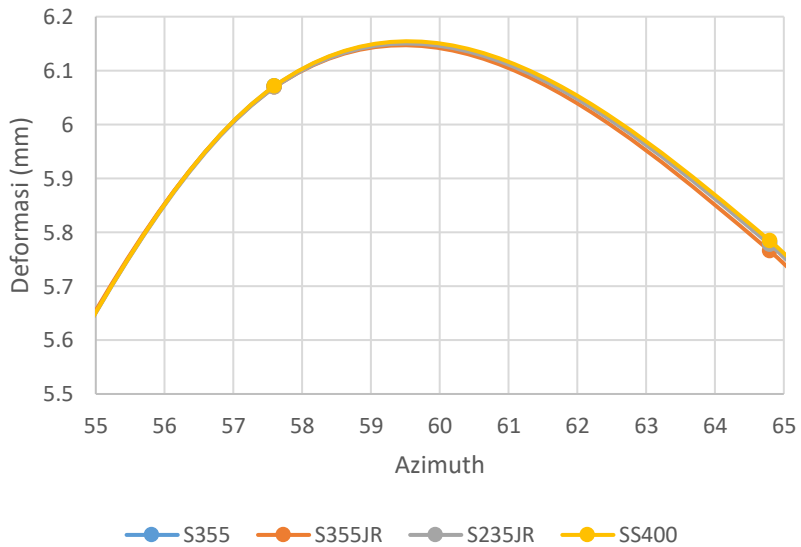
Perbedaan deformasi yang terjadi ketika dilakukan variasi material penyusun turbin sangat kecil. Pada arm atas deformasi terkecil terjadi ketika material penyusun yaitu S235JR dan S355JR dengan nilai 1.2756 mm. Sedangkan deformasi maksimum ketika material penyusun yaitu SS400 dengan nilai 1.2767 mm. Perbedaan antara nilai minimum deformasi dengan maksimum deformasi yaitu 0.08616%

Pada arm bawah deformasi terkecil terjadi ketika material penyusun S355JR dengan nilai 2.8392 mm. Sedangkan deformasi maksimum terjadi ketika material penyusun yaitu SS400 dengan nilai 2.8405 mm. Perbedaan antara nilai minimum deformasi dengan maksimum deformasi yaitu 0.0457%

4.5.2 Bentuk Geometri Ellips



Gambar 4. 16 Deformasi geometri ellips arm atas



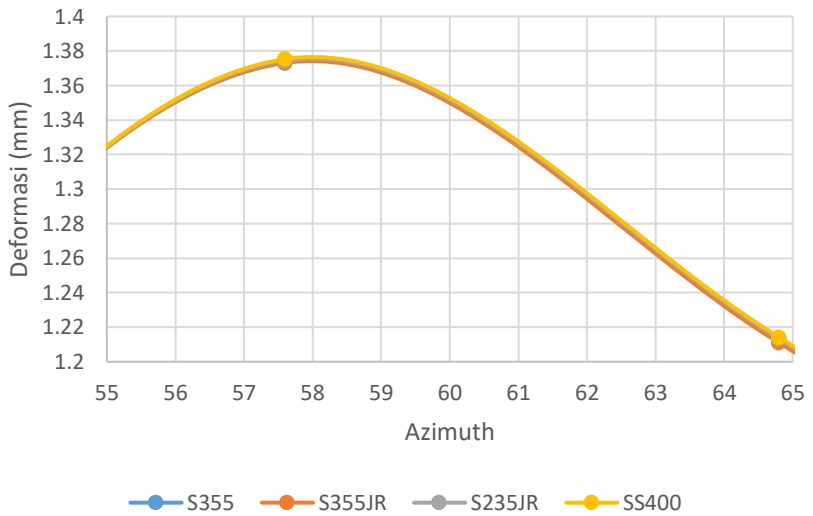
Gambar 4. 17 Deformasi geometri ellips arm bawah

Perbedaan deformasi yang terjadi ketika dilakukan variasi material penyusun turbin sangat kecil. Pada arm atas deformasi terkecil terjadi ketika material penyusun yaitu S235JR dengan nilai 1.866 mm. Sedangkan deformasi maksimum ketika material penyusun yaitu S355JR dengan nilai 1.8673. Perbedaan antara nilai minimum deformasi dengan maksimum deformasi yaitu 0.0375%

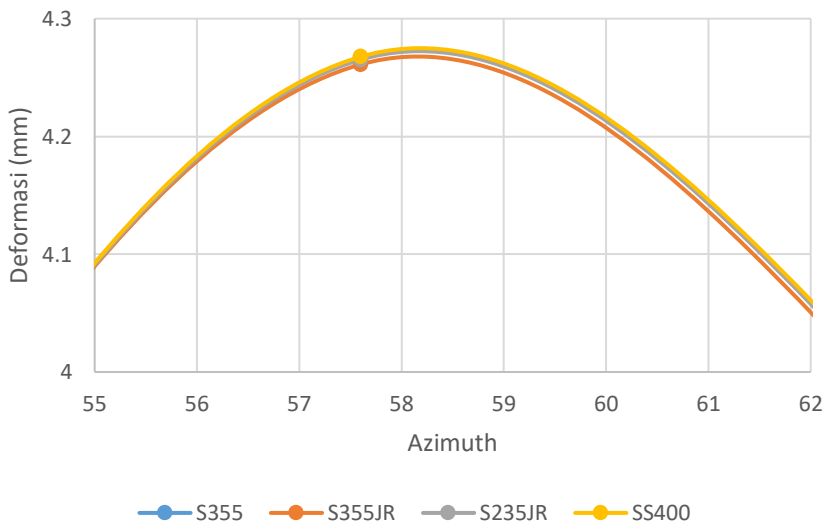
Pada arm bawah deformasi terkecil terjadi ketika material penyusun S235JR dengan nilai 6.0687 mm. Sedangkan deformasi maksimum terjadi ketika material penyusun yaitu SS400 dengan nilai 6.0714 mm. Perbedaan antara nilai minimum deformasi dengan maksimum deformasi yaitu 0.0447%

4.5.3 Bentuk Geometri Airfoil

Perbedaan deformasi yang terjadi pada geometri airfoil ketika dilakukan variasi material juga menunjukkan perubahan yang tidak signifikan. Deformasi arm atas minimum terjadi ketika digunakan material penyusun adalah S355JR dengan nilai 1.3731 mm. Deformasi arm atas maksimum terjadi ketika digunakan material penyusun SS400 dengan nilai 1.375 mm. Perbedaan antara nilai minimum dan maksimum deformasi adalah 0.16%



Gambar 4. 18 Deformasi geometri airfoil arm atas



Gambar 4. 19 Deformasi geometri airfoil arm bawah

Sedangkan pada arm bawah deformasi minimum yang terjadi ketika material S355JR dengan nilai 4.2611 mm. Deformasi maksimum pada arm bawah terjadi ketika digunakan material penyusun SS400 dengan nilai 4.2676 mm. Perbedaan antara nilai minimum dan maksimum deformasi adalah 0.15%

Dari hasil pengambilan data deformasi dapat dilihat bahwa deformasi maksimum terjadi ketika material penyusun yang digunakan adalah SS400. Perbedaan nilai maksimum dan minimum tiap variasi material kecil. Perbedaan ini terjadi selalu kurang dari 0.2%. Hal ini diakibatkan oleh sifat mekanik dari variabel bebas hampir sama.

Bila dibandingkan, deformasi yang terjadi pada arm bawah lebih besar dibandingkan dengan arm atas. Hal ini diakibatkan karena simulasi dilakukan dengan menggunakan *fixed support* pada bagian atas shaft turbin. *Fixed support* adalah suatu *boundary condition* yang menyatakan bahwa pada bagian tersebut tidak dapat bergerak atau deformasi.

4.6 Pengaruh Material Penyusun Terhadap Maximum Shear-Stress Dan Maximum Shear Elastic Strength

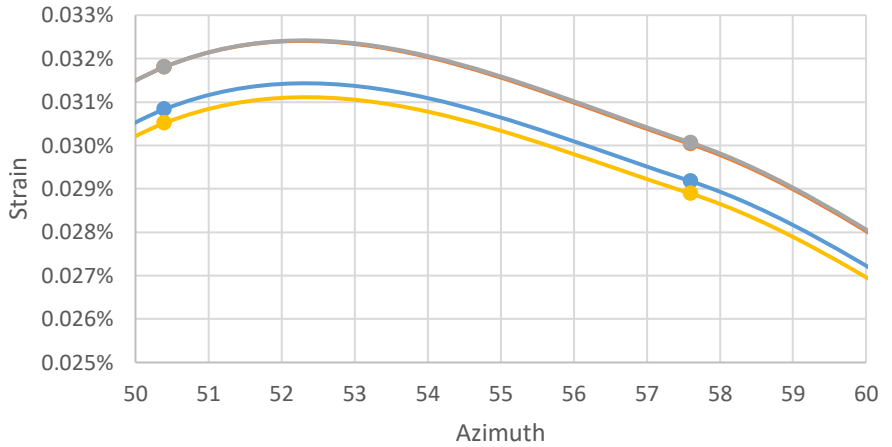
Pada penelitian ini diasumsikan bahwa material penyusun bekerja pada temperatur diatas temperatur transisi, sehingga material penyusun bersifat sebagai material elastis. Pada material elastis, *yielding* atau perubahan sifat material menjadi plastis terjadi akibat adanya pergeseran atom pada struktur kisi. Maka, *shear yield strength* (S_{sy}) adalah parameter kekuatan dari material elastis yang digunakan untuk melakukan desain.

Teori yang cocok untuk mengidentifikasi kekuatan pada struktur material elastis adalah teori "*maximum shear stress*". Teori ini menyatakan bahwa kegagalan terjadi ketika nilai *stress* yang bekerja sama atau melebihi nilai *shear stress* pada *yielding point* dari material.

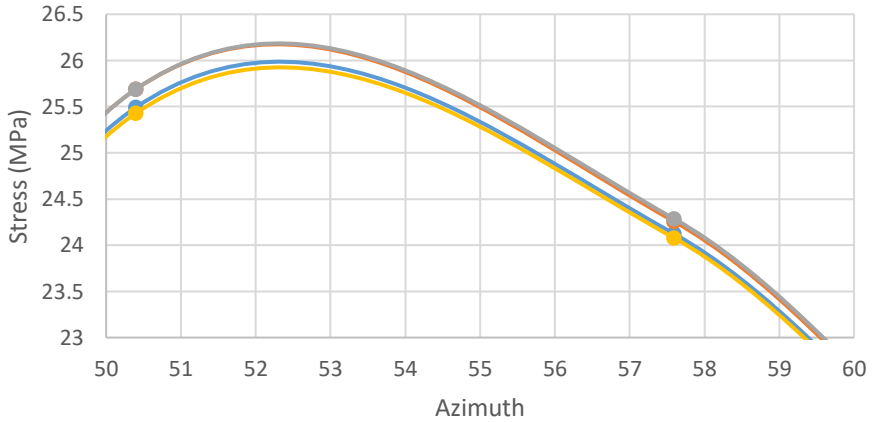
4.6.1 Bentuk Geometri Plat

Pada gambar 4.20 dipaparkan pengaruh perubahan material penyusun terhadap *maximum shear stress* dan *strain* yang terjadi pada arm atas dengan geometri plat. Dapat dilihat bahwa nilai *shear stress* dan *strain* yang paling tinggi terjadi ketika digunakan material S235JR

Gambar 4. 21 menunjukkan *shear stress* dan *strain* yang terjadi pada arm bawah akibat dilakukan variasi material penyusun. Nilai maksimum *shear stress* dan *strain* juga terjadi pada material S235JR.

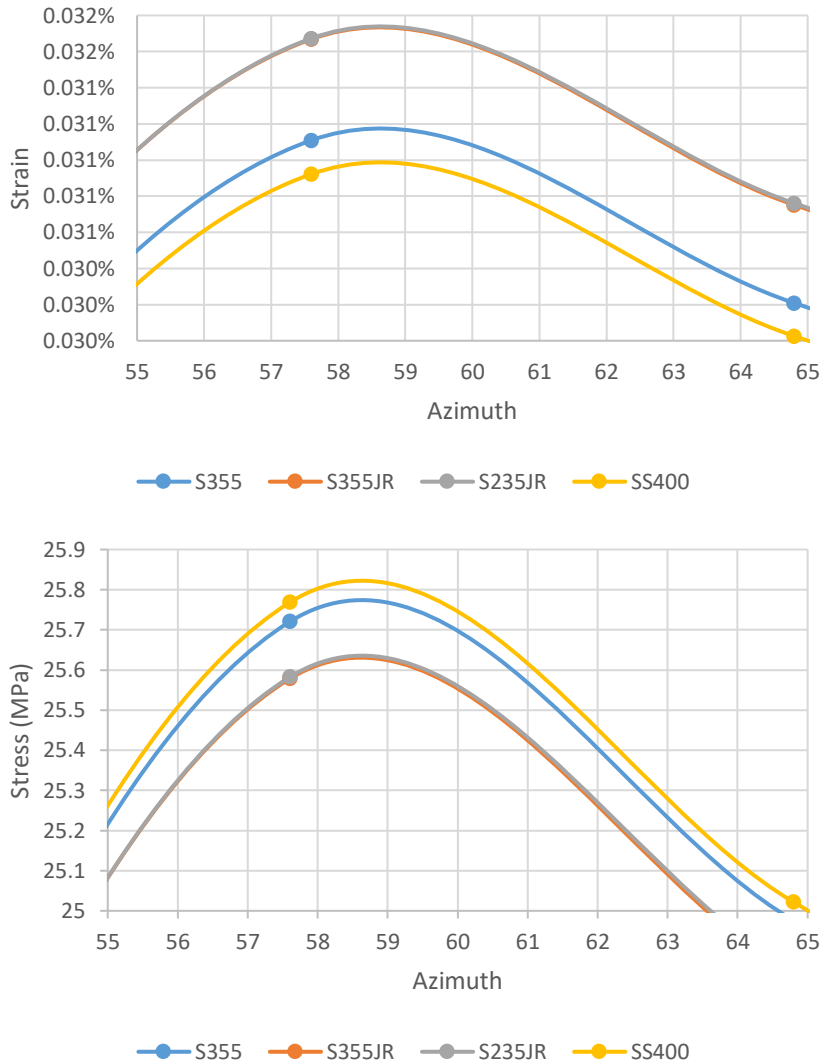


● S355 ● S355JR ● S235JR ● SS400



● S355 ● S355JR ● S235JR ● SS400

Gambar 4. 20 Maximum *shear stress* dan *strain* pada arm atas

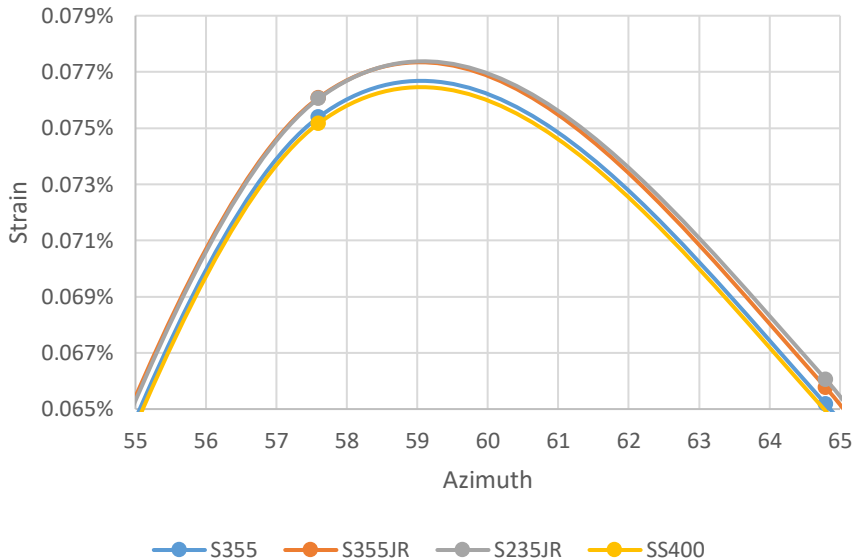


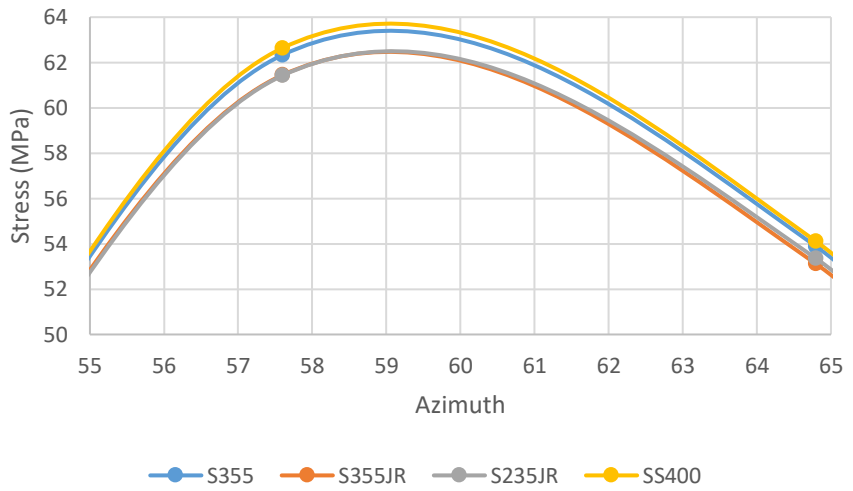
Gambar 4. 21 Maximum *shear stress* dan *strain* pada arm bawah

4.6.2 Bentuk Geometri Ellips

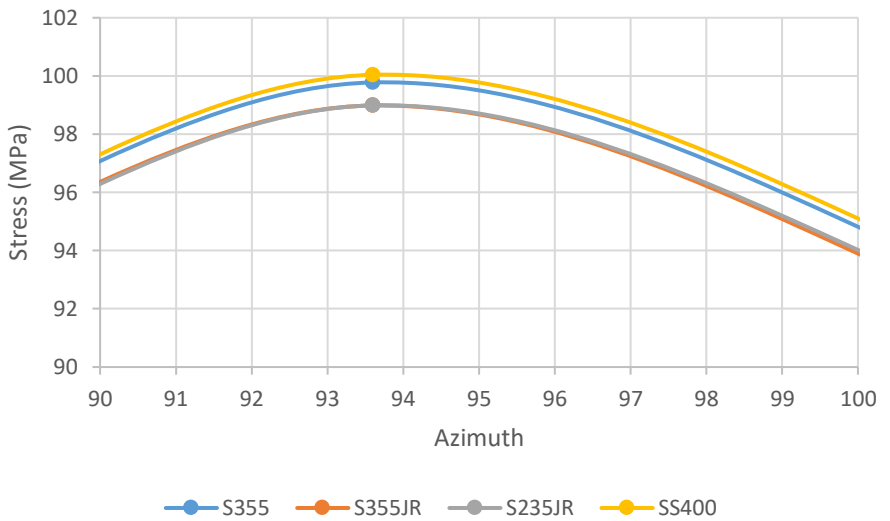
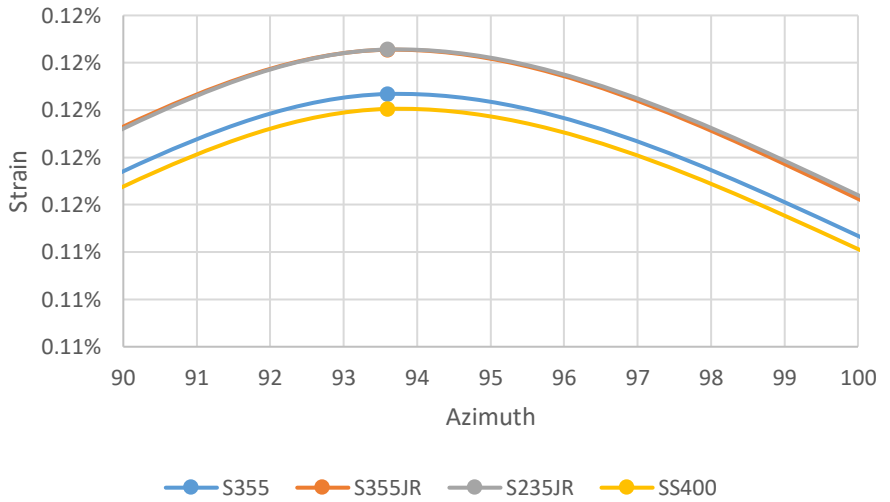
Pada gambar 4.22 dipaparkan pengaruh perubahan material penyusun terhadap *maximum shear stress* dan *strain* yang terjadi pada arm atas geometri ellips. Dapat dilihat bahwa nilai *strain* yang paling tinggi terjadi ketika digunakan material S235JR dengan geometri ellips sedangkan stress terbesar didapatkan ketika menggunakan SS400.

Gambar 4. 23 menunjukkan *shear stress* dan *strain* yang terjadi pada arm bawah akibat dilakukan variasi material penyusun. Dapat dilihat bahwa nilai *strain* yang paling tinggi terjadi ketika digunakan material S235JR dengan geometri ellips sedangkan stress terbesar didapatkan ketika menggunakan SS400.





Gambar 4. 22 Maximum *shear stress* dan *strain* pada arm atas

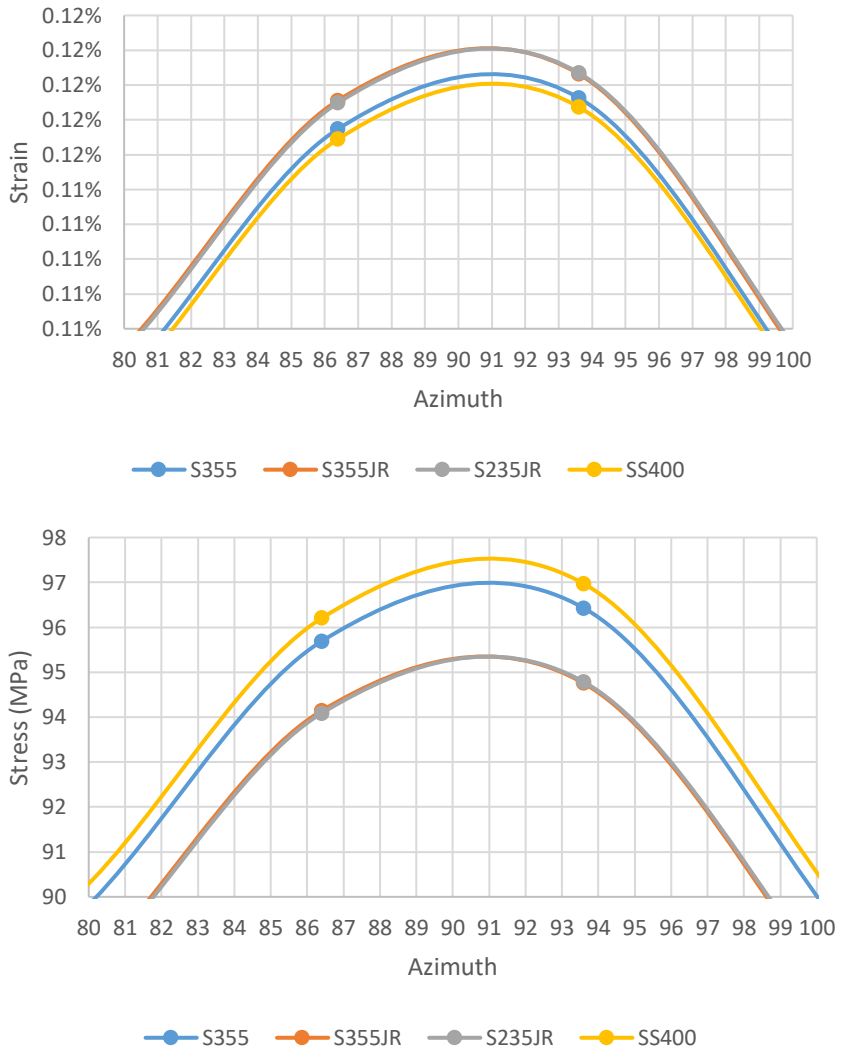


Gambar 4. 23 Maximum *shear stress* dan *strain* pada arm bawah

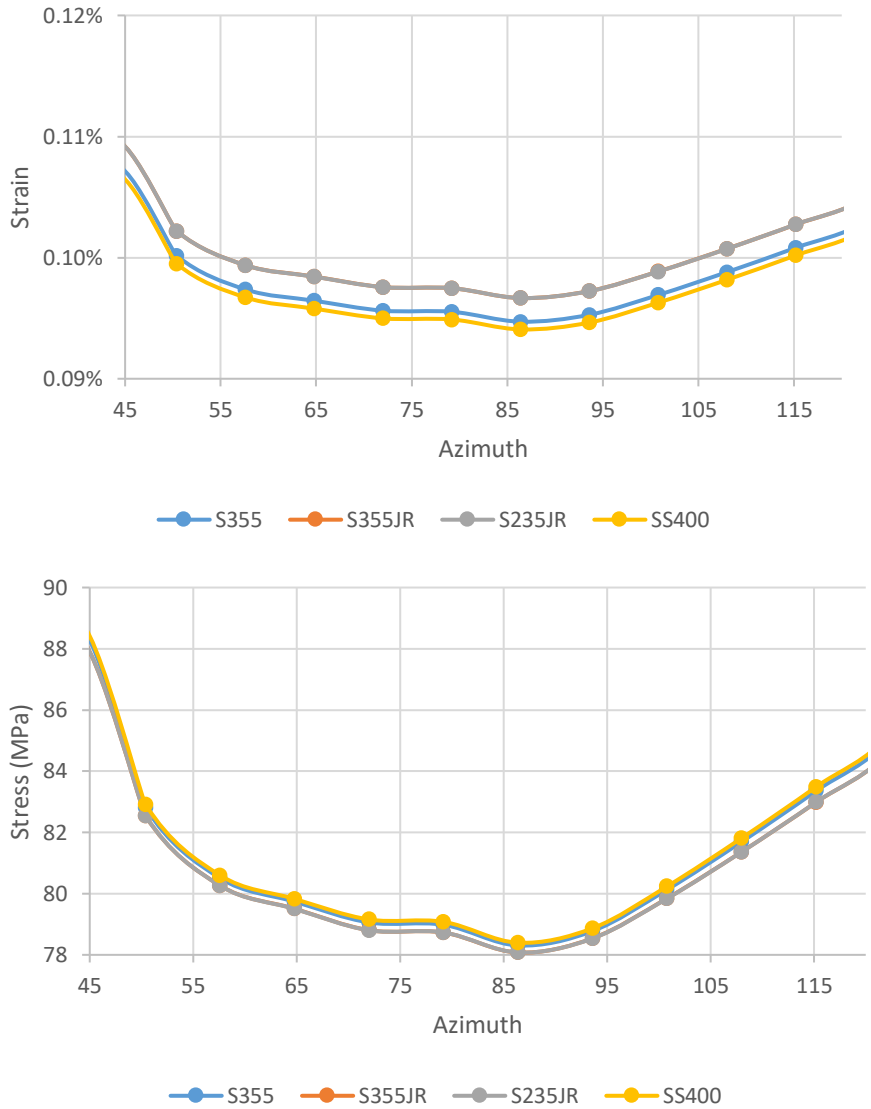
4.6.3 Bentuk Geometri Airfoil

Pada gambar 4.24 dipaparkan pengaruh perubahan material penyusun terhadap *maximum shear stress* dan *strain* yang terjadi pada arm atas geometri airfoil. Dapat dilihat bahwa nilai *strain* yang paling tinggi terjadi ketika digunakan material S235JR dengan geometri ellips sedangkan stress terbesar didapatkan ketika menggunakan SS400.

Gambar 4. 25 menunjukkan *shear stress* dan *strain* yang terjadi pada arm bawah akibat dilakukan variasi material penyusun. Dapat dilihat bahwa nilai *strain* yang paling tinggi terjadi ketika digunakan material S235JR dengan geometri ellips sedangkan stress terbesar didapatkan ketika menggunakan SS400



Gambar 4. 24 Maximum *shear stress* dan *strain* pada arm atas



Gambar 4. 25 Maximum *shear stress* dan *strain* pada arm bawah

Perbedaan nilai *shear stress* dan *strain* ini terjadi akibat tiap material memiliki modulus young yang berbeda beda sehingga *shear stress* maksimum dan *strain* yang terjadi berbeda pula. Nilai *shear stress* akan mempengaruhi kekuatan dari struktur.

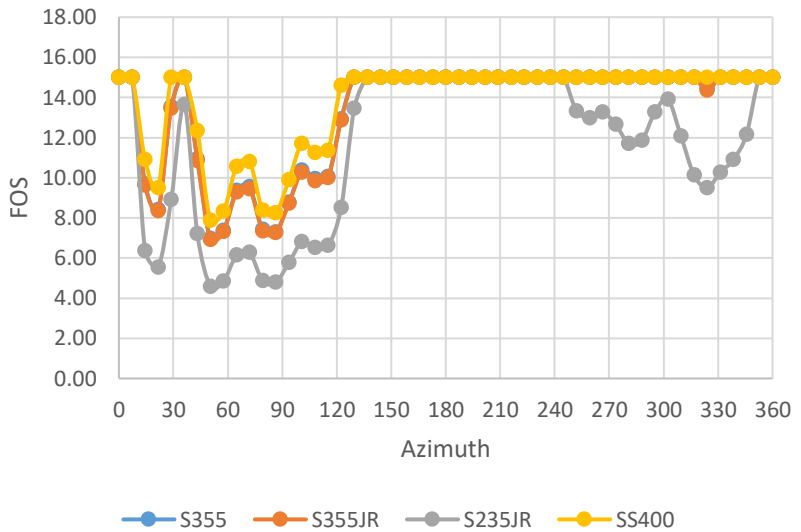
Nilai *strain* yang terjadi merupakan seberapa besar pergeseran yang terjadi bila dibandingkan dengan kondisi awal. *Strain* yang terjadi pada penelitian ini maksimal sebesar 0.1%. Berdasarkan sifat *ductility* dari baja, *strain* yang terjadi masih membuat material bersifat elastis.

Pada arm atas nilai maksimum *shear stress* lebih besar dibandingkan dengan arm bawah. Hal ini diakibatkan pada arm atas selain mendapatkan beban dinamik pada arm, juga mengalami gaya tahan akibat adanya *fixed support* pada bagian atas *shaft* turbin.

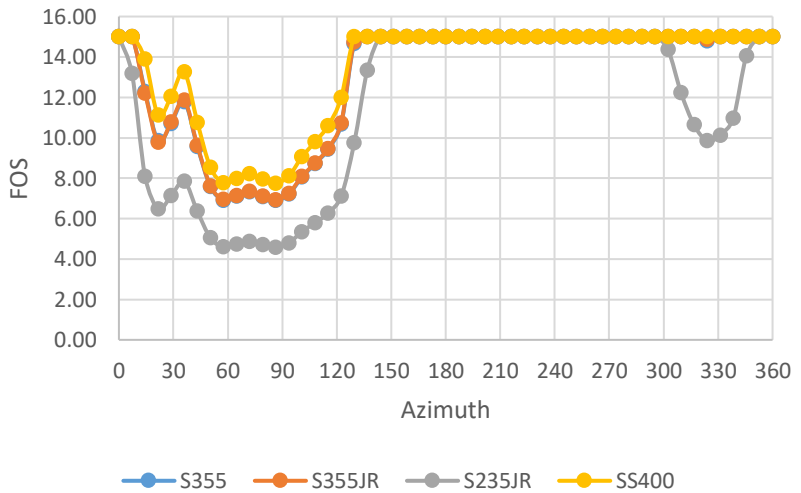
4.7 Factor of Safety (FOS) Tiap Variasi

Factor of Safety menyatakan seberapa kuat suatu sistem daripada yang dibutuhkan untuk beban yang diberikan. Berdasarkan teori *maximum shear stress*, FOS adalah rasio *stress* ketika benda mulai plastis (*yield stress*) dan *stress* yang terjadi pada benda. Semakin tinggi nilai FOS maka kemungkinan untuk gagal semakin kecil.

4.7.1 Bentuk Geometri Plat



Gambar 4. 26 FOS pada arm atas



Gambar 4. 27 FOS pada arm bawah

Gambar 4.26 dan 4.27 memaparkan bagaimana pengaruh material terhadap nilai FOS pada geometri plat. Dapat dilihat bahwa profil FOS tiap variasi material hampir sama. Perbedaan terjadi pada variasi material S235JR digunakan. Nilai FOS pada material S235JR terjadi pengurangan pada sudut azimuth 300° - 355° sedangkan pada material lain tidak terjadi pengurangan. Hal ini berarti pada kondisi ini material S235JR memiliki kekuatan yang lebih kecil jika dibandingkan dengan variasi material lain.

Pengurangan nilai FOS terjadi secara umum pada sudut azimuth 30° - 150° . Hal ini terjadi karena pada sudut ini arm mengalami *shear stress* maksimum. Ketika nilai *shear stress* mendekati nilai *yield stress* pada arm maka akan terjadi pengurangan nilai FOS

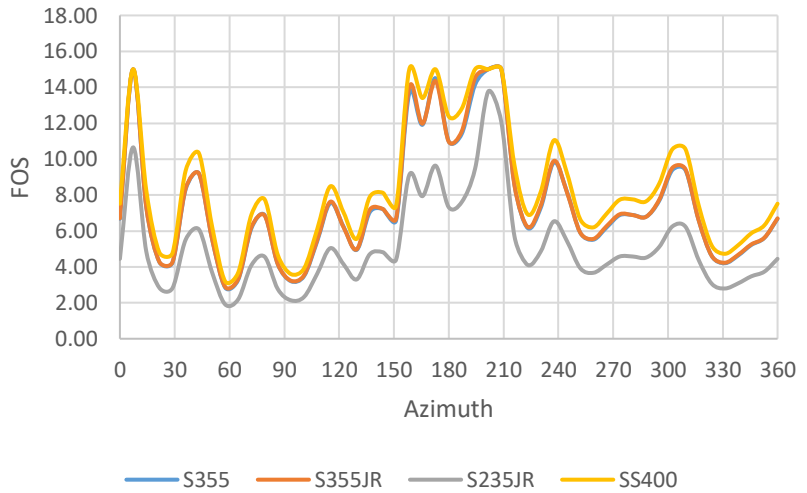
Dari kedua gambar tersebut nilai FOS pada kondisi 30° - 150° yang paling tinggi dimiliki oleh material SS400. Sehingga dapat dikatakan material SS400 untuk geometri plat memiliki karakteristik paling kuat

4.7.2 Bentuk Geometri Ellips

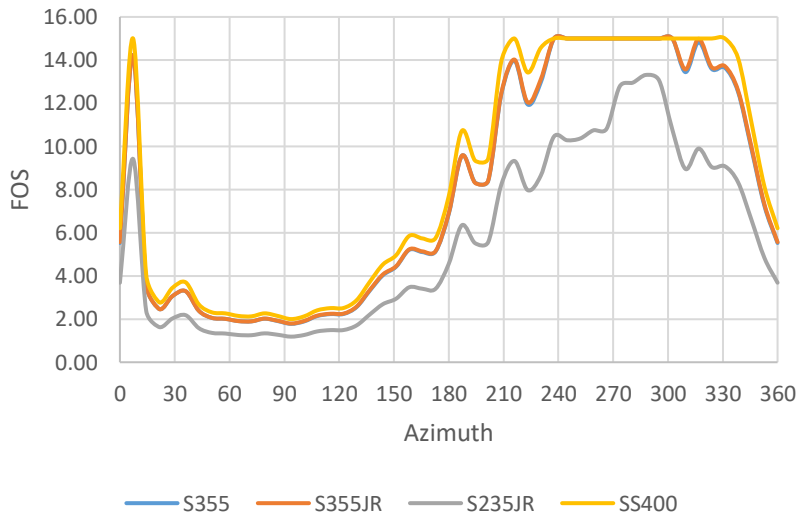
Gambar 4.28 dan 4.29 memaparkan bagaimana pengaruh nilai FOS terhadap material penyusunnya pada geometri ellips. Dapat dilihat bahwa profil FOS tiap variasi material hampir sama.

Nilai FOS bersifat fluktuatif. Hal ini diakibatkan nilai *shear stress* pada geometri terus menerus berubah. Penambahan nilai FOS secara signifikan terjadi pada sudut azimuth 150° - 210° . Pada sudut ini nilai *shear stress* mencapai nilai terendah.

Sama seperti variasi geometri plat, material SS400 memiliki kekuatan struktur yang paling kuat karena nilai FOS pada kedua lembah tersebut paling tinggi bila dibandingkan dengan material lain. Sedangkan material paling lemah merupakan material S235JR

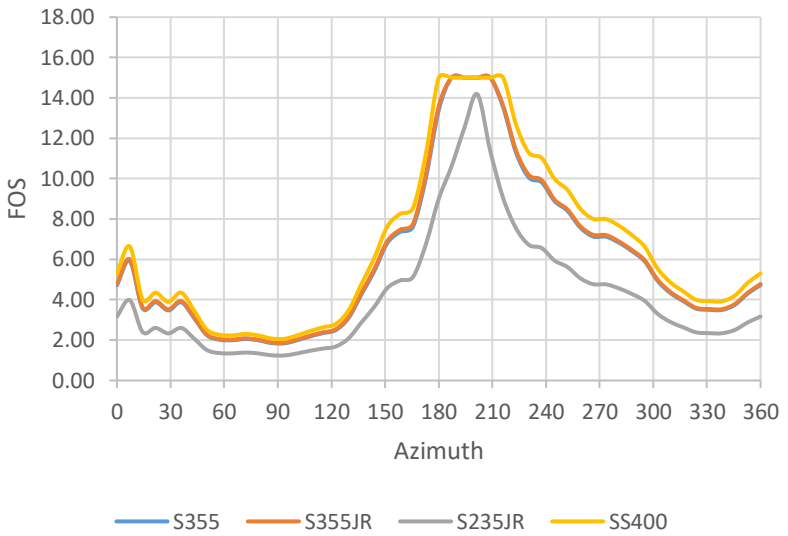


Gambar 4. 28 Nilai FOS pada arm atas

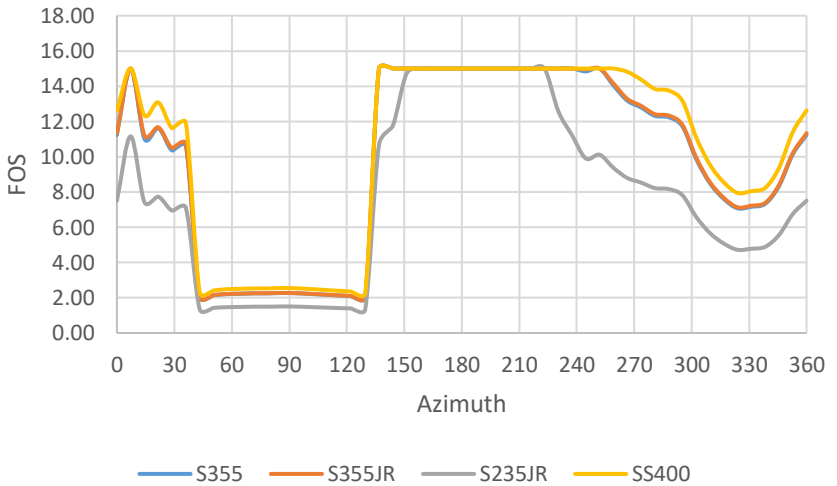


Gambar 4. 29 Nilai FOS pada arm bawah

4.7.3 Bentuk Geometri Airfoil



Gambar 4. 30 Nilai FOS pada arm atas



Gambar 4. 31 Nilai FOS pada arm bawah

Gambar 4.30 dan 4.31 memaparkan bagaimana pengaruh nilai FOS terhadap material penyusunnya pada geometri airfoil. Dapat dilihat bahwa profil FOS tiap variasi material hampir sama.

Pada geometri airfoil juga terdapat dua lembah yang menunjukkan nilai FOS mengalami nilai pengurangan yang signifikan. Lembah ini terjadi pada sudut azimuth 60° - 120° dan sudut 210° - 300° .

Material yang memiliki kekuatan struktur paling kuat pada geometri airfoil juga merupakan material SS400. Sedangkan material yang memiliki kekuatan struktur paling lemah adalah S235JR

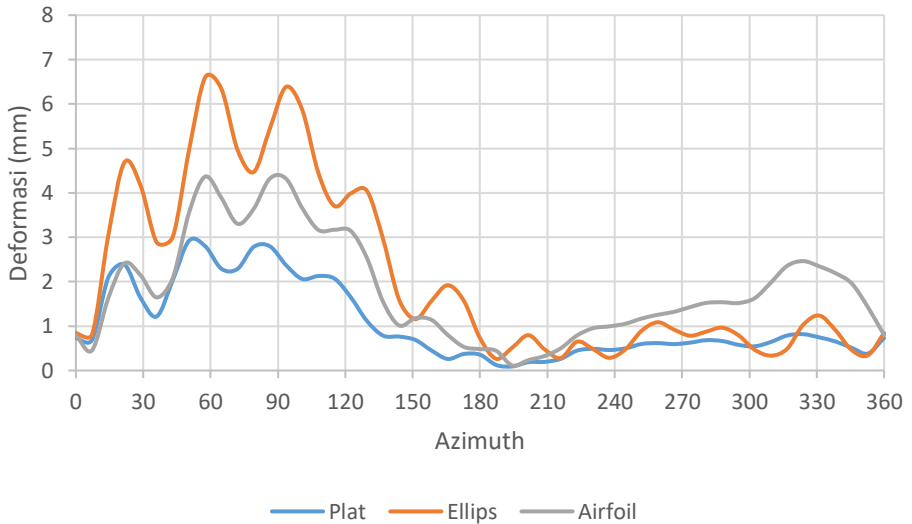
Dari pengambilan data FOS dapat disimpulkan bahwa material penyusun cukup berpengaruh terhadap kemungkinan gagal suatu struktur. Walaupun berdasarkan pada pengambilan data sebelumnya, deformasi dan *shear stress*, pengaruh variasi material ini dapat dikatakan cukup tidak signifikan (selisih nilai minimum dan maksimum deformasi kurang dari 1%, selisih nilai minimum dan maksimum *shear stress* sekitar 1%) sedangkan selisih nilai minimum dan maksimum FOS bisa mencapai hingga 41%.

Parameter yang membuat material penyusun menjadi berpengaruh adalah sifat mekanis dari material yang dipilih. Pada FOS nilai yang berpengaruh adalah *yield stress* dari material. Itulah yang menyebabkan material S235JR merupakan material penyusun yang paling lemah karena memiliki nilai *yield stress* 235MPa. Sedangkan material SS400 merupakan material penyusun terkuat karena memiliki nilai *yield stress* sebesar 400MPa.

4.8 Pengaruh Bentuk Geometri Terhadap Kekuatan Shaft

Perubahan geometri dari arm juga mempengaruhi *supporting structure* turbin yang lain yaitu shaft. Pada bagian ini akan dianalisa bagaimana kekuatan shaft akibat pengaruh perubahan geometri arm. Shaft pada turbin ini memiliki bentuk silindris dengan diameter 4 cm dan tinggi 110 cm. Bagian atas shaft dibuat *fixed support*.

4.8.1 Deformasi

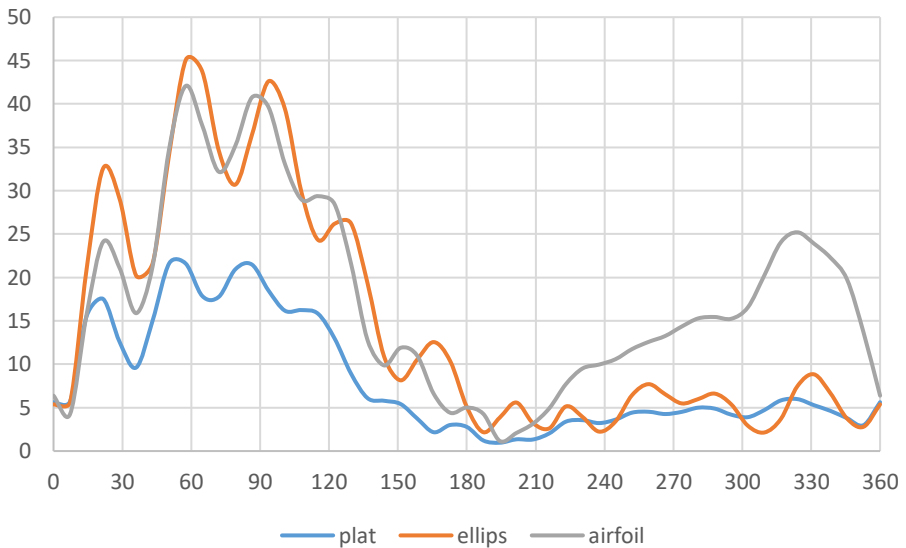


Gambar 4. 32 Deformasi shaft akibat perubahan geometri arm

Gambar 4.32 menunjukkan deformasi shaft yang terjadi akibat perubahan geometri arm. Deformasi terkecil terjadi ketika arm memiliki geometri plat. Nilai rata rata deformasi pada geometri plat adalah 1.07 mm. Sedangkan deformasi terbesar terjadi ketika digunakan geometri ellips. Nilai rata rata deformasi yang terjadi adalah 2.17 mm.

Deformasi yang terjadi akibat perubahan geometri besar tiap varian. Perbedaan nilai rata rata yang terjadi antara maksimum dan minimum terjadi sekitar 71%.

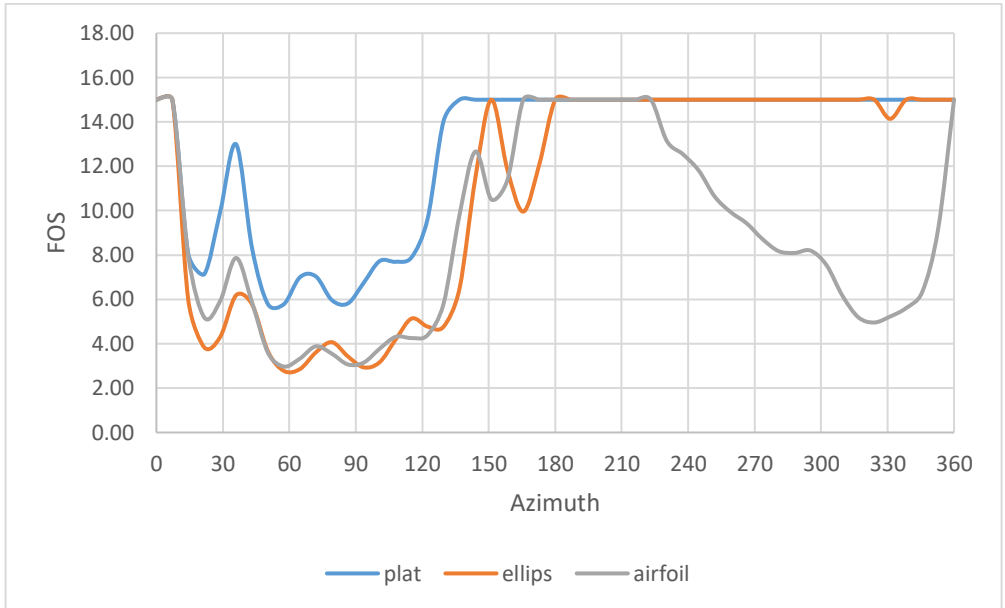
4.8.2 Shear Stress



Gambar 4. 33 Shear stress shaft akibat perubahan geometri arm

Berdasarkan hasil simulasi dapat dilihat bahwa shear stress yang terjadi pada shaft memiliki nilai terkecil pada geometri arm plat. Pada geometri ini memiliki nilai rata rata 8.15 MPa. Sedangkan nilai tertinggi dimiliki oleh bentuk geometri airfoil dengan nilai rata rata 17.60 MPa.

4.8.3 FOS



Gambar 4. 34 FOS pada shaft akibat perubahan geometri arm

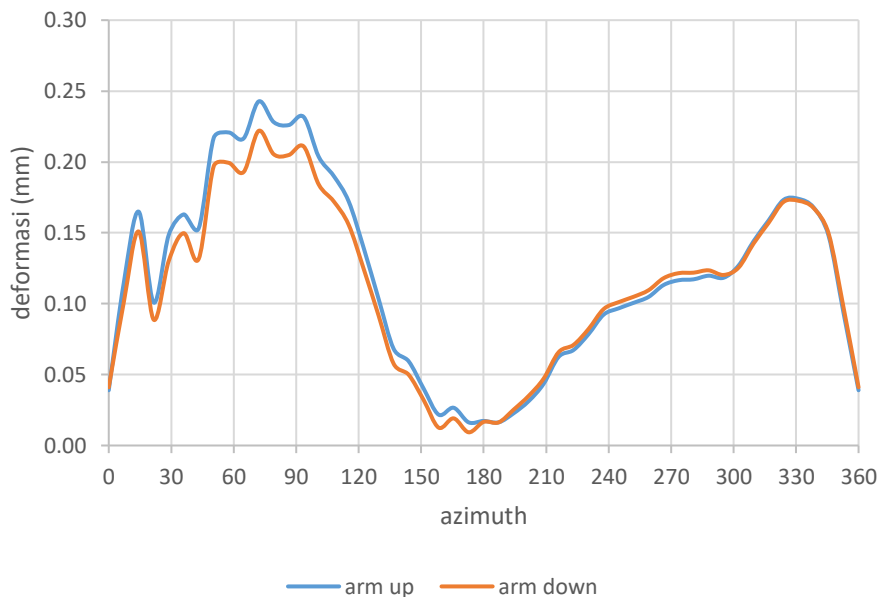
Berdasarkan hasil simulasi dapat dilihat bahwa nilai FOS terbesar dimiliki oleh bentuk plat. Hal ini sesuai dengan shear stress yang terjadi pada shaft.

Dari FOS dapat dilihat bahwa tiap varian memiliki nilai FOS yang lebih dari satu. Hal ini menunjukkan kegagalan pada shaft belum terjadi pada tiap varian.

4.9 Pengaruh 2 Fixed Support Terhadap Kekuatan Struktur

Pada bagian ini dilakukan variasi ketika 2 *fixed support* digunakan. *Fixed support* ini berada pada ujung ujung shaft. Hal ini akan merepresentasikan keadaan ketika turbin dipegang pada kedua ujungnya. Pada variasi kali ini bentuk geometri yang digunakan pada arm adalah geometri plat sedangkan untuk material penyusunnya adalah SS400

4.9.1 Deformasi

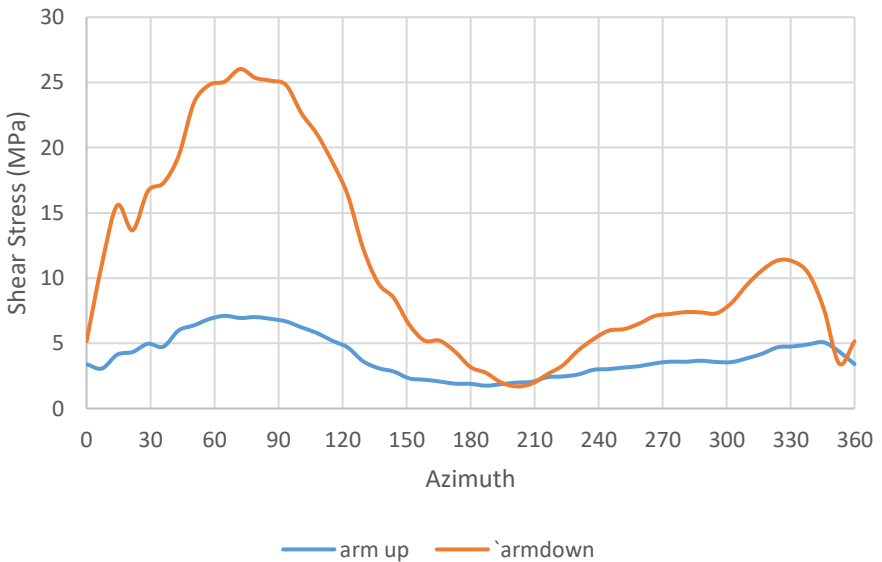


Gambar 4. 35 Deformasi yang terjadi ketika 2 fixed support digunakan

Deformasi yang terjadi ketika kedua ujung shaft dijadikan fixed support dipaparkan pada gambar 4.35. Deformasi yang terjadi pada arm menjadi lebih kecil bila dibandingkan pada kondisi yang memiliki satu fixed support.

Hal ini diakibatkan pada kondisi ini bagian bawah shaft dijadikan fixed support juga. Sehingga deformasi yang terjadi akan ditahan oleh kedua fixed support ini

4.9.2 Shear Stress

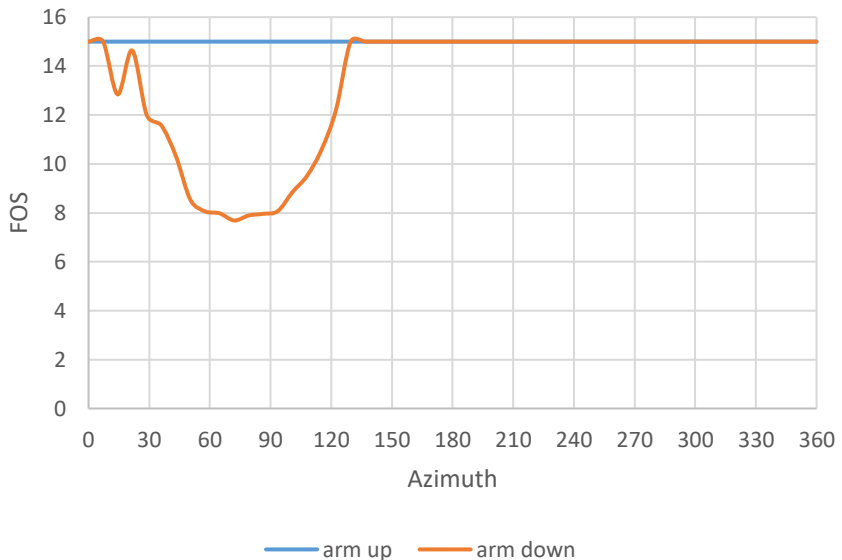


Gambar 4. 36 Shear stress yang terjadi ketika 2 fixed support digunakan

Gambar 4.36 dipaparkan shear stress pada arm atas dan bawah ketika shaft diberi 2 fixed support. Dapat dilihat bahwa terjadi pengurangan nilai shear stress yang cukup signifikan pada arm atas. Nilai rata rata shear stress arm atas pada kondisi ini yaitu 4 MPa. Sedangkan nilai rata rata shear stress arm bawah pada kondisi shaft dengan satu bagian fixed support yaitu 11.04 MPa.

Shear stress yang terjadi pada arm bawah memiliki nilai yang cukup tinggi jika dibandingkan dengan nilai arm atas. Hal ini diakibatkan pada bagian arm bawah terjadi deformasi yang cukup besar. Karena pada bagian bawah shaft diberi fixed support maka deformasi tersebut ditahan sehingga menghasilkan shear stress yang besar.

4.9.3 FOS



Gambar 4. 37 FOS yang terjadi ketika 2 fixed support digunakan

FOS dihitung pada kondisi ini berdasarkan shear stress yang terjadi. Ketika digunakan 2 fixed support nilai FOS pada arm atas menjadi bertambah. FOS pada arm atas memiliki nilai konstan. Sedangkan pada arm bawah FOS yang terjadi hampir sama pada kondisi ketika satu fixed support digunakan

Dari simulasi yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa dengan menambahkan fixed support membantu struktur untuk menahan deformasi dan shear stress yang terjadi. Perubahan ini cukup signifikan seperti yang dijelaskan pada gambar 4.36 shear stress yang terjadi pada arm atas berkurang sekitar 90%. Deformasi yang terjadi juga berkurang cukup signifikan.

4.10 Frekuensi Natural Dan Bentuk Moda

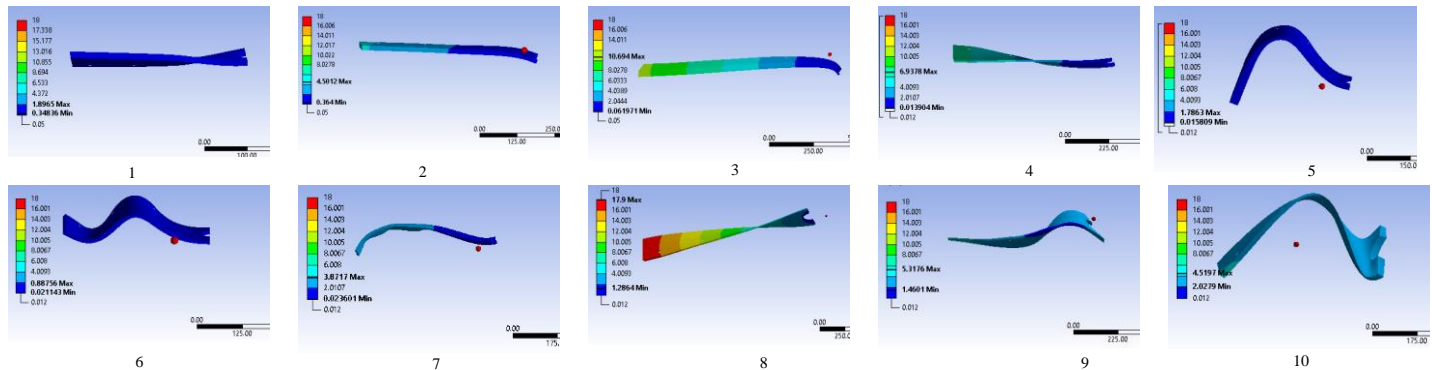
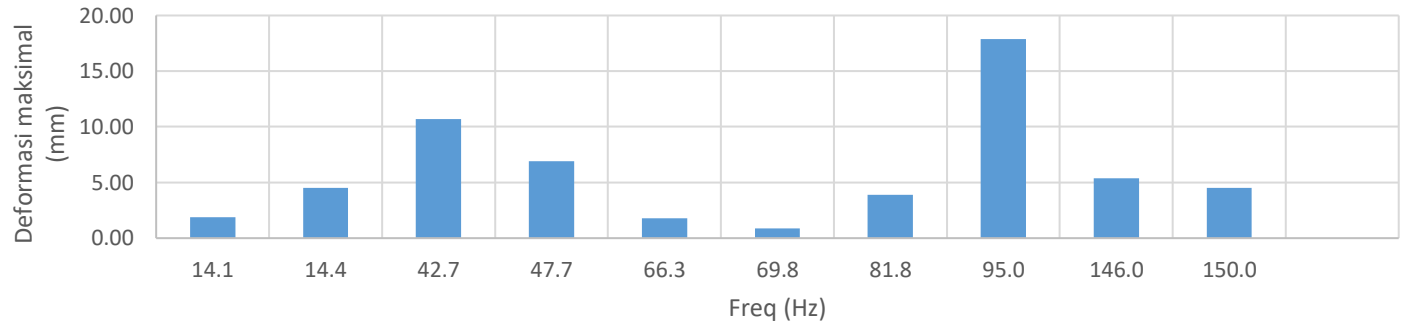
Pada bagian ini dilakukan analisa modal untuk melihat karakteristik ineren dari struktur. Hasil simulasi menunjukkan bahwa frekuensi natural dengan variasi material tidak terlalu

berbeda sehingga pada bagian selanjutnya ditampilkan frekuensi natural dan bentuk moda pada variasi material SS400.

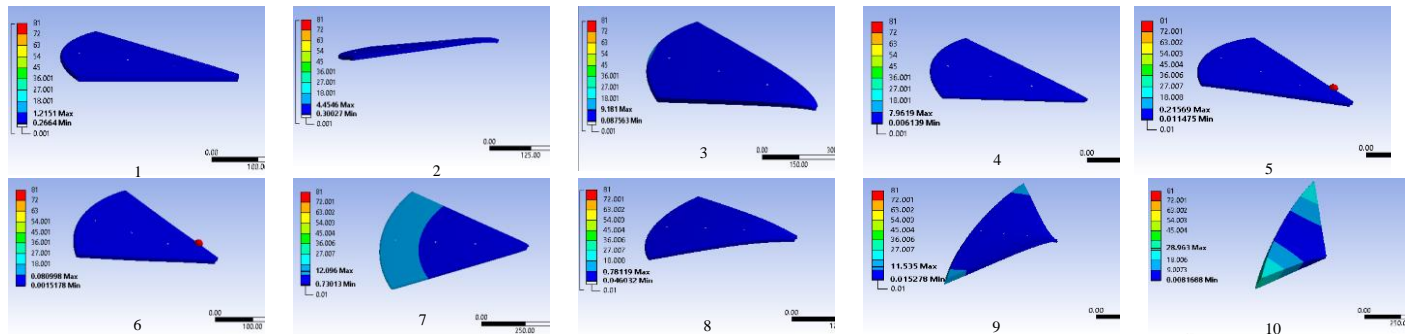
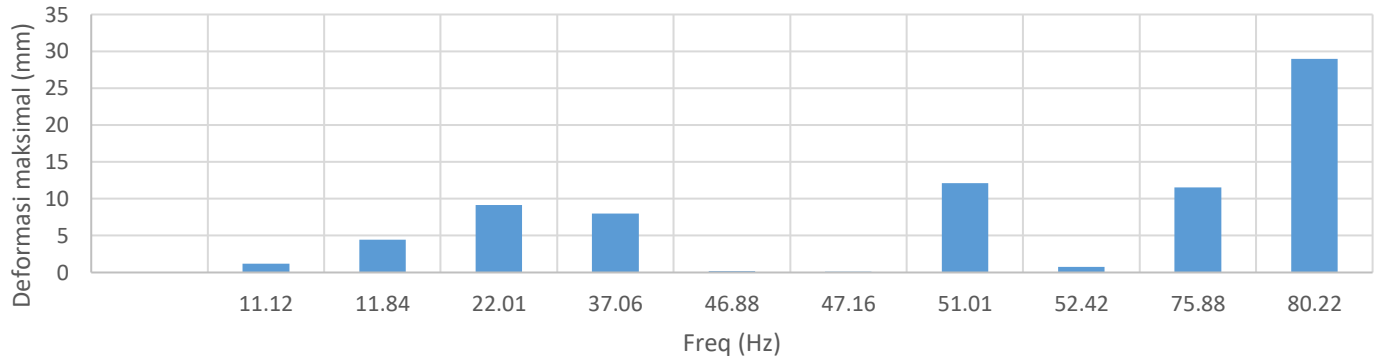
Analisa ini dilakukan dengan menghitung 10 frekuensi natural pertama yang terjadi pada struktur. Frekuensi natural dan bentuk moda dipaparkan pada gambar 4.35 sampai 4.37 untuk geometri plat, ellips dan airfoil.

Deformasi maksimal pada bentuk geometri plat terjadi pada frekuensi 95Hz. Pada frekuensi ini arm akan mengalami deformasi sebesar 17.9 mm. Bentuk deformasi yang terjadi yaitu bentuk moda ke 8. Sedangkan deformasi maksimal yang terjadi pada bentuk geometri ellips terjadi pada frekuensi 80.22 Hz. Pada frekuensi ini terjadi deformasi sebesar 28.96 mm. Lalu deformasi maksimal yang terjadi pada bentuk geometri airfoil terjadi pada frekuensi 84.73 Hz. Deformasi yang terjadi pada kondisi ini 15.86 mm.

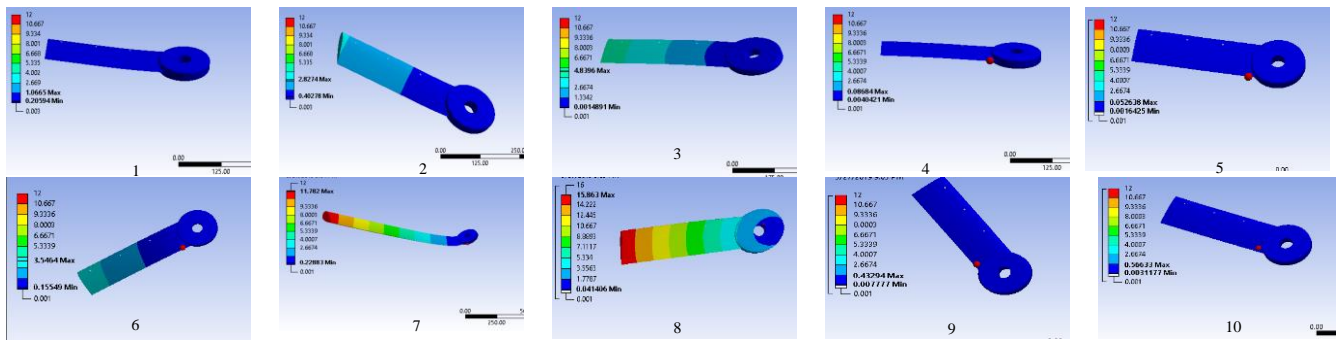
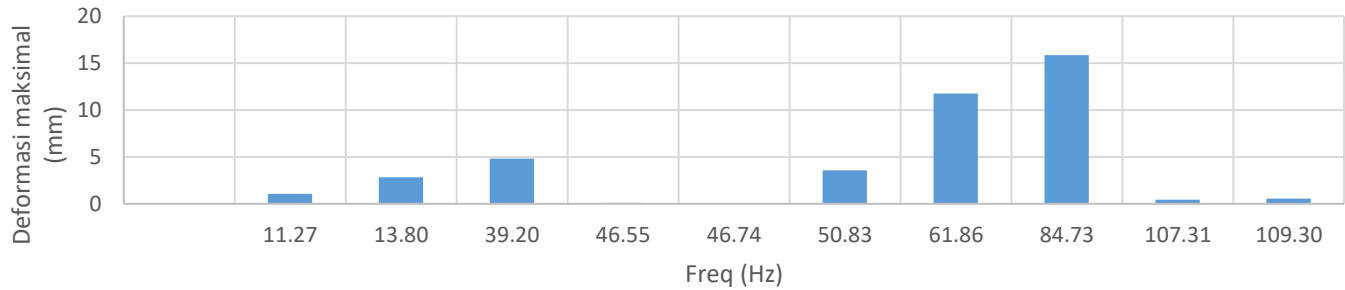
Dapat disimpulkan untuk menghindari kegagalan akibat terjadinya resonansi maka turbin harus ditempatkan jauh pada kondisi lingkungan yang memiliki vibrasi pada frekuensi 80-95 Hz. Jika turbin berada pada kondisi lingkungan yang bervibrasi pada frekuensi ini maka turbin, khususnya pada bagian arm, akan ikut beresonansi sehingga akan menghasilkan deformasi yang cukup besar dan bisa menyebabkan kegagalan struktur.



Gambar 4. 38 Grafik frekuensi natural dan bentuk moda struktur plat



Gambar 4. 39 Grafik frekuensi natural dan bentuk moda pada geometri ellipsis



Gambar 4.40 Grafik frekuensi natural dan bentuk moda pada geometri airfoil

4.11 Diskusi

Perubahan bentuk geometri mengakibatkan adanya perbedaan nilai rata-rata tekanan yang terjadi pada turbin. Perbedaan nilai tekanan ini mengakibatkan gaya dan torsi yang terjadi berbeda pula. Torsi dan gaya yang terjadi pada arm bernilai minus menandakan bahwa besaran-besaran tersebut melawan arah putar dari turbin. Besaran-besaran tersebut menjadi beban dinamik daripada turbin secara keseluruhan yang mengakibatkan efek-efek negatif seperti deformasi dan kegagalan pada struktur arm.

Nilai torsi dan gaya paling besar terjadi ketika turbin diposisi sudut azimuth sekitar 30° - 150° . Pada posisi tersebut arm berada paling dekat dengan inlet aliran. Dari analisa data didapatkan bahwa perubahan geometri dapat mengurangi beban dinamik yang dialami arm.

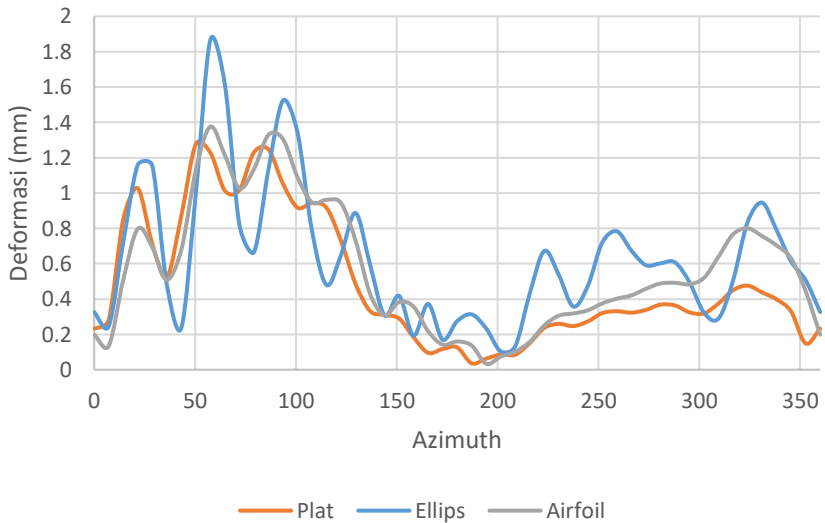
Berdasarkan hasil simulasi, beban dinamik paling kecil terdapat pada bentuk geometri airfoil. Hal ini karena bentuk airfoil didesain secara khusus untuk memiliki sifat hidrodinamis yang baik. Sedangkan beban dinamik paling tinggi terjadi pada bentuk geometri plat. Perubahan beban dinamik akibat perbedaan geometri bisa mencapai nilai hingga 80%.

Beban dinamik ini mengakibatkan deformasi dan tegangan geser pada arm. Deformasi dan tegangan geser ini bisa menyebabkan kegagalan pada struktur. Kegagalan pada struktur dapat dinyatakan dengan nilai FOS (*Factor of Safety*). Jika nilai FOS kurang dari satu dapat dinilai bahwa struktur telah mengalami kegagalan.

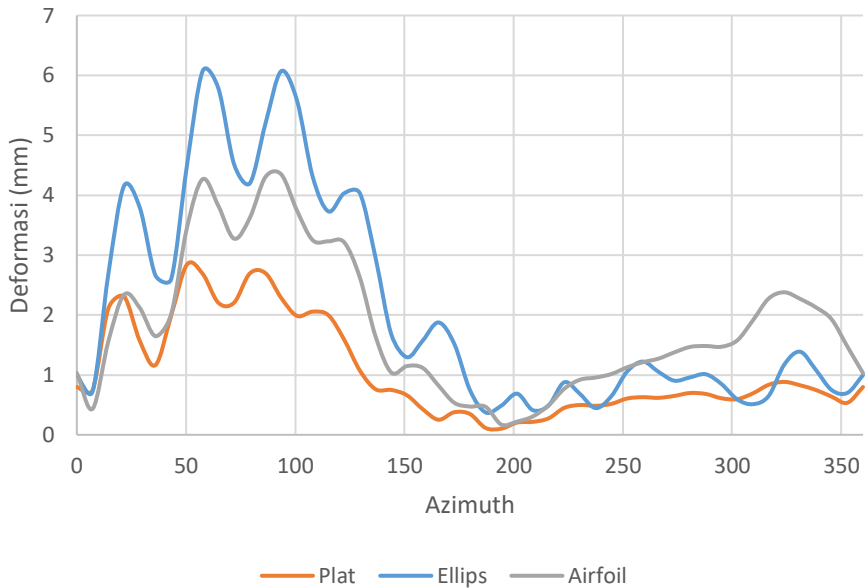
Berdasarkan hasil simulasi, pengaruh material terhadap deformasi memiliki selisih kurang dari 1% sedangkan untuk *shear stress* memiliki selisih sekitar 1%. Sehingga dari dua variabel ini tidak dapat ditentukan material yang mana yang paling baik. Namun dari nilai FOS dapat ditentukan bahwa material terbaik adalah SS400.

Selanjutnya dibandingkan pengaruh perubahan deformasi terhadap perubahan geometri dengan menggunakan material SS400. Dari gambar 4.41 dapat dilihat bahwa deformasi arm atas terkecil terjadi pada bentuk geometri plat dengan nilai deformasi

rata rata 0.49 mm. Sedangkan deformasi arm atas terbesar terjadi pada bentuk geometri ellips dengan nilai rata rata 0.63 mm. Hal yang sama juga terjadi pada arm bawah. Deformasi terkecil terjadi pada bentuk geometri arm plat dengan nilai 1.07 mm dan deformasi terbesar terjadi pada bentuk geometri arm ellips dengan nilai 2.10 mm. Hal ini dapat disimpulkan geometri plat dapat lebih menahan deformasi akibat beban dinamik

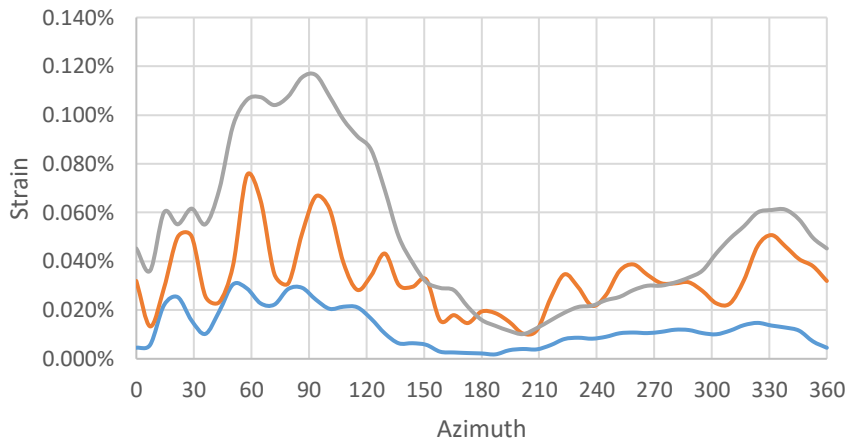


Gambar 4. 41 Pengaruh bentuk geometri terhadap deformasi pada arm atas



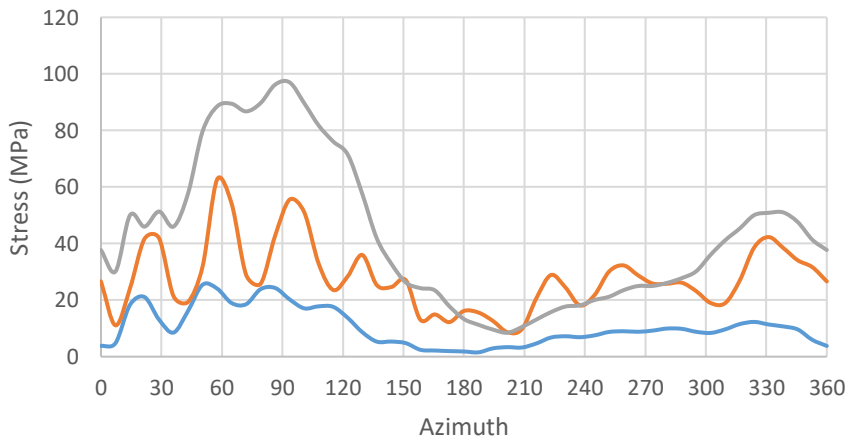
Gambar 4.42 Pengaruh bentuk geometri terhadap deformasi pada arm bawah

Hal yang dapat di garis bawahi dari fenomena ini adalah bahwa deformasi akibat perubahan geometri yang terjadi tidak terlalu signifikan dibanding dengan perubahan beban dinamik yang terjadi. Perbedaan nilai maksimum dan minimum beban dinamik mencapai 80% sedangkan perbedaan nilai maksimum dan minimum deformasi pada arm atas mencapai 38% dan pada arm bawah 4%.



— plat — ellips — airfoil

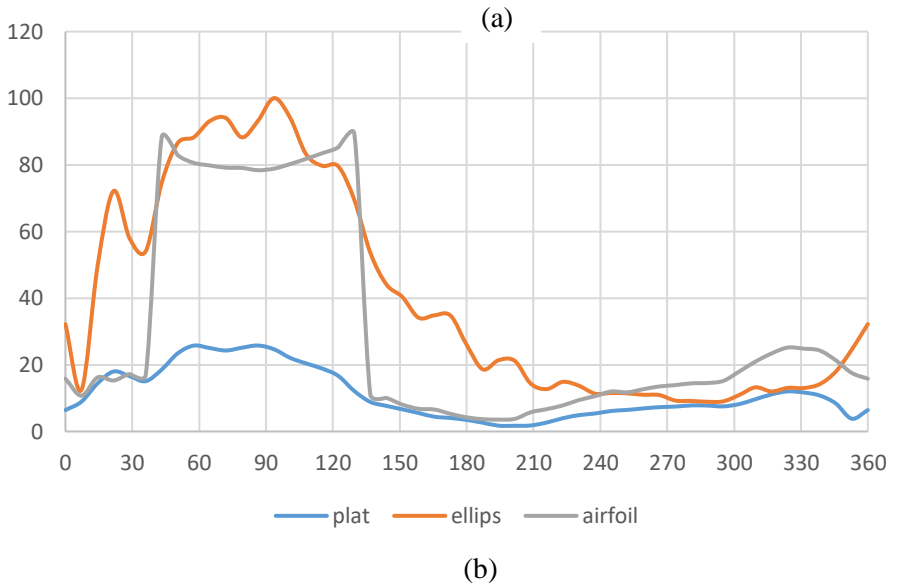
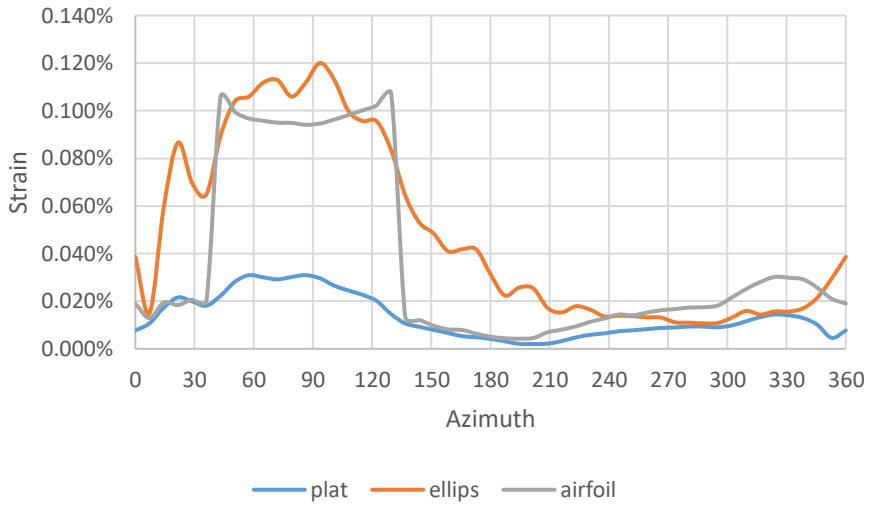
(a)



— plat — ellips — airfoil

(b)

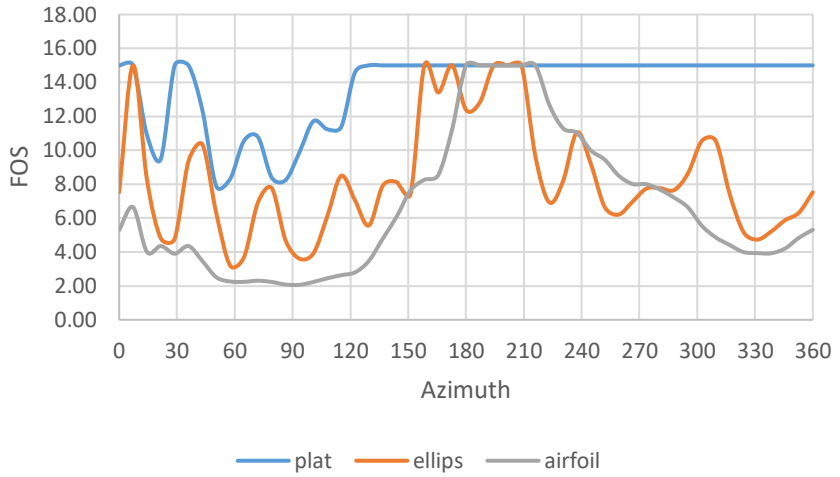
Gambar 4. 43 Beban dinamik pada arm atas (a) *Strain* vs azimuth
(b) *Shear Stress* vs azimuth



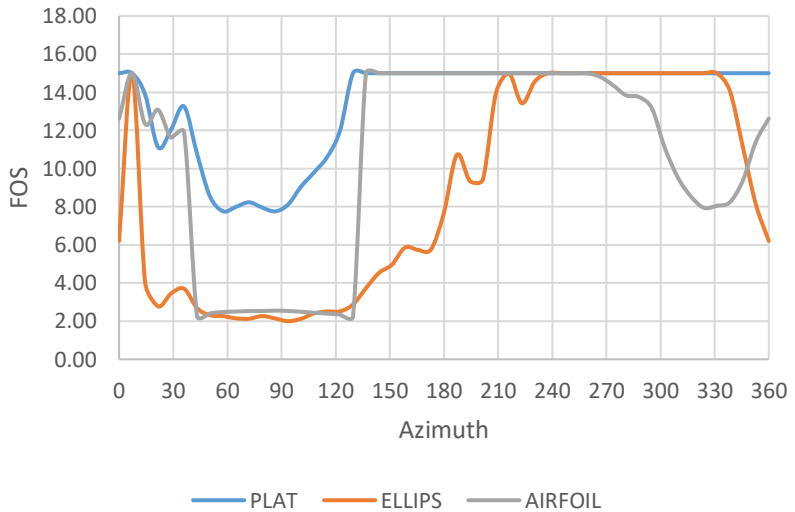
Gambar 4. 44 Beban dinamik pada arm bawah (a) *Strain* vs azimuth (b) *Shear Stress* vs azimuth

Gambar 4.43 dan 4.44 menunjukkan hubungan antara *strain* dan *shear stress* terhadap perubahan geometri arm atas dan bawah masing masing. Pada *strain* terlihat bahwa *strain* maksimum mencapai nilai 0.11% pada geometri airfoil. Nilai ini sangat kecil sehingga *strain* bukan menjadi variabel yang perlu diperhatikan untuk melihat kekuatan struktur.

Hal berbeda terjadi pada variabel *shear stress*. Nilai rata rata *shear stress* mencapai 43.27 MPa pada geometri airfoil di arm atas. Sedangkan nilai terkecil rata rata *shear stress* yaitu 10.42 MPa pada geometri plat di arm atas. Bahkan pada sudut azimuth 90° *shear stress* pada arm airfoil bisa mencapai nilai sekitar 96 MPa. Nilai tersebut sangat tinggi bila dibandingkan dengan variabel bentuk geometri lain. Perbedaan nilai tersebut terhadap *shear stress* pada sudut azimuth yang sama mencapai 83%. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan geometri mengakibatkan perubahan *shear stress* yang cukup signifikan sesuai dengan yang telah dijelaskan pada bab 2. *Shear stress* dipengaruhi luas alas yang dialami beban. Pada geometri airfoil ketika berada pada azimuth 90° luas area yang kontak secara langsung dengan aliran air kecil sehingga *shear stress* yang terjadi pada bagian tersebut besar. Berbeda pada geometri plat yang memiliki bentuk simetris tiap sisinya, sehingga pada tiap azimuth memiliki luas area yang cukup besar, sehingga beban akan terdistribusi secara merata.



Gambar 4. 45 FOS pada arm atas



Gambar 4. 46 FOS pada arm bawah

Shear stress maksimal yang terjadi tidak melebihi nilai *Ultimate Tensile Strength* (UTS) dari material. UTS adalah kapasitas dari material untuk menerima beban. Nilai UTS untuk material pada penelitian ini memiliki rentang $2 \times 10^8 - 6 \times 10^8$ Pa. Sehingga struktur masih bersifat benda elastis dan tidak terjadi patah. Namun, kegagalan struktur masih dapat terjadi yang bersifat deformasi plastis yaitu deformasi yang terjadi secara permanen.

Peningkatan *shear stress* yang besar ini akan secara langsung memberikan efek pada kekuatan struktur. Kekuatan struktur dapat diekspresikan dengan variabel FOS. FOS merupakan rasio antara nilai *stress* maksimal sebelum objek menjadi plastis dengan *stress* yang bekerja pada struktur. Semakin kecil nilai FOS suatu benda maka semakin besar kemungkinan struktur mengalami kegagalan.

Nilai FOS rata – rata terkecil pada arm atas terjadi pada geometri airfoil dengan nilai 6.65. Sedangkan nilai FOS rata rata terbesar pada arm atas terjadi pada geometri plat dengan nilai 13.73. Hal yang sama juga terjadi pada arm bawah. FOS rata – rata terkecil terjadi pada geometri ellips dengan nilai 8.62 dan FOS rata – rata terbesar terjadi pada geometri plat dengan nilai 13.40

Hal ini menunjukkan bahwa geometri plat memiliki kemungkinan untuk gagal yang paling kecil. Sehingga dapat disimpulkan bahwa geometri plat memiliki bentuk struktur yang paling kuat.

Kekuatan struktur akan bertambah ketika turbin menggunakan 2 fixed support. Hal ini diakibatkan penambahan fixed support akan membantu menahan deformasi dan shear stress yang terjadi. Hal ini menyebabkan penambahan nilai FOS sehingga struktur tidak mengalami kegagalan. Pengurangan nilai shear stress yang terjadi pada struktur mencapai 90%.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan simulasi dan analisis yang telah dilakukan, maka kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Perubahan bentuk geometri berpengaruh pada gaya dan torsi yang dialami. Beban dinamik menyebabkan deformasi terjadi pada arm. Semakin besar beban dinamik yang dialami maka semakin besar deformasi yang terjadi pada turbin. Deformasi terbesar terjadi pada bentuk geometri plat dengan nilai rata – rata 0.65mm. Sedangkan deformasi terkecil terjadi pada geometri airfoil dengan nilai rata – rata 0.40mm. Hal ini sesuai dengan beban dinamik yang terjadi pada masing masing bentuk geometri
- b. Deformasi yang terjadi akibat beban dinamik memiliki perbedaan sekitar 38% pada arm atas dan 4% pada arm bawah. FOS menunjukkan kecenderungan struktur mengalami kegagalan. Nilai FOS terkecil dimiliki geometri airfoil dengan nilai rata rata 5.10. Hal ini sesuai dengan nilai *shear stress* yang terjadi pada tiap geometri. Sehingga berdasarkan nilai FOS didapatkan bentuk geometri yang paling baik adalah bentuk plat. Berdasarkan hasil simulasi deformasi dan shear stress pengaruh material hanya bernilai 1% saja. Sedangkan untuk kekuatan struktur, material yang memiliki *yield stress* terbesar akan memiliki struktur yang lebih kuat. Perbedaan yang terjadi mencapai 41%, berdasarkan FOS dapat disimpulkan material yang paling baik digunakan adalah material SS400 dengan bentuk plat.

5.2 Saran

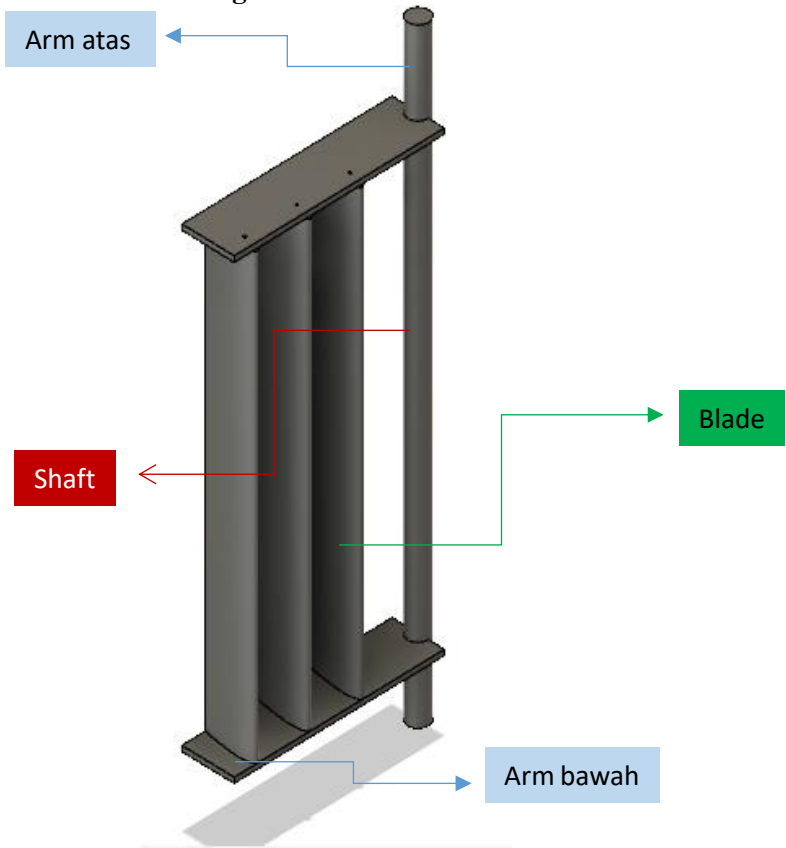
Berikut ini adalah saran penulis untuk keberlanjutan penelitian yang dilakukan:

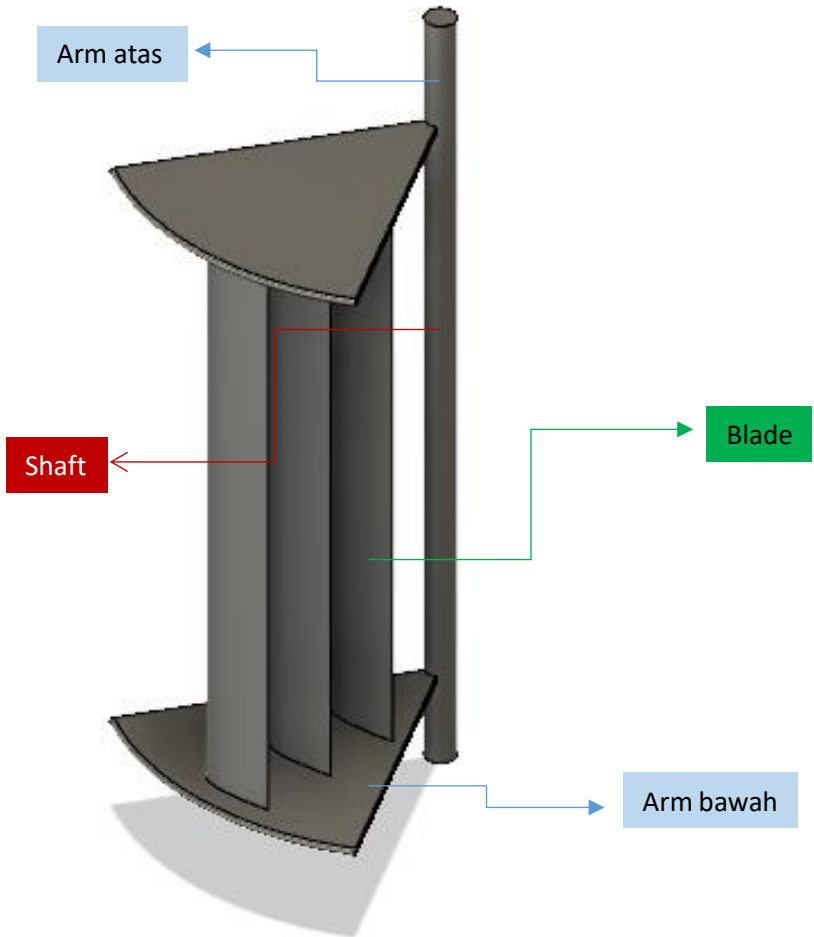
- a. Perlu dilakukan studi FSI pada variasi kecepatan aliran yang dapat merepresentasikan kondisi – kondisi ekstrim yang mungkin dapat terjadi
- b. Perlu dilakukan analisa performansi turbin ketika dilakukan variasi perubahan geometri arm untuk melihat efek perubahan geometri arm terhadap performansi turbin

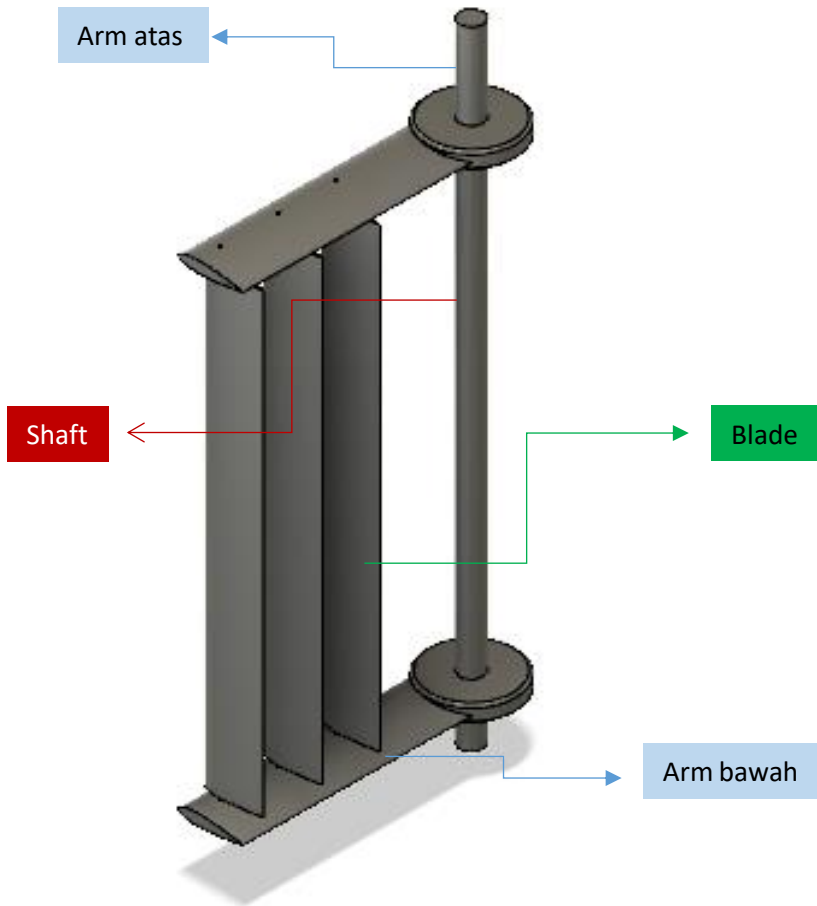
Daftar Pustaka

- Arnold, M. M. (2017). Simulation and Evaluation of the Hydroelastic Response of a Tidal Current Turbine. *Thesis of Institute of Aircraft Design University of Stuttgart*.
- Asghar, U. (2017). Modelling and Simulation of Flow Induced Vibrations in Vertical Axis Wind Turbine. *IEEE*.
- Canda, G. (2016). Potential Impacts of Hydrokinetic and Wave Energy Conversion Technologies on Aquatic Environments. *University of Toronto*.
- Guney, M. (2010). Hydrokinetic energy systems: a technology status review . *Renewable Sustainable Energy*.
- Hantoro, R. (2018). Novel Design of a Vertical Axis Hydrokinetic Turbine - Straight Blade Cascaded (VAHT-SBC): Experimental and Numerical Simulation. *J. Eng. Technol. Sci*.
- Hwang. (2009). Optimization of Cycloidal Water Turbine and the Performance Improvement by Individual Blade Control. *Applied Energy*.
- Igwemezie, V. (2018). Materials Selection of XL Wind Turbine. *Elsevier Marine Structures*.
- Johnson, J. B. (2010). River, Tidal, and Ocean Current Hydrokinetic Energy Technologies: Status and Future Opportunities in Alaska. *Alaska Center for Energy and Power*.
- Khan. (2009). Hydrokinetic Energy Conversion System and Assesment of Horizontal and Vertical Axis Turbine for River and Tidal Application : A Technology Status Review. *Applied Energy*.
- Koko, S. P. (2015). Micro-hydrokinetic river system modelling and analysis as compared to wind system for remote rural electrification . *Electric Power Systems Research*.
- Lee, K. (2017). Fluid-structure interaction analysis of NREL phase VI wind turbine: Aerodynamic force evaluation and structural analysis using FSI. *Elsevier*.
- Maki KJ, L. D. (2011). Hydroelastic impact of a wedge shaped body . *Ocean Engineering*.

- Manggala, S. W. (2016). *Rancang Bangun Turbin Arus Laut Sumbu Vertikal Straight Blade Cascade Untuk Mengetahui Pengaruh Variasi Jumlah Balde Terhadap Efisiensi Turbin*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Raja, R. S. (2012). *Coupled Fluid Structure Analysis on a Cylinder Exposed to Ocean Wave Loading*. Goteberg, Sweden: Chalmers.
- Rammohan. (2012). Coupled fluid structure interaction analysis on a cylinder exposed to ocean wave loading. *Master Thesis in Solid and Fluid Mechanics*.
- Roylance, D. (2008). *Mechanical Properties of Material*.
- Salman. (2014). Heat transfer enhancement of laminar nanofluids flow in a circular tube fitted with parabolic-cut twisted tape inserts. *Science World*.
- Septyaningrum, E. (2015). *Analisis profil wake dibelakang turbin arus laut tipe V-Blade Darries berbasis computational fluid dynamics*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sparta. (2014, May 1). *Ductile Brittle Transition Temperature - Sparta Engineering*. Retrieved from spartaengineering: <http://www.spartaengineering.com/glossary/ductile-brittle-transition-temperature/>
- UCAR. (2011). *The Greenhouse Effect*. Retrieved from UNIVERSITY CORPORATION FOR ATMOSPHERIC RESEARCH: <https://scied.ucar.edu/longcontent/greenhouse-effect>
- Ye Li, S. M. (2010). Three dimensional effects and arm effects on modelling a vertical axis tidal current turbine. *Elsevier*.
- Yuningsih, L. S. (2011). *Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Kelautan*. Retrieved from ESDM: www.mgi.esdm.go.id
- Zienkiewickz. (2010). Fluid structure dynamic interaction and wave forces. An introduction to numerical treatment . *International Journal Mathematical Engineering*.

LAMPIRAN**1. Variasi bentuk geometri**





2. Sifat mekanik material














Material S355

| Properties of Outline Row 5: S355 | | | | | |
|-----------------------------------|---------------------------|------------|--------------------|---|---|
| | A | B | C | D | E |
| 1 | Property | Value | Unit | | |
| 2 | Material Field Variables | Table | | | |
| 3 | Density | 7850 | kg m ⁻³ | | |
| 4 | Isotropic Elasticity | | | | |
| 5 | Derive from | Young'... | | | |
| 6 | Young's Modulus | 2.1E+11 | Pa | | |
| 7 | Poisson's Ratio | 0.27 | | | |
| 8 | Bulk Modulus | 1.5217E+11 | Pa | | |
| 9 | Shear Modulus | 8.2677E+10 | Pa | | |
| 10 | Tensile Yield Strength | 3.55E+08 | Pa | | |
| 11 | Tensile Ultimate Strength | 6.8E+08 | Pa | | |














Material SS35JR

| Properties of Outline Row 6: S355JR | | | | | |
|-------------------------------------|---------------------------|------------|--------------------|---|---|
| | A | B | C | D | E |
| 1 | Property | Value | Unit | | |
| 2 | Material Field Variables | Table | | | |
| 3 | Density | 7800 | kg m ⁻³ | | |
| 4 | Isotropic Elasticity | | | | |
| 5 | Derive from | Young'... | | | |
| 6 | Young's Modulus | 2.1E+11 | Pa | | |
| 7 | Poisson's Ratio | 0.3 | | | |
| 8 | Bulk Modulus | 1.75E+11 | Pa | | |
| 9 | Shear Modulus | 8.0769E+10 | Pa | | |
| 10 | Tensile Yield Strength | 3.55E+08 | Pa | | |
| 11 | Tensile Ultimate Strength | 6.3E+08 | Pa | | |

Material S235JR

| Properties of Outline Row 4: S235JR | | | | |
|-------------------------------------|---|---|--|---|
| | A | B | C | D E |
| 1 | Property | Value | Unit |   |
| 2 |  Material Field Variables |  Table | | |
| 3 |  Density | 7850 | kg m ⁻³  | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> |
| 4 |  Isotropic Elasticity | | | <input type="checkbox"/> |
| 5 | Derive from | Young'...  | | |
| 6 | Young's Modulus | 2.1E+11 | Pa  | <input type="checkbox"/> |
| 7 | Poisson's Ratio | 0.3 | | <input type="checkbox"/> |
| 8 | Bulk Modulus | 1.75E+11 | Pa | <input type="checkbox"/> |
| 9 | Shear Modulus | 8.0769E+10 | Pa | <input type="checkbox"/> |
| 10 |  Tensile Yield Strength | 2.35E+08 | Pa  | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> |
| 11 |  Tensile Ultimate Strength | 5.1E+08 | Pa  | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> |

Material SS400

| Properties of Outline Row 7: SS400 | | | | |
|------------------------------------|---|---|--|---|
| | A | B | C | D E |
| 1 | Property | Value | Unit |   |
| 2 |  Material Field Variables |  Table | | |
| 3 |  Density | 7860 | kg m ⁻³  | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> |
| 4 |  Isotropic Elasticity | | | <input type="checkbox"/> |
| 5 | Derive from | Young'...  | | |
| 6 | Young's Modulus | 2.1E+11 | Pa  | <input type="checkbox"/> |
| 7 | Poisson's Ratio | 0.26 | | <input type="checkbox"/> |
| 8 | Bulk Modulus | 1.4583E+11 | Pa | <input type="checkbox"/> |
| 9 | Shear Modulus | 8.3333E+10 | Pa | <input type="checkbox"/> |
| 10 |  Tensile Yield Strength | 4E+08 | Pa  | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> |
| 11 |  Tensile Ultimate Strength | 2.05E+08 | Pa  | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> |

3. Deformasi Geometri Plat

| WAKTU | SUDUT | S355 | | | | | |
|--------------|--------------|--------------|------------|--------------|------------|------------|------------|
| | | ARM UP | ARM DOWN | SHAFT | BLADE D | BLADE T | BLADE L |
| 1E-07 | 3.64E-05 | 0.00018 3 | 0.00020225 | 0.00021 6 | 0.00016451 | 0.00016551 | 0.00017938 |
| 0.01977 9 | 7.19992 7 | 0.30306 | 0.66807 | 0.6722 | 0.59011 | 0.61916 | 0.69433 |
| 0.03955 8 | 14.3998 5 | 0.98202 | 2.1301 | 2.2015 | 1.8986 | 1.9668 | 2.083 |
| 0.05933 7 | 21.5997 8 | 1.3105 | 2.858 | 2.97 | 2.5483 | 2.6284 | 2.7691 |
| 0.07911 7 | 28.8000 7 | 1.0684 | 2.3482 | 2.4326 | 2.0889 | 2.1558 | 2.2719 |
| 0.09889 6 | 36 | 0.8289 | 1.7865 | 1.8574 | 1.5931 | 1.6423 | 1.746 |
| 0.11868 | 43.2017 5 | 1.2383 | 2.6662 | 2.7569 | 2.3667 | 2.4482 | 2.5958 |
| 0.13845 | 50.3984 | 1.8826 | 4.0281 | 4.155 | 3.5646 | 3.6833 | 3.9017 |
| 0.15823 | 57.5986 9 | 2.023 | 4.3296 | 4.4732 | 3.8334 | 3.9538 | 4.1828 |

| | | | | | | | |
|---------|--------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.17801 | 64.7989 8 | 1.7725 | 3.7732 | 3.8754 | 3.3292 | 3.4345 | 3.6419 |
| 0.19779 | 71.9992 7 | 1.7308 | 3.7049 | 3.7514 | 3.245 | 3.3587 | 3.5784 |
| 0.21757 | 79.1995 6 | 2.0002 | 4.3053 | 4.3546 | 3.77 | 3.9063 | 4.1591 |
| 0.23735 | 86.3998 5 | 2.1171 | 4.5247 | 4.6043 | 3.9734 | 4.1113 | 4.3678 |
| 0.25713 | 93.6001 5 | 1.8976 | 4.0416 | 4.1057 | 3.5449 | 3.6666 | 3.8952 |
| 0.27691 | 100.800 4 | 1.6696 | 3.5917 | 3.5994 | 3.1285 | 3.2457 | 3.4599 |
| 0.29669 | 108.000 7 | 1.6536 | 3.6236 | 3.6029 | 3.146 | 3.2722 | 3.4954 |
| 0.31647 | 115.201 | 1.6424 | 3.5867 | 3.5809 | 3.1208 | 3.2435 | 3.4587 |
| 0.33625 | 122.401 3 | 1.4084 | 3.0456 | 3.0494 | 2.6528 | 2.7537 | 2.9324 |
| 0.35603 | 129.601 6 | 1.0044 | 2.186 | 2.1763 | 1.899 | 1.9734 | 2.1041 |
| 0.3758 | 136.798 3 | 0.68728 | 1.54 | 1.5047 | 1.3263 | 1.384 | 1.4823 |

| | | | | | | | |
|---------|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0.39558 | 143.998 5 | 0.62553 | 1.3838 | 1.3634 | 1.1965 | 1.2458 | 1.3328 |
| 0.41536 | 151.198 8 | 0.62338 | 1.3429 | 1.3634 | 1.1793 | 1.2199 | 1.2952 |
| 0.43514 | 158.399 1 | 0.44858 | 0.96023 | 0.98173 | 0.84638 | 0.87305 | 0.92645 |
| 0.45492 | 165.599 4 | 0.26122 | 0.56216 | 0.56168 | 0.48995 | 0.50648 | 0.56778 |
| 0.4747 | 172.799 7 | 0.26483 | 0.58311 | 0.58914 | 0.51197 | 0.52918 | 0.57463 |
| 0.49448 | 180 180 | 0.2894 | 0.63183 | 0.65384 | 0.56016 | 0.57824 | 0.6129 |
| 0.51426 | 187.200 3 | 0.14588 | 0.3264 | 0.33653 | 0.28766 | 0.29762 | 0.33195 |
| 0.53404 | 194.400 6 | 0.06372 | 0.15725 | 0.1343 | 0.12607 | 0.13895 | 0.15132 |
| 0.55382 | 201.600 9 | 0.1087 | 0.20697 | 0.20358 | 0.17592 | 0.18657 | 0.19995 |
| 0.57359 | 208.797 5 | 0.12376 | 0.21846 | 0.21695 | 0.1859 | 0.19632 | 0.2123 |
| 0.59337 | 215.997 8 | 0.27301 | 0.52001 | 0.52302 | 0.44846 | 0.46881 | 0.50227 |

| | | | | | | | |
|---------|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0.61315 | 223.198 1 | 0.45448 | 0.9046 | 0.92121 | 0.7887 | 0.82072 | 0.87336 |
| 0.63293 | 230.398 4 | 0.51378 | 1.0143 | 1.03 | 0.88167 | 0.91809 | 0.97903 |
| 0.65271 | 237.598 7 | 0.50689 | 0.99145 | 1.0014 | 0.85764 | 0.8956 | 0.95798 |
| 0.67249 | 244.799 | 0.57906 | 1.1389 | 1.1502 | 0.98464 | 1.0279 | 1.0988 |
| 0.69227 | 251.999 3 | 0.68292 | 1.3557 | 1.3752 | 1.1764 | 1.2252 | 1.3062 |
| 0.71205 | 259.199 6 | 0.69995 | 1.3895 | 1.409 | 1.2053 | 1.2555 | 1.3385 |
| 0.73183 | 266.399 9 | 0.69523 | 1.3703 | 1.3858 | 1.1861 | 1.2371 | 1.321 |
| 0.75161 | 273.600 1 | 0.7603 | 1.5108 | 1.5319 | 1.3114 | 1.3668 | 1.4572 |
| 0.77139 | 280.800 4 | 0.84489 | 1.6854 | 1.7122 | 1.4654 | 1.5253 | 1.624 |
| 0.79117 | 288.000 7 | 0.8478 | 1.6786 | 1.702 | 1.4578 | 1.5173 | 1.6165 |
| 0.81095 | 295.201 | 0.79449 | 1.5518 | 1.5669 | 1.3434 | 1.3993 | 1.4941 |

| | | | | | | | |
|---------|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0.83072 | 302.397 7 | 0.84852 | 1.6267 | 1.6321 | 1.4002 | 1.46 | 1.5646 |
| 0.8505 | 309.598 | 1.0493 | 2.0236 | 2.0328 | 1.7424 | 1.8156 | 1.9442 |
| 0.87028 | 316.798 3 | 1.2419 | 2.4138 | 2.4301 | 2.0814 | 2.1679 | 2.3186 |
| 0.89006 | 323.998 5 | 1.292 | 2.4776 | 2.4843 | 2.1289 | 2.2204 | 2.3797 |
| 0.90984 | 331.198 8 | 1.2183 | 2.3178 | 2.3182 | 1.9874 | 2.0743 | 2.2262 |
| 0.92962 | 338.399 1 | 1.1548 | 2.1762 | 2.1703 | 1.8627 | 1.946 | 2.0911 |
| 0.9494 | 345.599 4 | 1.0373 | 1.9277 | 1.9085 | 1.6408 | 1.7187 | 1.8507 |
| 0.96918 | 352.799 7 | 0.69293 | 1.2526 | 1.2085 | 1.0502 | 1.1085 | 1.2002 |
| 0.98896 | 360 | 0.18435 | 0.51821 | 0.40729 | 0.39883 | 0.44372 | 0.49097 |

| WAKTU | SUDUT | S355JR | | | | | |
|-------|----------|----------|------------|----------|------------|------------|------------|
| | | ARM UP | ARM DOWN | SHAFT | BLADE D | BLADE T | BLADE L |
| 1E-07 | 3.64E-05 | 0.000179 | 0.00020208 | 0.000216 | 0.00016393 | 0.00016386 | 0.00017553 |

| | | | | | | | |
|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0.019779 | 7.199927 | 0.30324 | 0.66868 | 0.67274 | 0.59062 | 0.61972 | 0.69468 |
| 0.039558 | 14.39985 | 0.98177 | 2.1302 | 2.2014 | 1.8987 | 1.9668 | 2.0831 |
| 0.059337 | 21.59978 | 1.3087 | 2.8549 | 2.9665 | 2.5454 | 2.6254 | 2.7659 |
| 0.079117 | 28.80007 | 1.0661 | 2.344 | 2.4282 | 2.0853 | 2.1521 | 2.2679 |
| 0.098896 | 36 | 0.82854 | 1.7859 | 1.8568 | 1.5926 | 1.6418 | 1.7453 |
| 0.11868 | 43.20175 | 1.2393 | 2.669 | 2.7597 | 2.3693 | 2.4509 | 2.5986 |
| 0.13845 | 50.3984 | 1.8814 | 4.0265 | 4.1533 | 3.5634 | 3.682 | 3.9002 |
| 0.15823 | 57.59869 | 2.0188 | 4.3216 | 4.4649 | 3.8266 | 3.9467 | 4.1753 |
| 0.17801 | 64.79898 | 1.7694 | 3.7676 | 3.8693 | 3.3243 | 3.4293 | 3.6364 |
| 0.19779 | 71.99927 | 1.7312 | 3.7068 | 3.7531 | 3.2468 | 3.3606 | 3.5804 |
| 0.21757 | 79.19956 | 2.0007 | 4.3076 | 4.3567 | 3.7721 | 3.9085 | 4.1614 |
| 0.23735 | 86.39985 | 2.1141 | 4.5197 | 4.5987 | 3.969 | 4.1067 | 4.363 |
| 0.25713 | 93.60015 | 1.8935 | 4.0341 | 4.0975 | 3.5382 | 3.6597 | 3.888 |
| 0.27691 | 100.8004 | 1.6687 | 3.591 | 3.5981 | 3.1278 | 3.245 | 3.4592 |
| 0.29669 | 108.0007 | 1.6548 | 3.6274 | 3.6065 | 3.1493 | 3.2757 | 3.4992 |
| 0.31647 | 115.201 | 1.6414 | 3.5861 | 3.5797 | 3.1201 | 3.2429 | 3.4581 |
| 0.33625 | 122.4013 | 1.4051 | 3.0397 | 3.0428 | 2.6474 | 2.7483 | 2.9267 |
| 0.35603 | 129.6016 | 1.0027 | 2.1833 | 2.1731 | 1.8964 | 1.9709 | 2.1015 |

| | | | | | | | |
|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0.3758 | 136.7983 | 0.68858 | 1.5433 | 1.5079 | 1.3292 | 1.387 | 1.4855 |
| 0.39558 | 143.9985 | 0.62668 | 1.3866 | 1.3663 | 1.199 | 1.2484 | 1.3355 |
| 0.41536 | 151.1988 | 0.62189 | 1.3401 | 1.3603 | 1.1768 | 1.2174 | 1.2926 |
| 0.43514 | 158.3991 | 0.44646 | 0.95591 | 0.97711 | 0.84251 | 0.86907 | 0.92228 |
| 0.45492 | 165.5994 | 0.26148 | 0.56283 | 0.56229 | 0.49051 | 0.50708 | 0.56821 |
| 0.4747 | 172.7997 | 0.26653 | 0.58672 | 0.5929 | 0.51518 | 0.53252 | 0.57776 |
| 0.49448 | 180 | 0.28934 | 0.63181 | 0.65375 | 0.56012 | 0.57821 | 0.61286 |
| 0.51426 | 187.2003 | 0.14411 | 0.32258 | 0.33247 | 0.28423 | 0.2941 | 0.3287 |
| 0.53404 | 194.4006 | 0.06415 | 0.15809 | 0.13527 | 0.12685 | 0.13974 | 0.15213 |
| 0.55382 | 201.6009 | 0.10701 | 0.2035 | 0.19997 | 0.17286 | 0.1834 | 0.19661 |
| 0.57359 | 208.7975 | 0.12265 | 0.21634 | 0.21485 | 0.1841 | 0.19443 | 0.21027 |
| 0.59337 | 215.9978 | 0.27387 | 0.52217 | 0.52533 | 0.45046 | 0.47084 | 0.50437 |
| 0.61315 | 223.1981 | 0.45499 | 0.90616 | 0.92292 | 0.7902 | 0.82222 | 0.8749 |
| 0.63293 | 230.3984 | 0.51222 | 1.0116 | 1.0271 | 0.87922 | 0.91552 | 0.9763 |
| 0.65271 | 237.5987 | 0.50507 | 0.98822 | 0.99804 | 0.8548 | 0.89264 | 0.95482 |
| 0.67249 | 244.799 | 0.57899 | 1.1395 | 1.1507 | 0.98516 | 1.0284 | 1.0993 |
| 0.69227 | 251.9993 | 0.68332 | 1.3574 | 1.3769 | 1.1778 | 1.2267 | 1.3077 |
| 0.71205 | 259.1996 | 0.69878 | 1.3878 | 1.4071 | 1.2037 | 1.2539 | 1.3367 |

| | | | | | | | |
|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0.73183 | 266.3999 | 0.69329 | 1.367 | 1.3822 | 1.1832 | 1.234 | 1.3177 |
| 0.75161 | 273.6001 | 0.75954 | 1.5101 | 1.5311 | 1.3108 | 1.3661 | 1.4564 |
| 0.77139 | 280.8004 | 0.84491 | 1.6864 | 1.7132 | 1.4663 | 1.5261 | 1.6248 |
| 0.79117 | 288.0007 | 0.84681 | 1.6774 | 1.7008 | 1.4568 | 1.5161 | 1.6152 |
| 0.81095 | 295.201 | 0.79264 | 1.5486 | 1.5636 | 1.3406 | 1.3964 | 1.491 |
| 0.83072 | 302.3977 | 0.84745 | 1.6253 | 1.6306 | 1.399 | 1.4587 | 1.5632 |
| 0.8505 | 309.598 | 1.049 | 2.0242 | 2.0333 | 1.7429 | 1.8161 | 1.9446 |
| 0.87028 | 316.7983 | 1.2408 | 2.4127 | 2.4289 | 2.0805 | 2.1669 | 2.3174 |
| 0.89006 | 323.9985 | 1.2897 | 2.4738 | 2.4804 | 2.1256 | 2.217 | 2.376 |
| 0.90984 | 331.1988 | 1.2163 | 2.3148 | 2.3151 | 1.9849 | 2.0716 | 2.2232 |
| 0.92962 | 338.3991 | 1.1541 | 2.1759 | 2.17 | 1.8625 | 1.9458 | 2.0907 |
| 0.9494 | 345.5994 | 1.0366 | 1.9273 | 1.9083 | 1.6407 | 1.7185 | 1.8504 |
| 0.96918 | 352.7997 | 0.69137 | 1.2502 | 1.2062 | 1.0483 | 1.1065 | 1.198 |
| 0.98896 | 360 | 0.18343 | 0.51845 | 0.40758 | 0.39911 | 0.44402 | 0.49127 |

| WAKTU | SUDUT | S235JR | | | | | |
|-------|----------|----------|------------|----------|------------|------------|------------|
| | | ARM UP | ARM DOWN | SHAFT | BLADE D | BLADE T | BLADE L |
| 1E-07 | 3.64E-05 | 0.000179 | 0.00020208 | 0.000216 | 0.00016383 | 0.00016376 | 0.00017543 |

| | | | | | | | |
|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0.019779 | 7.199927 | 0.30298 | 0.66803 | 0.67206 | 0.59004 | 0.61912 | 0.69418 |
| 0.039558 | 14.39985 | 0.98136 | 2.1293 | 2.2005 | 1.8979 | 1.966 | 2.0822 |
| 0.059337 | 21.59978 | 1.309 | 2.8557 | 2.9674 | 2.5462 | 2.6262 | 2.7668 |
| 0.079117 | 28.80007 | 1.0671 | 2.3461 | 2.4303 | 2.0871 | 2.154 | 2.2699 |
| 0.098896 | 36 | 0.8285 | 1.7858 | 1.8567 | 1.5925 | 1.6417 | 1.7453 |
| 0.11868 | 43.20175 | 1.2378 | 2.6657 | 2.7563 | 2.3664 | 2.4479 | 2.5954 |
| 0.13845 | 50.3984 | 1.8811 | 4.026 | 4.1526 | 3.5628 | 3.6815 | 3.8997 |
| 0.15823 | 57.59869 | 2.0205 | 4.3252 | 4.4685 | 3.8297 | 3.9499 | 4.1787 |
| 0.17801 | 64.79898 | 1.7704 | 3.7696 | 3.8716 | 3.3262 | 3.4313 | 3.6384 |
| 0.19779 | 71.99927 | 1.7299 | 3.7036 | 3.7499 | 3.244 | 3.3576 | 3.5773 |
| 0.21757 | 79.19956 | 1.9992 | 4.3048 | 4.3536 | 3.7695 | 3.9059 | 4.1587 |
| 0.23735 | 86.39985 | 2.115 | 4.522 | 4.6009 | 3.9709 | 4.1088 | 4.3652 |
| 0.25713 | 93.60015 | 1.8952 | 4.0377 | 4.1014 | 3.5415 | 3.6631 | 3.8916 |
| 0.27691 | 100.8004 | 1.6683 | 3.5897 | 3.5971 | 3.1267 | 3.2439 | 3.458 |
| 0.29669 | 108.0007 | 1.6531 | 3.6237 | 3.6026 | 3.146 | 3.2723 | 3.4956 |
| 0.31647 | 115.201 | 1.6414 | 3.5864 | 3.5799 | 3.1203 | 3.2432 | 3.4584 |
| 0.33625 | 122.4013 | 1.4067 | 3.0434 | 3.0466 | 2.6507 | 2.7517 | 2.9303 |
| 0.35603 | 129.6016 | 1.0033 | 2.1842 | 2.1742 | 1.8973 | 1.9717 | 2.1023 |

| | | | | | | | |
|---------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0.3758 | 136.7983 | 0.68725 | 1.5402 | 1.5047 | 1.3264 | 1.3841 | 1.4824 |
| 0.39558 | 143.9985 | 0.62566 | 1.3848 | 1.3642 | 1.1973 | 1.2467 | 1.3338 |
| 0.41536 | 151.1988 | 0.62271 | 1.3421 | 1.3623 | 1.1786 | 1.2192 | 1.2945 |
| 0.43514 | 158.3991 | 0.44769 | 0.95853 | 0.9799 | 0.84487 | 0.87149 | 0.92481 |
| 0.45492 | 165.5994 | 0.2611 | 0.56169 | 0.56127 | 0.48956 | 0.50606 | 0.56738 |
| 0.4747 | 172.7997 | 0.26522 | 0.58399 | 0.59 | 0.51273 | 0.53 | 0.57535 |
| 0.49448 | 180 | 0.28933 | 0.63189 | 0.65381 | 0.56019 | 0.5783 | 0.61296 |
| 0.51426 | 187.2003 | 0.1453 | 0.32509 | 0.33514 | 0.28649 | 0.29641 | 0.33083 |
| 0.53404 | 194.4006 | 0.063862 | 0.15843 | 0.13535 | 0.12706 | 0.14 | 0.15244 |
| 0.55382 | 201.6009 | 0.10813 | 0.20596 | 0.20243 | 0.175 | 0.18563 | 0.19897 |
| 0.57359 | 208.7975 | 0.12332 | 0.21782 | 0.2164 | 0.18544 | 0.1958 | 0.21171 |
| 0.59337 | 215.9978 | 0.27304 | 0.52037 | 0.52348 | 0.44887 | 0.46921 | 0.50265 |
| 0.61315 | 223.1981 | 0.4542 | 0.90447 | 0.92117 | 0.78871 | 0.82068 | 0.87327 |
| 0.63293 | 230.3984 | 0.51284 | 1.0129 | 1.0285 | 0.88042 | 0.91674 | 0.97757 |
| 0.65271 | 237.5987 | 0.50594 | 0.99005 | 0.99994 | 0.85641 | 0.89431 | 0.95657 |
| 0.67249 | 244.799 | 0.57859 | 1.1387 | 1.1499 | 0.98448 | 1.0277 | 1.0986 |
| 0.69227 | 251.9993 | 0.68247 | 1.3556 | 1.375 | 1.1762 | 1.2251 | 1.306 |
| 0.71205 | 259.1996 | 0.69899 | 1.3882 | 1.4076 | 1.2041 | 1.2543 | 1.3371 |

| | | | | | | | |
|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0.73183 | 266.3999 | 0.69408 | 1.3686 | 1.384 | 1.1847 | 1.2355 | 1.3192 |
| 0.75161 | 273.6001 | 0.75948 | 1.51 | 1.531 | 1.3107 | 1.366 | 1.4563 |
| 0.77139 | 280.8004 | 0.84421 | 1.6849 | 1.7116 | 1.465 | 1.5248 | 1.6234 |
| 0.79117 | 288.0007 | 0.84678 | 1.6773 | 1.7007 | 1.4567 | 1.5161 | 1.6152 |
| 0.81095 | 295.201 | 0.79326 | 1.55 | 1.5651 | 1.3419 | 1.3976 | 1.4923 |
| 0.83072 | 302.3977 | 0.84754 | 1.6255 | 1.6308 | 1.3992 | 1.4588 | 1.5633 |
| 0.8505 | 309.598 | 1.0484 | 2.0228 | 2.0319 | 1.7417 | 1.8148 | 1.9433 |
| 0.87028 | 316.7983 | 1.2406 | 2.4123 | 2.4284 | 2.0801 | 2.1664 | 2.317 |
| 0.89006 | 323.9985 | 1.2903 | 2.4752 | 2.4818 | 2.1268 | 2.2182 | 2.3772 |
| 0.90984 | 331.1988 | 1.2167 | 2.3157 | 2.316 | 1.9857 | 2.0724 | 2.224 |
| 0.92962 | 338.3991 | 1.1536 | 2.175 | 2.169 | 1.8617 | 1.9449 | 2.0898 |
| 0.9494 | 345.5994 | 1.0362 | 1.9264 | 1.9074 | 1.6399 | 1.7177 | 1.8496 |
| 0.96918 | 352.7997 | 0.69183 | 1.2512 | 1.2072 | 1.0491 | 1.1074 | 1.1989 |
| 0.98896 | 360 | 0.18398 | 0.51902 | 0.40808 | 0.39956 | 0.44451 | 0.49179 |

| WAKTU | SUDUT | SS400 | | | | | |
|-------|----------|----------|------------|----------|------------|------------|------------|
| | | ARM UP | ARM DOWN | SHAFT | BLADE D | BLADE T | BLADE L |
| 1E-07 | 3.64E-05 | 0.000184 | 0.00020232 | 0.000216 | 0.00016472 | 0.00016614 | 0.00018075 |

| | | | | | | | |
|----------|----------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|
| 0.019779 | 7.199927 | 0.30303 | 0.66794 | 0.6721 | 0.59002 | 0.61905 | 0.69428 |
| 0.039558 | 14.39985 | 0.98213 | 2.1302 | 2.2016 | 1.8987 | 1.9669 | 2.0831 |
| 0.059337 | 21.59978 | 1.311 | 2.8589 | 2.971 | 2.5491 | 2.6292 | 2.77 |
| 0.079117 | 28.80007 | 1.069 | 2.3492 | 2.4337 | 2.0899 | 2.1568 | 2.2729 |
| 0.098896 | 36 | 0.82902 | 1.7866 | 1.8577 | 1.5932 | 1.6424 | 1.7462 |
| 0.11868 | 43.20175 | 1.2381 | 2.6657 | 2.7564 | 2.3663 | 2.4477 | 2.5953 |
| 0.13845 | 50.3984 | 1.8829 | 4.0286 | 4.1556 | 3.5651 | 3.6837 | 3.9021 |
| 0.15823 | 57.59869 | 2.0241 | 4.3316 | 4.4753 | 3.8352 | 3.9557 | 4.1848 |
| 0.17801 | 64.79898 | 1.7733 | 3.7748 | 3.877 | 3.3306 | 3.4359 | 3.6433 |
| 0.19779 | 71.99927 | 1.7309 | 3.7046 | 3.7512 | 3.2448 | 3.3585 | 3.5782 |
| 0.21757 | 79.19956 | 2.0002 | 4.3048 | 4.3542 | 3.7696 | 3.9058 | 4.1587 |
| 0.23735 | 86.39985 | 2.1179 | 4.526 | 4.6057 | 3.9745 | 4.1124 | 4.369 |
| 0.25713 | 93.60015 | 1.8987 | 4.0435 | 4.1078 | 3.5466 | 3.6684 | 3.8971 |
| 0.27691 | 100.8004 | 1.67 | 3.5921 | 3.5999 | 3.1289 | 3.2461 | 3.4603 |
| 0.29669 | 108.0007 | 1.6535 | 3.6227 | 3.6021 | 3.1453 | 3.2715 | 3.4946 |
| 0.31647 | 115.201 | 1.6427 | 3.5868 | 3.5812 | 3.1209 | 3.2436 | 3.4588 |
| 0.33625 | 122.4013 | 1.4093 | 3.047 | 3.051 | 2.6541 | 2.755 | 2.9337 |
| 0.35603 | 129.6016 | 1.0049 | 2.1868 | 2.1772 | 1.8997 | 1.9741 | 2.1049 |

| | | | | | | | |
|---------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0.3758 | 136.7983 | 0.68703 | 1.5394 | 1.504 | 1.3258 | 1.3834 | 1.4817 |
| 0.39558 | 143.9985 | 0.62527 | 1.383 | 1.3628 | 1.1959 | 1.2452 | 1.3321 |
| 0.41536 | 151.1988 | 0.62374 | 1.3435 | 1.3641 | 1.1799 | 1.2205 | 1.2958 |
| 0.43514 | 158.3991 | 0.44911 | 0.9613 | 0.98287 | 0.84733 | 0.87402 | 0.92748 |
| 0.45492 | 165.5994 | 0.26119 | 0.5621 | 0.56163 | 0.4899 | 0.50643 | 0.56776 |
| 0.4747 | 172.7997 | 0.26445 | 0.58228 | 0.58828 | 0.51123 | 0.52842 | 0.57391 |
| 0.49448 | 180 | 0.28941 | 0.6318 | 0.65383 | 0.56014 | 0.57822 | 0.61287 |
| 0.51426 | 187.2003 | 0.14629 | 0.32731 | 0.3375 | 0.28848 | 0.29846 | 0.33273 |
| 0.53404 | 194.4006 | 0.063608 | 0.15691 | 0.13395 | 0.12576 | 0.13864 | 0.15099 |
| 0.55382 | 201.6009 | 0.10909 | 0.20777 | 0.20442 | 0.17662 | 0.1873 | 0.20072 |
| 0.57359 | 208.7975 | 0.12403 | 0.21896 | 0.21744 | 0.18632 | 0.19676 | 0.21277 |
| 0.59337 | 215.9978 | 0.27284 | 0.51954 | 0.52251 | 0.44801 | 0.46836 | 0.50181 |
| 0.61315 | 223.1981 | 0.4544 | 0.90429 | 0.92086 | 0.78839 | 0.82041 | 0.87305 |
| 0.63293 | 230.3984 | 0.5142 | 1.015 | 1.0308 | 0.88229 | 0.91874 | 0.97973 |
| 0.65271 | 237.5987 | 0.50737 | 0.99226 | 1.0023 | 0.85835 | 0.89635 | 0.95877 |
| 0.67249 | 244.799 | 0.57913 | 1.1388 | 1.1501 | 0.98456 | 1.0278 | 1.0987 |
| 0.69227 | 251.9993 | 0.68288 | 1.3554 | 1.3749 | 1.1761 | 1.225 | 1.3059 |
| 0.71205 | 259.1996 | 0.70029 | 1.39 | 1.4095 | 1.2057 | 1.2559 | 1.339 |

| | | | | | | | |
|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| 0.73183 | 266.3999 | 0.69575 | 1.3712 | 1.3867 | 1.1869 | 1.2379 | 1.3218 |
| 0.75161 | 273.6001 | 0.76054 | 1.511 | 1.5322 | 1.3116 | 1.367 | 1.4575 |
| 0.77139 | 280.8004 | 0.84496 | 1.6852 | 1.7121 | 1.4653 | 1.5251 | 1.6239 |
| 0.79117 | 288.0007 | 0.8481 | 1.6789 | 1.7024 | 1.4581 | 1.5176 | 1.6169 |
| 0.81095 | 295.201 | 0.795 | 1.5526 | 1.5678 | 1.3441 | 1.4 | 1.4949 |
| 0.83072 | 302.3977 | 0.84885 | 1.6271 | 1.6325 | 1.4006 | 1.4604 | 1.5651 |
| 0.8505 | 309.598 | 1.0494 | 2.0236 | 2.0328 | 1.7423 | 1.8156 | 1.9442 |
| 0.87028 | 316.7983 | 1.2423 | 2.4142 | 2.4305 | 2.0817 | 2.1682 | 2.319 |
| 0.89006 | 323.9985 | 1.2927 | 2.4786 | 2.4854 | 2.1297 | 2.2213 | 2.3807 |
| 0.90984 | 331.1988 | 1.2189 | 2.3186 | 2.3191 | 1.9882 | 2.0751 | 2.227 |
| 0.92962 | 338.3991 | 1.155 | 2.1764 | 2.1705 | 1.8628 | 1.9462 | 2.0913 |
| 0.9494 | 345.5994 | 1.0375 | 1.9279 | 1.9087 | 1.6409 | 1.7189 | 1.8509 |
| 0.96918 | 352.7997 | 0.69337 | 1.2532 | 1.2091 | 1.0507 | 1.1091 | 1.2008 |
| 0.98896 | 360 | 0.18457 | 0.51804 | 0.40712 | 0.39867 | 0.44355 | 0.4908 |

BIODATA PENULIS



Penulis bernama Iqbal Ismail lahir di Jakarta pada tanggal 27 Oktober 1997. Riwayat pendidikan penulis sebagai berikut SDN Jatiasih I Bekasi (2003-2009), SMPN 9 Bekasi (2009-2012), SMAN 48 Jakarta (2012-2015) dan sekarang sedang menempuh pendidikan S-1 Teknik Fisika ITS dengan bidang minat yang diambil adalah Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan. Selama kuliah penulis aktif sebagai asisten Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan.