



TUGAS AKHIR TF-181801

**ANALISIS PENGARUH VARIASI MATERIAL DAN
STRUKTUR *BLADE* TERHADAP BEBAN DINAMIK
PADA *VERTICAL AXIS HYDROKINETIC
TURBINE* TIPE *STRAIGHT BLADE CASCADED*
(VAHT - SBC)**

**IZDIHAR SALSABILLA DUMA PUTRI
02311540000100**

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
AN EFFECT ANALYSIS OF MATERIALS AND
STRUCTURES BLADE VARIATIONS TO
DYNAMIC LOADS AT VERTICAL AXIS
HYDROKINETIC TURBINE TYPE STRAIGHT
BLADE CASCADED (VAHT-SBC)

IZDIHAR SALSABILLA DUMA PUTRI
02311540000100

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 PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : *Izdihar Salsabilla Duma Putri*

NRP : 02311540000100

Dengan ini menyatakan bahwa tugas akhir saya berjudul ***“ANALISIS VARIASI MATERIAL DAN STRUKTUR BLADE TERHADAP BEBAN DINAMIK PADA VERTICAL AXIS HYDROKINETIC TURBINE TIPE STRAIGHT BLADE CASCADED”*** adalah bebas plagiasi. Apabila pernyataan ini terbukti tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar – benarnya.

Surabaya, 25 Juli 2019
Yang membuat pernyataan,



Izdihar Salsabilla Duma Putri
NRP. 02311540000100

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

ANALISIS PENGARUH VARIASI MATERIAL DAN STRUKTUR TERHADAP BEBAN DINAMIK *BLADE* PADA *VERTICAL AXIS HYDROKINETIC TURBINE STRAIGHT BLADE CASCADED (VAHT-SBC)*

TUGAS AKHIR

Oleh :

IZDIHAR SALSABILLA DUMA PUTRI
NRP. 0231154000100

Surabaya, 22 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



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

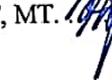
**ANALISIS PENGARUH VARIASI MATERIAL DAN
STRUKTUR TERHADAP BEBAN DINAMIK *BLADE*
PADA *VERTICAL AXIS HYDROKINETIC TURBINE* TIPE
STRAIGHT BLADE CASCADED (VAHT-SBC)
TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Program Studi S-1 Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

IZDIHAR SALSABILLA DUMA PUTRI
Nrp. 02311540000100

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir

1. Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.,  (Pembimbing I)
2. Erna Septyaningrum, S.T., M.T.,  (Pembimbing II)
3. Dr. Ir Totok Suhartanto, DEA.  (Penguji I)
4. Dr. Suyanto, ST, MT  (Penguji II)
5. Dr. -Ing. Doty Dewi Risanti, ST, MT.  (Penguji III)

SURABAYA
2019

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**ANALISIS PENGARUH VARIASI MATERIAL DAN
STRUKTUR *BLADE* TERHADAP BEBAN DINAMIK
PADA *VERTICAL AXIS HYDROKINETIC TURBINE* TIPE
STRAIGHT BLADE CASCADED (VAHT-SBC)**

Nama Mahasiswa : IZDIHAR SALSABILLA D. P.
NRP : 02311540000100
Departemen : Teknik Fisika FTI - ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.
Erna Septyaningrum, S.T., M.T.

Abstrak

Pengembangan desain turbin yang dilakukan berkembang pesat, salah satunya dengan metode analisis beban dinamik secara *computational fluid dynamic* (CFD) yang menerapkan prinsip interaksi antara fluida dengan struktur. Kerusakan yang terjadi pada turbin merupakan hal yang tidak diinginkan karena menyangkut performansi turbin. Umumnya kerusakan ini terjadi berupa keretakan atau patah pada turbin. Oleh karena itu pada tugas akhir ini dilakukan analisis pengaruh variasi material dan struktur *blade* terhadap beban dinamik *straight blade cascaded*, sehingga pada penelitian ini akan didapatkan desain *blade* yang optimal. Dari analisis yang telah dilakukan didapatkan bahwa kombinasi struktur-material *hollow-carbon fiber* merupakan desain struktur pada *blade* yang baik berdasarkan parameter deformasi yaitu sebesar 0,8 mm. Namun apabila melihat parameter *stress* dan *strain* struktur material *solid-e glass FRP* merupakan desain *blade* yang terbaik yaitu maksimum *stress/strain* yang dihasilkan sebesar 17848,8 MPa.

Kata Kunci: Bentuk Moda, *Blade*, Deformasi, Frekuensi Natural, Regangan, Tegangan,

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**AN ANALYSIS EFFECT OF MATERIALS AND
STRUCTURES BLADE VARIATION TO DYNAMIC
LOADS ON VERTICAL AXIS HYDRIKINETIC TURBINE
TYPE STRAIGHT BLADE CASCADED (VAHT- SBC)**

Student's Name : IZDIHAR SALSABILLA D. P.
NRP : 02311540000100
Departement : Teknik Fisika FTI - ITS
Supervisors : Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.
Erna Septyaningrum, S.T., M.T.

Abstract

The development of turbine design has grown fast, this method use dynamic load analysis in computational fluid dynamic (CFD) which is used the principle of interaction between fluid and structure. Damage to the turbine is undesirable because it involves turbine performance. Generally, this damage occurs in the form of cracks or broken turbines. Therefore in this final project an analysis of the effect of material variation and blade structure on the dynamic load of cascaded straight blades is analyzed, so that in this study an optimal blade design will be obtained. From the analysis that has been done it was found that the structural combination of hollow-carbon fiber material is a good structural design for blade based on the deformation parameters of 0.8 mm. But when looking at the stress and strain parameters of the solid- e glass FRP material is the best blade design with the maximum stress-strain value at 17848,8 MPa.

Kata Kunci: Blade, Deformation, Frekuensi Natural, Shape Mode Strain, Stress,

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir “Analisis Pengaruh Variasi Material dan Struktur Terhadap Beban Dinamik Blade Pada *Vertical Axis Hydrokinetic Turbine Straight Blade Cascaded (VAHT-SBC)*”

Selama melaksanakan tugas ini, penulis telah mendapatkan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D selaku Kepala Departemen Teknik Fisika ITS dan dosen wali penulis yang telah memberikan petunjuk dan bimbingan kepada penulis.
2. Bapak Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T. dan Ibu Erna Septyaningrum, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang senantiasa memberikan bimbingan, motivasi dan saran dalam penyelesaian tugas akhir ini.
3. Bapak Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph. D. selaku KBM Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan yang telah memberikan dukungannya kepada penulis.
4. Bapak Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA, bapak Suyanto, ST, MT dan ibu Dr.-Ing. Doty Dewi Risanti, ST, MT selaku dosen penguji tugas akhir yang telah menguji dan memberikan arahan kepada penulis selama proses tugas akhir.
5. Bapak Ibu dosen yang telah memberikan ilmu dan bimbingan selama penulis menuntut ilmu di Teknik Fisika.
6. Bapak Sadvara Duma Putra, Ibu Enni Sriatun, Ibu Mierrina Dasmir serta seluruh keluarga penulis yang telah memberikan motivasi, dukungan dan doa
7. Okky Agassy dan Seno Widya Manggala selaku peneliti sebelumnya.

8. Iqbal Ismail selaku teman seperjuangan dalam mengerjakan tugas akhir bidang energi yang telah membantu dalam menyelesaikan tugas akhir ini..
9. Zanuar yang senantiasa memberikan dukungan, motivasi, serta saran kepada penulis.
10. Sahabat-sahabat Penulis : Aulia, Yesika, Adel, Ghina, Tika, April, Vivin, Rana, Della, Caca, Mita, Alana, Novi dan lain-lain atas motivasi yang senantiasa diberikan kepada penulis.
11. Teman-teman Asisten Laboratorium Pengukuran Fisis: Ananta, Kevin, Zul, Lathif, Bella, dan lain-lain.
12. Teman-teman Asisten Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan.
13. Teman-Teman Transcendent Frontier yang telah bersama dengan penulis sejak 2015.
14. Serta teman-teman 2013, 2014, 2015 dan 2016 lainnya yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu
15. Semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan laporan tugas akhir ini.

Apabila terdapat kekurangan, penulis memohon kritik dan saran demi kesempurnaan laporan tugas akhir ini. Semoga laporan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan ilmu bagi banyak orang

Surabaya, 16 Juli 2019

Penulis

DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Lembar Pengesahan	Error! Bookmark not defined.
Abstrak	ix
Abstract	xi
Kata Pengantar	xiii
Daftar Isi	xv
Daftar Gambar	xvii
Daftar Tabel	xxivi
Daftar Simbol	xxvi
Bab I Pendahuluan	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Batasan Masalah	3
Bab II Dasar Teori	5
2.1 Turbin Vertical Axis Hydrokinetic Turbine – Straight Blade Cascaded	5
2.2 Hidrodinamika	6
2.3 Hidroelastisitas	7
2.4 Stress, Strain, Safety Factor	9
2.5 Analisis Moda	10
Bab III Metodologi Penelitian	13
3.1 Studi Literatur	15
3.2 Pengumpulan Data dari Penelitian Sebelumnya	15
3.3 Simulasi CFD Pada VAHT SBC 3 Arm	18
3.4 Validasi Nilai Torsi dengan Penelitian Sebelumnya	19

3.5 Pembuatan Geometri VAHT SBC 1 <i>Arm</i>	20
3.6 Penentuan Variasi Material dan Struktur <i>Blade</i>	20
3.7 Simulasi Fluida (CFD) Pada VAHT SBC 1 <i>Arm</i>	24
3.8 Simulasi Struktur (CFD) Pada VAHT SBC 1 <i>Arm</i>	27
Bab IV Analisa Data Dan Pembahasan	29
4.1 Validasi Hasil Simulasi	29
4.2 Dinamika Gaya Pada <i>Blade</i>	30
4.3 Persebaran Tekanan pada <i>Blade</i>	34
4.4 Pengaruh Variasi Material <i>Blade</i> yang Terhubung dengan <i>Arm</i> Terhadap Karakteristik Mekanik Material dan Respon Moda	38
4.5 Pengaruh Variasi Struktur <i>Blade</i> yang Terhubung dengan <i>Arm</i> Terhadap Karakteristik Mekanik Material dan Respon Getaran	87
4.6 Pengaruh Variasi Struktur <i>Blade</i> yang Terhubung dengan <i>Arm</i> Terhadap Moda	100
4.7 Karakteristik Mekanik Material dan Moda Pada <i>Stand Alone Blade</i>	107
4.8 Diskusi	116
Bab V Penutup	119
5.1 Kesimpulan	119
5.2 Saran	119
Daftar Pustaka	121
Lampiran	125
Biodata Penulis	139

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Desain Turbin Vertikal Aksis Hidrokinetik - Straight Blade Cascaded [4]	5
Gambar 2.2	Gaya yang Bekerja Pada Blade [10]	6
Gambar 2.3	a) <i>One Way Coupling</i> b) <i>Two-Way Coupling</i> [11]	8
Gambar 2.4	Kurva Stress dan Strain [14]	10
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	14
Gambar 3.2	Diagram Blok Penelitian	15
Gambar 3.3	Desain Geometri VAHT SBC	16
Gambar 3.4	Desain Blade pada VAHT SBC	16
Gambar 3.5	Geometri VAHT SBC dengan 1 <i>Arm</i>	20
Gambar 3.6	Struktur <i>Solid Blade</i> Tampak (a) Atas (b) Samping	22
Gambar 3.7	Struktur <i>Solid</i> dengan Sisipan <i>Plat</i> Pada <i>Blade</i> Tampak (a) Atas (b) Samping	23
Gambar 3.8	Struktur <i>Hollow</i> Pada <i>Blade</i> Tampak (a) Atas (b) Samping	24
Gambar 3.9	Struktur <i>Hollow</i> dengan Sisipan <i>Plat</i> pada <i>Blade</i> Tampak (a) Atas (b) Samping	24
Gambar 3.10	Domain Tabung	25
Gambar 3.11	Domain Kanal Terbuka	26
Gambar 3.12	Domain Fluida Serta <i>Boundary Condition</i> dari Simulasi Fluida	27
Gambar 3.13	Simulasi <i>One-Way FSI Coupling</i>	28
Gambar 3.14	Kondisi Batas pada Simulasi Struktur	28
Gambar 4.1	Arah Putar dan Azimuth Turbin	31
Gambar 4.2	Gaya yang Terjadi Pada Sumbu Z Terhadap Sudut Azimuth	31
Gambar 4.3	Gaya yang Terjadi Pada Sumbu X Terhadap Sudut Azimuth	32
Gambar 4.4	Gaya Tangensial SBC pada Kecepatan Aliran 1,21 m/s	33

Gambar 4.5	Gaya Normal SBC Pada Kecepatan Aliran 1,21 m/s	33
Gambar 4.6	Gaya Tangensial Pada Penelitian Morgan [18]	34
Gambar 4.7	Gaya Normal pada Penelitian Morgan [18]	34
Gambar 4.8	Persebaran Tekanan SBC, <i>Arm, Shaft</i> . a) sudut azimuth 7.2° b) sudut azimuth 180° c) sudut azimuth 360°	35
Gambar 4.9	Persebaran Tekanan SBC <i>Stand Alone</i> . a) sudut azimuth 7.2° b) sudut azimuth 180° c) sudut azimuth 270°	35
Gambar 4.10	Persebaran Tekanan pada <i>Blade 1 Stand Alone</i> . a) sudut azimuth 7.2° b) sudut azimuth 180° c) sudut azimuth 270°	36
Gambar 4.11	Persebaran Tekanan pada <i>Blade 2 Stand Alone</i> . a) sudut azimuth 7.2° b) sudut azimuth 180° c) sudut azimuth 270°	36
Gambar 4.12	Persebaran Tekanan pada <i>Blade 3 Stand Alone</i> . a) sudut azimuth 7.2° b) sudut azimuth 180° c) sudut azimuth 270°	37
Gambar 4.13	Pengaruh Variasi Material Pada Struktur <i>Solid</i> Terhadap Deformasi SBC	39
Gambar 4.14	Pengaruh Perubahan Material Penyusun Pada Struktur <i>Solid</i> SBC Terhadap Deformasi Sumbu X	39
Gambar 4.15	Pengaruh Perubahan Material Penyusun Pada Struktur <i>Solid</i> SBC Terhadap Deformasi Sumbu Y	40
Gambar 4.16	Pengaruh Perubahan Material Penyusun Pada	40
Gambar 4.17	Pengaruh Variasi Material Pada Struktur <i>Solid</i> Terhadap Deformasi <i>Blade</i> Dalam	41
Gambar 4.18	Pengaruh Variasi Material Pada Struktur <i>Solid</i> Terhadap Deformasi <i>Blade</i> Tengah	42

Gambar 4.19	Pengaruh Variasi Material Pada Struktur <i>Solid</i> Terhadap Deformasi <i>Blade</i> Luar	42
Gambar 4.20	Pengaruh Variasi Material Pada Struktur <i>Solid</i> Terhadap Deformasi Sepanjang <i>Span Blade</i>	43
Gambar 4.21	Pengaruh Variasi Material Terhadap Maksimum <i>Strain Blade</i> Terhadap Sudut Azimuth pada Struktur <i>Solid</i>	44
Gambar 4.22	Pengaruh Variasi Material Terhadap Maksimum <i>Stress Blade</i> Terhadap Sudut Azimuth pada Struktur <i>Solid</i>	44
Gambar 4.23	Pengaruh Variasi Material Pada Struktur <i>Solid</i> Terhadap Frekuensi	45
Gambar 4.24	Pengaruh Variasi Material terhadap Deformasi SBC Struktur <i>Solid</i> dengan Sisipan Plat	51
Gambar 4.25	Pengaruh Variasi Material Pada Struktur <i>Solid</i> dengan Sisipan Plat Terhadap Deformasi Sumbu X	52
Gambar 4.26	Pengaruh Variasi Material Pada Struktur <i>Solid</i> dengan Sisipan Plat Terhadap Deformasi Sumbu Y	52
Gambar 4.27	Pengaruh Variasi Material Pada Struktur <i>Solid</i> dengan Sisipan <i>Plat</i> Terhadap Deformasi Sumbu Y	53
Gambar 4.28	Deformasi <i>Blade</i> Dalam Pada Struktur <i>Solid</i> dengan Sisipan <i>Plat</i> Terhadap Azimuth	53
Gambar 4.29	Deformasi <i>Blade</i> Tengah Pada Struktur <i>Solid</i> dengan Sisipan Plat Terhadap Sudut Azimuth	54
Gambar 4.30	Deformasi <i>Blade</i> Luar Pada Struktur <i>Solid</i> dengan Sisipan Plat Terhadap Sudut Azimuth	54
Gambar 4.31	Pengaruh Variasi Material Penyusun Terhadap Deformasi Sepanjang <i>Span</i>	55

Gambar 4.32	Pengaruh Perubahan Variasi Material Pada Struktur <i>Solid</i> dengan Sisipan <i>Plat</i> Terhadap Maksimum <i>Strain</i>	56
Gambar 4.33	Pengaruh Perubahan Variasi Material Pada Struktur <i>Solid</i> dengan Sisipan <i>Plat</i> Terhadap Maksimum <i>Stress</i>	56
Gambar 4.34	Pengaruh Material Penyusun <i>Blade</i> Terhadap Frekuensi Natural	57
Gambar 4.35	Grafik Hubungan Deformasi SBC Pada Struktur <i>Hollow</i> Terhadap Sudut Azimuth	63
Gambar 4.36	Pengaruh Perubahan Material Penyusun Pada Struktur <i>Hollow</i> SBC Terhadap Deformasi Sumbu X	64
Gambar 4.37	Pengaruh Perubahan Material Penyusun Pada Struktur <i>Hollow</i> SBC Terhadap Deformasi Sumbu Y	64
Gambar 4.38	Pengaruh Perubahan Material Penyusun Pada Struktur <i>Hollow</i> SBC Terhadap Deformasi Sumbu z	65
Gambar 4.39	Deformasi <i>Blade</i> Dalam Pada Struktur <i>Hollow</i> Terhadap Sudut Azimuth	66
Gambar 4.40	Deformasi <i>Blade</i> Tengah Pada Struktur <i>Hollow</i> Terhadap Sudut Azimuth	66
Gambar 4.41	Deformasi <i>Blade</i> Luar Pada Struktur <i>Hollow</i> Terhadap Sudut Azimuth	67
Gambar 4.42	Nilai Deformasi Pada Struktur <i>Hollow</i> yang Terjadi Terhadap Panjang <i>Span</i>	67
Gambar 4.43	Pengaruh Variasi Material Terhadap Maksimum <i>Strain</i> SBC pada Struktur <i>Hollow</i>	68
Gambar 4.44	Pengaruh Variasi Material Terhadap Maksimum <i>Stress</i> SBC pada Struktur <i>Hollow</i>	68
Gambar 4.45	Pengaruh Variasi Material Terhadap Frekuensi Natural Pada Struktur <i>Hollow</i>	69

Gambar 4.46	Pengaruh Variasi Material Pada Struktur <i>Hollow</i> dengan Sisipan <i>Plat</i> Terhadap Deformasi SBC	75
Gambar 4.47	Pengaruh Variasi Material Penysun Pada Struktur <i>Hollow</i> dengan Sisipan <i>Plat</i> Terhadap Deformasi Sumbu X	76
Gambar 4.48	Pengaruh Variasi Material Penysun Pada Struktur <i>Hollow</i> dengan Sisipan <i>Plat</i> Terhadap Deformasi Sumbu Y	76
Gambar 4.49	Pengaruh Variasi Material Penysun Pada Struktur <i>Hollow</i> dengan Sisipan <i>Plat</i> Terhadap Deformasi Sumbu Z.	77
Gambar 4.50	Deformasi <i>Blade</i> Dalam Pada <i>Hollow</i> dengan Sisipan <i>Plat</i> Terhadap Sudut Azimuth	78
Gambar 4.51	Deformasi <i>Blade</i> Tengah Pada Struktur <i>Hollow</i> dengan Sisipan <i>Plat</i> Terhadap Sudut Azimuth	78
Gambar 4.52	Deformasi <i>Blade</i> Luar Pada Struktur <i>Hollow</i> dengan Sisipan <i>Plat</i> Terhadap Sudut Azimuth	79
Gambar 4.53	Pengaruh Variasi Material Pada Struktur <i>Hollow</i> dengan Sisipan <i>Plat</i> terhadap Deformasi Sepanjang <i>Span</i>	79
Gambar 4.54	Maksimum <i>Strain</i> terhadap sudut Azimuth Pada Struktur <i>Hollow</i> dengan Sisipan <i>Plat</i>	80
Gambar 4.55	Maksimum Stress terhadap sudut Azimuth Pada Struktur <i>Hollow</i> dengan Sisipan <i>Plat</i>	80
Gambar 4.56	Pengaruh Variasi Material Terhadap Frekuensi Natural	81
Gambar 4.57	Distribusi Deformasi Pada SBC, <i>Arm</i> dan <i>Shaft</i> dengan <i>Blade</i> Struktur <i>Solid</i> dan Material Carbon	88
Gambar 4.58	Pengaruh Variasi Struktur <i>Blade</i> Terhadap Deformasi <i>Blade</i> Pada 1 Putaran	88
Gambar 4.59	Pengaruh Variasi Struktur <i>Blade</i> Terhadap Deformasi Pada Sumbu X	89

Gambar 4.60	Pengaruh Variasi Struktur <i>Blade</i> Terhadap Deformasi Pada Sumbu Y	89
Gambar 4.61	Pengaruh Variasi Struktur <i>Blade</i> Terhadap Deformasi Pada Sumbu Z	90
Gambar 4.62	Distribusi Deformasi <i>Blade</i> Dalam pada Variasi <i>Blade</i> Struktur <i>Solid</i> dan Material Carbon	91
Gambar 4.63	Pengaruh Variasi Struktur Terhadap Deformasi <i>Blade</i> Dalam	91
Gambar 4.64	Pengaruh Perubahan Variasi Struktur Terhadap Deformasi <i>Blade</i> Tengah Pada 1 Putaran	92
Gambar 4.65	Distribusi Deformasi Pada <i>Blade</i> Luar dari Turbin Struktur <i>Solid</i> dan Material Carbon	92
Gambar 4.66	Pengaruh Perubahan Variasi Struktur Terhadap Deformasi <i>Blade</i> Luar Pada 1 Putaran	93
Gambar 4.67	Pengaruh Variasi Struktur Terhadap Deformasi Sepanjang <i>Blade Span</i>	93
Gambar 4.68	Distribusi <i>Strain</i> pada SBC, <i>Arm</i> dan <i>Shaft</i> dengan <i>Blade</i> Struktur <i>Solid</i>	94
Gambar 4.69	Distribusi <i>Strain</i> pada SBC, <i>Arm</i> dan <i>Shaft</i> dengan <i>Blade</i> Struktur <i>Solid</i> dengan Plat	95
Gambar 4.70	Distribusi <i>Strain</i> pada SBC, <i>Arm</i> dan <i>Shaft</i> dengan <i>Blade</i> Struktur <i>Hollow</i>	95
Gambar 4.71	Distribusi <i>Strain</i> pada SBC, <i>Arm</i> dan <i>Shaft</i> dengan <i>Blade</i> Struktur <i>Hollow</i> dengan Plat	96
Gambar 4.72	Pengaruh Perubahan Variasi Struktur <i>Blade</i> Terhadap <i>Strain</i> SBC, <i>Arm</i> dan <i>Shaft</i> Pada 1 Putaran	96
Gambar 4.73	Distribusi <i>Stress</i> Pada Turbin Struktur <i>Solid</i>	98
Gambar 4.74	Distribusi Maksimum <i>Stress</i> Turbin terhadap sudut Azimuth pada Struktur <i>Solid</i> dengan Sisipan Plat	98
Gambar 4.75	Distribusi Maksimum <i>Stress</i> pada Struktur <i>Hollow</i>	99

Gambar 4.76	Distribusi Maksimum Stress Pada Struktur Hollow dengan Sisipan Plat	99
Gambar 4.77	Pengaruh Perubahan Variasi Struktur Terhadap Maksimum Stress Turbin Pada 1 Putaran	100
Gambar 4.78	Pengaruh Perubahan Variasi Struktur Terhadap Frekuensi Natural SBC	101
Gambar 4.79	Deformasi yang Terjadi Pada <i>Blade 1</i> , <i>Blade 2</i> dan <i>Blade 3</i> Terhadap Sudut Azimuth	107
Gambar 4.80	Maksimum <i>Strain</i> yang Terjadi Pada <i>Blade 1</i> , <i>Blade 2</i> dan <i>Blade 3</i> Terhadap Sudut Azimuth	108
Gambar 4.81	Maksimum <i>Stress</i> yang Terjadi Pada <i>Blade 1</i> , <i>Blade 2</i> dan <i>Blade 3</i> Terhadap Sudut Azimuth	108
Gambar 4.82	Frekuensi Natural Pada <i>Blade 1</i> , <i>Blade 2</i> , <i>Blade 3</i>	109
Gambar 4.83	Deformasi SBC Stand Alone Terhadap Sudut Azzimuth	113
Gambar 4.84	Maksimum <i>Strain</i> yang Terjadi Pada <i>Blade 1</i> , <i>Blade 2</i> dan <i>Blade 3</i> Terhadap Sudut Azimuth	113
Gambar 4.85	Maksimum <i>Stress</i> Pada <i>Blade 1</i> , <i>Blade 2</i> , <i>Blade 2</i> dan <i>Blade 3</i> Terhadap Sudut Azimuth	114
Gambar 4.86	Frekuensi Natural Pada SBC <i>Stand Alone</i>	114
Gambar 4.87	Perbandingan Desain Material dan Struktur pada <i>Blade</i> Terhadap Karakteristik Mekanik Material	118

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Profil Geometri Turbin 80 x 80 cm	17
Tabel 3.2	Material Turbin	17
Tabel 3.3	Profil Aliran Fluida	18
Tabel 3.4	Profil Kinetik Turbin Pada Kecepatan <i>Inlet</i> 1,2 m/s	18
Tabel 3.5	Matriks Variasi Ukuran <i>Meshing</i> dan Modul Turbulensi Pada Simulasi Validasi	19
Tabel 3.6	Matriks Variasi Material dan Struktur	21
Tabel 3.7	Variasi Material Pada Penelitian [16]	23
Tabel 3.8	<i>Boundary Condition</i> pada Simulasi Fluida (CFD)	27
Tabel 4.1	Validasi Nilai Torsi Simulasi CFD dengan Eksperimen dari Penelitian Sebelumnya	29
Tabel 4.2	Frekuensi Natural Turbin pada Struktur <i>Solid</i>	46
Tabel 4.3	Frekuensi Natural pada Struktur <i>Solid</i> dengan Sisipan Plat	58
Tabel 4.4	Frekuensi Natural dan Bentuk Moda Pada Struktur <i>Hollow</i>	70
Tabel 4.5	Frekuensi Natural dan Bentuk Moda pada Struktur <i>Hollow</i> dengan Sisipan Plat	82
Tabel 4.6	Pengaruh Variasi Struktur Terhadap Frekuensi Natural dan Moda	102
Tabel 4.7	Bentuk Moda dan Frekuensi Natural Pada <i>Blade</i> 1, <i>Blade</i> 2 dan <i>Blade</i> 3	109
Tabel 4.8	Bentuk Moda pada SBC Stand Alone	115

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR SIMBOL

C_L = Koefisien Lift
 F_l = Gaya Lift (N)
 ρ = Massa Jenis Aliran (kg/m^3)
 U = Kecepatan Aliran (m/s)
 A = Luas Penampang (m^2)
 C_D = Koefisien Drag
 C_T = Koefisien Tangensial
 C_N = Koefisien Normal
 F_T = Gaya Tangensial
 F_N = Gaya Normal
 F_x = Gaya Pada Sumbu X
 F_y = Gaya Pada Sumbu y
 α = Sudut Serang
 M = Matriks Massa Struktur
 C = Matriks Damping
 K = Matriks Kekakuan
 E = Matriks Inersia Fluida
 A = Matriks Damping pada Fluida
 H = Matriks Damping Pada Fluida
 X = perpindahan (mm)
 P = Tekanan (Pa)
 σ_T = *True Stress* (Pa)
 e_T = *True Strain* (mm/mm)
 N = Safety factor

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi Listrik merupakan salah satu kebutuhan penting bagi masyarakat guna sebagai sumber daya ekonomis yang paling utama dengan tujuan untuk keperluan rumah tangga maupun kebutuhan dalam suatu kegiatan usaha. Menurut data statistik ketenagalistrikan, pada tahun 2011 konsumsi energi listrik penduduk Indonesia sebesar 178.279 MWh, yang meningkat setiap tahunnya hingga tahun 2016 menjadi 232.520 MWh. Sementara itu ketersediaan energi di Indonesia sebesar 247.416 MWh, 41% adalah minyak bumi dan 32,3% adalah batu bara. [1] Melihat data tersebut beberapa usaha telah dilakukan untuk memenuhi kebutuhan konsumsi listrik dengan menggunakan energi baru terbarukan (EBT). Pengembangan EBT menjadi fokus pemerintah sebagaimana dinyatakan pada UU Energi No 30 Tahun 2007 dan Peraturan Pemerintah No 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional. Untuk memenuhi kebutuhan energi ini, energi hidrokinetik dapat menjadi alternatif pembangkitan energi dengan keunggulan dapat mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil dan juga Indonesia sebagai negara kepulauan dan beriklim tropis, laut dan sungainya memiliki potensi energi hidrokinetik yang besar yaitu 75.000 MWh [2] [3]

Pengembangan teknologi turbin hidrokinetik dengan berbagai model dan jenis turbin telah banyak dilakukan untuk mendapatkan desain turbin yang optimal sesuai dengan kondisi lingkungan dan daya yang dihasilkan. *Vertical Axis Hydrokinetic Turbine Straight Blade Cascaded* yang telah dilakukan oleh Ridho Hantoro merupakan pengembangan dari vertical axis turbine yang memiliki keunggulan pada VAT yaitu *omnidirectional*, tidak memerlukan mekanisme *yaw* serta dapat meningkatkan rendahnya efisiensi dari VAT dengan cara memperbesar jangkauan sapuan *blade* tanpa memperbesar dimensi turbin dan meningkatkan *self-start* turbin. Desain VAHT SBC menggunakan 3 arm dengan kombinasi 3 *blade* yang terusun secara tumpuk pada tiap *arm* serta mekanisme

passive-pitch diaplikasikan pada tiap *blade* terluar [4]. Hingga saat ini turbin telah melalui banyak pengembarngan untuk meningkat performasni turbin secara keseluruhan. Seperti penelitian mengenai konfigurasi *array* turbin, mekanisme *pitching*, hingga pengembangan generator Turbin ini yang kemudian digunakan sebagai objek pada penelitian ini untuk dianalisis.

Pada turbin hidrokinetik, *blade* merupakan komponen penting. *Blade* harus didesain dan dikonstruksi dengan baik sehingga mampu mengekstrak energi dari air seoptimal mungkin. Instalasi turbin hidrokinetik berada pada lingkungan yang keras yangmana lebih kompleks daripada pada lingkungan udara. Kejadian yang tidak diinginkan seperti deformasi bahkan keretakan pada *blade* menjadi hal yang tidak diharapkan terjadi. *Blade* yang terus menerus terkena beban dari fluida akan rentan terhadap kerusakan akibat fenomena hidroelastisitas turbin. Penelitian mengenai hidroelastisitas turbin telah dilakukan Asghar [5]. Pada penelitian ini dilakukan analisa deformasi *blade* pada turbin angin dengan variasi *tip speed ratio*. Dari penelitian tersebut didapatkan bahwa semakin besar *tip speed ratio* maka nilai torsi turbin semakin besar. Namun hal ini juga mengakibatkan nilai *equivalent stress* yang bekerja pada turbin berubah dan mengakibatkan deformasi. Selain efek karena deformasi, Chen pada pada penelitiannya menyatakan bahwa kegagalan seperti keretakan pada turbin dapat terjadi ketika *blade* tidak stabil, akibat frekuensi getaran pada *blade*. Hal ini dapat terjadi karena terjadi resonansi pada *blade*. Untuk menghindari ini perlu dipastikan bahwa frekuensi natural dari desain *blade* tidak sama dengan frekuensi angular turbin. Kemudian tidak boleh adanya kesamaan frekuensi antar komponen pada turbin. [6]

Dengan adanya kemungkinan-kemungkinan kerusakan seperti itu perlu adanya studi lebih lanjut mengenai beban dinamik *blade* pada turbin, yang mana *blade* merupakan komponen utama dari turbin dalam mengekstraksi energi. Pada studi kali ini dilakukan penelitian tentang efek perubahan struktur dan material penyusun *blade* terhadap karakteristik material seperti maksimum stress, maksimum strain, deformasi, frekuensi natural dan juga

bentuk moda yang terjadi ketika *blade* terkena beban dinamik sebagai pertimbangan untuk mendesain turbin VAHT –SBC berdasarkan ketahanannya.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut maka dapat dirumuskan masalah pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut

1. Bagaimana efek perubahan material *blade* pada turbin terhadap beban dinamik *blade*?
2. Bagaimana efek perubahan struktur *blade* terhadap beban dinamik *blade*?
3. Pada variasi material dan struktur *blade* manakah yang memiliki kekuatan struktur yang lebih bagus?

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini antara lain:

1. Menganalisis efek perubahan material *blade* pada turbin terhadap beban dinamik *blade*.
2. Menganalisis efek perubahan struktur *blade* pada turbin terhadap beban dinamik *blade*.
3. Menganalisis jenis *blade* yang memiliki kekuatan mekanik material dan respon moda yang lebih baik diantara variasi material dan struktur.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada tugas akhir ini adalah

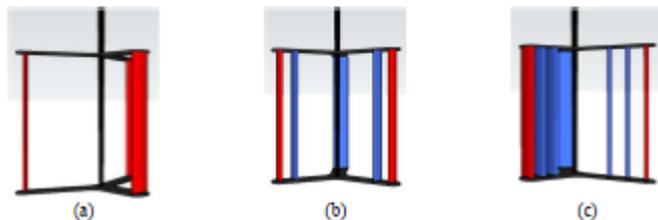
1. Jenis turbin yang digunakan adalah *Vertical Axis Hydrokinetic Turbine Straight Blade Cascade* (VAHT-SBC).
2. Simulasi dilakukan dengan menggunakan CFD.
3. Data penelitian yang diambil dari penelitian sebelumnya. adalah geometri, material, torsi, kecepatan aliran fluida, kecepatan putar

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II DASAR TEORI

2.1 Turbin *Vertical Axis Hydrokinetic Turbine – Straight Blade Cascaded (VAHT – SBC)*

Sistem pembangkitan energi tenaga hidro sebenarnya memiliki prinsip kerja yang sederhana dengan mengkonversi energy kinetic dari arus air menjadi energy listrik melalui perputaran blade. Penerapan turbin vertical aksis cocok pada arus kecepatan rendah dan jenis turbin ini memiliki kelebihan dapat menangkap arus dari segala arah (tidak bergantung pada arah arus) [7] Namun turbin jenis ini memiliki efisiensi yang lebih rendah dibandingkan dengan dengan turbin horizontal aksis [8] Beberapa penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan performansi turbin berdasarkan bentuk blade yaitu *straight blade*, *helical twisted blade*, turbin jenis Gorlov dengan *v blades*. Pengembangan melalui jumlah dan susunan *straight blade* secara *cascaded* juga telah dilakukan untuk meningkatkan performansi dari turbin [4]. Desain *turbin vertical axis – straight blade cascaded* yang telah dilakukan dapat diamati pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Desain Turbin Vertikal Aksis Hidrokinetik - Straight Blade Cascaded [4]

Turbin VAHT-SBC ini tersusun atas tiga lengan dengan variasi jumlah blade pada setiap model. Model pertama terdiri dari 1 blade pada setiap lengan, Model kedua terdiri dari 2 blade pada setiap lengan dan model ketiga terdiri dari 3 blade pada setiap

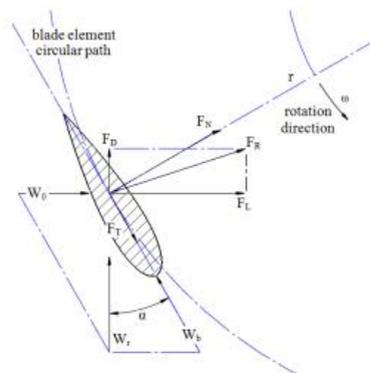
lengan. Dengan bagian blade yang terluar menggunakan passive pitch dan bagian dalam fixed pitch.

2.2 Hidrodinamika

Pada turbin hidrokinetik, *blade* merupakan komponen penting. *Blade* harus didesain dengan baik sehingga hidrodinamika yang terjadi pada blade harus optimal agar turbin mampu mengekstrak energi dari air seoptimal mungkin. Terdapat dua gaya hidrodinamika yang bekerja pada blade yaitu gaya *drag* (F_D) yang bekerja searah dengan kecepatan relatif (U_{rel}) dan gaya *lift* (F_L) yang bekerja tegak lurus kecepatan relatif. Secara skematik gaya – gaya yang bekerja pada blade dapat diilustrasikan dengan Gambar 2.2. Koefisien *lift* dan *drag* yang bekerja pada *blade* didefinisikan oleh Anderson sebagai persamaan (2.1) dan persamaan (2.2) [9]:

$$C_L = \frac{F_L}{0,5 \rho U^2 A} \quad (2.1)$$

$$C_D = \frac{F_D}{0,5 \rho U^2 A} \quad (2.2)$$



Gambar 2.2 Gaya yang Bekerja Pada Blade [10]

Dari Gambar 2.2, F_T merupakan gaya tangensial yang bekerja tegak lurus dengan lintasan rotasi. Gaya F_T ini menyebabkan torsi yang akan memutar turbin sehingga dapat menghasilkan energi

mekanik. Sementara itu, gaya F_N merupakan gaya normal yang dapat menjadi beban pada turbin. Secara matematis, besarnya koefisien gaya tangensial dan gaya normal dituliskan sebagai berikut [10] :

$$C_T = \frac{F_T}{0,5 \rho U^2 c} = C_L \sin(\alpha) - C_D \cos(\alpha) \quad (2.3)$$

$$C_N = \frac{F_N}{0,5 \rho U^2 c} = -C_L \sin(\alpha) - C_D \cos(\alpha) \quad (2.4)$$

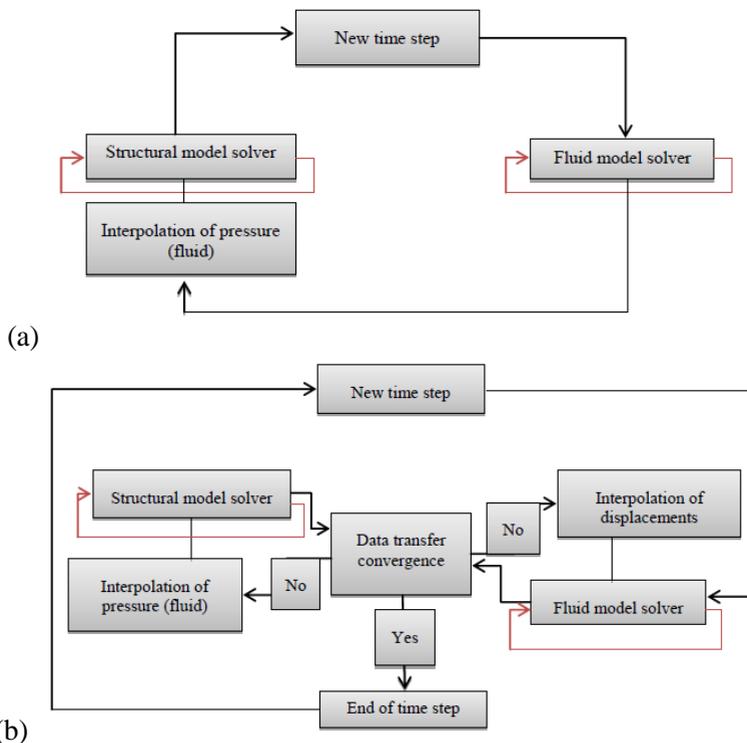
2.3 Hidroelastisitas

Beban hidrodinamika merupakan suatu beban yang dapat terjadi pada struktur benda yang disekitarnya terdapat aliran fluida dalam hal ini adalah air. Gaya-gaya hidrodinamika tersebut muncul akibat perubahan momentum dan energi dari fluida ketika bergerak melewati benda tersebut.

Sebuah benda memiliki elastisitas karena material *solid* yang menyusun benda tersebut juga oleh geometri dari benda tersebut. Sifat elastis dari benda berarti ketika benda tersebut dikenai beban akan mengalami deformasi, menuju keseimbangan baru antara benda dan beban yang dikenai pada benda.

Fluid Structure Interaction merupakan fenomena multifisika sistem yang mana aliran fluida menyebabkan deformasi pada struktur solid objek sehingga merubah kondisi batas (*boundary condition*) dari fluida. [11]. Adapun pada simulasi FSI terdapat berbagai metode pendekatan yaitu *one-way coupling* dan *two way coupling*.

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.



Gambar 2.3 a) *One Way Coupling* b) *Two-Way Coupling* [11]

Hidroelastisitas merupakan salah satu topik analisa pada FSI yang mana berfokus pada deformasi objek terhadap *liquid*. Teori ini merupakan adaptasi dari aeroelastisitas untuk mendeskripsikan efek dari respon struktural terhadap fluida yang berada disekitarnya. Gaya hidrodinamik yang bekerja pada permukaan benda bekerja mengakselerasikan pergeseran pada permukaan sehingga beban hidrodinamika tidak dapat dianggap sebagai ‘eksternal’ pra kalkulasi beban. Jika deformasi elastis relatif kecil dan objek tidak menyalang terhadap permukaan fluida bebas maka dapat menggunakan metode *added mass matrix* atau *boundary integral matrix*. *Fluid structure interaction* sebagai persamaan parsial diferensial mulai banyak diteliti dengan menggunakan

persamaan Navier Stokes dan persamaan elastisitas [12]. Persamaan hidroelastisitas dengan menggabungkan domain fluida dan struktur yang dijabarkan oleh Zienkiewicz dan Bettess [13] sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ \rho Q & E \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & A \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K & Q \\ 0 & H \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} \quad (2.5)$$

Dengan M merupakan matriks massa struktur, C adalah matriks damping, K adalah matriks kekakuan pada domain struktur, sedangkan pada domain fluida E merupakan inersia, A adalah damping, H adalah kekakuan. Kemudian Q adalah matriks *added mass*, f_1 dan f_2 adalah gaya yang bekerja pada struktur dan fluida, adalah perpindahan pada struktur, sedangkan P adalah tekanan pada fluida.

2.4 Stress, Strain, Safety Factor

True Stress dapat didefinisikan sebagai beban (F) yang terdistribusi pada area (A), pada area deformasi terjadi. *Stress* dapat dinyatakan dengan persamaan 2.6. Sedangkan strain merupakan perubahan deformasi terhadap panjang sebelum terjadi deformasi yang dinyatakan dengan persamaan 2.7 yang dinyatakan oleh Callister [14].

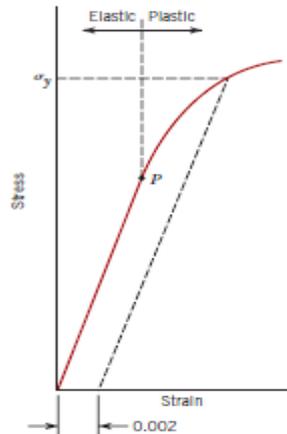
$$\sigma_T = \frac{F}{A} \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.7)$$

Hubungan antara stress dengan strain dapat dinyatakan pada Gambar 2.4. Pada gambar tersebut kemiringan pada daerah elastis merupakan modulus elastisitas (E). Grafik tersebut dapat diterjemahkan ke dalam persamaan 2.8 [14]:

$$\sigma = E \varepsilon \quad (2.8)$$

Perubahan regangan (ε) yang terjadi pada kondisi elastis sebelum berdeformasi selanjutnya disebut dengan maksimum *strain* dan maksimum *stress* adalah nilai maksimum *stress* yang terjadi sebelum material mengalami deformasi.



Gambar 2.4 Kurva Stress dan Strain [14]

Pada pendesainan perlu dilakukan perhitungan untuk dapat mengantisipasi kegagalan pada material seperti patah atau retak. Oleh karena itu perlu adanya parameter nilai dari factor desain atau *safety factor* (N). Nilai dari N menyatakan konstanta nilai dari stress yang bekerja dibanding dengan *stress* maksimum dari material. Faktor desain ini dinyatakan dengan persamaan 2.8. Nilai dari factor desain ini haruslah besar, untuk menghindari kegagalan material. Nilai *safety factor* dikategorikan aman jika nilai N berada pada rentang 1,2 hingga 4. [14].

$$\sigma_w = \frac{\sigma_y}{N} \quad (2.8)$$

2.5 Analisis Moda

Analisis moda adalah suatu proses yang ditujukan untuk menentukan karakteristik-karakteristik dinamik dari suatu sistem struktur. Karakteristik-karakteristik tersebut antara lain adalah frekuensi natural dan moda getaran. Frekuensi natural adalah frekuensi dari struktur yang memiliki massa dan kekakuan bergerak ketika diberikan eksitasi awal kemudian eksitasi tersebut dihilangkan sehingga struktur tersebut bergetar secara bebas. Lalu

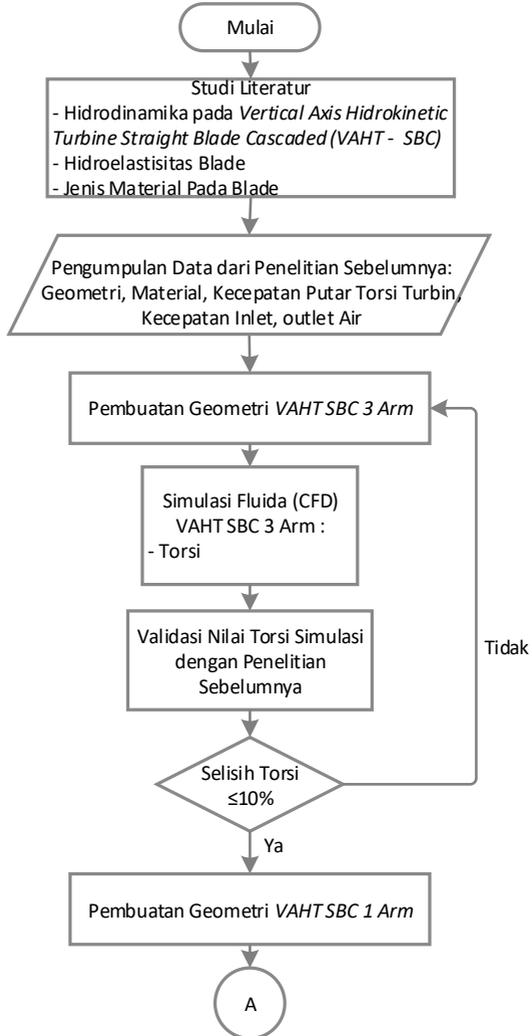
bentuk dari perpindahan struktur tersebut ketika bergetar disebut dengan moda getar [15]. Untuk sistem multi degree of freedom (MDOF), frekuensi natural diketahui dengan penggunaan persamaan karakteristik (*eigen value equation*). Dalam dinamika struktur, akar dari nilai *eigen* dikenal dengan frekuensi natural (ω_n) dan *vector eigen* dikenal dengan moda getar (φ_n), dengan catatan bahwa tiap moda memiliki satu *eigen value* dan satu faktor *eigen*. Persamaan gerak untuk struktur pada sistem MDOF dapat dinyatakan dengan persamaan 2.8 [15]:

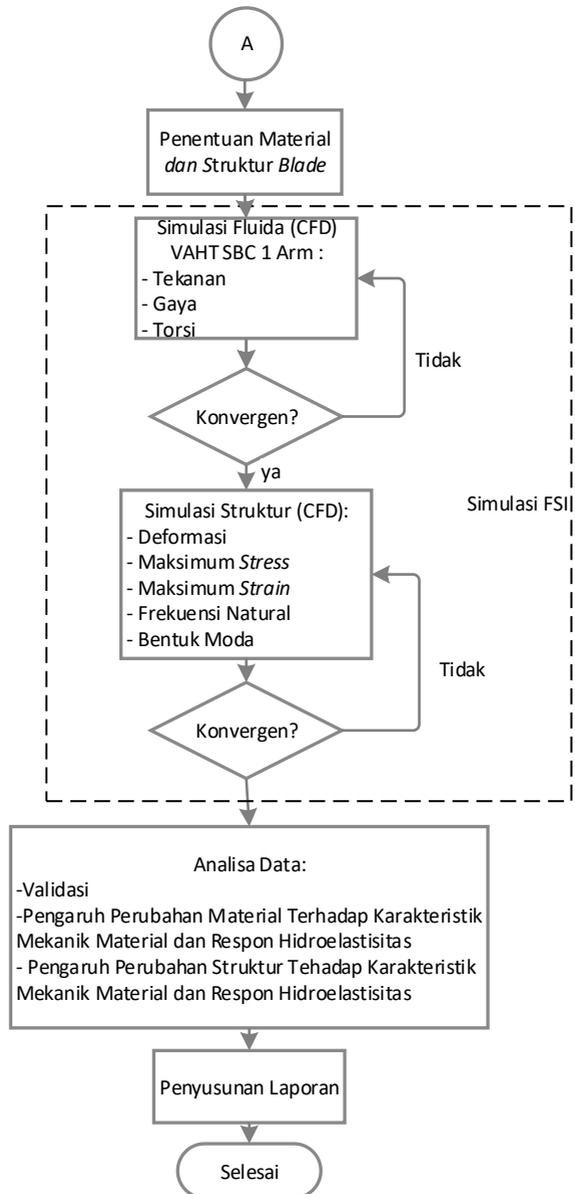
$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (2.8)$$

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

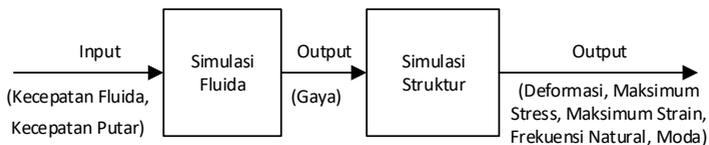
BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam pengerjaan tugas akhir ini secara runtut dan terstruktur dengan diagram alir pada Gambar 3.1.





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.2 Diagram Blok Penelitian

Secara umum simulasi pada penelitian ini ditunjukkan dengan diagram blok pada Gambar 3.2. Input yang berupa kecepatan fluida dan kecepatan turbin akan dikomputasi oleh simulasi CFD dengan menggunakan persamaan-persamaan gaya pada persamaan 2.1 – 2.4 oleh CFD. Hasil komputasi simulasi tersebut yang berupa gaya akan menjadi input dari simulasi struktur yang akan dikomputasi nilai tekanan dan menggunakan persamaan-persamaan dan fenomena-fenomena di matriks FSI. Adapun penjelasan mengenai diagram alir pengerjaan tugas akhir yang dijelaskan pada Gambar 3.1 ini antara lain:

3.1 Studi Literatur

Studi literatur bertujuan untuk memperoleh referensi-referensi yang terkait dalam pengerjaan dan penyusunan tugas akhir, seperti hidrodinamika VAHT - SBC, hidroelastisitas pada *blade*, material *blade* yang bersumber dari buku (*handbook*), jurnal ilmiah, penelitian sebelumnya seperti tugas akhir dan tesis yang relevan dengan topik permasalahan yang dibutuhkan guna menunjang proses pengerjaan dan pengembangan pada penelitian ini. Selain itu poin pembaruan dan originalitas menjadi acuan alasan untuk melakukan kajian pustaka secara teliti dan mendalam khususnya pada hidroelastisitas turbin.

3.2 Pengumpulan Data dari Penelitian Sebelumnya

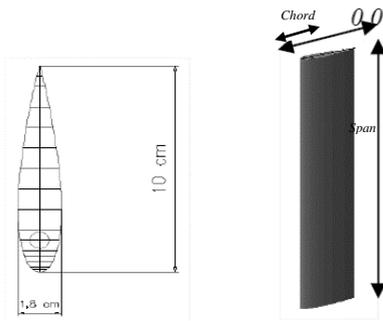
Data spesifikasi geometri, material turbin, profil aliran, serta profil kinetic turbin dibutuhkan dalam pengerjaan tugas akhir ini. Tujuannya adalah agar mempermudah pengerjaan dalam mensimulasikan beban dinamik terhadap *straight blade cascaded* (SBC) dengan CFD.

3.2.1 Profil Turbin

Turbin yang digunakan untuk simulasi ini merupakan turbin vertical axis SBC. Turbin ini pada setiap armnya memiliki 3 *blade*. Desain dari turbin vertical axis dengan dimensi 80x80 cm ini dapat diamati pada Gambar 3.3 dan 3.4, dengan penjabaran ukuran parameter desain dijelaskan pada Tabel 3.1



Gambar 3.3 Desain Geometri VAHT SBC



Gambar 3.4 Desain Blade pada VAHT SBC

Tabel 3.1 Profil Geometri Turbin 80 x 80 cm

Diameter Turbin	80 cm
Jenis <i>Airfoil</i>	NACA 0018
Panjang <i>Chord Airfoil</i>	10 cm
Panjang <i>Span</i>	80 Cm
Jarak Antar <i>Blade</i>	10 cm
Tinggi <i>Shaft</i>	110 cm
Diameter <i>Shaft</i>	4 cm
Panjang <i>Arm</i>	40 cm
Tebal <i>Arm</i>	1 cm
Lebar <i>Arm</i>	10 cm

3.2.2 Material Turbin VAHT SBC

Material yang digunakan pada VAHT-SBC dapat dijabarkan pada Tabel 3.2 beserta profil setiap material, sebagai berikut:

Tabel 3.2 Material Turbin

Bagian Turbin	Nama Material	Profil Material
<i>Blade</i>	<i>Carbon Fiber</i>	Massa Jenis: 1800 kg/m ³ Poisson Ratio : 0,2 Modulus Young : 2,28 x 10 ¹¹ Pa Tensile Yield Strength : 4 x 10 ⁹ Pa
Sisipan Plat di dalam <i>Blade</i>	<i>Structural Steel</i>	Massa Jenis: 7750 kg/m ³ Poisson Ratio : 0,31 Modulus Young : 1,93 x 10 ¹¹ Pa Tensile Yield Strength : 4,48 x 10 ⁹ Pa
<i>Arm</i>	<i>Structural Steel</i>	Massa Jenis: 7750 kg/m ³ Poisson Ratio : 0,31 Modulus Young : 1,93 x 10 ¹¹ Pa Tensile Yield Strength : 4,48 x 10 ⁹ Pa
<i>Shaft</i>	<i>Structural Steel</i>	Massa Jenis: 7750 kg/m ³ Poisson Ratio : 0,31 Modulus Young : 1,93 x 10 ¹¹ Pa Tensile Yield Strength : 4,48 x 10 ⁹ Pa

3.2.3 Profil Aliran Fluida

Fluida yang mengalir menuju turbin diambil data profilnya agar dapat mensimulasikan profil turbin dan aliran setelah turbin terkena fluida. Profil aliran pada penelitian sebelumnya dijabarkan pada Tabel 3.3

Tabel 3.3 Profil Aliran Fluida

Parameter	Nilai
Kecepatan <i>Inlet</i>	1,2 m/s
Kecepatan <i>Outlet</i> (Pada 0,5m dari turbin)	0,69 m/s

3.2.4 Profil Kinetik Turbin pada Kecepatan inlet 1,2 m/s

Fluida yang mengenai turbin menyebabkan turbin bergerak, parameter pergerakan turbin yang harus diketahui untuk dapat disimulasikan fluidanya adalah nilai kecepatan putar dan torsi. Nilai kedua parameter tersebut pada penelitian sebelumnya dijabarkan pada Tabel 3.4

Tabel 3.4 Profil Kinetik Turbin Pada Kecepatan *Inlet* 1,2 m/s

Parameter	Nilai
Kecepatan Putar	60,67 rpm
Torsi	30,18 Nm

3.3 Simulasi CFD Pada VAHT SBC 3 Arm

Pada tahap simulasi CFD VAHT SBC 3 Arm secara garis besar parameter dan nilai yang telah dikumpulkan akan disimulasikan fluidanya dengan CFD. Output pada simulasi ini adalah nilai torsi, nilai torsi simulasi tersebut akan dibandingkan dengan nilai torsi pada penelitian sebelumnya. Untuk mendapatkan nilai tersebut pada simulasi ini dilakukan variasi dari ukuran *meshing* dengan model turbulensi guna mendapatkan pengaturan simulasi yang tepat untuk dapat mensimulasikan hidroelastisitas turbin dengan variasi material dan struktur ini. Matriks variasi dari simulasi validasi yang dilakukan dijabarkan pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Matriks Variasi Ukuran *Meshing* dan Modul Turbulensi Pada Simulasi Validasi

No	<i>Setting</i>	Model Turbulensi
1	<i>Coarse</i>	Laminar
2		K- ϵ
3		SST
4		<i>BSL Reynold Stress</i>
5		<i>SSG Reynold Stress</i>
6	<i>Medium</i>	<i>Laminar</i>
7		K- ϵ
8		SST
9		<i>BSL Reynold Stress</i>
10		<i>SSG Reynold Stress</i>
11	<i>Fine</i>	<i>Laminar</i>
12		K- ϵ
13		SST
14		<i>BSL Reynold Stress</i>
15		<i>SSG Reynold Stress</i>

3.4 Validasi Nilai Torsi dengan Penelitian Sebelumnya

Proses validasi yang dilakukan adalah dengan membandingkan nilai torsi hasil simulasi yang dilakukan pada poin 3.3 dengan torsi hasil eksperimen pada penelitian sebelumnya untuk menentukan ukuran mesh dan model turbulensi yang akan digunakan sebagai inisiasi pengaturan pada simulasi. Simulasi akan valid jika nilai selisih antara torsi simulasi dengan penelitian sebelumnya $\leq 10\%$.

3.5 Pembuatan Geometri VAHT SBC 1 Arm

Untuk mengurangi waktu simulasi FSI, maka model geometri dari VAHT SBC dengan 3 *arm* disederhanakan menjadi VAHT SBC 1 *arm* dengan tidak mengubah dimensi dari VAHT SBC. Desain geometri dari VAHT SBC 1 *arm* ini dapat diamati pada Gambar 3.5



Gambar 3.5 Geometri VAHT SBC dengan 1 *Arm*

3.6 Penentuan Variasi Material dan Struktur *Blade*

Pada turbin hidrokinetik, *blade* merupakan komponen penting. *Blade* harus didesain dan dikonstruksi dengan baik sehingga mampu mengekstrak energi dari air seoptimal mungkin. Sifat mekanik material seperti kekuatan, kekakuan menjadi salah satu factor desain turbin dalam hal struktur.

Untuk mendapatkan desain *blade* yang optimal berdasarkan sifat mekanik material maka pada pengerjaan tugas akhir ini dilakukan simulasi dengan variasi material dan struktur pada *blade*. Adapun variasi yang dilakukan pada pengerjaan tugas akhir ini dapat diamati pada berdasarkan variasi material dan struktur pada *blade* matriks variasi dari variasi material dan struktur dapat diamati pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Matriks Variasi Material dan Struktur

Desain	Struktur	Bagian	Material
1	<i>Solid</i>	<i>Blade</i>	<i>Carbon Fiber</i>
2			<i>E Glass Fiber</i>
3			<i>S Glass Fiber</i>
4			<i>Carbon FRP</i>
5			<i>E Glass FRP</i>
6			<i>S Glass FRP</i>
7	<i>Solid dengan Plat</i>	<i>Blade</i>	<i>Carbon Fiber</i>
8		<i>Plat</i>	<i>Stainless Steel</i>
		<i>Blade</i>	<i>E Glass Fiber</i>
9		<i>Plat</i>	<i>Stainless Steel</i>
		<i>Blade</i>	<i>S Glass Fiber</i>
10		<i>Plat</i>	<i>Stainless Steel</i>
		<i>Blade</i>	<i>Carbon FRP</i>
11		<i>Plat</i>	<i>Stainless Steel</i>
		<i>Blade</i>	<i>E Glass FRP</i>
12		<i>Plat</i>	<i>Stainless Steel</i>
		<i>Blade</i>	<i>S Glass FRP</i>
13		<i>Hollow (ketebalan blade 5 mm)</i>	<i>Blade</i>
14	<i>E Glass Fiber</i>		
15	<i>S Glass Fiber</i>		
16	<i>Carbon FRP</i>		
17	<i>E Glass FRP</i>		
18	<i>S Glass FRP</i>		
19	<i>Hollow (ketebalan blade 5 mm) dengan Plat</i>	<i>Blade</i>	<i>Carbon Fiber</i>
20		<i>Plat</i>	<i>Stainless Steel</i>
		<i>Blade</i>	<i>E Glass Fiber</i>
21		<i>Plat</i>	<i>Stainless Steel</i>
		<i>Blade</i>	<i>S Glass Fiber</i>
		<i>Plat</i>	<i>Stainless Steel</i>
		<i>Blade</i>	<i>Carbon FRP</i>

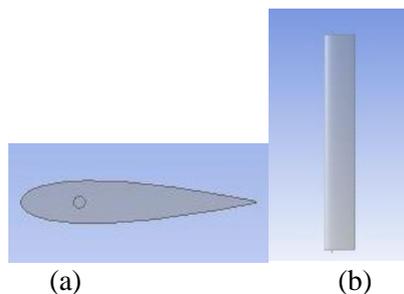
22		Plat	<i>Stainless Steel</i>
23		<i>Blade</i>	<i>E Glass FRP</i>
		Plat	<i>Stainless Steel</i>
24		<i>Blade</i>	<i>S Glass FRP</i>
	Plat	<i>Stainless Steel</i>	

3.6.1 Variasi Material pada *Blade*

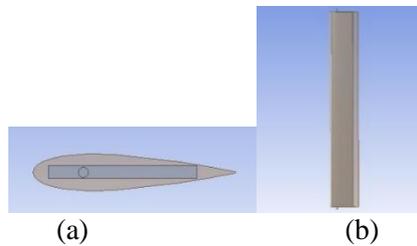
Variasi material yang digunakan pada simulasi ini adalah material *carbon fiber*, *electric glass fiber (e glass fiber)*, *structure glass fiber*, serta variasi material yang lain adalah serat-serat tersebut difabrikasi dengan resin (komposisi serat adalah 60%). Variasi material ini biasa disebut dengan *fiber reinforced polymers (FRP)*. Profil karakteristik dari material yang akan disimulasikan dapat diamati pada Tabel 3.7

3.6.2 Variasi Struktur Pada *Blade*

Selain variasi struktur, pada simulasi pengerjaan tugas akhir ini juga menggunakan variasi struktur *blade*. Variasi struktur *blade* yang digunakan dapat diamati pada Gambar 3.5 – 3.8.



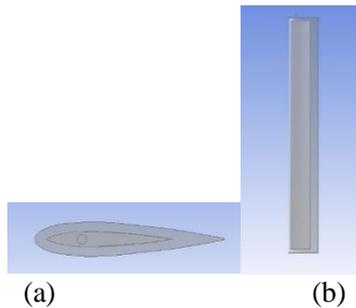
Gambar 3.6 Struktur *Solid Blade* Tampak (a) Atas (b) Samping



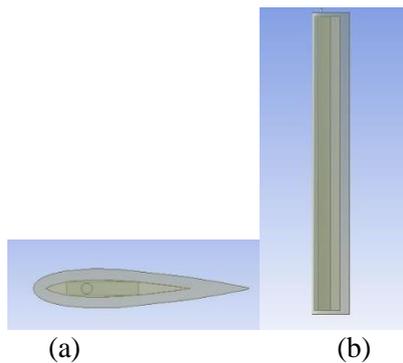
Gambar 3.7 Struktur *Solid* dengan Sisipan Plat Pada *Blade*
Tampak (a) Atas (b) Samping

Tabel 3.7 Variasi Material Pada Penelitian [16]

No	Nama Material	Profil Material
1	<i>Carbon Fiber</i>	Massa Jenis: 1800 kg/m ³ Poisson Ratio : 0,2 Modulus Young : 2,28 x 10 ¹¹ Pa <i>Tensile Yield Strength</i> : 4 x 10 ¹⁰ Pa
2	<i>E Glass Fiber</i>	Massa Jenis: 2540 kg/m ³ Poisson Ratio : 0,22 Modulus Young : 7,2 x 10 ¹⁰ Pa <i>Tensile Yield Strength</i> : 3,44 x 10 ¹⁰ Pa
3	<i>S Glass Fiber</i>	Massa Jenis: 2490 kg/m ³ Poisson Ratio : 0,22 Modulus Young : 8,6 x 10 ¹⁰ Pa <i>Tensile Yield Strength</i> : 4,48 x 10 ¹⁰ Pa
4	<i>Carbon FRP</i> (60% Carbon <i>Fiber</i> , 40% <i>Epoxy</i>)	Densitas: 1580 kg/m ³ Poisson Ratio : 0,25 Modulus Young: 1,45 x 10 ¹¹ Pa <i>Tensile Yield Strength</i> : 1,24 x 10 ⁹ Pa
5	<i>E Glass FRP</i> (60% <i>S Glass</i> <i>Fiber</i> , 40% <i>Epoxy</i>)	Densitas: 2100 kg/m ³ Poisson Ratio : 0,28 Modulus Young: 4,5 x 10 ¹⁰ Pa <i>Tensile Yield Strength</i> : 6,2 x 10 ⁸ Pa
6	<i>S Glass FRP</i> (60% <i>S Glass Fiber</i> , 40% <i>Epoxy</i>)	Massa Jenis: 2000 kg/m ³ Poisson Ratio : 0,28 Modulus Young : 5,5 x 10 ¹⁰ Pa <i>Tensile Yield Strength</i> : 6,9 x 10 ⁸ Pa



Gambar 3.8 Struktur *Hollow* Pada *Blade* Tampak (a) Atas (b) Samping



Gambar 3.9 Struktur *Hollow* dengan Sisipan Plat pada *Blade* Tampak (a) Atas (b) Samping

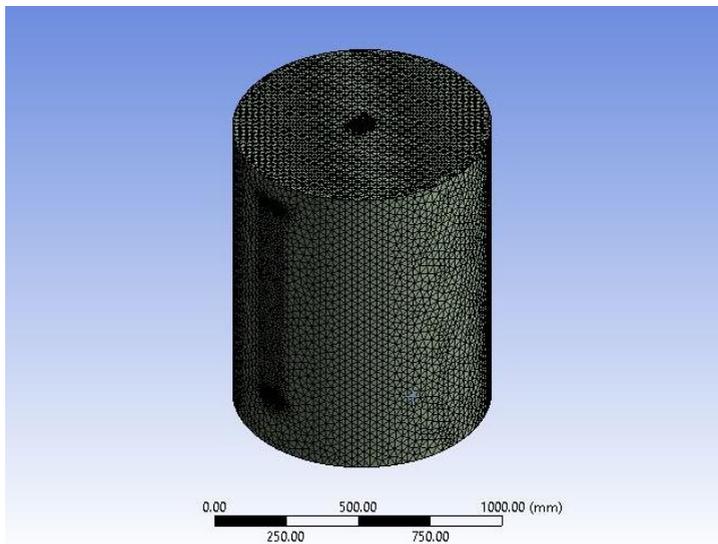
3.7 Simulasi Fluida (CFD) Pada VAHT SBC 1 Arm

Pada proses ini dilakukan simulasi fluida dengan CFD berdasarkan geometri turbin 1 arm pada Gambar 3.3. Adapun pada inisiasi pengaturan simulasi yang akan dilakukan telah berdasarkan pengaturan yang telah tervalidasi dari simulasi validasi yang telah dilakukan sebelumnya. Simulasi Fluida (CFD) dinyatakan berhasil ketika simulasi tersebut telah mencapai kondisi konvergen. Kondisi konvergen yang artinya proses perhitungan dari iterasi-iterasi pada simulasi memiliki nilai yang

konvergen. Hasil dari simulasi CFD ini antara gaya, torsi dan tekanan yang terjadi pada turbin. Data - data hasil simulasi CFD tersebut kemudian akan sebagai input beban dinamik pada simulasi struktur di CFD.

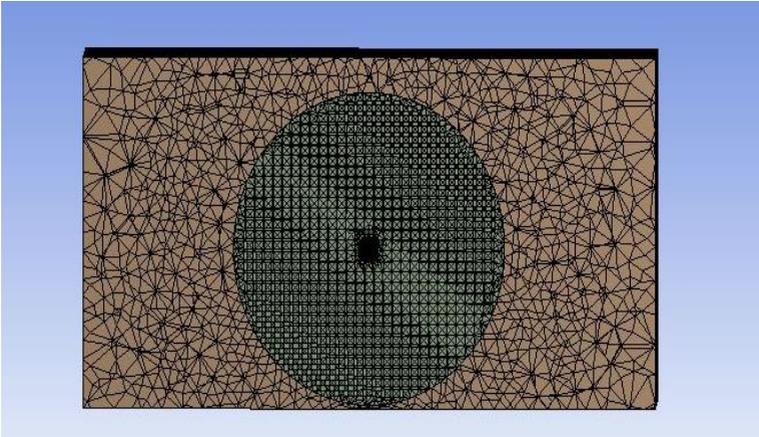
3.7.1 Domain Fluida pada Kanal Terbuka

Pada simulasi fluida, pembuatan domain menjadi aspek penting dalam simulasi. Untuk merepresentasikan turbin yang berputar, maka perlu dibuat domain tabung pada domain fluida. Dimensi diameter, tinggi tabung dari domain tabung tersebut berturut – turut adalah 0,45 m dan 1.1 m.



Gambar 3.10 Domain Tabung

Domain kanal terbuka berbentuk balok dengan lubang berbentuk tabung. Lubang tersebut memiliki dimensi yang sama dengan domain tabung. Jarak antara upstream atau downstream dengan turbin secara berturut-turut adalah 0,5m



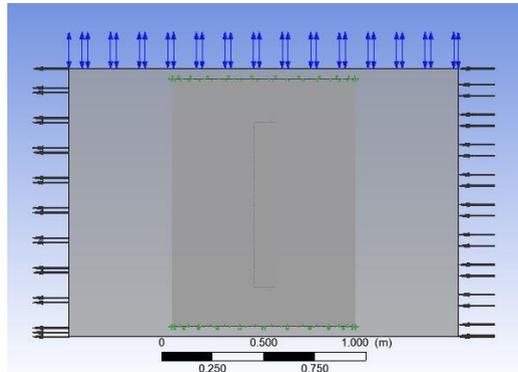
Gambar 3.11 Domain Kanal Terbuka

3.7.2 Meshing

Meshing merupakan proses membagi geometri yang telah dibuat menjadi bagian-bagian kecil yang disebut sebagai *control volume*. Persamaan konservasi energi, massa, momentum dan persamaan lain diterapkan di masing-masing *control volume*. Ukuran mesh sangat menentukan seberapa valid hasil simulasi. Semakin kecil *mesh* yang digunakan, maka semakin tinggi pula akurasi. Namun *mesh* yang semakin kecil komputasi yang harus dilakukan akan semakin berat. Gambar 3.9 menunjukkan, *meshing* pada geometri yang sudah dibuat. *Mesh size* yang digunakan adalah minimum *mesh* sebesar 1 mm dan maksimum sebesar 200 mm. Dari gambar tersebut terlihat bahwa, daerah yang dekat dengan turbin memiliki ukuran *mesh* yang lebih kecil.

3.7.2 Boundary Condition

Simulasi ini dilakukan pada kanal terbuka dengan *boundary condition* yang dijelaskan pada Gambar 3.11. Dan Tabel 3.8 Pemilihan kondisi batas harus tepat untuk mendapatkan hasil yang valid. Kondisi batas harus sesuai dengan kondisi benda dan lingkungan yang disimulasikan



Gambar 3.12 Domain Fluida Serta *Boundary Condition* dari Simulasi Fluida

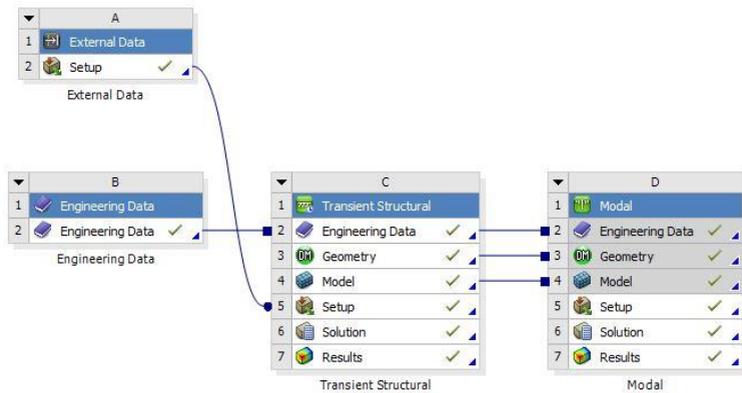
Tabel 3.8 *Boundary Condition* pada Simulasi Fluida (CFD)

Kondisi Batas	Keterangan
<i>Inlet</i>	<i>Inlet</i> Kecepatan : 1,2 m/s
<i>Outlet</i>	<i>Outlet</i> Kecepatan: 0,69 m/s
Sisi Atas	<i>Opening:</i> <i>Pressure : 1 atm</i>
Sisi Bawah	<i>Wall – no slip</i>
Sisi Samping	<i>Wall – no slip</i>
Turbin	<i>Rotating Wall – no slip</i>

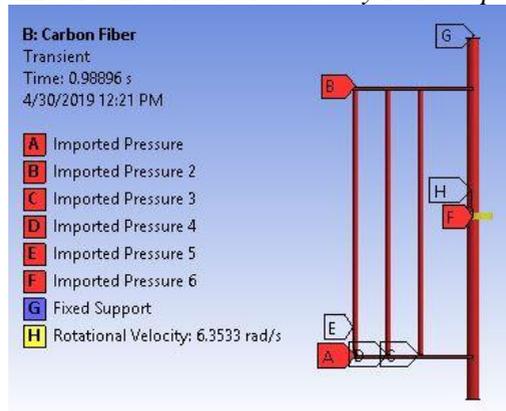
3.8 Simulasi Struktur (CFD) Pada VAHT SBC 1 Arm

Simulasi struktur ini merupakan salah satu bagian FSI yangmana data-data beban dinamik tersebut menjadi inisiasi pengaturan kondisi batas struktur turbin. *Setup* simulasi struktur dengan metode FSI *one-way coupling* dijelaskan pada Gambar 3.12. Metode tersebut menggunakan interaksi beban dinamik fluida pada turbin terhadap struktur turbin sebagai kondisi batas beban kemudian pada simulasi struktur akan menghitung nilai

deformasi, stress, strain frekuensi serta modal. Inisiasi pengaturan kondisi batas turbin yang digunakan pada penelitian ini dapat diamati pada Gambar 3.13. Beban dinamik pada *arm* atas, *arm* bawah, *blade* dalam, *blade* tengah, *blade* luar serta *shaft* secara berturut turut pada Gambar dinyatakan dengan bagian A, B, C, D, E, F. Kemudian pada bagian G sisi atas *shaft* merupakan *fixed support*



Gambar 3.13 Simulasi *One-Way FSI Coupling*



Gambar 3.14 Kondisi Batas pada Simulasi Struktural

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Validasi Hasil Simulasi

Tabel 4.1 Validasi Nilai Torsi Simulasi CFD dengan Eksperimen dari Penelitian Sebelumnya

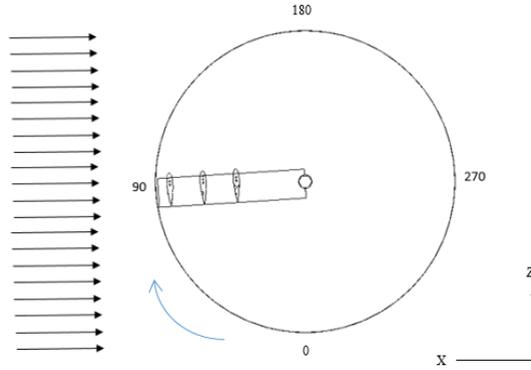
<i>Setting Relevance Center</i>	Jumlah Elemen	<i>Skewness</i>	Model Turbulensi	Torsi Simulasi (Nm)	Selisih (%)
<i>Coarse</i>	3141062	0,57	<i>Laminar</i>	20	33,73
			K- ϵ	22,5	25,45
			SST	25,4	15,84
			<i>BSL Reynold Stress</i>	23,6	21,80
			<i>SSG Reynold Stress</i>	24,7	18,15
<i>Medium</i>	3512214	0,48	<i>Laminar</i>	25,30	16,16
			K- ϵ	26,23	13,10
			SST	29,22	3,18
			<i>BSL Reynold Stress</i>	26,4	12,52
			<i>SSG Reynold Stress</i>	25,8	14,51
<i>Fine</i>	4862183	0,3	<i>Laminar</i>	27	10,54
			K - ϵ	28	7,22
			SST	29,3	2,91
			<i>BSL Reynold Stress</i>	28,6	5,23
			<i>SSG Reynold Stress</i>	26,2	13,18

Penentuan setting meshing dan model turbulensi dilakukan pada tahapan simulasi CFD. Validasi model turbulen dan meshing

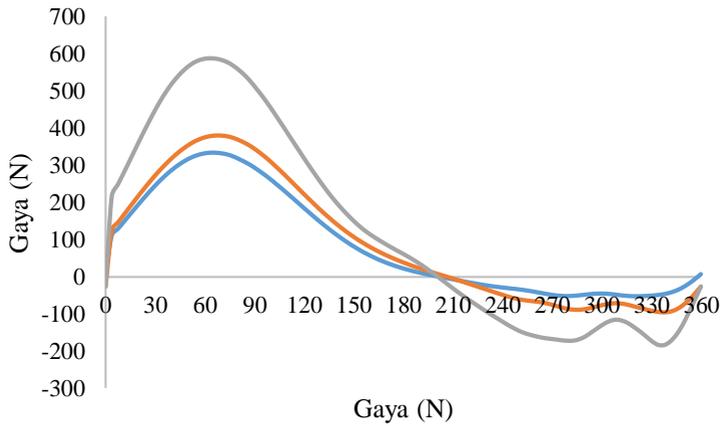
bertujuan untuk menentukan model turbulen dan meshing yang sesuai dengan keadaan nyata. Aspek validasi berupa nilai torsi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi berupa torsi dengan nilai torsi pada hasil eksperimen yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya yaitu sebesar 30,18 Nm pada kecepatan inlet dan outlet aliran fluida berturut – turut 1,2 m/s, 0 m/s, dengan kecepatan putar 60,67 rpm [17]. Adapun pada Tabel 4.1 menunjukkan perbandingan nilai torsi simulasi dengan torsi penelitian sebelumnya. Pada hasil validasi tersebut dapat diamati bahwa meshing fine dengan model turbulen SST merupakan hasil yang mendekati dengan eksperimen/penelitian sebelumnya dengan error yang dihasilkan adalah 2,91%. Model turbulen ini merupakan model turbulen gabungan antara $k - \omega$ dan $k - \varepsilon$

4.2 Dinamika Gaya Pada *Blade*

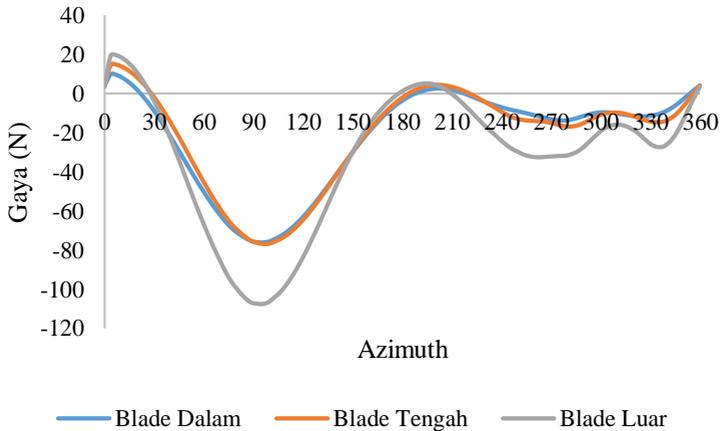
Dinamika gaya pada *blade* didapatkan melalui simulasi CFD. Tinjauan posisi *blade* dan sudut azimuthnya ditunjukkan pada Gambar 4.1. Hasil dinamika gaya pada 3 *blade* yang disusun *cascaded* disampaikan secara grafik terhadap sudut azimuth. Gaya yang terjadi pada sumbu Z (F_z) ditampilkan pada Gambar 4.2. Gaya ini memiliki pola nilai F_z bertambah mengikuti besarnya sudut azimuth kemudian berkurang, puncak terjadi pada sudut $0 < \theta < 90$. Hal ini dikarenakan sudut serang antara aliran dengan *blade*. Sedangkan gaya yang terjadi pada sumbu x ditunjukkan pada Gambar 4.3. Gaya yang terjadi pada sumbu x (F_x) yang dihasilkan dari simulasi memiliki nilai negatif karena arah dari gaya tersebut berlawanan dengan arah sumbu positif x. Nilai puncak negatif dari F_x terletak pada $30 < \theta < 150$.



Gambar 4.1 Arah Putar dan Azimuth Turbin

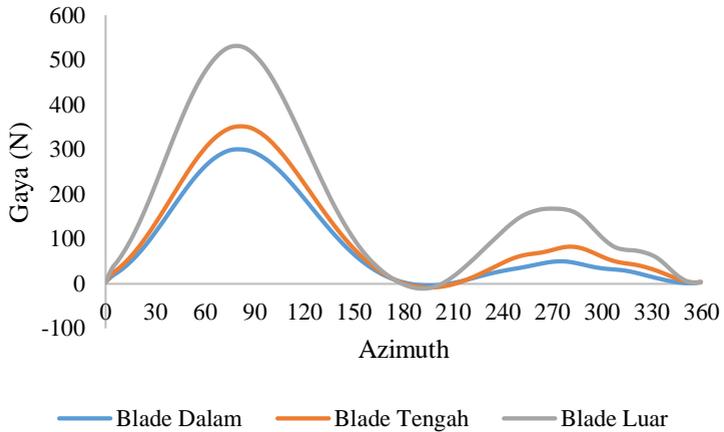


Gambar 4.2 Gaya yang Terjadi Pada Sumbu Z Terhadap Sudut Azimuth

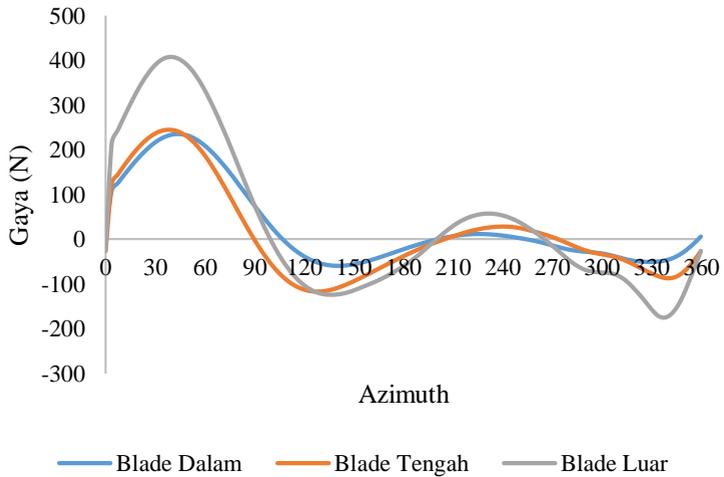


Gambar 4.3 Gaya yang Terjadi Pada Sumbu X Terhadap Sudut Azimuth

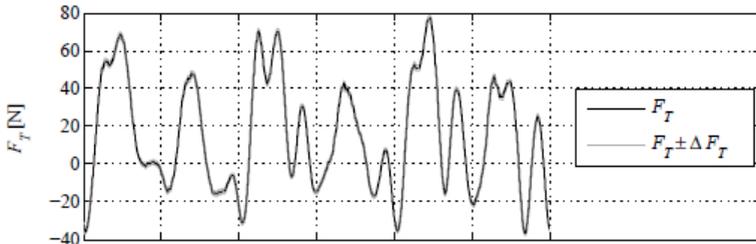
Gaya tangensial (F_T) merupakan resultan dari gaya *lift* (F_L) dan gaya *drag* (F_D) yang searah dengan arah gerak turbin. Gaya ini dalam perhitungan digunakan untuk mengestimasi daya turbin. Sementara gaya normal merupakan resultan dari F_L dan F_D yang memiliki arah radial. Nilai F_N mewakili beban dinamik pada *blade* [18]. Pada simulasi yang telah dilakukan gaya tangensial dan gaya normal secara berturut-turut ditunjukkan pada Gambar 4.4 dan 4.5. Pola gaya tangensial dan normal yang sama juga dihasilkan oleh Morgan Rossander pada penelitiannya pada Gambar 4.6 dan 4.7 [18]. Pada penelitian morgan tersebut menggunakan turbin dengan *blade* yang disusun pada sudut 120 antar *bladenya*, sehingga terdapat tiga buah puncak pada penelitiannya. Sementara pada penelitian ini menggunakan 3 *blade* yang disusun secara *cascaded* sehingga hanya terdapat 1 puncak.



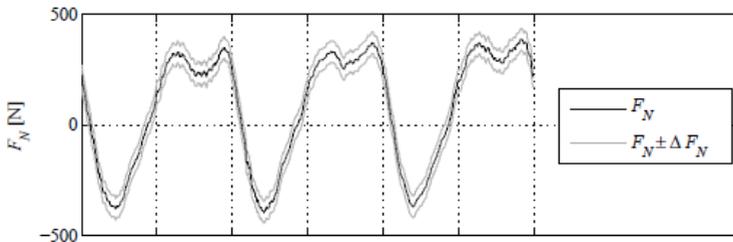
Gambar 4.4 Gaya Tangensial SBC pada Kecepatan Aliran 1,21 m/s



Gambar 4.5 Gaya Normal SBC Pada Kecepatan Aliran 1,21 m/s



Gambar 4.6 Gaya Tangensial Pada Penelitian Morgan [18]

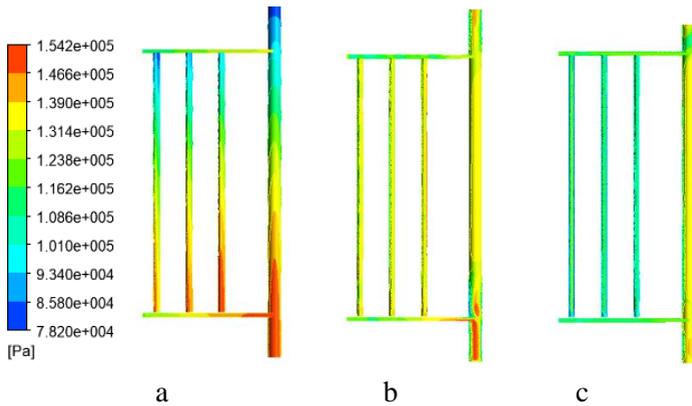


Gambar 4.7 Gaya Normal pada Penelitian Morgan [18]

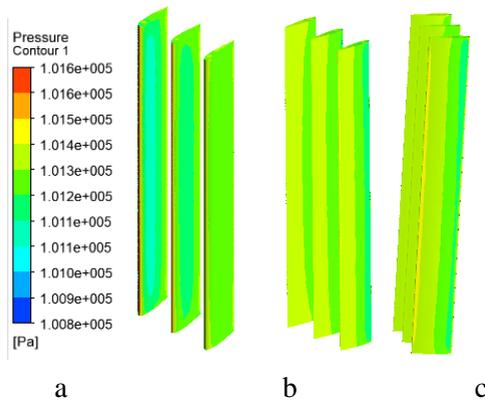
4.2 Persebaran Tekanan pada *Blade*

Keretakkan yang terjadi pada *blade* bisa disebabkan oleh beberapa faktor, salah satunya adalah gaya hidrodinamika yang bekerja pada *blade*. Keretakan ini dapat disebabkan kelelahan material karena menerima beban secara terus menerus. Untuk itulah pada penelitian ini akan dimodelkan gaya yang bekerja pada *blade*, gaya tersebut akan ditransfer berupa tekanan yang bekerja pada *blade*. Tekanan yang dialami pada turbin akan mempengaruhi beban dinamik yang terjadi. Simulasi beban dinamik fluida dari CFD dilakukan tiga kali yaitu pada keadaan SBC terhubung dengan *arm shaft*, keadaan SBC *stand alone*, terakhir pada keadaan *blade* tunggal yang masing – masing mewakili posisi blade pada SBC. *Blade – blade* tunggal ini kemudian dinyatakan dengan *blade 1*, *blade 2* dan *blade 3* untuk

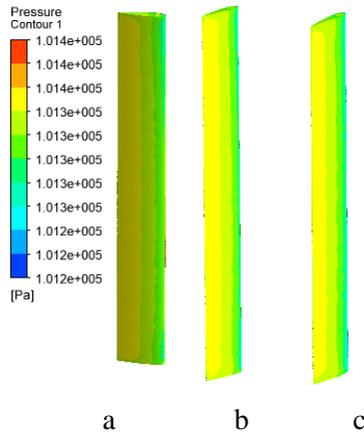
posisi berturut turut adalah *blade* luar, *blade* tengah, *blade* dalam pada SBC.



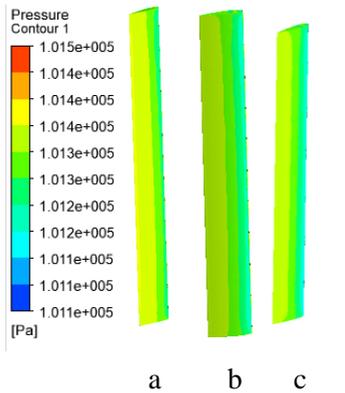
Gambar 4.8 Persebaran Tekanan SBC, Arm, Shaft. a) sudut azimuth 7.2° b) sudut azimuth 180° c) sudut azimuth 360°



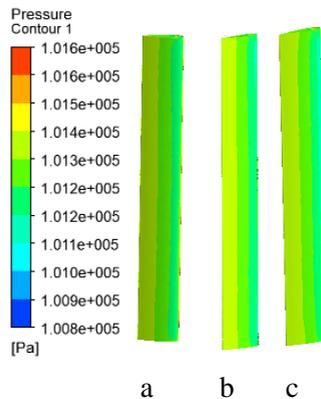
Gambar 4.9 Persebaran Tekanan SBC Stand Alone. a) sudut azimuth 7.2° b) sudut azimuth 180° c) sudut azimuth 270°



Gambar 4.10 Persebaran Tekanan pada *Blade 1 Stand Alone*. a) sudut azimuth 7.2° b) sudut azimuth 180° c) sudut azimuth 270°



Gambar 4.11 Persebaran Tekanan pada *Blade 2 Stand Alone*. a) sudut azimuth 7.2° b) sudut azimuth 180° c) sudut azimuth 270°



Gambar 4.12 Persebaran Tekanan pada *Blade 3 Stand Alone*. a) sudut azimuth 7.2° b) sudut azimuth 180° c) sudut azimuth 270°

Pada Gambar 4.8 - 4.12 merupakan profil distribusi yang terjadi pada azimuth 90° , 180° , 270° berturut-turut pada keadaan 1, keadaan 2 dan keadaan 3. Hasil simulasi keadaan 1 ini menunjukkan bahwa pada bagian bawah memiliki beban terbesar yaitu $1,54 \times 10^5$ Pa. Hal ini dapat terjadi karena bagian bawah terjadi interaksi antara fluida dengan dinding yang berada pada kondisi batas simulasi. Pada keadaan kedua beban dinamik pada *SBC Stand Alone* memiliki nilai tekanan yang lebih rendah sebesar $1,016 \times 10^5$ Pa. Sedangkan pada keadaan ketiga yaitu keadaan *blade tunggal stand alone*, masing-masing *blade* memiliki nilai yang hampir sama yaitu nilai maksimum tekanan berturut-turut sebesar $1,014 \times 10^5$ Pa, $1,015 \times 10^5$ Pa dan $1,016 \times 10^5$ Pa. Adapun jika simulasi pada keadaan ketiga ini dibandingkan dengan simulasi pada keadaan kedua untuk dapat mengetahui pengaruh susunan *SBC* pada keadaan ketiga dibandingkan dengan tidak disusun *SBC* pada masing – masing *blade* sebagai berikut *blade* ketiga yang memiliki posisi *blade* dalam jika pada *SBC* memiliki nilai tekanan yang lebih tinggi daripada *SBC* pada keadaan kedua hal ini terjadi karena *blade* dalam pada *SBC* interaksi yang terjadi

antara inlet dengan blade telah terdisturbansi oleh *blade* yang lain. Sehingga nilai tekanan pada bagian terluar SBC akan lebih rendah.

4.3 Pengaruh Variasi Material *Blade* yang Terhubung dengan *Arm* Terhadap Karakteristik Mekanik Material dan Respon Moda

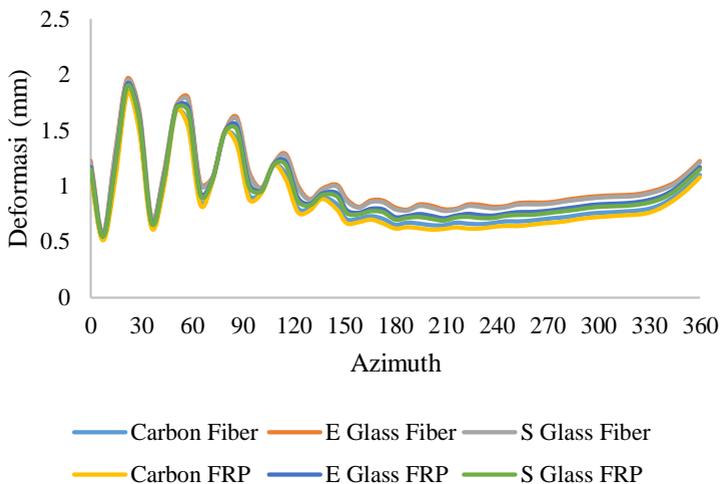
Pada bagian ini akan dianalisa pengaruh variasi material dari desain blade pada struktur *solid*, *solid* dengan sisipan plat, *hollow* dan *hollow* dengan sisipan plat. Pada hasil simulasi penelitian ini parameter yang dianalisa adalah karakteristik mekanik material seperti deformasi, maksimum *strain*, maksimum *stress* dan respon getaran seperti frekuensi natural dan bentuk moda.

4.3.1 Struktur *Solid*

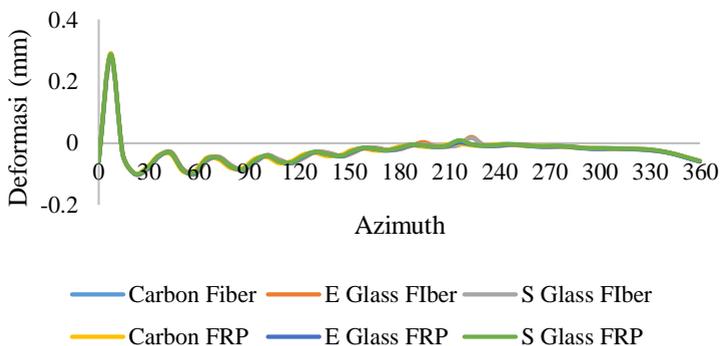
Pada proses ekstraksi energi air oleh turbin, *blade* berperan sebagai komponen penting. *Blade* telah didesain sedemikian rupa untuk dapat mengekstraksi energi dengan optimal. Namun pada saat proses tersebut, beban dinamik yang bekerja terhadap *blade* akan dapat menyebabkan terjadinya deformasi. Total deformasi merupakan total keseluruhan deformasi yang terjadi dari arah sumbu x, y, dan z. Adanya deformasi pada *blade* ini rentan dapat menyebabkan turunnya kinerja *blade*. Selama blade beroperasi selama 1 putaran yang dapat diamati pada Gambar 4.13 *blade* mengalami nilai resultan deformasi yang meningkat dan kemudian menurun seiring dengan semakin besarnya sudut azimuth, puncak deformasi terjadi pada $0 < \theta < 120$. Hal ini sesuai dengan beban dinamik maksimum yang terjadi pada sudut tersebut. Secara garis besar perbedaan nilai deformasi SBC dari tiap material penyusun *blade* relatif kecil. Deformasi rata-rata minimum terdapat pada material *carbon fiber* sebesar 0,89 mm dan nilai deformasi terbesar terjadi pada material e *glass frp* sebesar 1,03 mm.

Untuk mengetahui arah deformasi yang maksimum, deformasi pada setiap sumbu x, y dan z diambil dan ditampilkan pada Gambar 4.14 – 4.16. Berdasarkan hasil simulasi tersebut

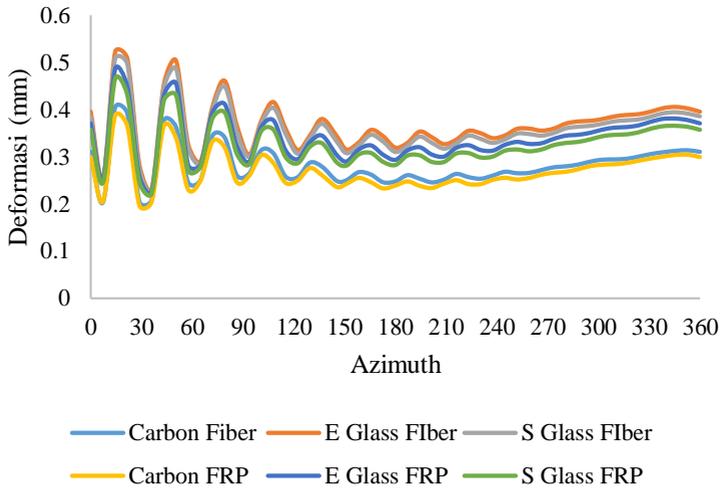
dapat terlihat bahwa pada sumbu z memiliki nilai deformasi yang terbesar dibandingkan sumbu yang lain, dengan nilai puncak deformasi maksimum sebesar 1,2 mm.



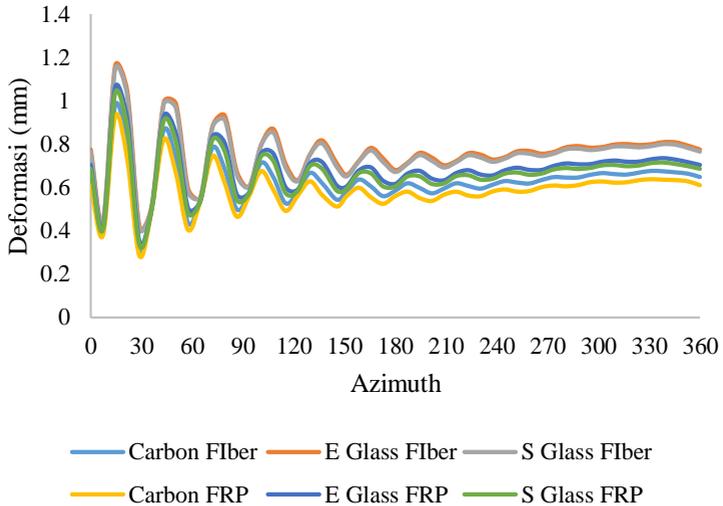
Gambar 4.13 Pengaruh Variasi Material Pada Struktur *Solid* Terhadap Deformasi SBC



Gambar 4.14 Pengaruh Perubahan Material Penyusun Pada Struktur *Solid* SBC Terhadap Deformasi Sumbu X

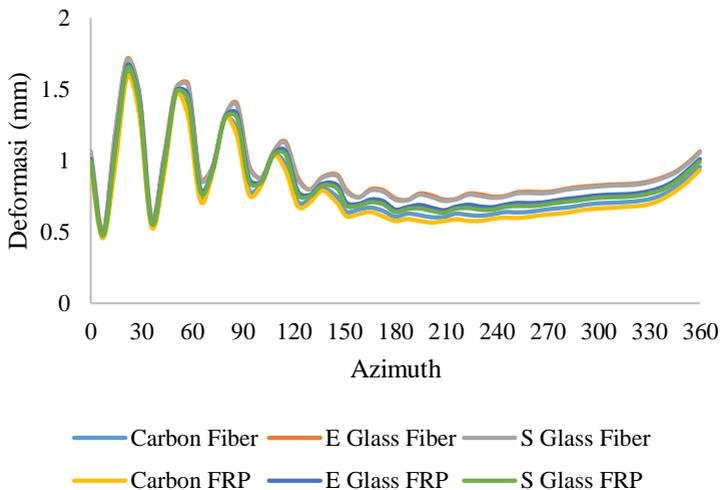


Gambar 4.15 Pengaruh Perubahan Material Penyusun Pada Struktur *Solid SBC* Terhadap Deformasi Sumbu Y

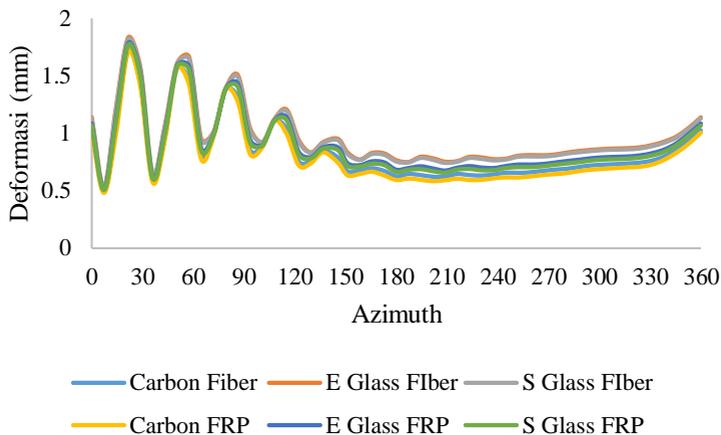


Gambar 4.16 Pengaruh Perubahan Material Penyusun Pada Struktur *Solid SBC* Terhadap Deformasi Sumbu Z

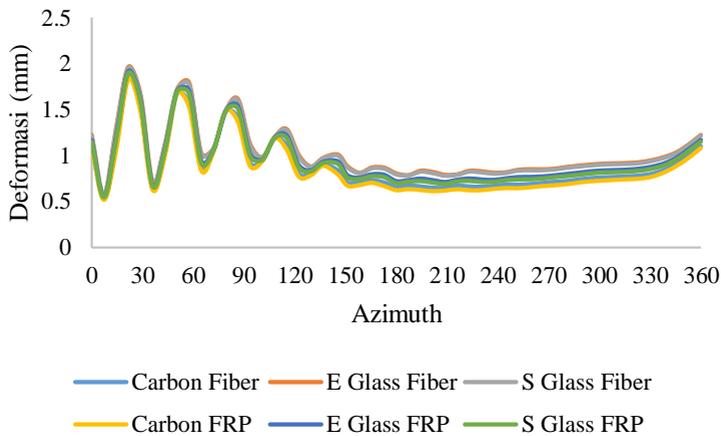
Nilai deformasi yang terjadi pada setiap blade dari SBC yaitu blade dalam, blade tengah dan blade luar dijabarkan pada Gambar 4.17 - 4.19 Pada masing-masing grafik tersebut dapat diamati bahwa pola deformasi setiap blade sama namun dengan nilai maksimum deformasi blade yang terjadi berbeda yaitu 1,75 mm, 1,8 mm dan 2 mm berturut-turut pada *blade* luar, *blade* tengah, dan *blade* dalam. Berdasarkan nilai tersebut terlihat bahwa *blade* luar memiliki nilai deformasi maksimum dikarenakan pada *blade* ini yang berinteraksi dengan kecepatan aliran terlebih dahulu daripada *blade* yang lain. Sehingga pada *blade* ini akan dianalisis nilai deformasi yang terjadi sepanjang span bladenya yang ditunjukkan pada Gambar 4.20. Bagian bawah *blade* yaitu pada panjang span 80 cm memiliki nilai deformasi terbesar karena pada simulasi yang dilakukan menggunakan 1 *fixed support* pada bagian atas.



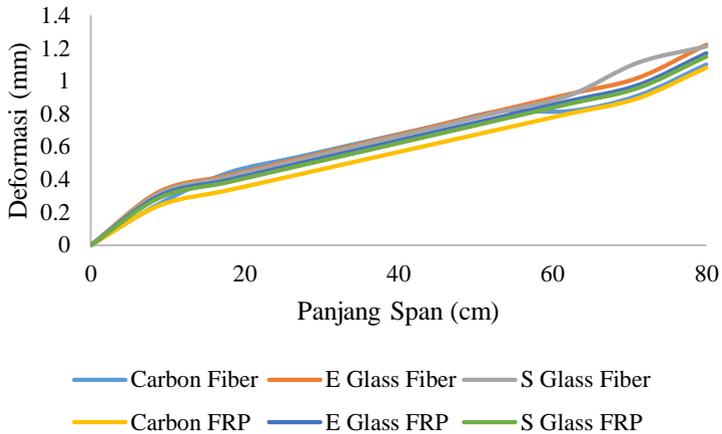
Gambar 4.17 Pengaruh Variasi Material Pada Struktur *Solid* Terhadap Deformasi *Blade* Dalam



Gambar 4.18 Pengaruh Variasi Material Pada Struktur *Solid* Terhadap Deformasi *Blade* Tengah

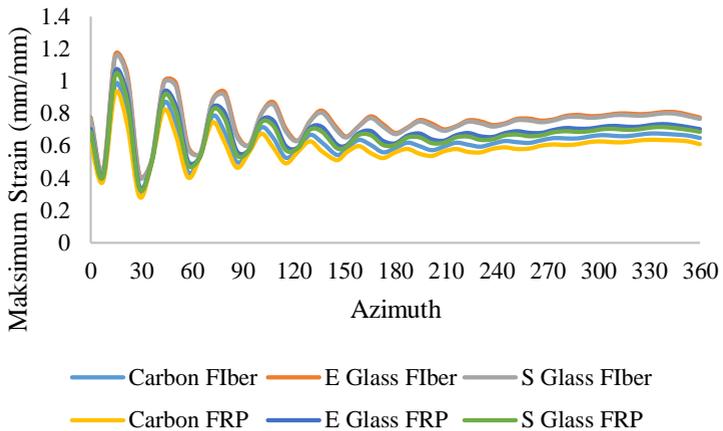


Gambar 4.19 Pengaruh Variasi Material Pada Struktur *Solid* Terhadap Deformasi *Blade* Luar

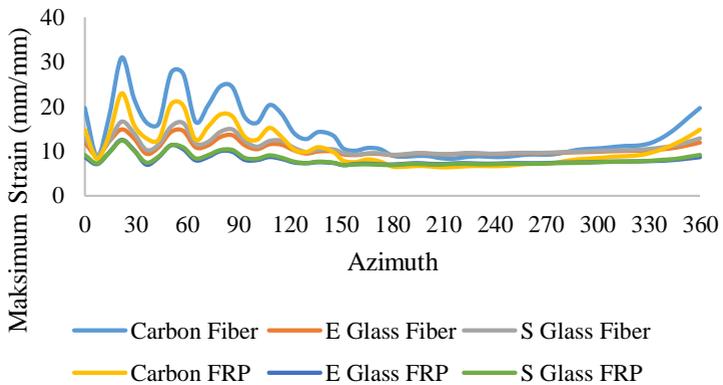


Gambar 4.20 Pengaruh Variasi Material Pada Struktur *Solid* Terhadap Deformasi Sepanjang Span *Blade*

Pada Gambar 4.21 dan 4.22 menunjukkan pengaruh dari perubahan variasi material penyusun *blade* terhadap maksimum SBC strain dan maksimum stress. Selama satu putaran, dapat diamati terjadi kenaikan nilai maksimum stress dan maksimum strain pada sudut azimuth $0 < \theta < 120$. Hal ini dapat terjadi karena beban dinamik terbesar terjadi pada sudut tersebut. Nilai maksimum strain terkecil yang terjadi pada SBC terdapat pada carbon FRP yaitu sebesar 0,7 mm dan maksimum strain terbesar adalah material fiber *e glass FRP*. Sementara itu nilai maksimum stress terbesar terdapat pada material *carbon fiber* sebesar 20 MPa, dan nilai maksimum stress terkecil pada material *e glass FRP* yaitu sebesar 10 MPa.



Gambar 4.21 Pengaruh Variasi Material Terhadap Maksimum *Strain Blade* Terhadap Sudut Azimuth pada Struktur *Solid*



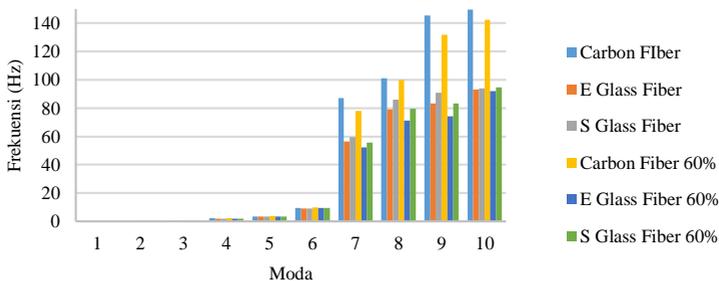
Gambar 4.22 Pengaruh Variasi Material Terhadap Maksimum *Stress Blade* Terhadap Sudut Azimuth pada Struktur *Solid*

Gambar 4.23 menjelaskan mengenai pengaruh variasi material terhadap struktur solid. Dapat diamati bahwa material carbon memiliki nilai frekuensi yang lebih tinggi dibandingkan

material lainnya pada setiap moda. Pada paper yang ditulis oleh Chi Chen, mengatakan bahwa resonansi pada turbin dapat terjadi jika frekuensi natural memiliki nilai yang sama dengan frekuensi angular [19] Pada bidang fisika kecepatan angular atau ω juga merupakan frekuensi angular yang dinyatakan dengan persamaan 4.1 pada vektor perpindahan dan persamaan 4.2 pada vektor frekuensi natural. Berdasarkan penelitian sebelumnya kecepatan putar turbin yang digunakan pada simulasi adalah 60,67 rpm. Nilai kecepatan putar ini jika menggunakan persamaan 4.1 dan 4.2 didapatkan bahwa frekuensi dari putaran turbin ini sebesar 1,02 Hz. Pada Tabel 4.2 menunjukkan nilai frekuensi dan bentuk moda dari simulasi. Berdasarkan tabel tersebut struktur *solid* berpotensi mengalami resonansi dikarenakan nilai frekuensi natural pada moda ke 4 memiliki nilai yang mendekati frekuensi dari putaran turbin, selisih frekuensi ± 1 Hz yangmana mendekati dengan nilai frekuensi dari putaran turbin. Apabila terdapat nilai frekuensi system yang sama dengan frekuensi alami maka akan terjadi resonansi. Resonansi tersebut akan dapat mengakibatkan osilasi terus menerus. Adapun bentuk moda yang terjadi pada moda 1-3 gerakan yang terjadi adalah *rigid* sementara pada moda berikutnya defleksi mulai terjadi.

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (4.1)$$

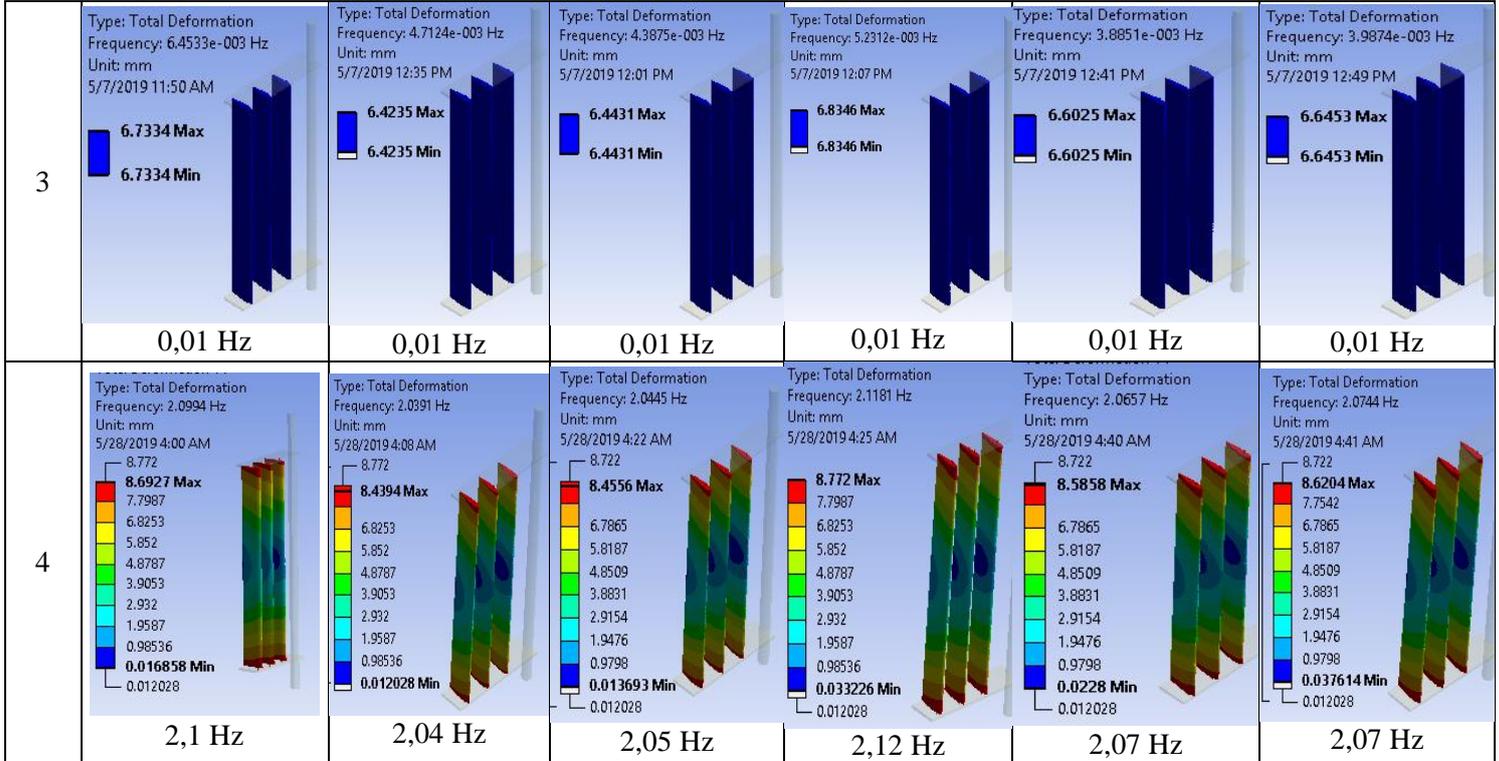
$$\omega = 2\pi f \quad (4.2)$$

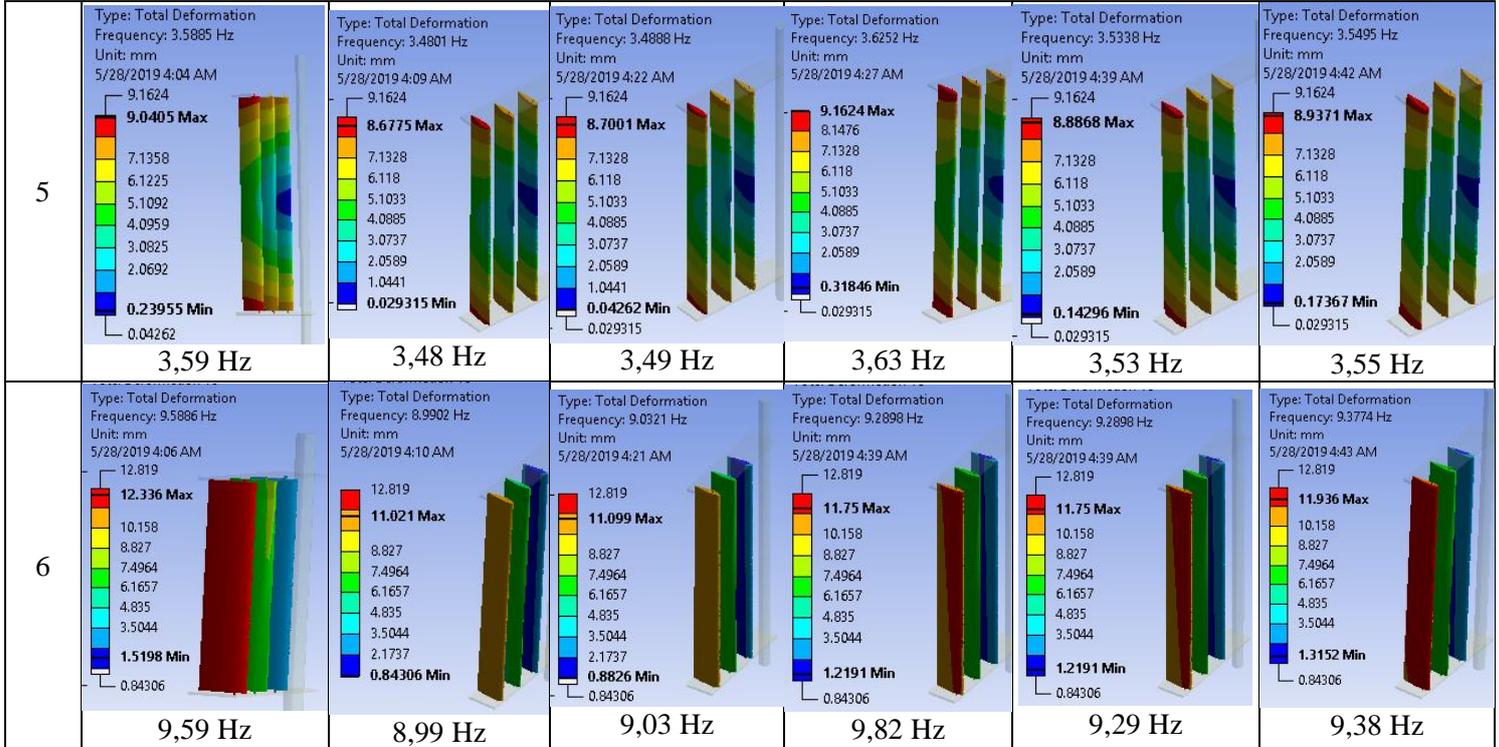


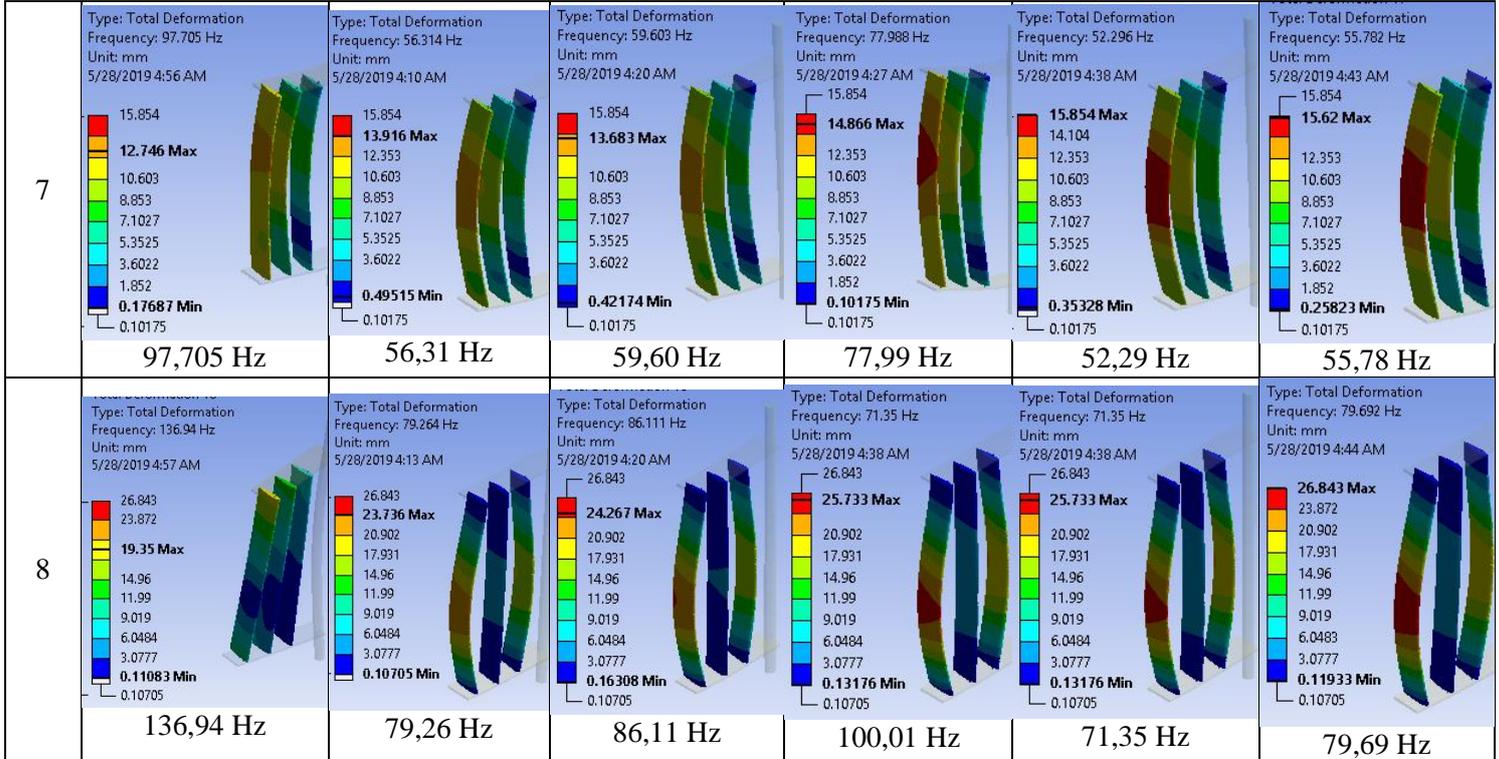
Gambar 4.23 Pengaruh Variasi Material Pada Struktur *Solid* Terhadap Frekuensi

Tabel 4.2 Frekuensi Natural Turbin pada Struktur *Solid*

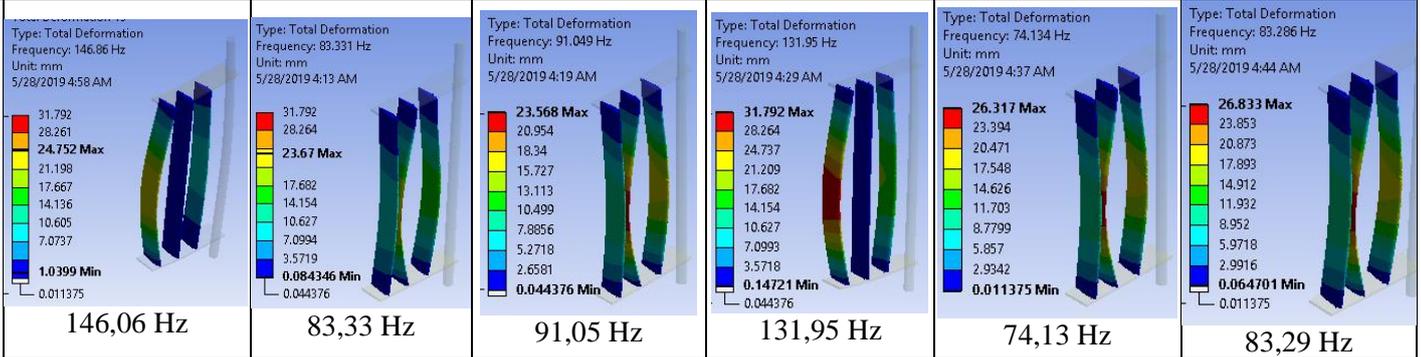
Moda Ke-	Frekuensi (Hz)					
	<i>Carbon Fiber</i>	<i>E Glass Fiber</i>	<i>S Glass Fiber</i>	<i>Carbon FRP</i>	<i>E Glass FRP</i>	<i>S Glass FRP</i>
1	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 11:49 AM</p> <p>6.7334 Max 6.7334 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 12:34 PM</p> <p>6.4235 Max 6.4235 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 11:59 AM</p> <p>6.4431 Max 6.4431 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 12:06 PM</p> <p>6.8346 Max 6.8346 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 12:40 PM</p> <p>6.6025 Max 6.6025 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 12:47 PM</p> <p>6.6453 Max 6.6453 Min</p> <p>0</p>
2	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 11:50 AM</p> <p>6.7334 Max 6.7334 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 12:34 PM</p> <p>6.4235 Max 6.4235 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 1.1872e-003 Hz Unit: mm 5/7/2019 12:00 PM</p> <p>6.4431 Max 6.4431 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 12:07 PM</p> <p>6.8346 Max 6.8346 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 1.4439e-003 Hz Unit: mm 5/7/2019 12:40 PM</p> <p>6.6024 Max 6.6024 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 1.747e-003 Hz Unit: mm 5/7/2019 12:48 PM</p> <p>6.6453 Max 6.6453 Min</p> <p>0 Hz</p>



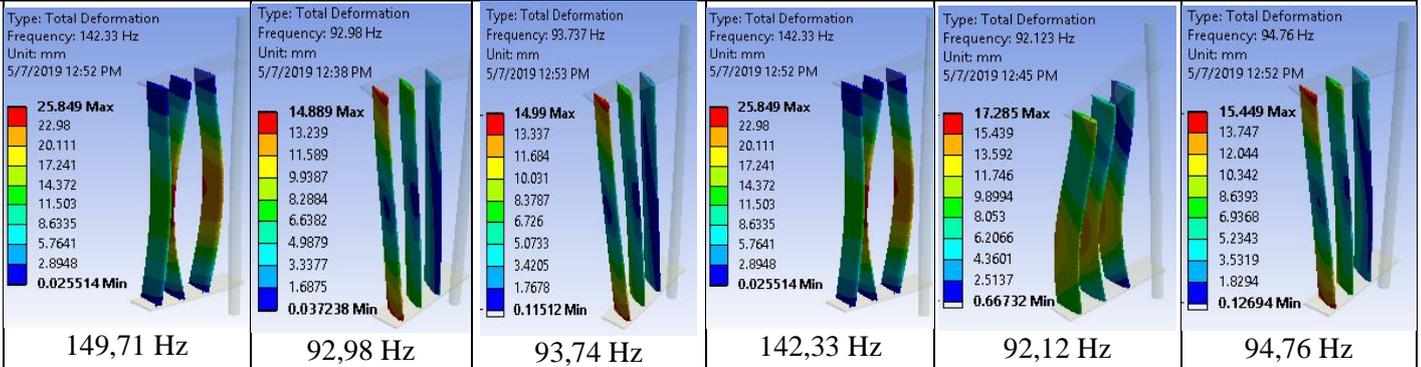




9

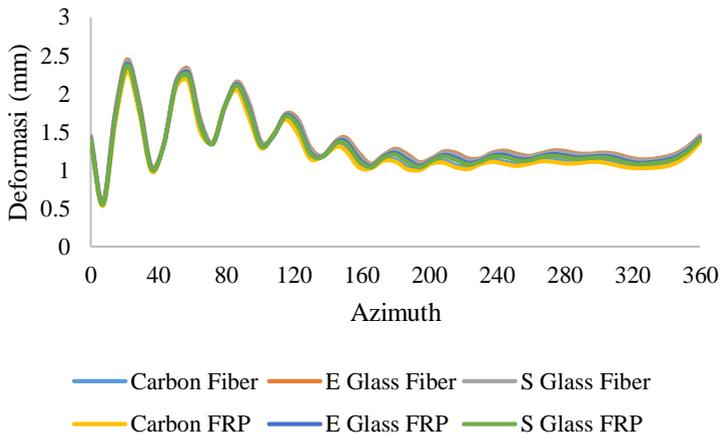


10

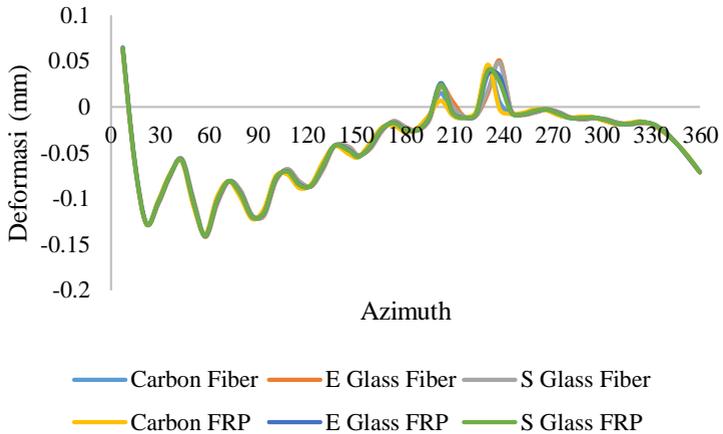


4.3.2 Struktur Solid dengan Sisipan Plat

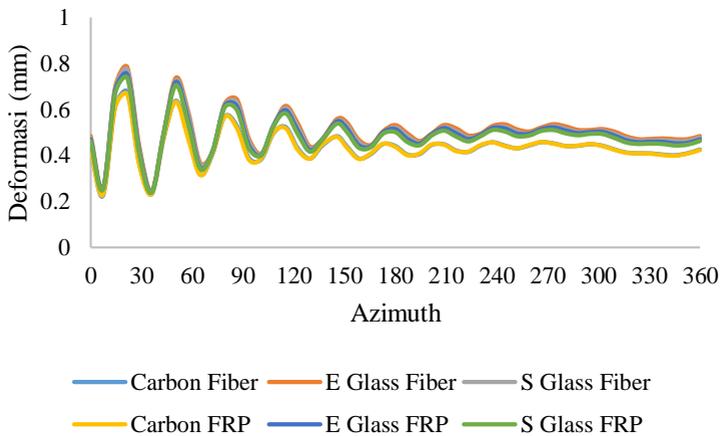
Pengaruh variasi material penyusun pada struktur solid dengan sisipan plat terhadap deformasi dapat diamati pada Gambar 4.24. Sama seperti pada struktur *solid* perbedaan nilai deformasi SBC dari tiap material penyusun *blade* relatif kecil, material *carbon FRP* sebesar 1,6 mm dan nilai deformasi terbesar terjadi pada material *e glass fiber* sebesar 1,7 mm. Untuk mengetahui arah deformasi yang maksimum, deformasi pada setiap sumbu x, y dan z diambil dan ditampilkan pada Gambar 4.25 – 4.27. Berdasarkan hasil simulasi tersebut dapat terlihat bahwa pada sumbu z memiliki nilai deformasi yang terbesar dibandingkan sumbu yang lain, dengan nilai puncak deformasi maksimum sebesar 1,5 mm. Adapun pada struktur ini deformasi pada masing *blade* dijelaskan pada Gambar 4.28 – 4.31. Nilai deformasi maksimum *blade* dalam, *blade* tengah, *blade* luar secara berturut-turut adalah 1,5 mm, 2 mm dan 2,25 mm. Sementara itu nilai deformasi *blade* luar sepanjang span akan ditinjau pada Gambar 4.32 karena pada *blade* tersebut memiliki nilai deformasi terbesar, bagian bawah *blade* memiliki nilai deformasi terbesar yaitu sebesar 1,5 pada azimuth 80.



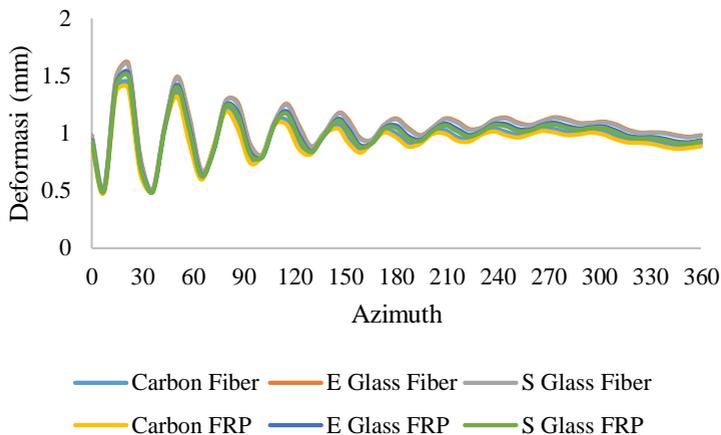
Gambar 4.24 Pengaruh Variasi Material terhadap Deformasi SBC Struktur *Solid* dengan Sisipan *Plat*



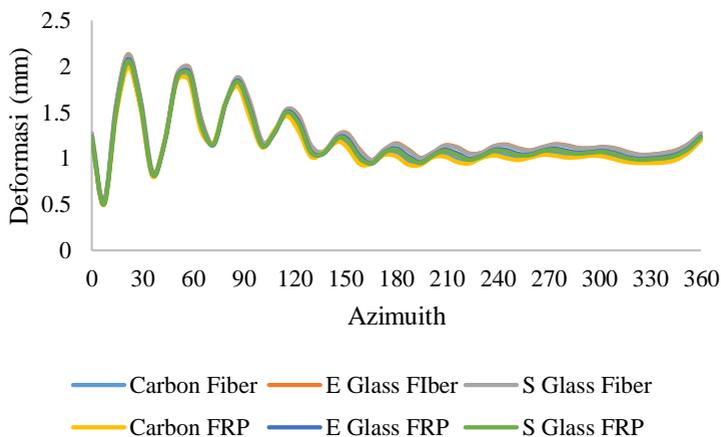
Gambar 4.25 Pengaruh Variasi Material Pada Struktur *Solid* dengan Sisipan *Plat* Terhadap Deformasi Sumbu X



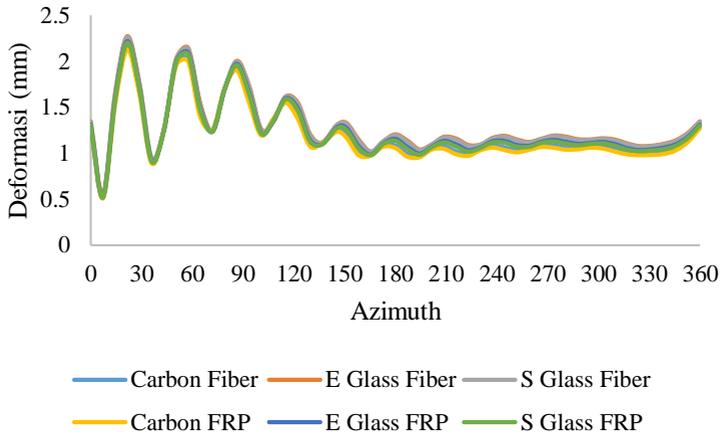
Gambar 4.26 Pengaruh Variasi Material Pada Struktur *Solid* dengan Sisipan *Plat* Terhadap Deformasi Sumbu Y



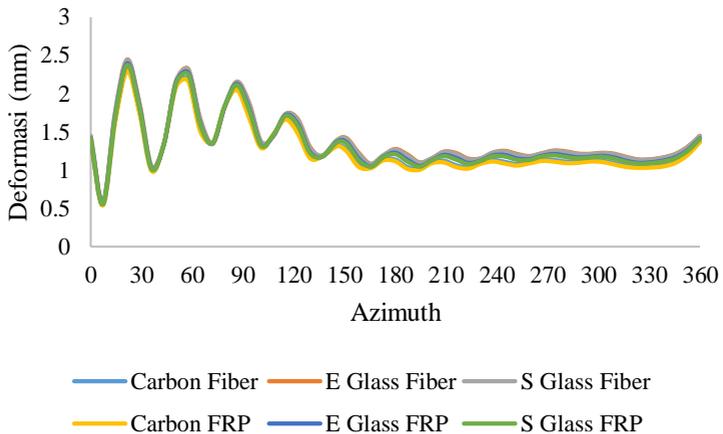
Gambar 4.27 Pengaruh Variasi Material Pada Struktur *Solid* dengan Sisipan *Plat* Terhadap Deformasi Sumbu Y



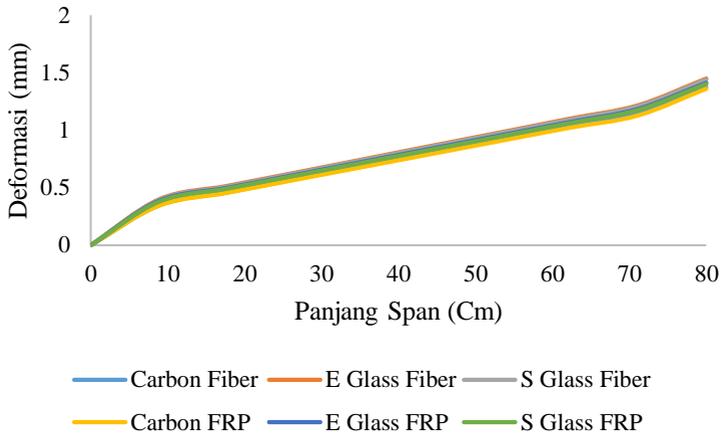
Gambar 4.28 Deformasi *Blade* Dalam Pada Struktur *Solid* dengan Sisipan *Plat* Terhadap Azimuth



Gambar 4.29 Deformasi *Blade* Tengah Pada Struktur *Solid* dengan Sisipan *Plat* Terhadap Sudut Azimuth

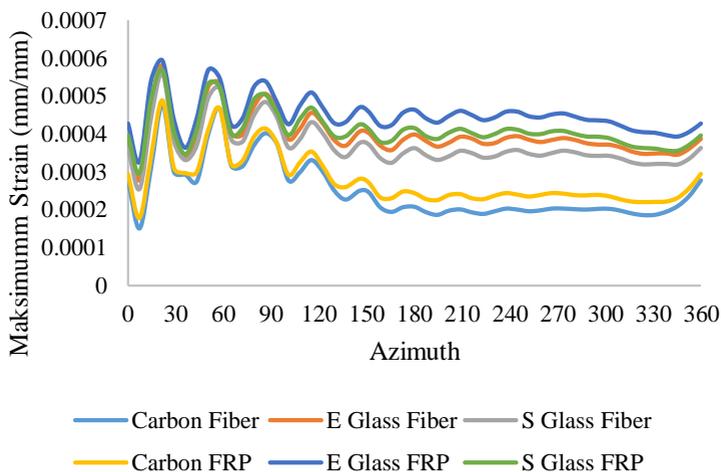


Gambar 4.30 Deformasi *Blade* Luar Pada Struktur *Solid* dengan Sisipan *Plat* Terhadap Sudut Azimuth

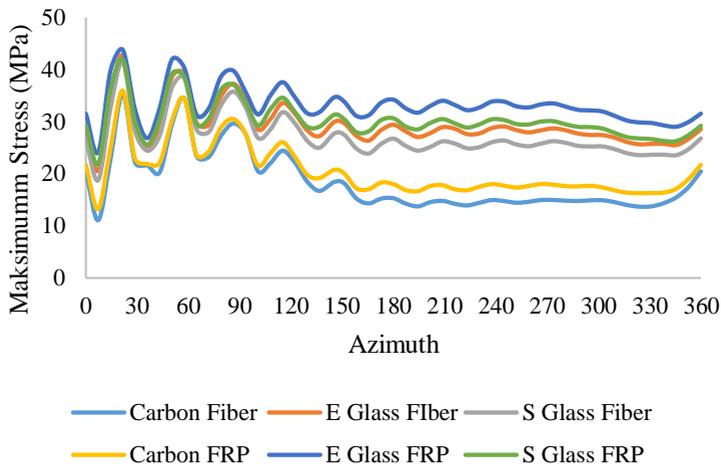


Gambar 4.31 Pengaruh Variasi Material Penyusun Terhadap Deformasi Sepanjang Span

Pada Gambar 4.31 dan 4.32 menunjukkan pengaruh dari perubahan material penyusun *blade* terhadap maksimum strain dan maksimum stress *blade*. Dari gambar-gambar tersebut dapat diamati bahwa nilai terbesar maksimum *stress* dan maksimum *strain* terdapat pada sudut azimuth 0 hingga 120 hal ini dapat terjadi karena beban dinamik *blade* terbesar terdapat pada sudut tersebut. Nilai maksimum *strain* terdapat pada material *e glass FRP* yaitu sebesar $4 \cdot 10^{-3}$ mm dan maksimum strain terendah adalah material *carbon fiber* sebesar $3 \cdot 10^{-3}$ mm/mm. Perbedaan pengaruh perubahan material penyusun *blade* terhadap nilai *stress* kecil. Pada grafik maksimum stress dapat diamati bahwa nilai maksimum stress terbesar terdapat pada material *e glass FRP* sebesar 37 MPa, dan nilai maksimum stress terkecil pada material *carbon fiber* yaitu sebesar 30 MPa.

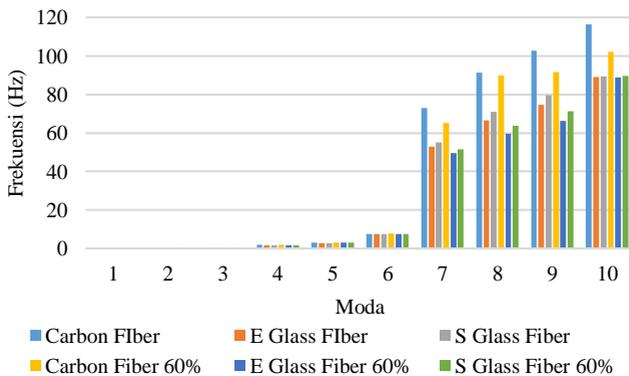


Gambar 4.32 Pengaruh Perubahan Variasi Material Pada Struktur *Solid* dengan Sisipan *Plat* Terhadap Maksimum *Strain*



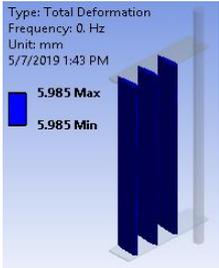
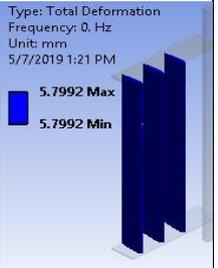
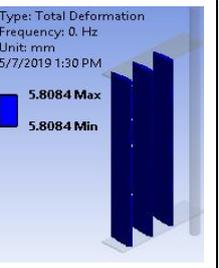
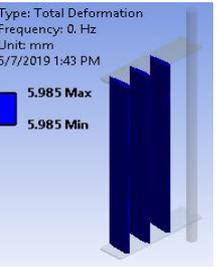
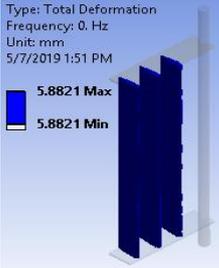
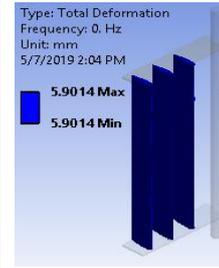
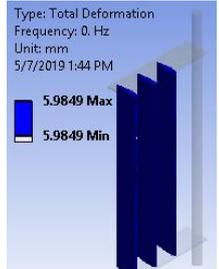
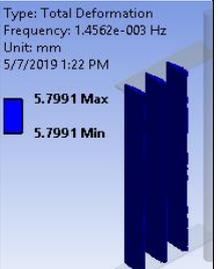
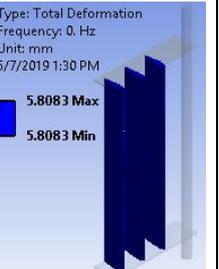
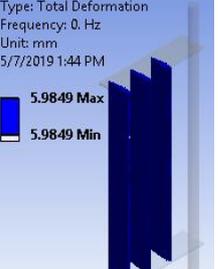
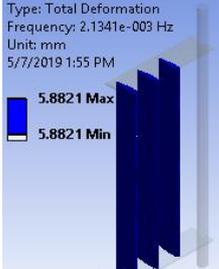
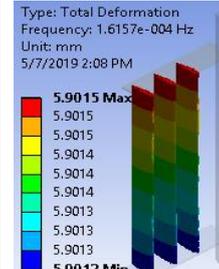
Gambar 4.33 Pengaruh Perubahan Variasi Material Pada Struktur *Solid* dengan Sisipan *Plat* Terhadap Maksimum *Stress*

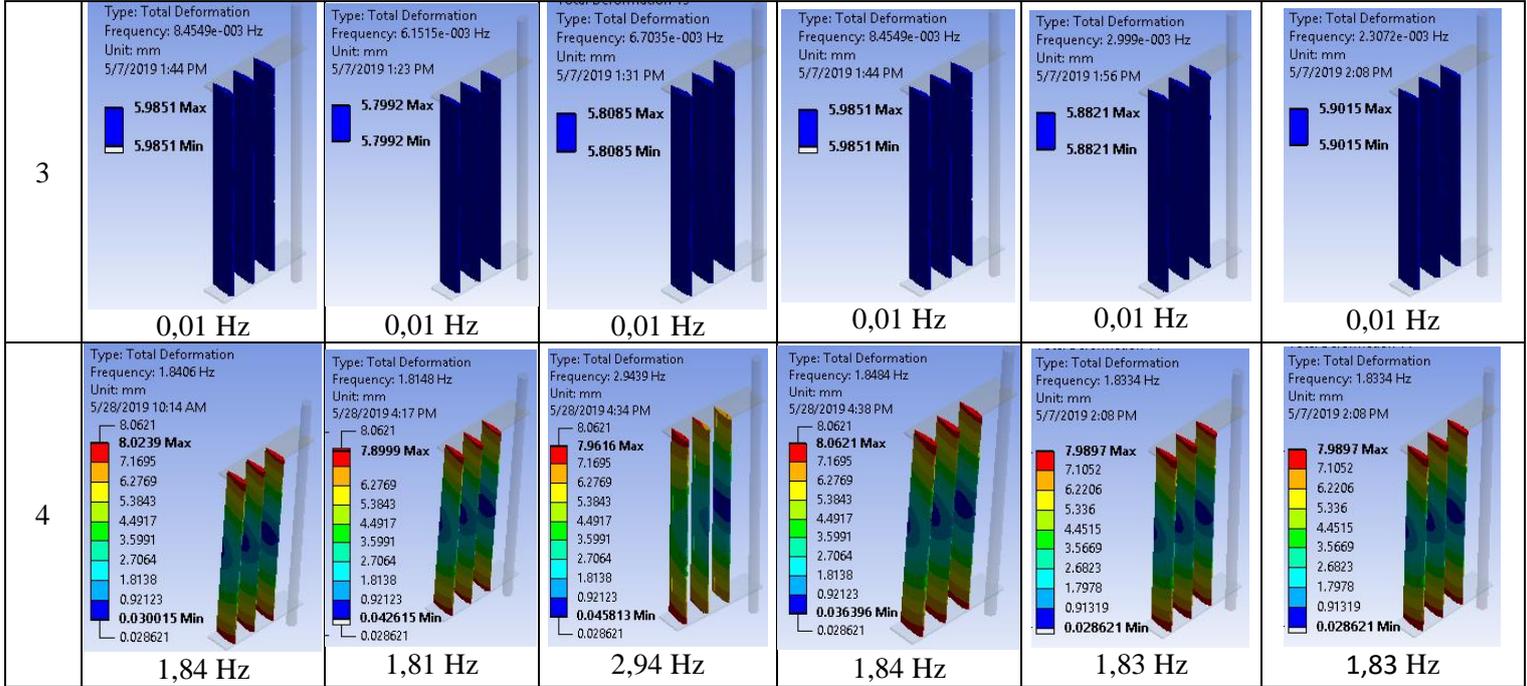
Sesuai dengan persamaan pada 4.1 dan 4.2 nilai dari frekuensi sistem saat beroperasi pada kecepatan inlet 1,2 m/s adalah 1,02 Hz. Pada setiap variasi material di struktur solid nilai frekuensi natural ditampilkan pada Gambar 4.34. Dapat diamati bahwa material *carbon fiber* memiliki nilai frekuensi yang lebih tinggi dibandingkan material lainnya pada setiap moda. Pada mode ke 4 nilai frekuensi natural dari setiap variasi mendekati nilai frekuensi sistem, dengan selisih nilai frekuensi ± 0.1 Hz. Kedekatan nilai frekuensi ini rentan terjadi resonansi pada *blade*. Adapun bentuk moda yang dinyatakan pada Tabel 4.4 adalah bentuk benda saat bergetar pada frekuensi natural. Bentuk dari moda ini berperan penting dalam mengamati arah getaran dan bentuk benda pada saat bergetar. Apabila terjadi resonansi dari sistem, diketahuinya bentuk moda ini dapat membantu dalam mendesain area *blade* yang mengalami defleksi terbesar, untuk menghindari terjadinya retak atau patah pada area tersebut saat *blade* beroperasi. Pada moda ke 0-3 SBC bergerak secara rigid sumbu x,y,z. Sedangkan pada moda yang lain *blade* mulai mengalami defleksi.



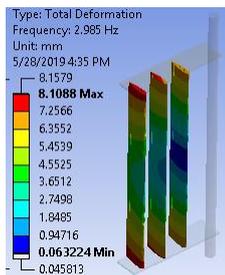
Gambar 4.34 Pengaruh Material Penyusun *Blade* Terhadap Frekuensi Natural

Tabel 4.3 Frekuensi Natural pada Struktur *Solid* dengan Sisipan Plat

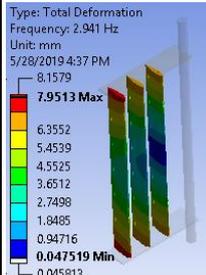
Moda Ke-	Bentuk Moda dan Frekuensi (Hz)					
	<i>Carbon Fiber</i>	<i>E Glass Fiber</i>	<i>S Glass Fiber</i>	<i>Carbon FRP</i>	<i>E Glass FRP</i>	<i>S Glass FRP</i>
1	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 1:43 PM</p>  <p>5.985 Max 5.985 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 1:21 PM</p>  <p>5.7992 Max 5.7992 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 1:30 PM</p>  <p>5.8084 Max 5.8084 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 1:43 PM</p>  <p>5.985 Max 5.985 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 1:51 PM</p>  <p>5.8821 Max 5.8821 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 2:04 PM</p>  <p>5.9014 Max 5.9014 Min</p> <p>0 Hz</p>
2	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 1:44 PM</p>  <p>5.9849 Max 5.9849 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 1.4562e-003 Hz Unit: mm 5/7/2019 1:22 PM</p>  <p>5.7991 Max 5.7991 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 1:30 PM</p>  <p>5.8083 Max 5.8083 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 1:44 PM</p>  <p>5.9849 Max 5.9849 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 2.1341e-003 Hz Unit: mm 5/7/2019 1:55 PM</p>  <p>5.8821 Max 5.8821 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 1.6157e-004 Hz Unit: mm 5/7/2019 2:08 PM</p>  <p>5.9015 Max 5.9015 5.9015 5.9014 5.9014 5.9014 5.9013 5.9013 5.9013 5.9012 Min</p> <p>0 Hz</p>



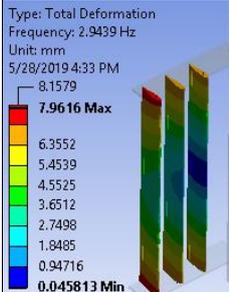
5



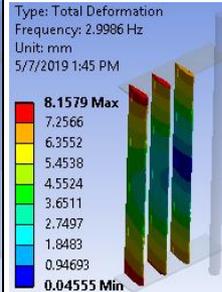
2,98 Hz



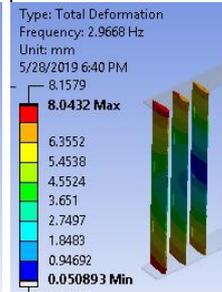
2,94 Hz



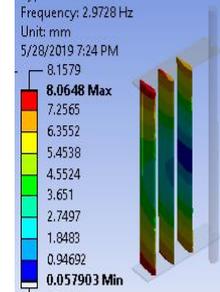
2,94 Hz



2,99 Hz

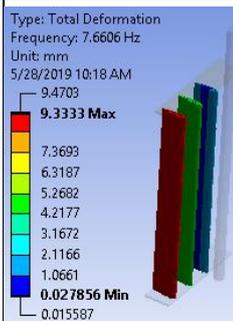


2,96 Hz

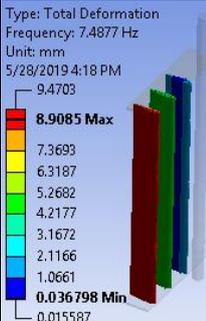


2,97 Hz

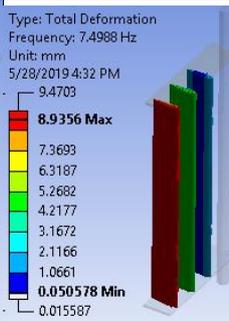
6



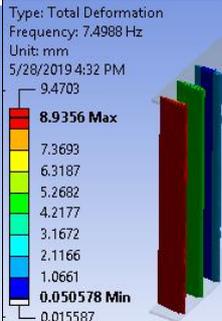
7,66 Hz



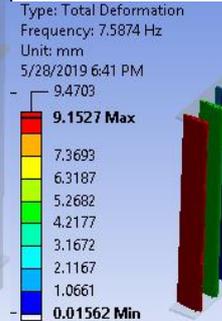
7,48 Hz



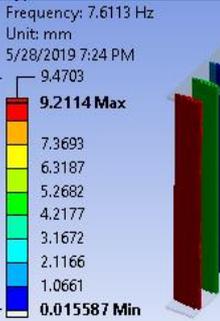
7,49 Hz



7,71 Hz

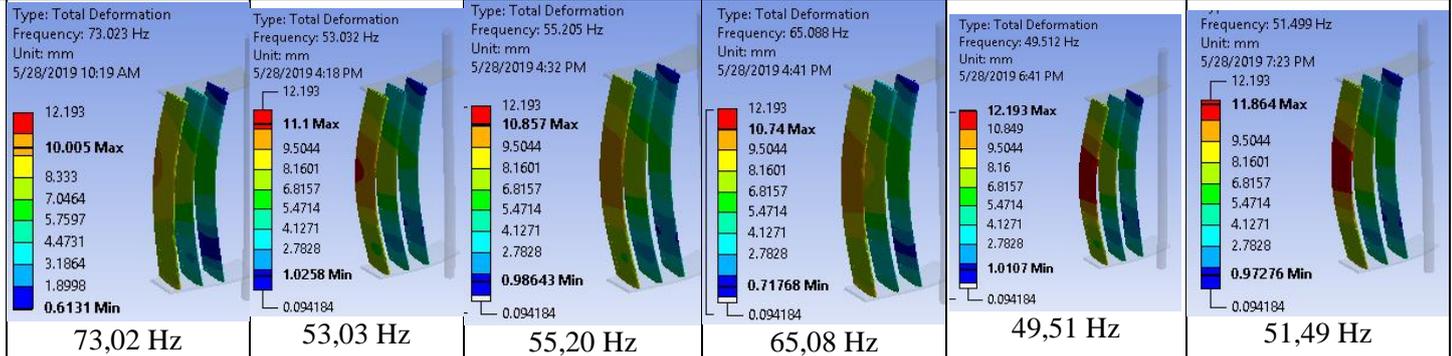


7,58 Hz

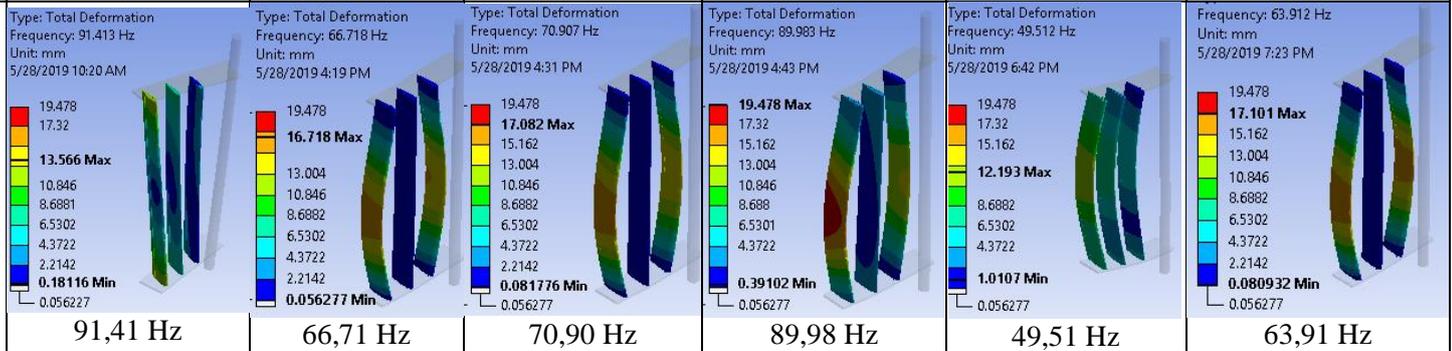


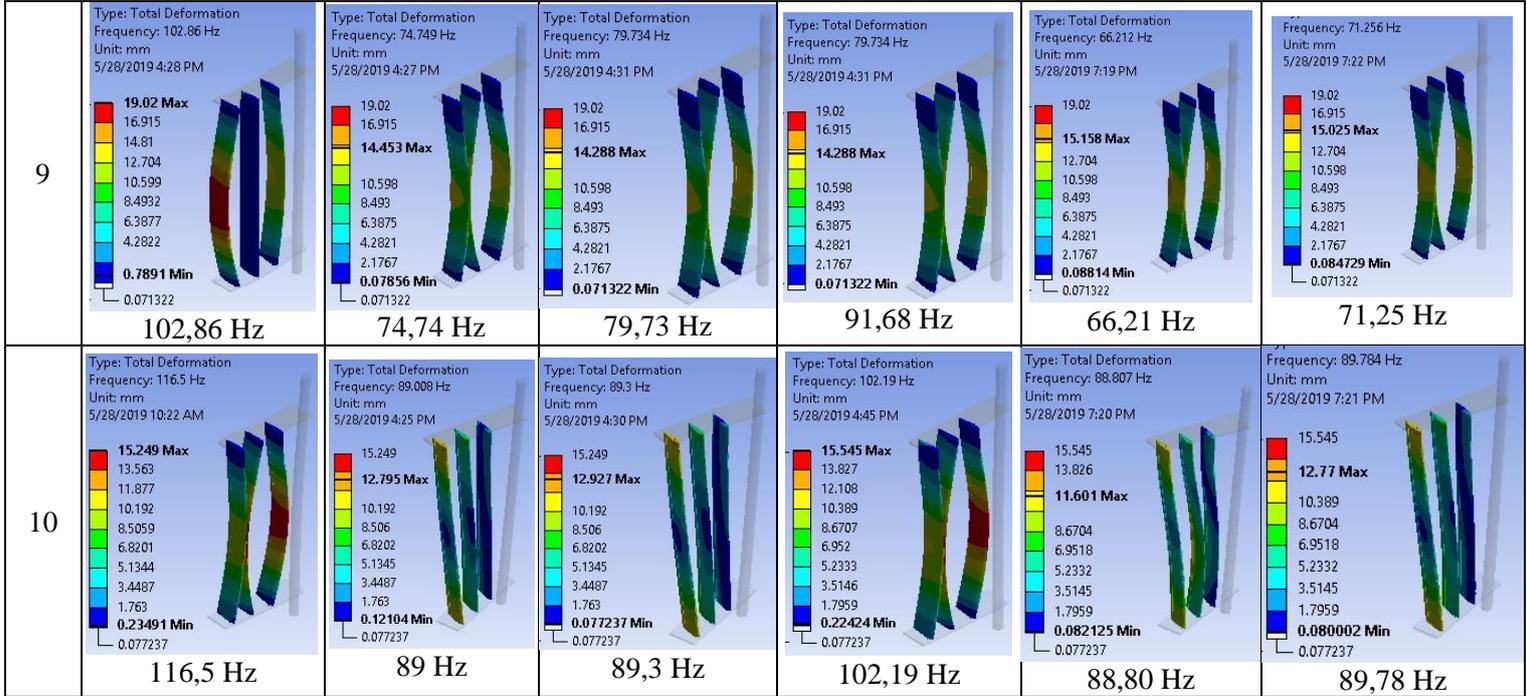
7,61 Hz

7



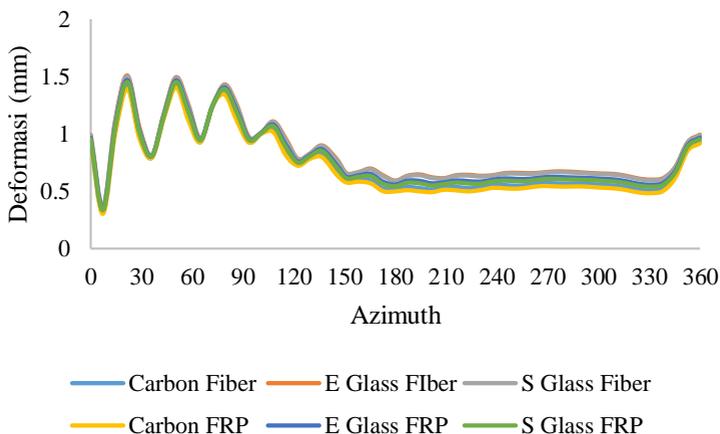
8



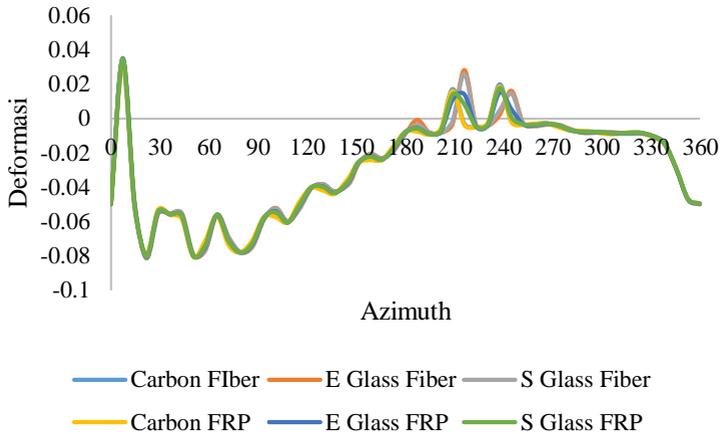


4.3.3 Struktur Hollow

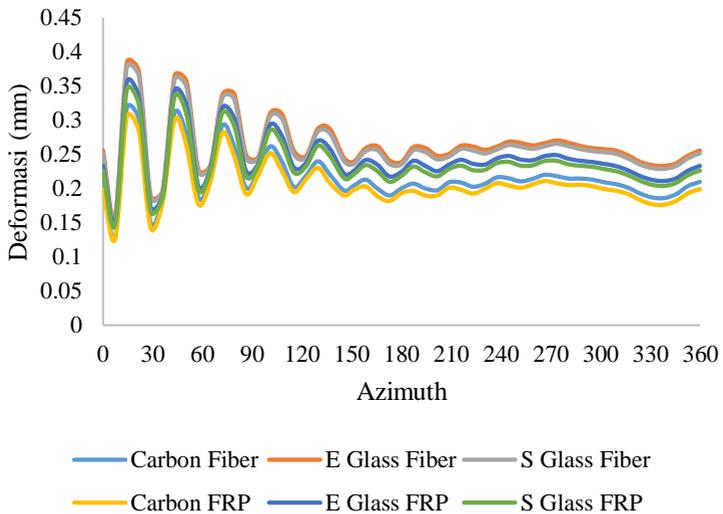
Total deformasi yang terjadi akibat perubahan material pada struktur *hollow* ditampilkan pada Gambar 4.35. Nilai deformasi mengalami nilai yang fluktuatif, puncak maksimum dari nilai deformasi maksimum terjadi pada $0 < \theta < 90$. Hal ini terjadi karena pada azimuth tersebut merupakan area yang mengalami beban dinamik maksimum dibandingkan sudut azimuth yang lain. Perbedaan nilai deformasi SBC dari tiap material penyusun *blade* relatif kecil. Apabila selama satu putaran tersebut dirata-rata nilai deformasi minimum terjadi pada material *carbon FRP* sebesar 1,32 mm dan nilai deformasi terbesar terjadi pada material *e glass fiber* sebesar 1,44 mm. Untuk mengetahui arah deformasi yang maksimum, deformasi pada setiap sumbu x, y dan z diambil dan ditampilkan pada Gambar 4.36 – 4.38. Berdasarkan hasil simulasi tersebut dapat terlihat bahwa pada sumbu z memiliki nilai deformasi yang terbesar dibandingkan sumbu yang lain, dengan nilai puncak deformasi maksimum sebesar 0,8 mm.



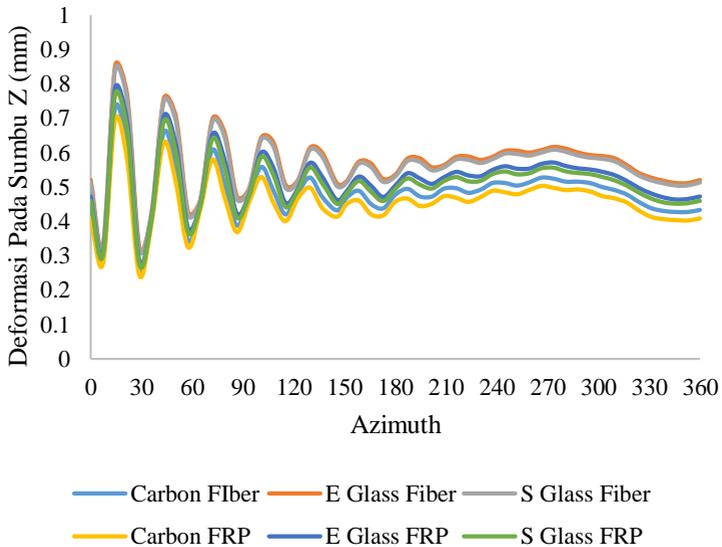
Gambar 4.35 Grafik Hubungan Deformasi SBC Pada Struktur Hollow Terhadap Sudut Azimuth



Gambar 4.36 Pengaruh Perubahan Material Penyusun Pada Struktur Hollow SBC Terhadap Deformasi Sumbu X

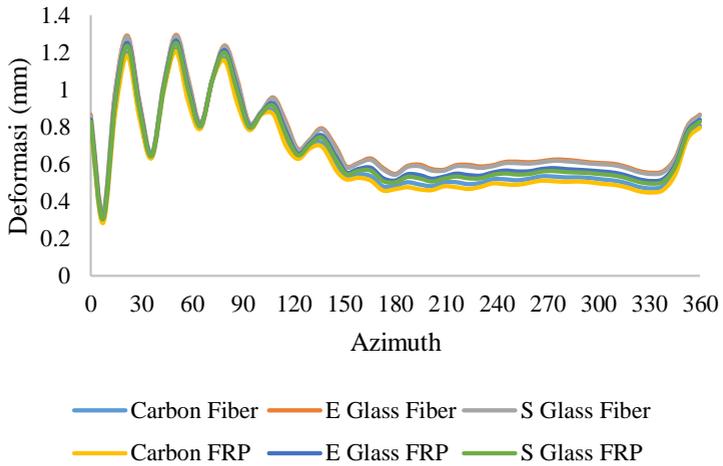


Gambar 4.37 Pengaruh Perubahan Material Penyusun Pada Struktur Hollow SBC Terhadap Deformasi Sumbu Y

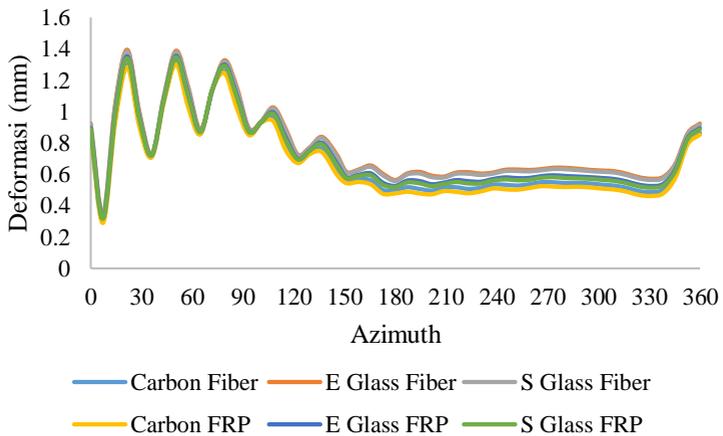


Gambar 4.38 Pengaruh Perubahan Material Penyusun Pada Struktur *Hollow* SBC Terhadap Deformasi Sumbu z

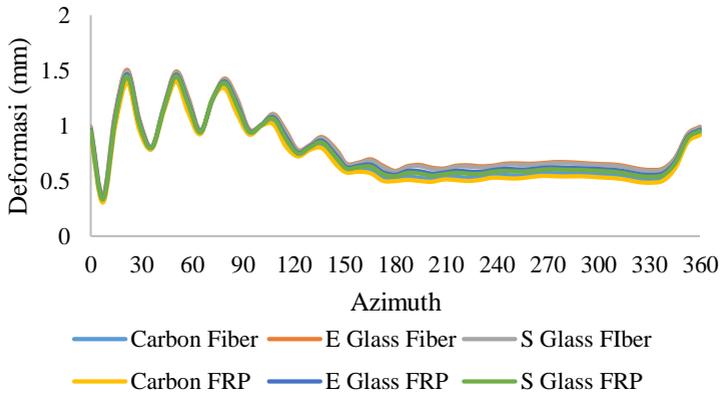
Nilai deformasi setiap blade dari SBC yaitu *blade* dalam, *blade* tengah dan *blade* luar dijabarkan pada Gambar 4.39 – 4.41. Pada masing-masing grafik tersebut dapat diamati bahwa pola deformasi setiap blade sama namun dengan nilai maksimum deformasi blade yang terjadi berbeda yaitu 1,2 mm, 1,4 mm dan 1,5 mm berturut-turut pada blade dalam, *blade* tengah, dan *blade* luar. *Blade* luar memiliki nilai deformasi maksimum dibandingkan dengan *blade* yang lain, sehingga pada *blade* ini akan ditinjau nilai deformasi sepanjang span *blade* yang ditunjukkan pada Gambar 4.42.



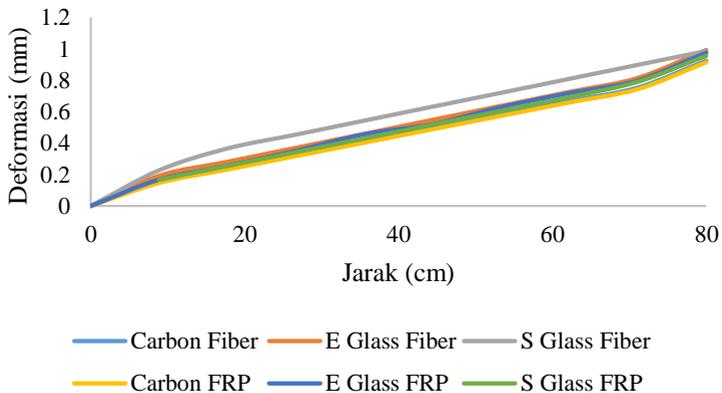
Gambar 4.39 Deformasi Blade Dalam Pada Struktur *Hollow* Terhadap Sudut Azimuth



Gambar 4.40 Deformasi Blade Tengah Pada Struktur *Hollow* Terhadap Sudut Azimuth



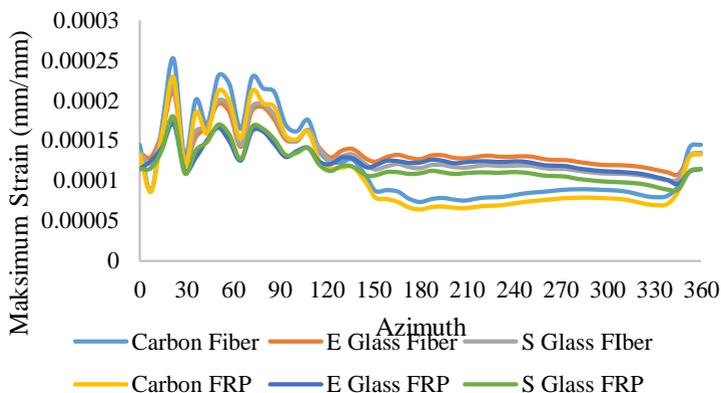
Gambar 4.41 Deformasi Blade Luar Pada Struktur *Hollow* Terhadap Sudut Azimuth



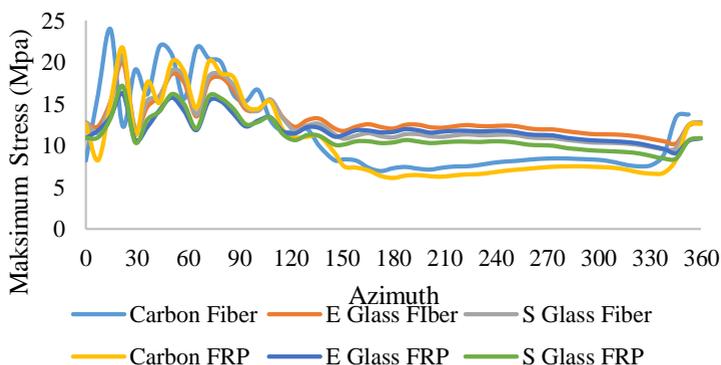
Gambar 4.42 Nilai Deformasi Pada Struktur *Hollow* yang Terjadi Terhadap Panjang *Span*

Pada Gambar 4.43 dan 4.44 menunjukkan pengaruh dari perubahan material penyusun *blade* terhadap maksimum *strain* dan maksimum *stress blade* Nilai maksimum *strain* terdapat pada material e *glass FRP* yaitu sebesar $2 \cdot 10^{-4}$ mm/mm dan maksimum

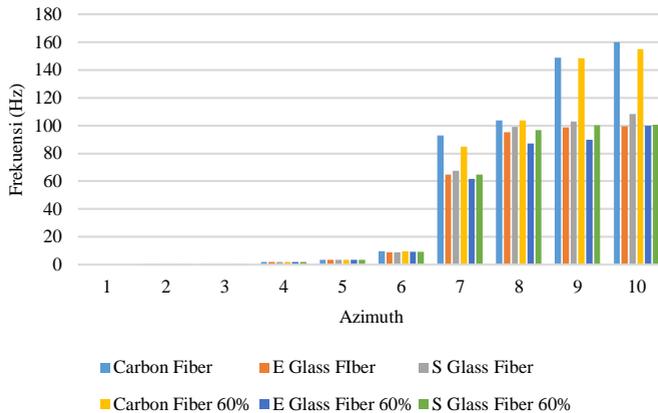
strain terendah adalah material *carbon fiber* sebesar $1,5 \cdot 10^{-4}$ mm/mm. Pada grafik maksimum *stress* dapat diamati bahwa nilai maksimum *stress* terbesar terdapat pada material *e glass FRP* sebesar 19 MPa, dan nilai maksimum *stress* terkecil pada material *carbon fiber* yaitu sebesar 15 MPa.



Gambar 4.43 Pengaruh Variasi Material Terhadap Maksimum *Strain* SBC pada Struktur *Hollow*



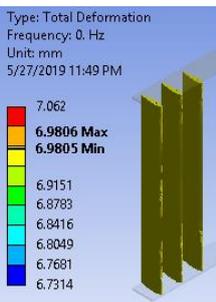
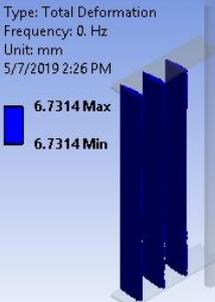
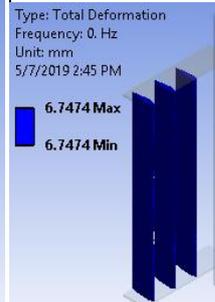
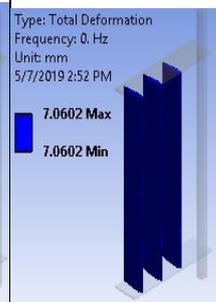
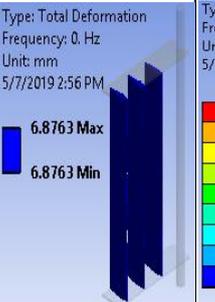
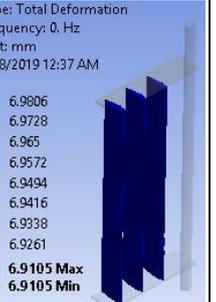
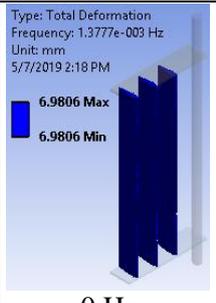
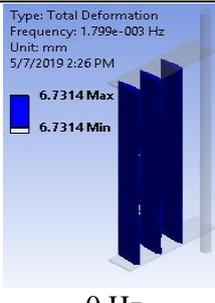
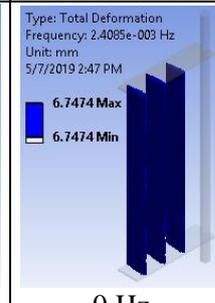
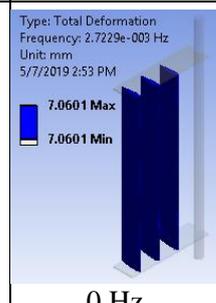
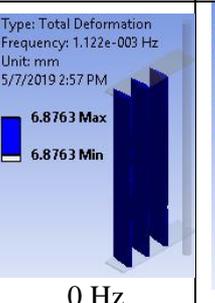
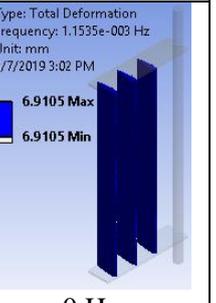
Gambar 4.44 Pengaruh Variasi Material Terhadap Maksimum *Stress* SBC pada Struktur *Hollow*

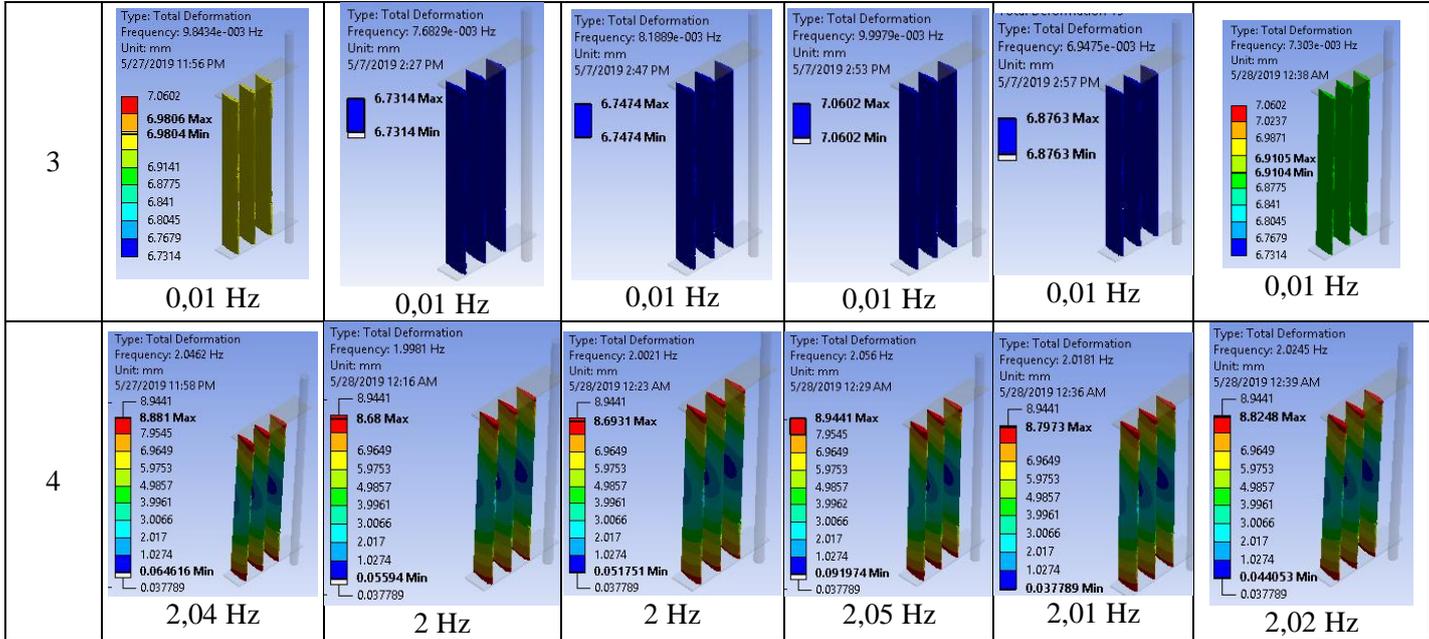


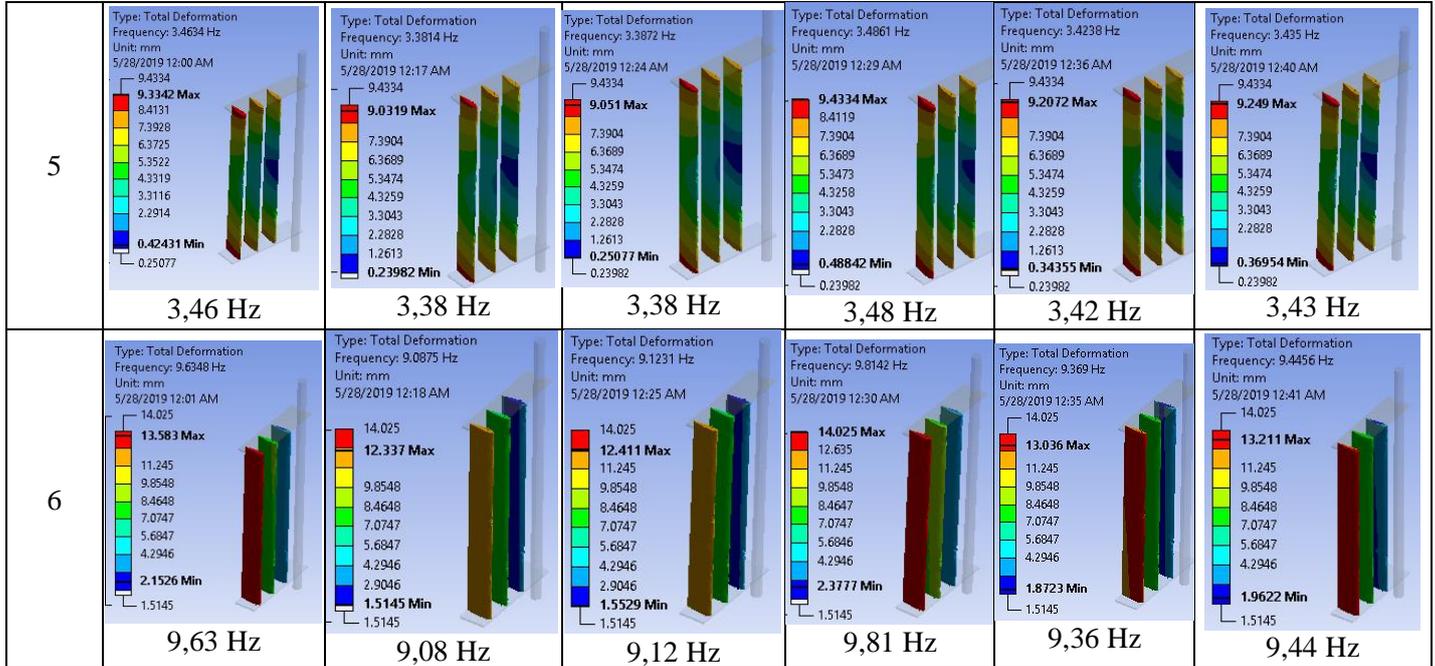
Gambar 4.45 Pengaruh Variasi Material Terhadap Frekuensi Natural Pada Struktur *Hollow*

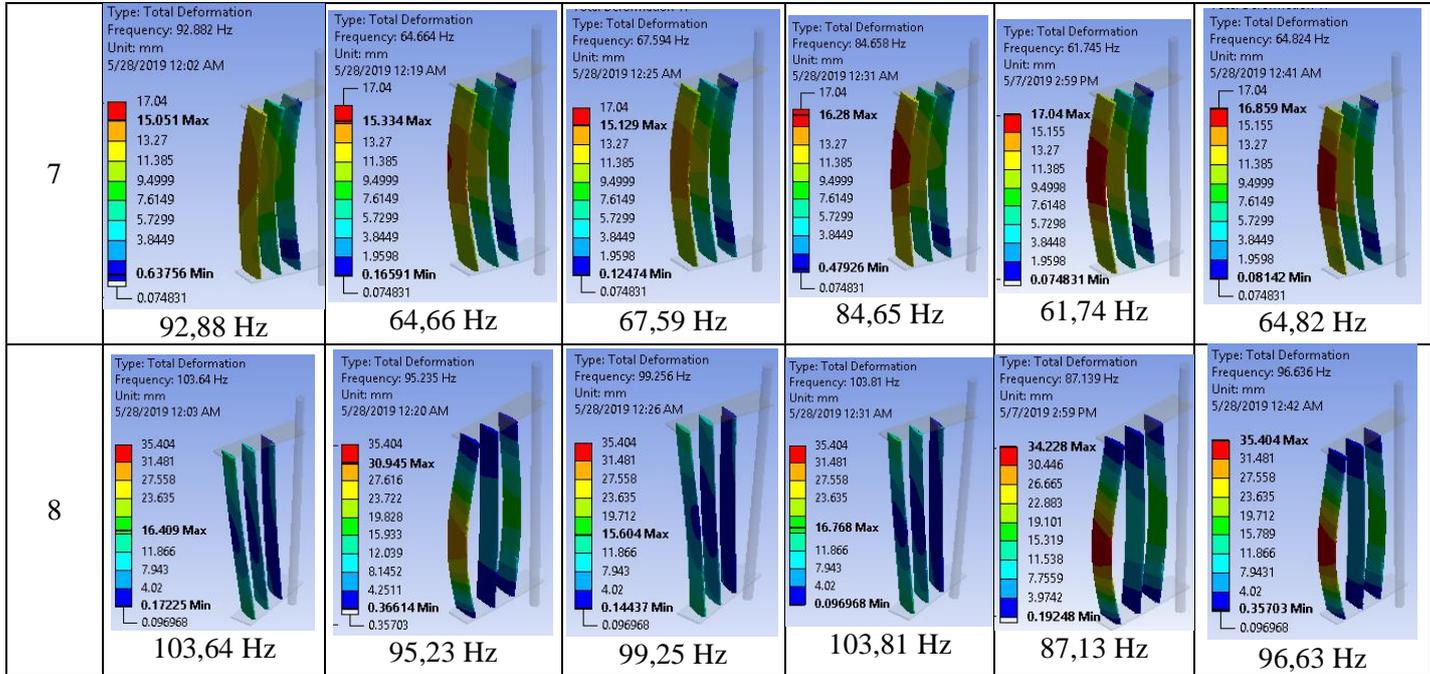
Gambar 4.46 menjelaskan mengenai pengaruh variasi material terhadap frekuensi natural, Berdasarkan hasil simulasi dapat diamati bahwa material *carbon fiber* memiliki nilai frekuensi natural yang lebih tinggi dibandingkan material yang lain. Sama seperti pada material di struktur-struktur sebelumnya pada mode ke 4 nilai frekuensi natural dari setiap variasi mendekati nilai frekuensi sistem, dengan selisih nilai frekuensi ± 1 Hz. Kedekatan nilai frekuensi ini rentan terjadi resonansi pada *blade*. Pada setiap moda tersebut, bentuk moda penting untuk diketahui. Bentuk moda yang terjadi pada setiap moda dijelaskan pada Tabel 4.4. Adapun pada moda ke 0-3 gerakkan yang terjadi secara rigid pada setiap sumbu *x,y,z*. sedangkan pada moda berikutnya mulai terjadi defleksi.

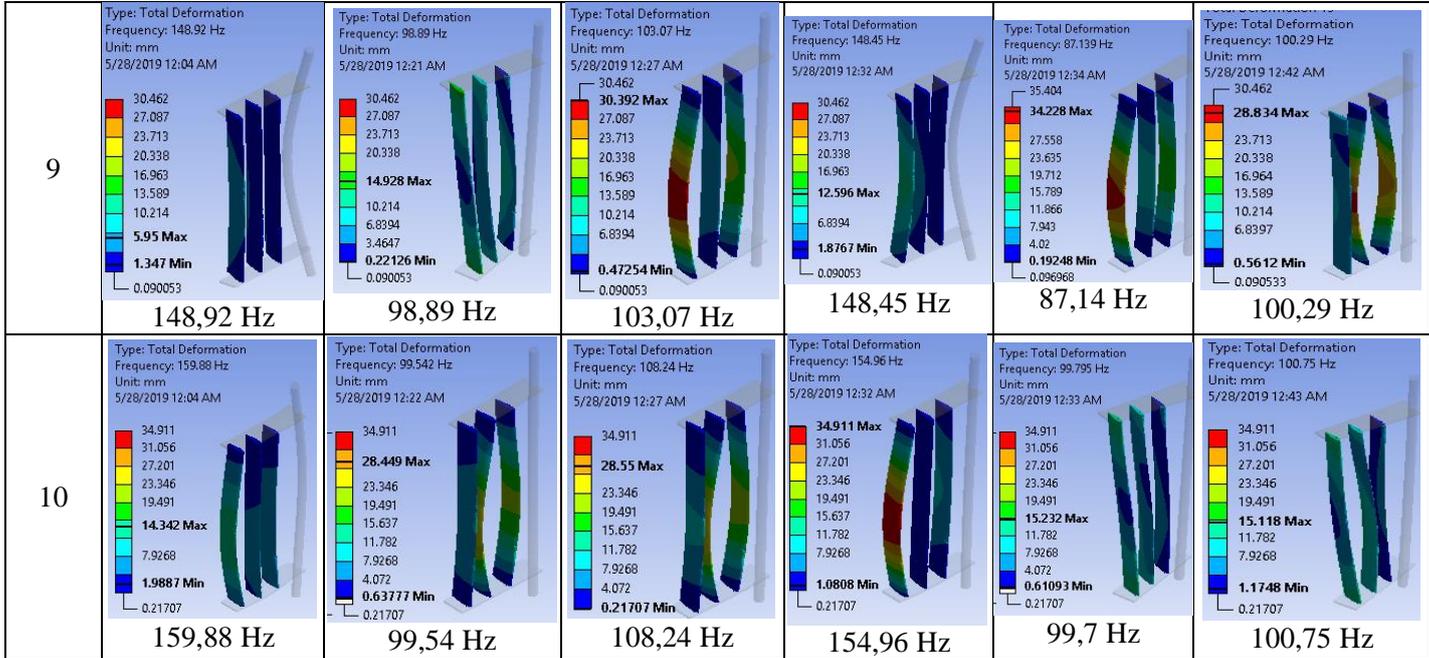
Tabel 4.4 Frekuensi Natural dan Bentuk Moda Pada Struktur *Hollow*

Moda ke-	Frekuensi (Hz)					
	<i>Carbon Fiber</i>	<i>E Glass Fiber</i>	<i>S Glass Fiber</i>	<i>Carbon FRP</i>	<i>E Glass FRP</i>	<i>S Glass FRP</i>
1	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/27/2019 11:49 PM</p>  <p>7.062 6.9806 Max 6.9805 Min 6.9151 6.8783 6.8416 6.8049 6.7681 6.7314</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 2:26 PM</p>  <p>6.7314 Max 6.7314 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 2:45 PM</p>  <p>6.7474 Max 6.7474 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 2:52 PM</p>  <p>7.0602 Max 7.0602 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 2:56 PM</p>  <p>6.8763 Max 6.8763 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/28/2019 12:37 AM</p>  <p>6.9806 6.9728 6.965 6.9572 6.9494 6.9416 6.9338 6.9261 6.9105 Max 6.9105 Min</p> <p>0 Hz</p>
2	<p>Type: Total Deformation Frequency: 1.3777e-003 Hz Unit: mm 5/7/2019 2:18 PM</p>  <p>6.9806 Max 6.9806 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 1.799e-003 Hz Unit: mm 5/7/2019 2:26 PM</p>  <p>6.7314 Max 6.7314 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 2.4085e-003 Hz Unit: mm 5/7/2019 2:47 PM</p>  <p>6.7474 Max 6.7474 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 2.7229e-003 Hz Unit: mm 5/7/2019 2:53 PM</p>  <p>7.0601 Max 7.0601 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 1.122e-003 Hz Unit: mm 5/7/2019 2:57 PM</p>  <p>6.8763 Max 6.8763 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 1.1535e-003 Hz Unit: mm 5/7/2019 3:02 PM</p>  <p>6.9105 Max 6.9105 Min</p> <p>0 Hz</p>



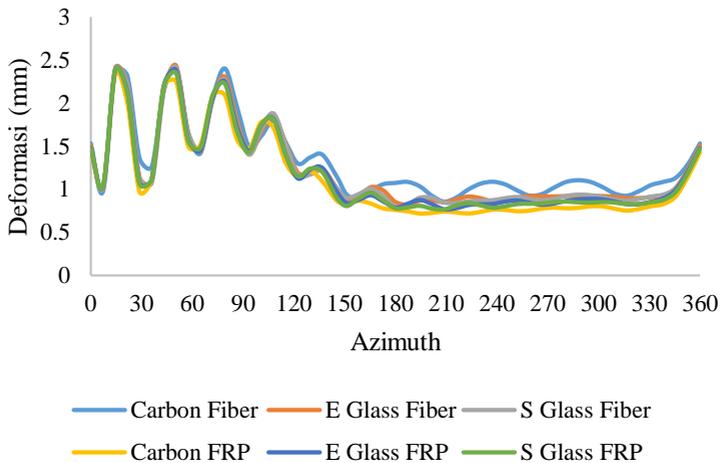




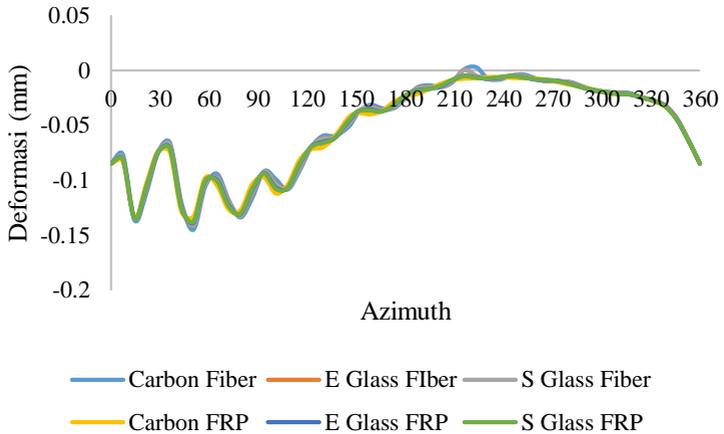


4.3.4 Struktur Hollow dengan Sisipan Plat

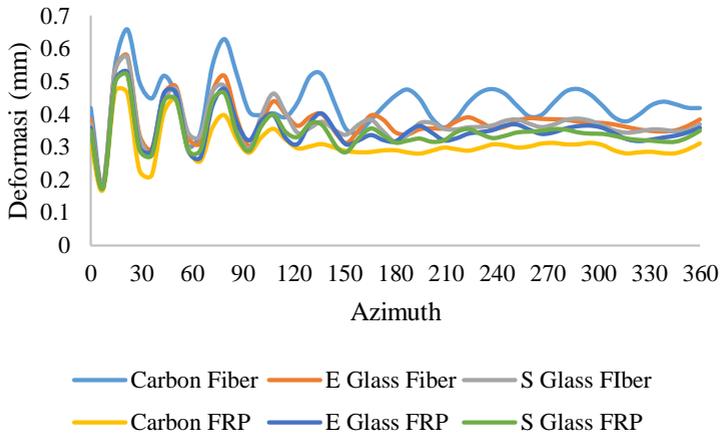
Dapat diamati pada Gambar 4.46 bahwa sama seperti deformasi pada struktur hollow, deformasi yang terjadi pada struktur hollow dengan sisipan plat memiliki nilai deformasi yang fluktuatif terutama pada sudut azimuth 0° hingga 120° . Pengaruh variasi material penyusun *blade* pada struktur *hollow* dengan sisipan plat memiliki perbedaan nilai deformasi SBC dari tiap material penyusun *blade* relatif kecil. Apabila selama satu putaran tersebut dirata-rata nilai deformasi minimum terjadi pada material carbon FRP sebesar 1,46 mm dan nilai deformasi terbesar terjadi pada material *e glass* FRP sebesar 1,54 mm. Untuk mengetahui arah dan nilai dari deformasi secara detail ditampilkan pada Gambar 4.47 – 4.49 pada setiap sumbu x, y dan z secara berturut-turut. Nilai maksimum deformasi terdapat pada sumbu z yaitu dengan nilai sebesar 1,2 mm.



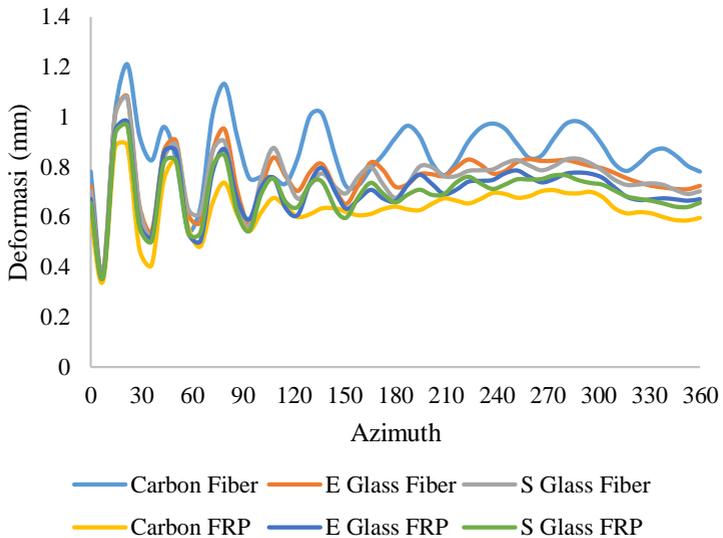
Gambar 4.46 Pengaruh Variasi Material Pada Struktur *Hollow* dengan Sisipan *Plat* Terhadap Deformasi SBC



Gambar 4.47 Pengaruh Variasi Material Penyusun Pada Struktur *Hollow* dengan Sisipan *Plat* Terhadap Deformasi Sumbu X

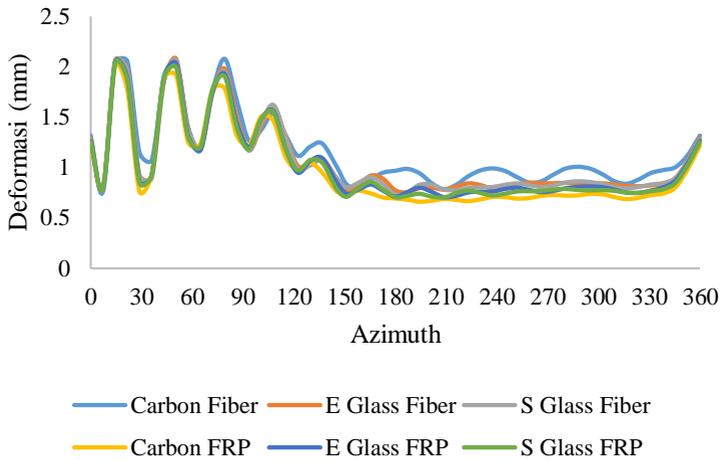


Gambar 4.48 Pengaruh Variasi Material Penyusun Pada Struktur *Hollow* dengan Sisipan *Plat* Terhadap Deformasi Sumbu Y

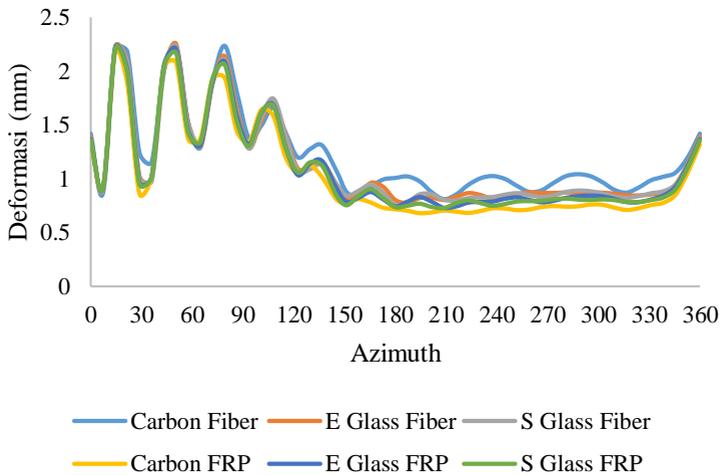


Gambar 4.49 Pengaruh Variasi Material Penyusun Pada Struktur *Hollow* dengan Sisipan *Plat* Terhadap Deformasi Sumbu Z.

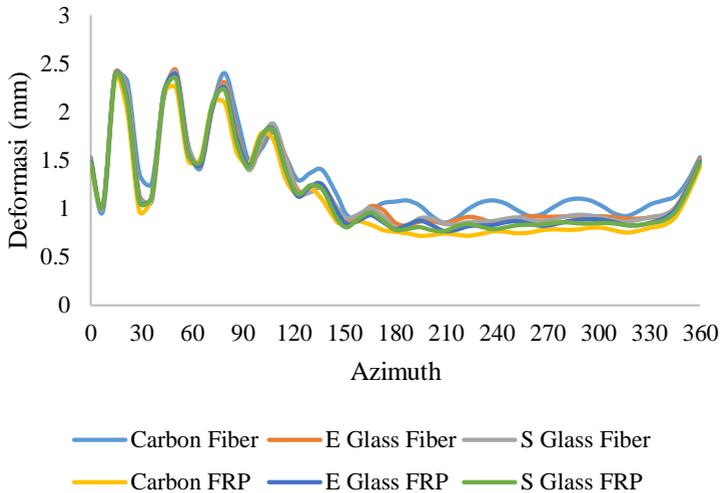
Nilai deformasi setiap blade dari SBC yaitu blade dalam, blade tengah dan blade luar dijabarkan pada Gambar 4.50 – 4.52. Pada masing-masing grafik tersebut dapat diamati bahwa pola deformasi setiap blade sama namun dengan nilai maksimum deformasi blade yang terjadi berbeda yaitu 2 mm, 2,2 mm dan 2,5 mm berturut-turut pada blade dalam, blade tengah, dan blade luar. Nilai deformasi sepanjang *span blade* luar yang memiliki nilai deformasi maksimum pada bagian bawah sebesar 2,5 mm



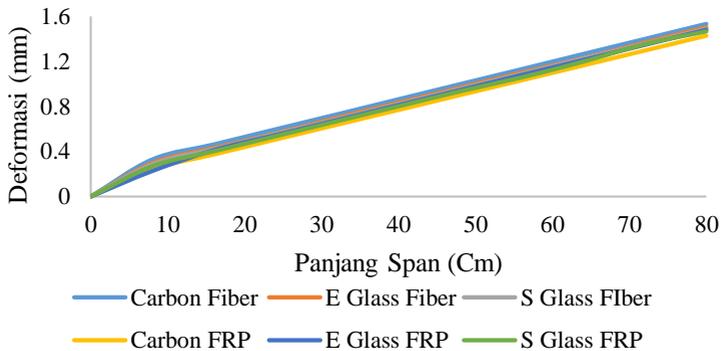
Gambar 4.50 Deformasi *Blade* Dalam Pada *Hollow* dengan Sisipan *Plat* Terhadap Sudut Azimuth



Gambar 4.51 Deformasi *Blade* Tengah Pada Struktur *Hollow* dengan Sisipan *Plat* Terhadap Sudut Azimuth



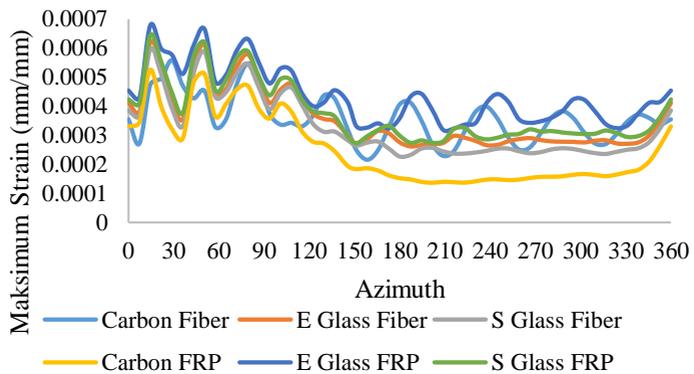
Gambar 4.52 Deformasi *Blade* Luar Pada Struktur *Hollow* dengan Sisipan *Plat* Terhadap Sudut Azimuth



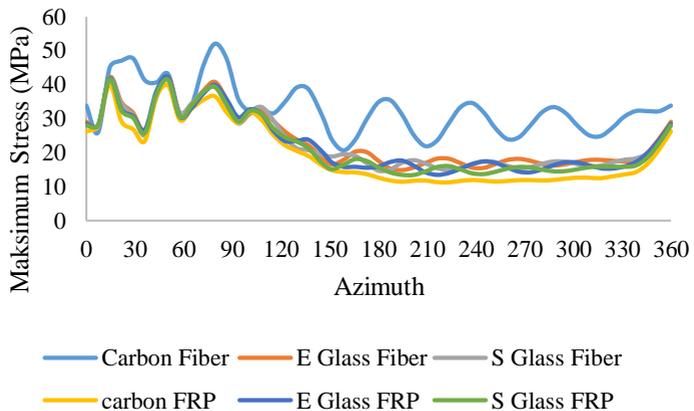
Gambar 4.53 Pengaruh Variasi Material Pada Struktur *Hollow* dengan Sisipan *Plat* terhadap Deformasi Sepanjang *Span*

Pada Gambar 4.54 dan 4.55 menunjukkan profil maksimum SBC *strain* dan maksimum *stress* pengaruh dari perubahan variasi material penyusun *blade*. Nilai maksimum *strain* terdapat pada material e *glass* FRP yaitu sebesar $6 \cdot 10^{-4}$ mm dan maksimum strain

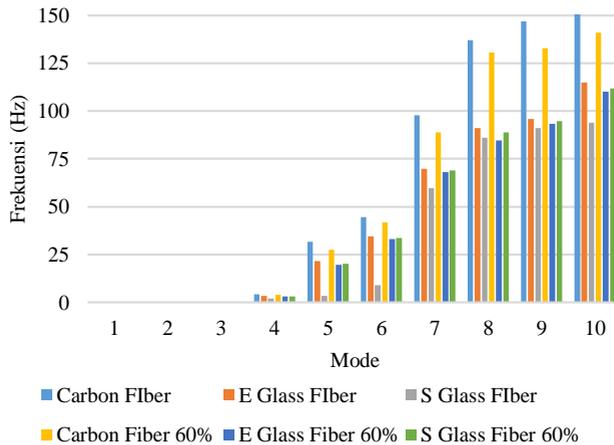
terendah adalah material *carbon FRP* sebesar $5 \cdot 10^{-4}$ mm/mm. Perbedaan pengaruh perubahan material penyusun *blade* terhadap nilai stress kecil. Pada grafik maksimum stress dapat diamati bahwa nilai maksimum stress terkecil terdapat pada material *e glass FRP* sebesar 30 MPa, dan nilai maksimum *stress* terbesar pada material *carbon fiber* yaitu sebesar 40 MPa.



Gambar 4.54 Maksimum *Strain* terhadap sudut Azimuth Pada Struktur *Hollow* dengan Sisipan Plat



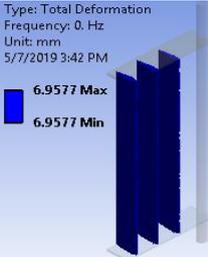
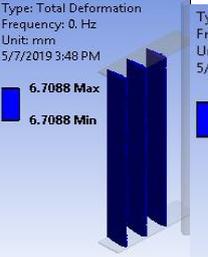
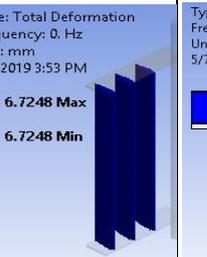
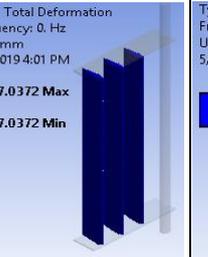
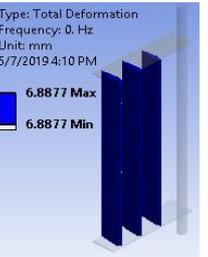
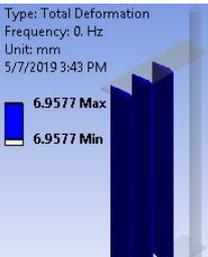
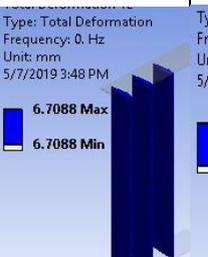
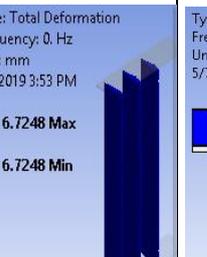
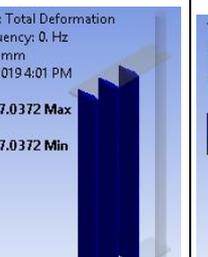
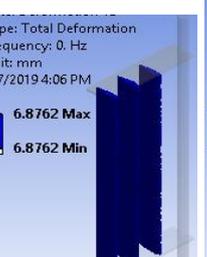
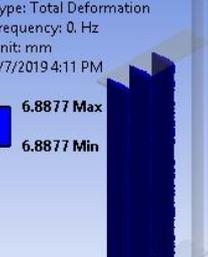
Gambar 4.55 Maksimum *Stress* terhadap sudut Azimuth Pada Struktur *Hollow* dengan Sisipan Plat

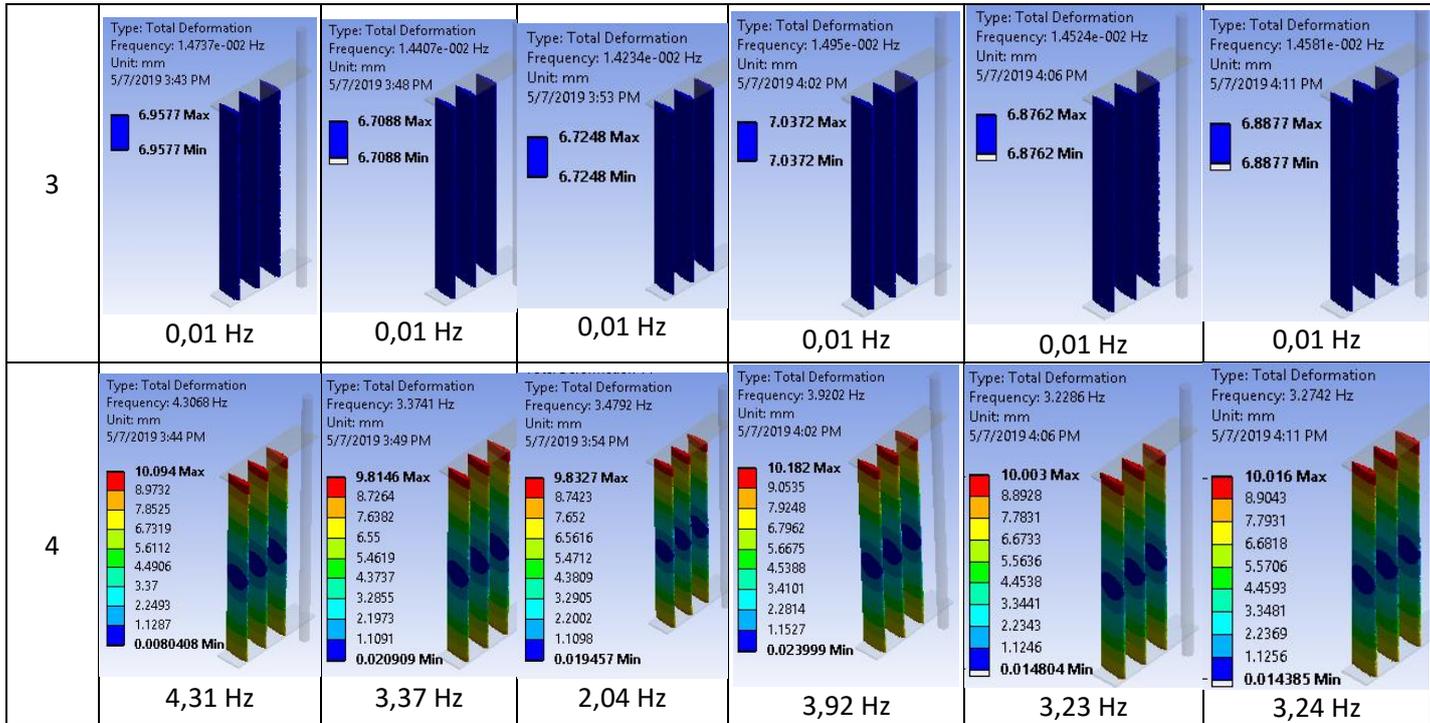


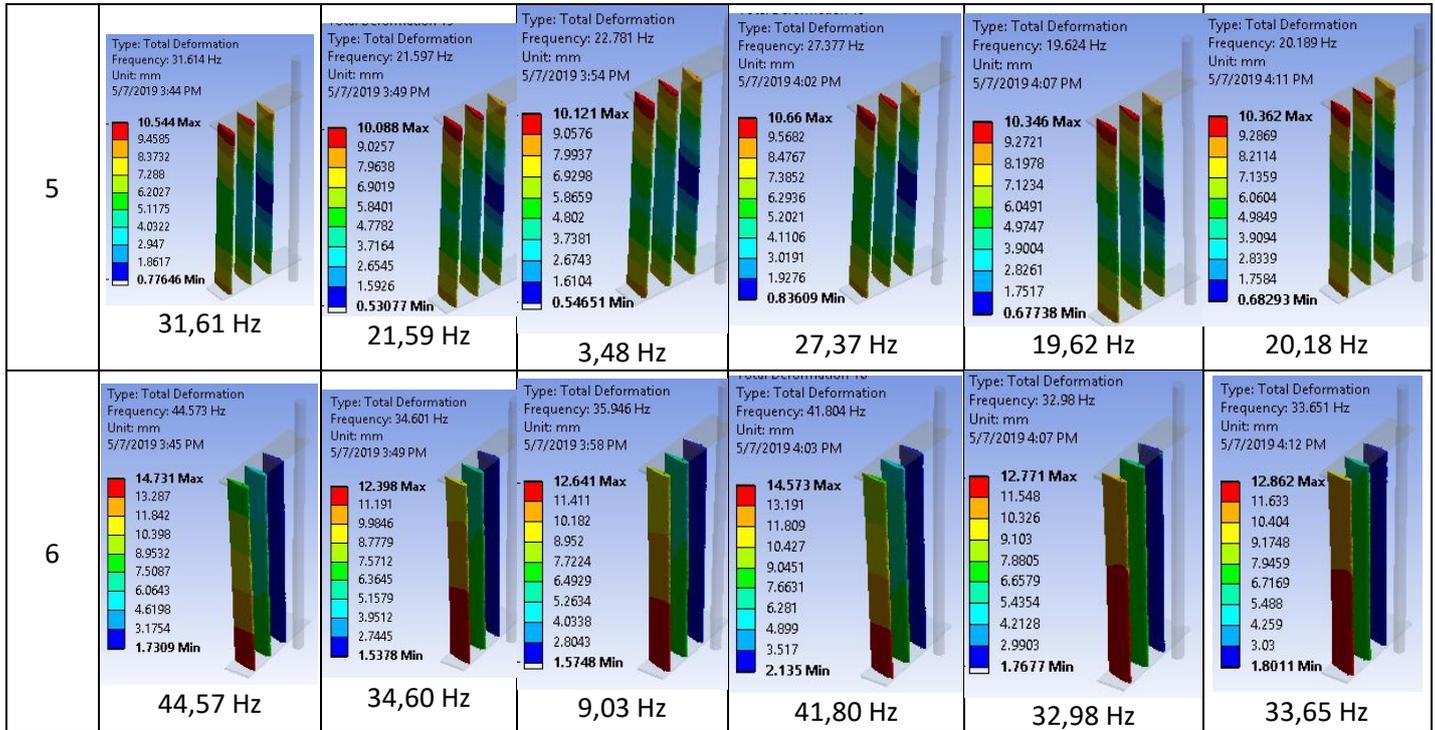
Gambar 4.56 Pengaruh Variasi Material Terhadap Frekuensi Natural

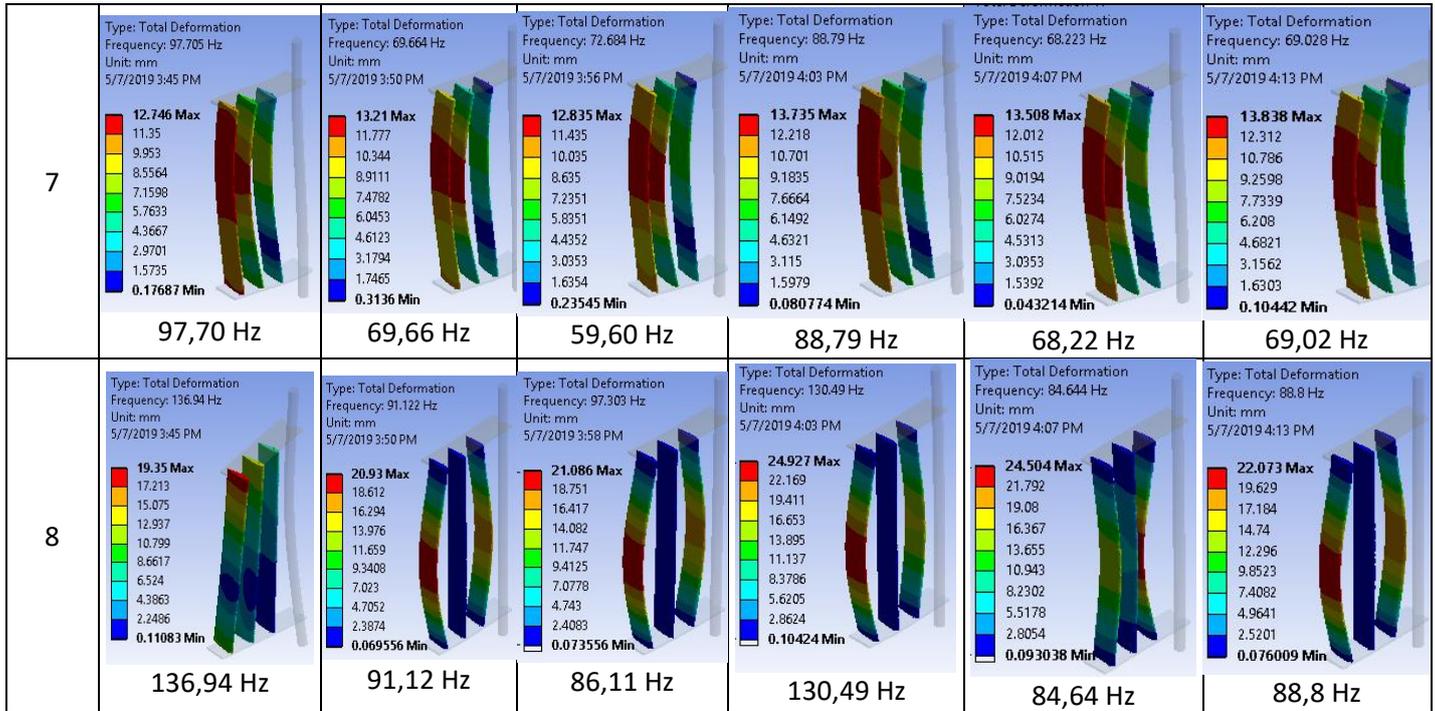
Gambar 4.56 menjelaskan mengenai pengaruh variasi material terhadap frekuensi natural, Berdasarkan hasil simulasi dapat diamati bahwa material carbon fiber memiliki nilai frekuensi natural yang lebih tinggi dibandingkan material yang lain. Sama seperti pada material di struktur-struktur sebelumnya pada mode ke 4 nilai frekuensi natural dari setiap variasi mendekati nilai frekuensi sistem, dengan selisih nilai frekuensi ± 3 Hz. Kedekatan nilai frekuensi ini rentan terjadi resonansi pada *blade*. Pada setiap moda tersebut, bentuk moda penting untuk diketahui. Bentuk moda yang terjadi pada setiap moda dijelaskan pada Tabel 4.5.

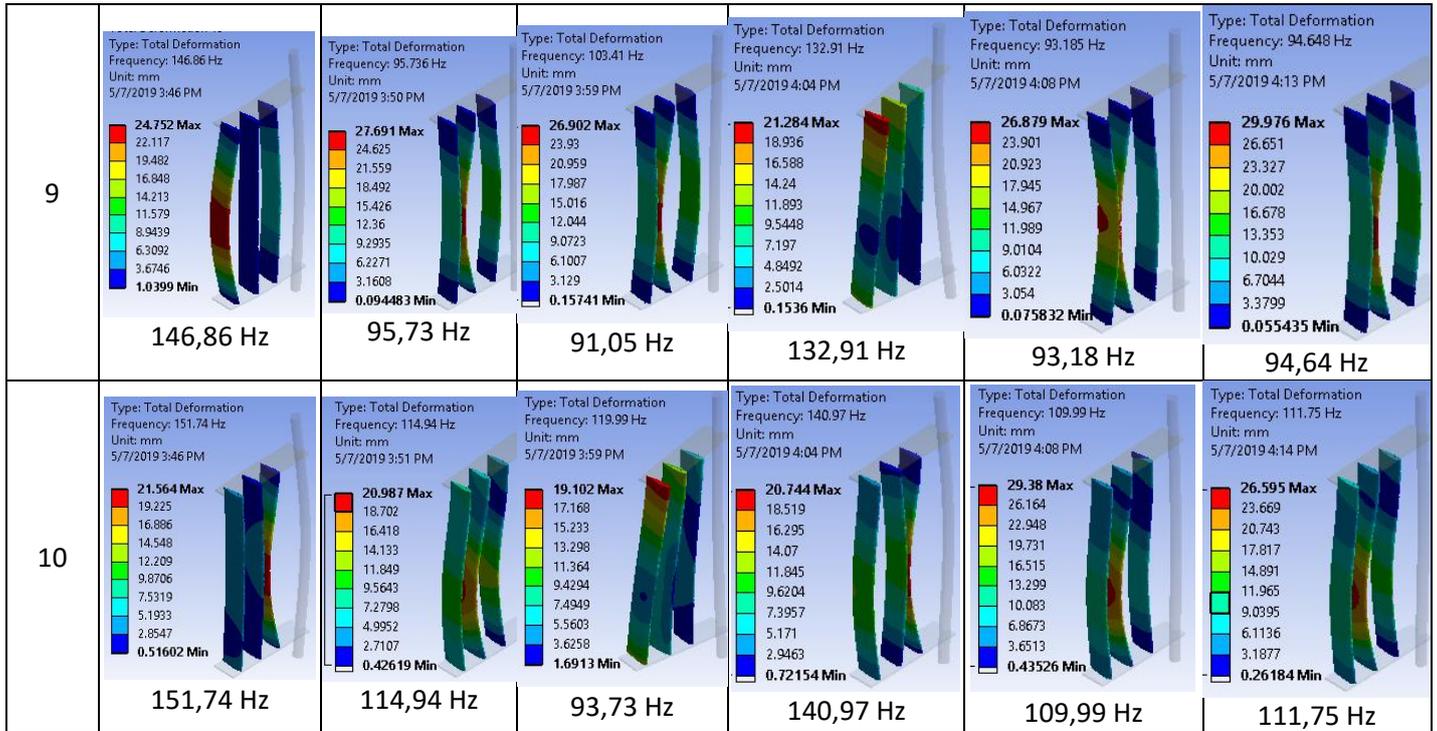
Tabel 4.5 Frekuensi Natural dan Bentuk Moda pada Struktur *Hollow* dengan Sisipan Plat

Moda ke	Frekuensi (Hz)					
	<i>Carbon Fiber</i>	<i>E Glass Fiber</i>	<i>S Glass Fiber</i>	<i>Carbon FRP</i>	<i>E Glass FRP</i>	<i>S Glass FRP</i>
1	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 3:42 PM</p>  <p>6.9577 Max 6.9577 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 3:48 PM</p>  <p>6.7088 Max 6.7088 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 3:53 PM</p>  <p>6.7248 Max 6.7248 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 4:01 PM</p>  <p>7.0372 Max 7.0372 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 4:05 PM</p>  <p>6.8762 Max 6.8762 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 4:10 PM</p>  <p>6.8877 Max 6.8877 Min</p> <p>0 Hz</p>
2	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 3:43 PM</p>  <p>6.9577 Max 6.9577 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 3:48 PM</p>  <p>6.7088 Max 6.7088 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 3:53 PM</p>  <p>6.7248 Max 6.7248 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 4:01 PM</p>  <p>7.0372 Max 7.0372 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 4:06 PM</p>  <p>6.8762 Max 6.8762 Min</p> <p>0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 4:11 PM</p>  <p>6.8877 Max 6.8877 Min</p> <p>0 Hz</p>









4.4 Pengaruh Variasi Struktur *Blade* yang Terhubung dengan *Arm* Terhadap Karakteristik Mekanik Material dan Respon Getaran

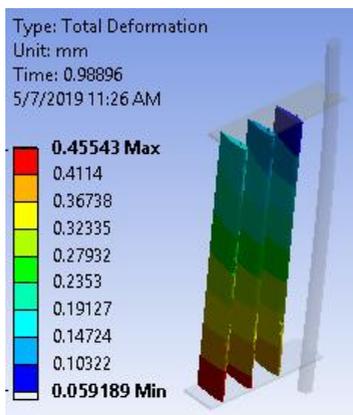
Pada bagian ini akan dianalisa pengaruh variasi struktur dari desain blade dengan material *carbon fiber*, dengan pertimbangan bahwa material ini yang digunakan pada penelitian sebelumnya. Dengan parameter yang dianalisa adalah karakteristik mekanik material seperti deformasi, maksimum strain, maksimum stress dan respon getaran seperti frekuensi natural dan bentuk moda.

4.4.1 Deformasi

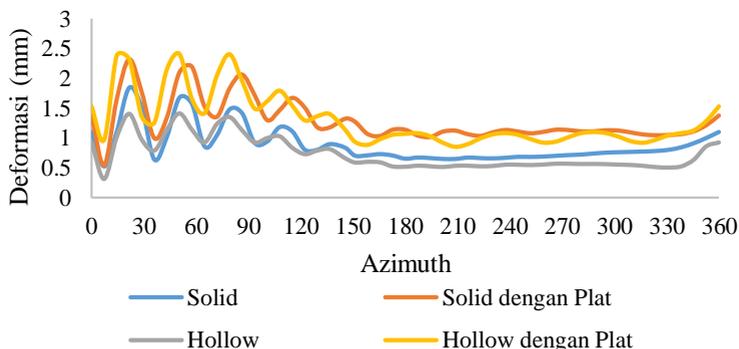
Total deformasi merupakan total keseluruhan deformasi yang terjadi dari arah sumbu x, y, dan z. Pada Gambar 4.40 dapat diamati bahwa bagian bawah dari sisi terluar SBC mengalami deformasi terbesar daripada bagian blade yang lain sebesar 0,45543 mm pada struktur solid. Hal ini sesuai dengan distribusi tekanan pada Gambar 4.58. Bagian bawah tersebut memiliki beban dinamik yang lebih besar dibanding area yang lain jika dibandingkan dengan Gambar 4.1 yang menunjukkan distribusi beban dinamik pada *blade*, *shaft* dan *arm*. Adapun profil persebaran deformasi pada tiap – tiap variasi struktur juga menunjukkan bahwa pada bagian bawah SBC ini merupakan area dengan deformasi terbesar. Profil persebaran deformasi pada setiap struktur dilampirkan pada lempiran.

Selama 1 putaran turbin bekerja, deformasi turbin mengalami fluktuatif hal ini berkorelasi dengan beban dinamik yang diterima oleh turbin. Fluktuatifnya beban dinamik ini disebabkan oleh perbedaan sudut azimuth turbin saat terkena fluida. Pada Gambar 4.59 menjelaskan mengenai pengaruh variasi struktur dari turbin selama 1 putaran, pada $0 < \theta < 90$ merupakan puncak dari nilai deformasi yang terjadi selama satu putaran. Turbin dengan struktur *hollow* memiliki nilai deformasi terkecil yaitu sebesar 2,2 mm. Hal ini dapat terjadi karena semakin tebal bagian dari blade menyebabkan gaya inersia yang terjadi semakin besar. Saat massa blade semakin meningkat menyebabkan beban massa inersia yang

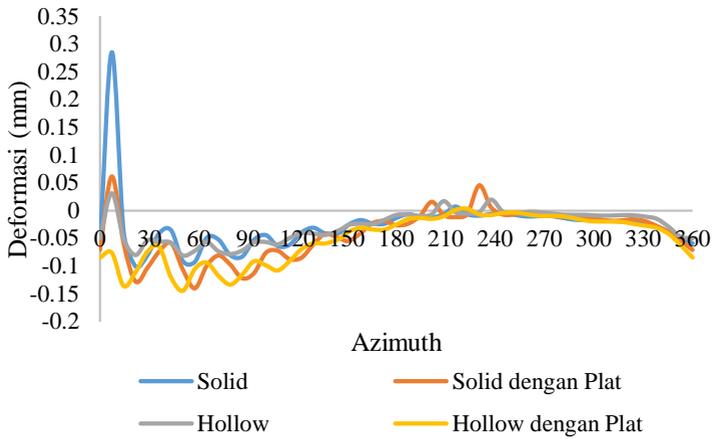
besar, sehingga nilai deformasi akan meningkat pada saat turbin bekerja [20]. Adapun untuk mengetahui nilai dan arah deformasi yang terjadi lebih detail maka pada Gambar 4.60 – 4.62 menunjukkan nilai deformasi pada sumbu x, y dan z. Dari hasil tersebut dapat diamati bahwa pada sumbu z memiliki nilai deformasi maksimum.



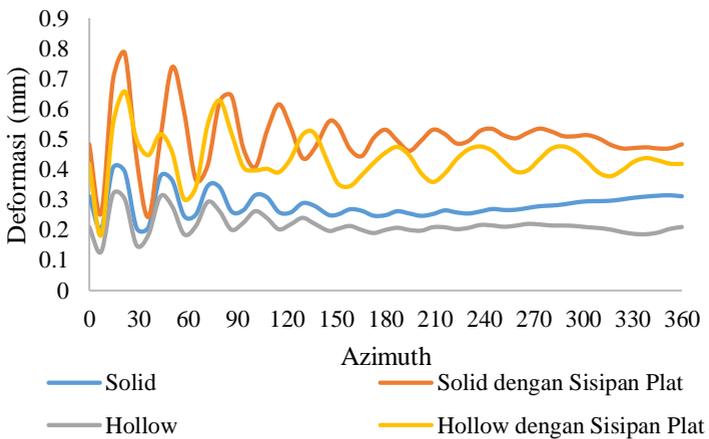
Gambar 4.57 Distribusi Deformasi Pada SBC, Arm dan Shaft dengan *Blade* Struktur *Solid* dan Material Carbon



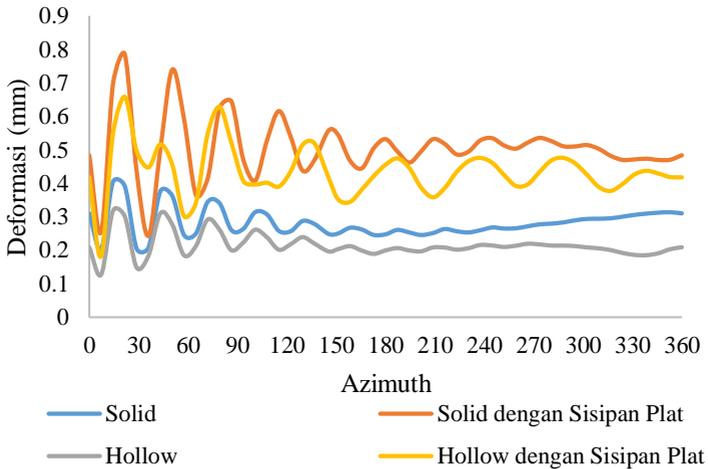
Gambar 4.58 Pengaruh Variasi Struktur *Blade* Terhadap Deformasi *Blade* Pada 1 Putaran



Gambar 4.59 Pengaruh Variasi Struktur *Blade* Terhadap Deformasi Pada Sumbu X

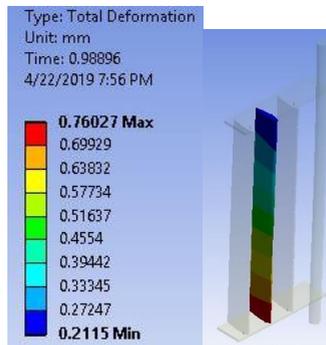


Gambar 4.60 Pengaruh Variasi Struktur *Blade* Terhadap Deformasi Pada Sumbu Y

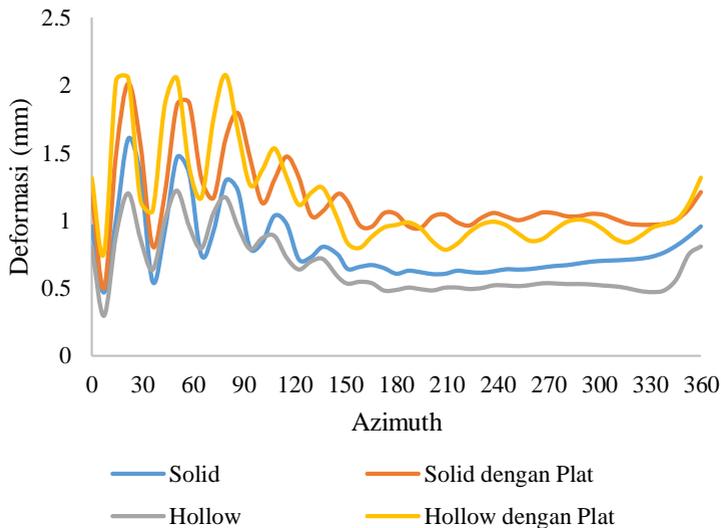


Gambar 4.61 Pengaruh Variasi Struktur *Blade* Terhadap Deformasi Pada Sumbu Z

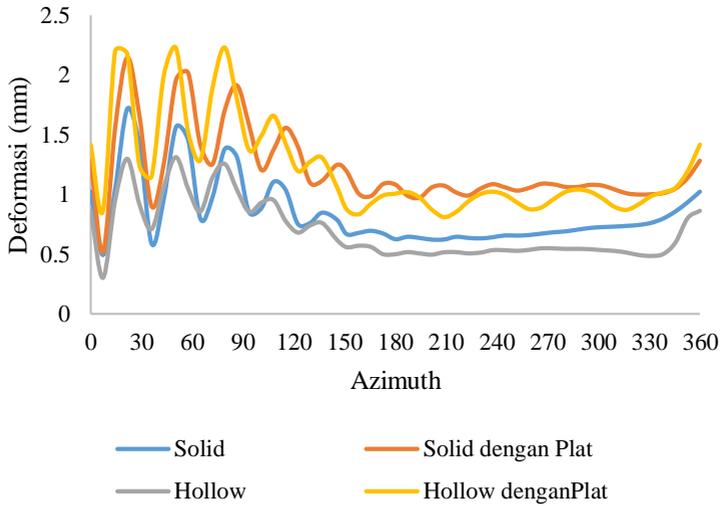
Pada Gambar 4.63 - 4.67 merupakan analisis deformasi pada masing- masing *blade* beserta persebaran yan terjadi. Bagian *blade* yang terdalam memiliki nilai deformasi terkecil karena terjadi disturbansi pada aliran dari bagian *blade* terluar, sehingga beban dinamik yang terjadi pada blade terdalam akan menjadi lebih kecil. Dan bagian luar *blade* merupakan bagian yang memiliki nilai deformasi terbesar. Oleh karena itu pada *blade* ini ditinjau nilai deformasi yang terjadi sepanjang *span* yang ditunjukkan pada Gambar 4.68.



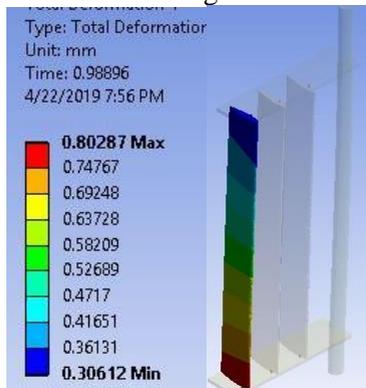
Gambar 4.62 Distribusi Deformasi *Blade* Dalam pada Variasi *Blade* Struktur *Solid* dan Material Carbon



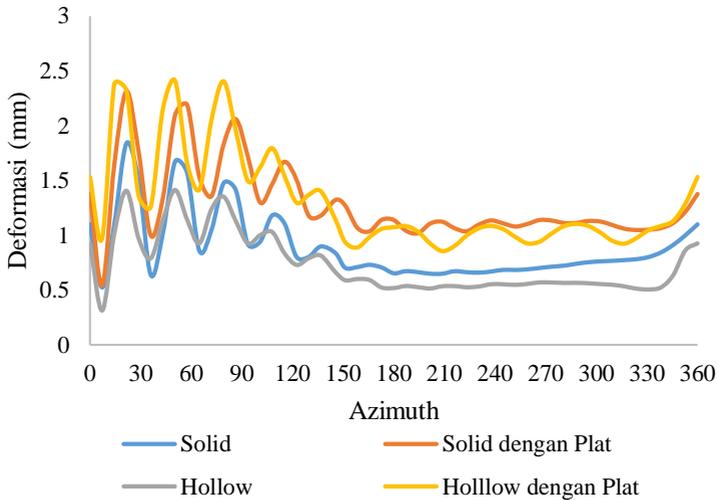
Gambar 4.63 Pengaruh Variasi Struktur Terhadap Deformasi *Blade* Dalam



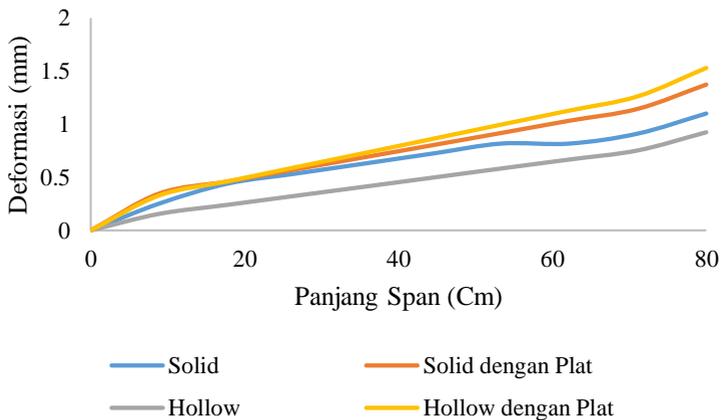
Gambar 4.64 Pengaruh Perubahan Variasi Struktur Terhadap Deformasi *Blade* Tengah Pada 1 Putaran



Gambar 4.65 Distribusi Deformasi Pada *Blade* Luar dari Turbin Struktur *Solid* dan Material Carbon



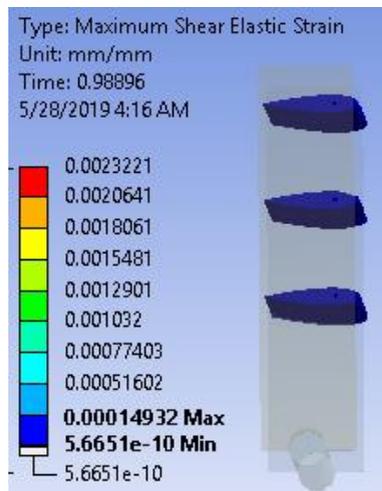
Gambar 4.66 Pengaruh Perubahan Variasi Struktur Terhadap Deformasi *Blade* Luar Pada 1 Putaran



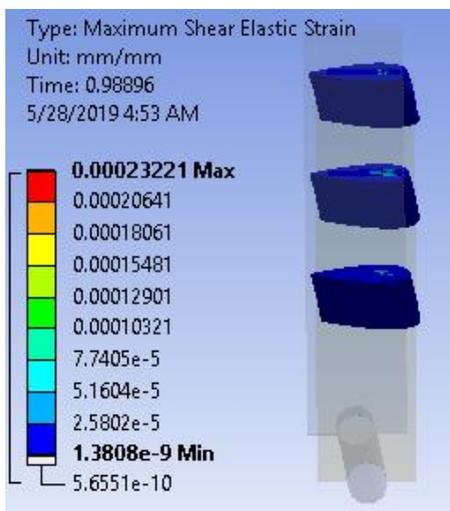
Gambar 4.67 Pengaruh Variasi Struktur Terhadap Deformasi Sepanjang *Span*

4.4.2 Maksimum *Strain*

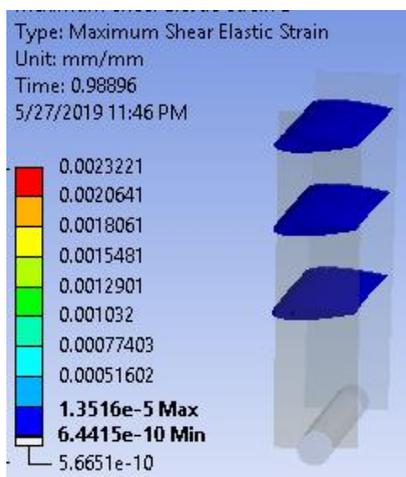
Maksimum *strain* merupakan nilai maksimum regangan yang terjadi pada kondisi elastis sebelum material mengalami deformasi. Pada Gambar 4.69 hingga 4.72 menunjukkan persebaran nilai maksimum *strain* berturut-turut dari struktur solid, solid dengan sisipan plat, hollow, hollow dengan sisipan plat secara. Dapat diamati bahwa pada bagian atas *blade* yang terhubung dengan *arm* memiliki nilai maksimum *strain* terbesar dibandingkan dengan bagian yang lain. Karena pada bagian ini lebih dekat dengan *fixed support* yang mempertahankan posisinya.



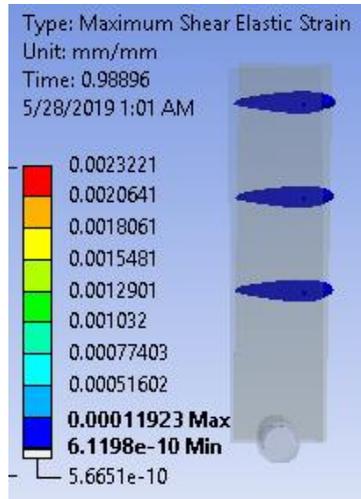
Gambar 4.68 Distribusi *Strain* pada SBC, *Arm* dan *Shaft* dengan *Blade* Struktur *Solid*



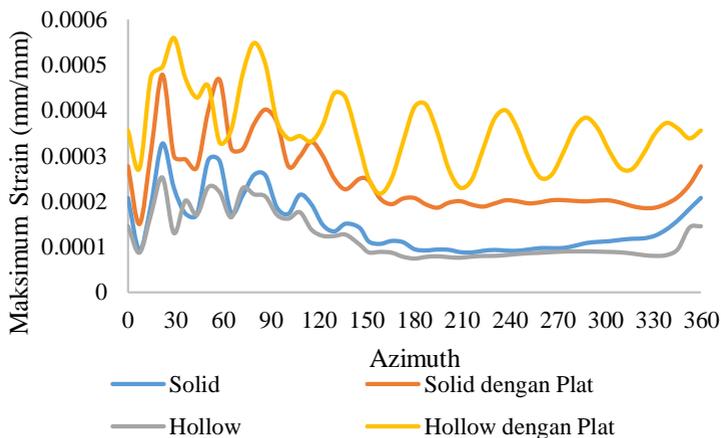
Gambar 4.69 Distribusi *Strain* pada SBC, Arm dan Shaft dengan Blade Struktur Solid dengan Plat



Gambar 4.70 Distribusi *Strain* pada SBC, Arm dan Shaft dengan Blade Struktur *Hollow*



Gambar 4.71 Distribusi *Strain* pada SBC, Arm dan Shaft dengan Blade Struktur Hollow dengan Plat



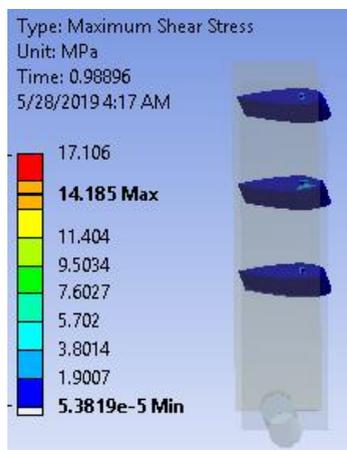
Gambar 4.72 Grafik Pengaruh Perubahan Variasi Struktur *Blade* Terhadap *Strain* SBC, *Arm* dan *Shaft* Pada 1 Putaran

Pada Gambar 4.73 dipaparkan profil maksimum *strain* dari pengaruh perubahan struktur SBC selama satu putaran. Sama seperti profil deformasi pada sudut azimuth 90 SBC mengalami nilai maksimum *strain* yang terbesar hal ini disebabkan karena pada azimuth tersebut posisi SBC berada dekat dengan inlet. Dari Gambar tersebut dapat diamati bahwa nilai maksimum *strain* tiap struktur cukup signifikan, dan struktur *hollow* memiliki nilai maksimum *strain* terkecil juga jika dibandingkan dengan struktur yang lain yaitu 0,0004 mm/mm.

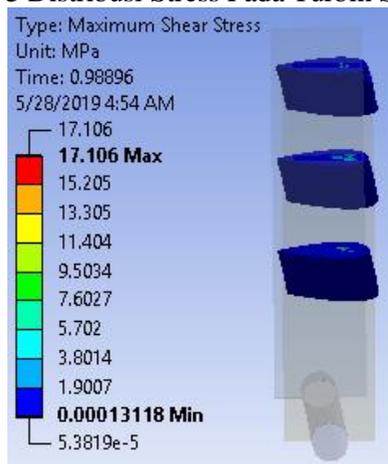
4.4.3 Maksimum *Stress*

Berdasarkan Gambar 4.74 - 4.77 profil distribusi maksimum *stress* yang terjadi pada *blade*. Nilai *stress* tertinggi terletak pada bagian atas. Bagian turbin ini menerima beban dinamik menyeluruh, namun bagian atas terdapat *fixed support* yang menahan turbin. Sehingga bagian ini memiliki nilai *stress* tertinggi. M. Heyder, G Khun pada penelitiannya melakukan eksperimen perambatan keretakan akibat kelelahan material sehingga material tidak mampu menahannya lagi. Berdasarkan hal tersebut kemungkinan retak menjalar dari area dengan nilai maksimum *stress* terbesar [21]. Saat luas permukaan *blade* tidak mampu menahan lagi akan terjadi patah pada *blade*. Oleh karena itu berdasarkan simulasi yang telah dilakukan dari keseluruhan bagian turbin bagian atas apabila dianalisis dari nilai *stress*nya akan memiliki kemungkinan retak yang paling tinggi dibandingkan dengan bagian *blade* yang lain.

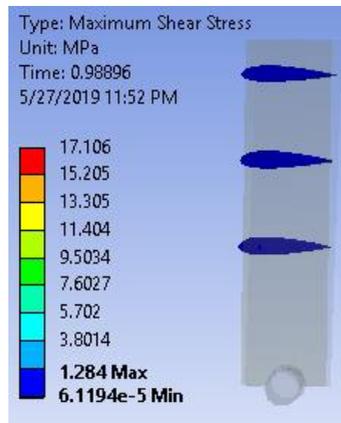
Selain profil distribusi maksimum *stress* pada Gambar 4.78 dijelaskan mengenai pengaruh maksimum *stress* terhadap sudut azimuth. Dari gambar tersebut dapat diamati bahwa maksimum *stress* pada sudut $0 < \theta < 120$ memiliki nilai maksimum *stress* yang puncak dibandingkan dengan sudut azimuth yang lain.. Hal ini dapat terjadi karena pada sudut azimuth tersebut beban dinamik yang terjadi pada *blade* lebih tinggi dibandingkan dengan sudut azimuth yang lain.



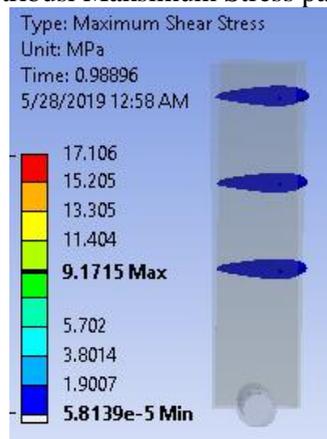
Gambar 4.73 Distribusi Stress Pada Turbin Struktur Solid



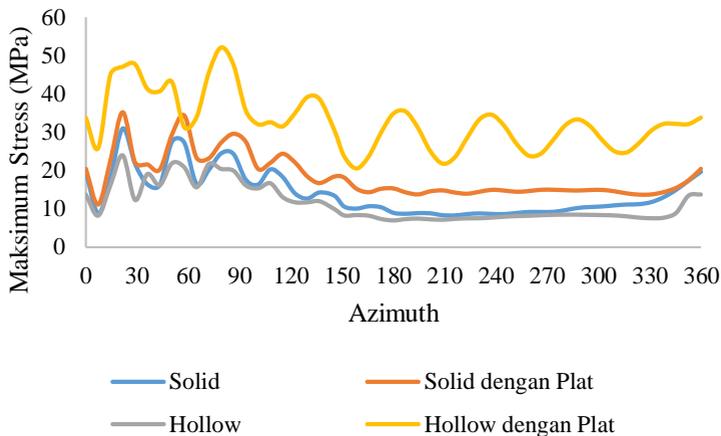
Gambar 4.74 Distribusi Maksimum Stress Turbin terhadap sudut Azimuth pada Struktur Solid dengan Sisipan Plat



Gambar 4.75 Distribusi Maksimum Stress pada Struktur Hollow



Gambar 4.76 Distribusi Maksimum Stress Pada Struktur Hollow dengan Sisipan Plat



Gambar 4.77 Pengaruh Perubahan Variasi Struktur Terhadap Maksimum Stress Turbin Pada 1 Putaran

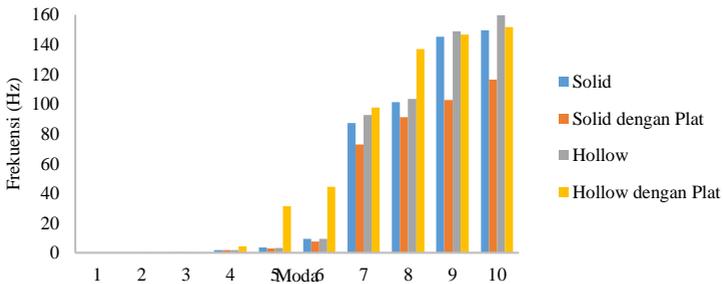
4.4.4 Safety Factor

Pada simulasi yang telah dilakukan didapatkan bahwa pada setiap variasi desain struktur memiliki nilai *safety factor* sebesar 15. Hal ini terjadi karena berdasarkan persamaan 2.16 yang menjelaskan mengenai *safety factor*, nilai maksimum stress dari setiap simulasi yang dilakukan memiliki nilai stress yang jauh lebih besar dibandingkan dengan nilai dari *tensile yield strength* dari setiap material yang digunakan. Nilai *safety factor* tersebut masih termasuk kondisi aman *stress*, karena berdasarkan buku yang ditulis oleh *callister* rentang nilai *safety factor* normal sebesar 1,2 hingga 4. [14]

4.5 Pengaruh Variasi Struktur *Blade* yang Terhubung dengan *Arm* Terhadap Moda

Pada bagian ini akan dianalisa pengaruh variasi struktur dari desain *blade* dengan material *fiber carbon*, dengan pertimbangan bahwa material ini yang digunakan pada penelitian sebelumnya. Dengan parameter yang dianalisa adalah respon

moda seperti frekuensi natural dan bentuk moda. Hubungan antara moda dengan frekuensi pada tiap-tiap variasi dinyatakan pada Gambar 4.79. Pada hasil simulasi tersebut dapat diamati bahwa nilai frekuensi struktur *hollow* dengan plat memiliki nilai frekuensi yang lebih tinggi pada moda ke 4-8. Dan kemudian frekuensi natural pada moda berikutnya struktur *hollow* dengan sisipan *plat* meningkat.



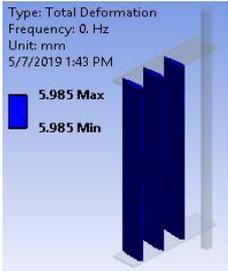
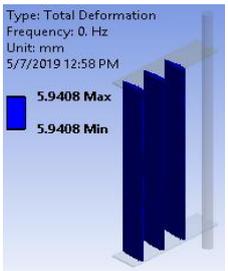
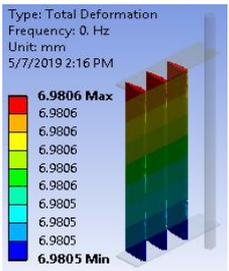
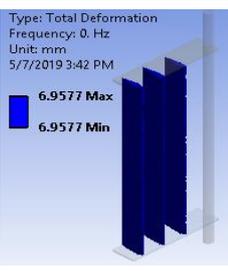
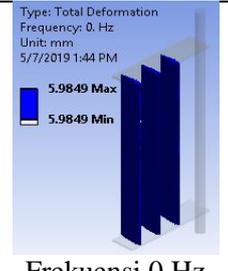
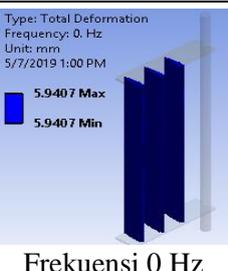
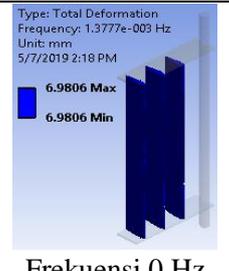
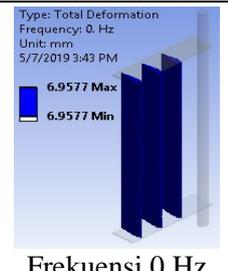
Gambar 4.78 Pengaruh Perubahan Variasi Struktur Terhadap Frekuensi Natural SBC

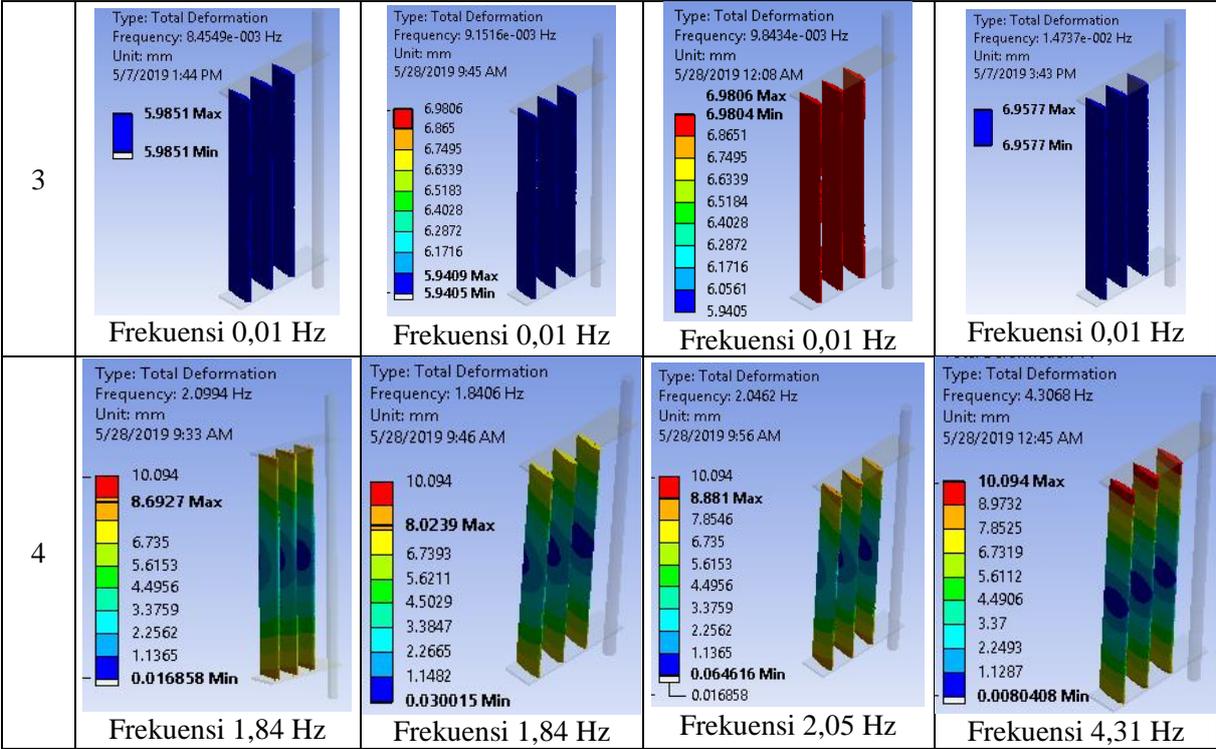
$$\omega = \frac{v}{r} \quad (4.1)$$

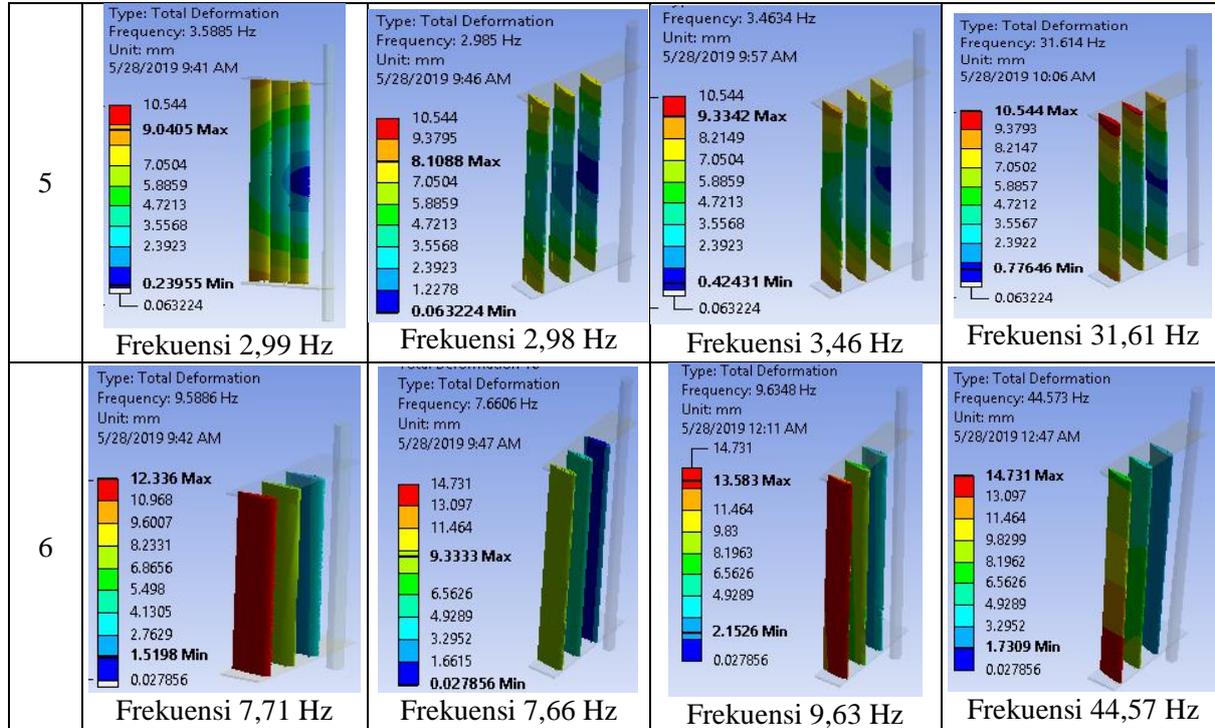
$$\omega = 2\pi f \quad (4.2)$$

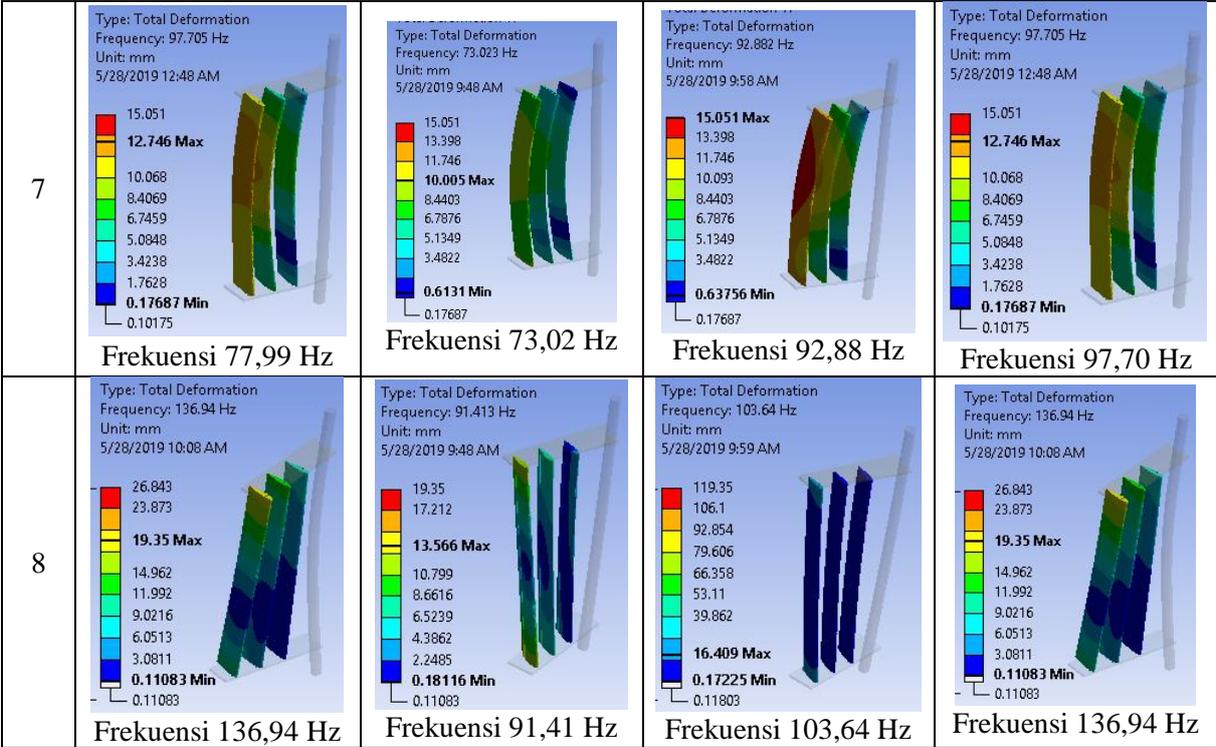
Adapun bentuk moda adalah bentuk benda saat bergetar pada frekuensi natural. Bentuk dari moda ini berperan penting dalam mengamati arah getaran dan bentuk benda pada saat bergetar. Apabila terjadi resonansi dari sistem, diketahuinya bentuk moda ini dapat membantu dalam mendesain area *blade* yang mengalami defleksi terbesar, untuk menghindari terjadinya retak atau patah pada area tersebut saat *blade* beroperasi. Pada Tabel 4.6 ini dapat diamati pengaruh variasi struktur terhadap bentuk moda. Bentuk-bentuk moda pada masing-masing struktur relatif sama seiring dengan kenaikan moda. Adapun moda yang digunakan pada simulasi ini dibatasi hingga 10 moda. Karena moda-moda yang lebih tinggi mewakili energi getaran yang besar yang kemungkinan kecil terjadi pada saat sistem beroperasi. Moda – moda pada frekuensi rendah 0 Hz ini menyatakan bahwa pada moda tersebut bergerak secara rigid pada setiap sumbu x,y,z. Sedangkan pada moda yang lain *blade* mulai mengalami defleksi.

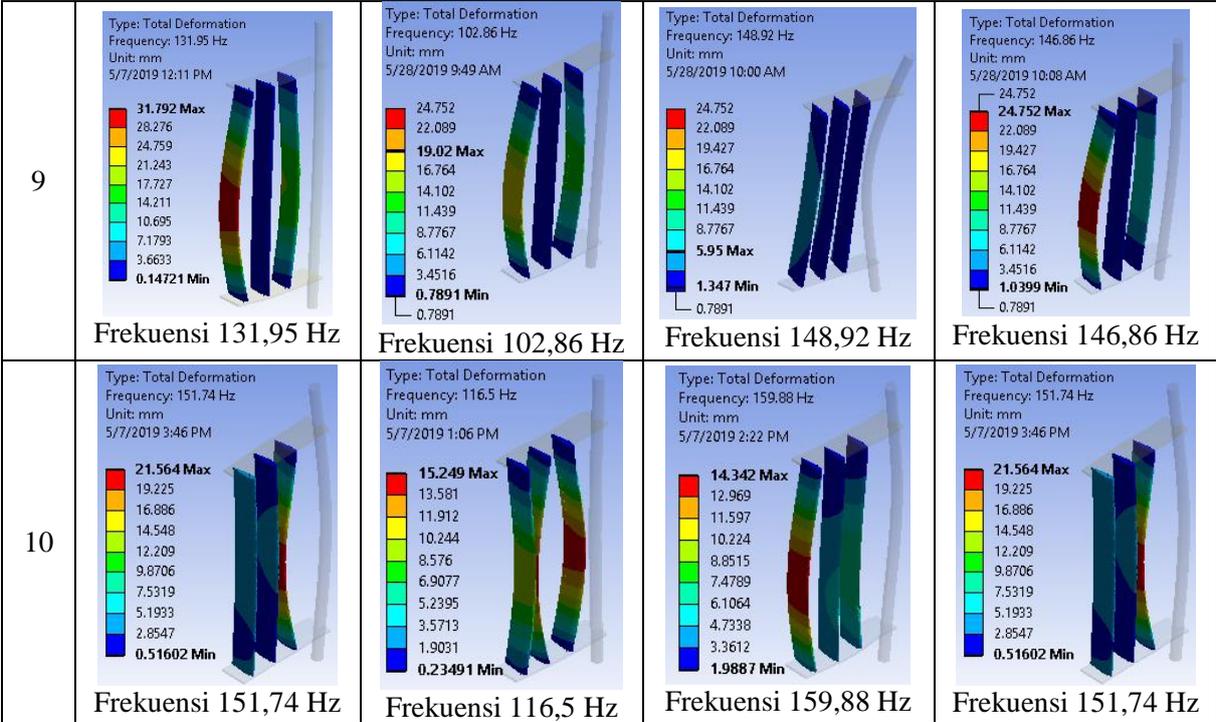
Tabel 4.6 Pengaruh Variasi Struktur Terhadap Frekuensi Natural dan Moda

Moda ke	Bentuk Moda dan Frekuensi (Hz)			
	<i>Solid</i>	<i>Solid</i> dengan Sisipan Plat	<i>Hollow</i>	<i>Hollow</i> dengan Sisipan Plat
1	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 1:43 PM</p>  <p>5.985 Max 5.985 Min</p> <p>Frekuensi 0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 12:58 PM</p>  <p>5.9408 Max 5.9408 Min</p> <p>Frekuensi 0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 2:16 PM</p>  <p>6.9806 Max 6.9806 6.9806 6.9806 6.9806 6.9806 6.9805 6.9805 6.9805 6.9805 Min</p> <p>Frekuensi 0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 3:42 PM</p>  <p>6.9577 Max 6.9577 Min</p> <p>Frekuensi 0 Hz</p>
2	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 1:44 PM</p>  <p>5.9849 Max 5.9849 Min</p> <p>Frekuensi 0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 1:00 PM</p>  <p>5.9407 Max 5.9407 Min</p> <p>Frekuensi 0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 1.3777e-003 Hz Unit: mm 5/7/2019 2:18 PM</p>  <p>6.9806 Max 6.9806 Min</p> <p>Frekuensi 0 Hz</p>	<p>Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/7/2019 3:43 PM</p>  <p>6.9577 Max 6.9577 Min</p> <p>Frekuensi 0 Hz</p>







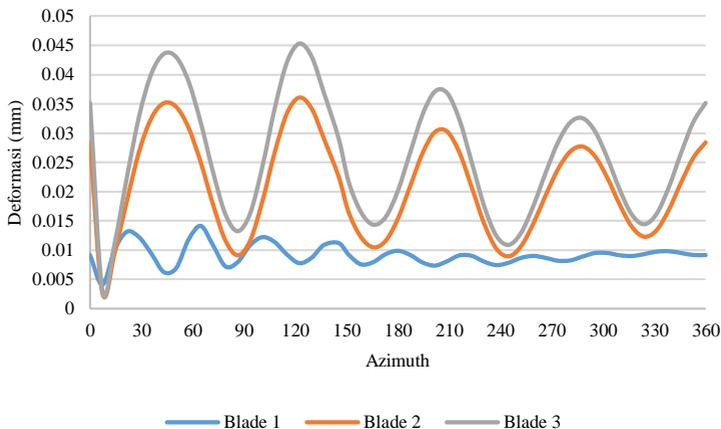


4.6 Karakteristik Mekanik Material dan Moda Pada *Stand Alone Blade*

Pada bagian ini membahas mengenai pengaruh struktur dan material terhadap deformasi, stress, strain, safety factor, frekuensi natural serta bentuk moda dari *blade* tunggal dan *blade cascaded*.

4.6.1 *Blade Tunggal*

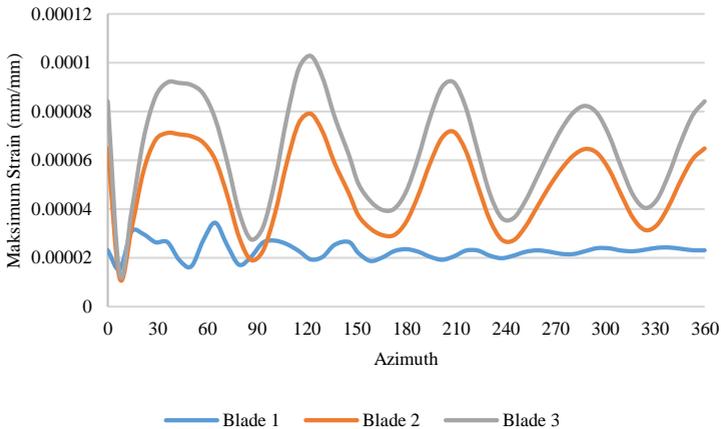
Pada bagian ini membahas mengenai analisis pada 3 letak *blade* dari jarak pusat rotasi secara berturut turut *blade 1*, *blade 2* dan *blade 3* adalah 10 cm, 20 cm, dan 30 cm.



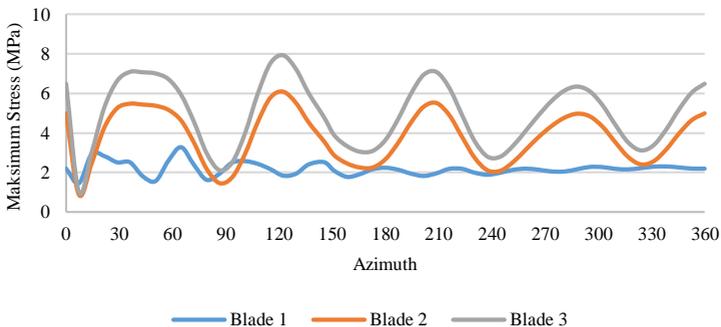
Gambar 4.79 Deformasi yang Terjadi Pada *Blade 1*, *Blade 2* dan *Blade 3* Terhadap Sudut Azimuth

Pada Gambar 4.80 dapat diamati deformasi yang terjadi pada *blade 1*, *blade 2* dan *blade 3* mengalami perubahan yang fluktuatif. Hal ini dikarenakan pada saat pemodelan domain *fixed support* yang digunakan hanya pada bagian atas blade hal ini menyebabkan *blade* lebih menjaga posisinya saat menerima beban. Adapun *blade 3* memiliki nilai deformasi yang paling besar. Pada sudut azimuth 50 blade 3 memiliki nilai deformasi sebesar 0,04 m, sedangkan blade 2 berdeformasi sebesar 0,03 mm dan blade 1 sebesar 0,005 mm. Nilai deformasi blade 3 paling besar dikarenakan *blade 3*

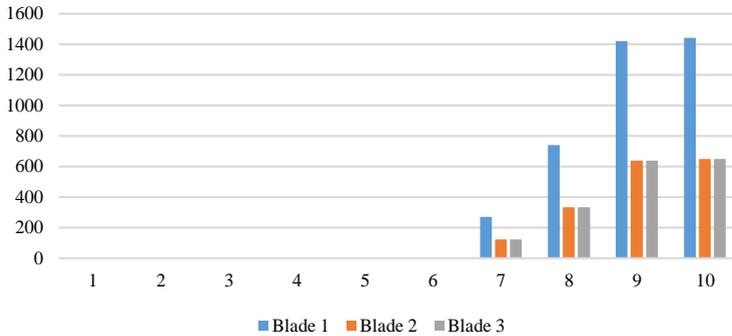
merupakan *blade* yang paling dekat interaksinya dengan aliran inlet dibandingkan posisi *blade* yang lain. Kemudian hal ini juga terjadi pada nilai maksimum *strain* dan *stress* yang dapat diamati pada Gambar 4.81 dan 4.82. Nilai yang paling besar terdapat pada *blade* 3.



Gambar 4.80 Maksimum *Strain* yang Terjadi Pada *Blade 1*, *Blade 2* dan *Blade 3* Terhadap Sudut Azimuth



Gambar 4.81 Maksimum *Stress* yang Terjadi Pada *Blade 1*, *Blade 2* dan *Blade 3* Terhadap Sudut Azimuth

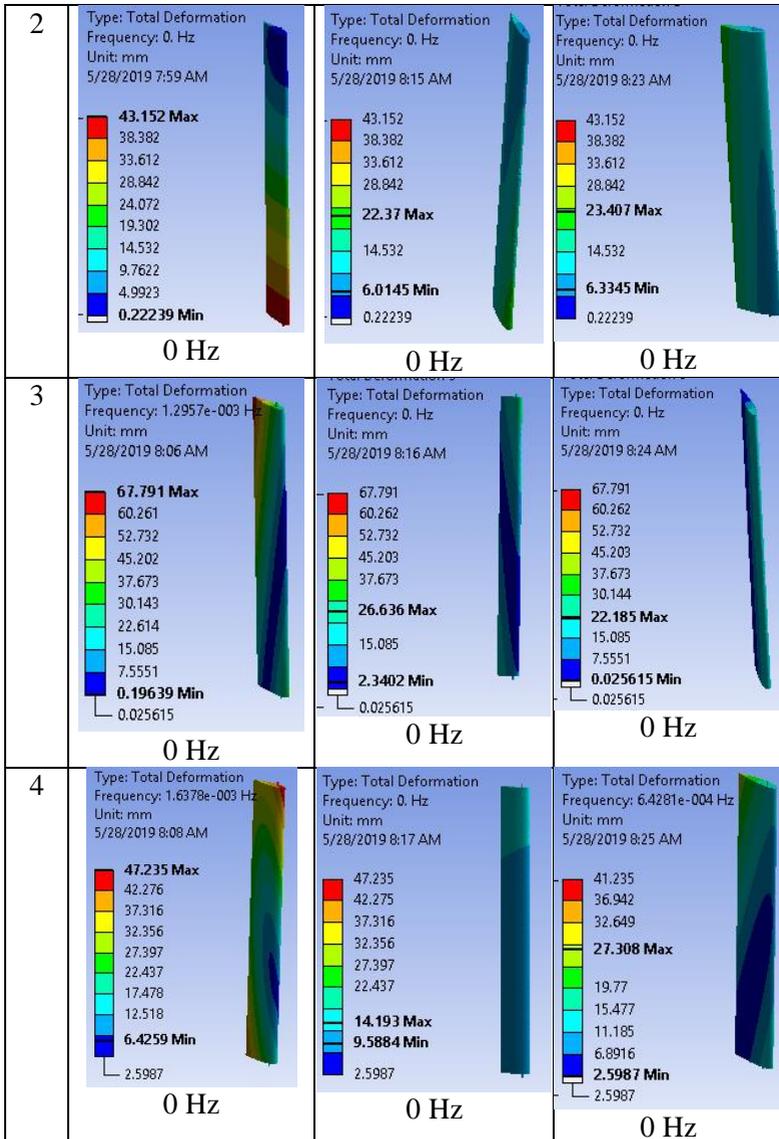


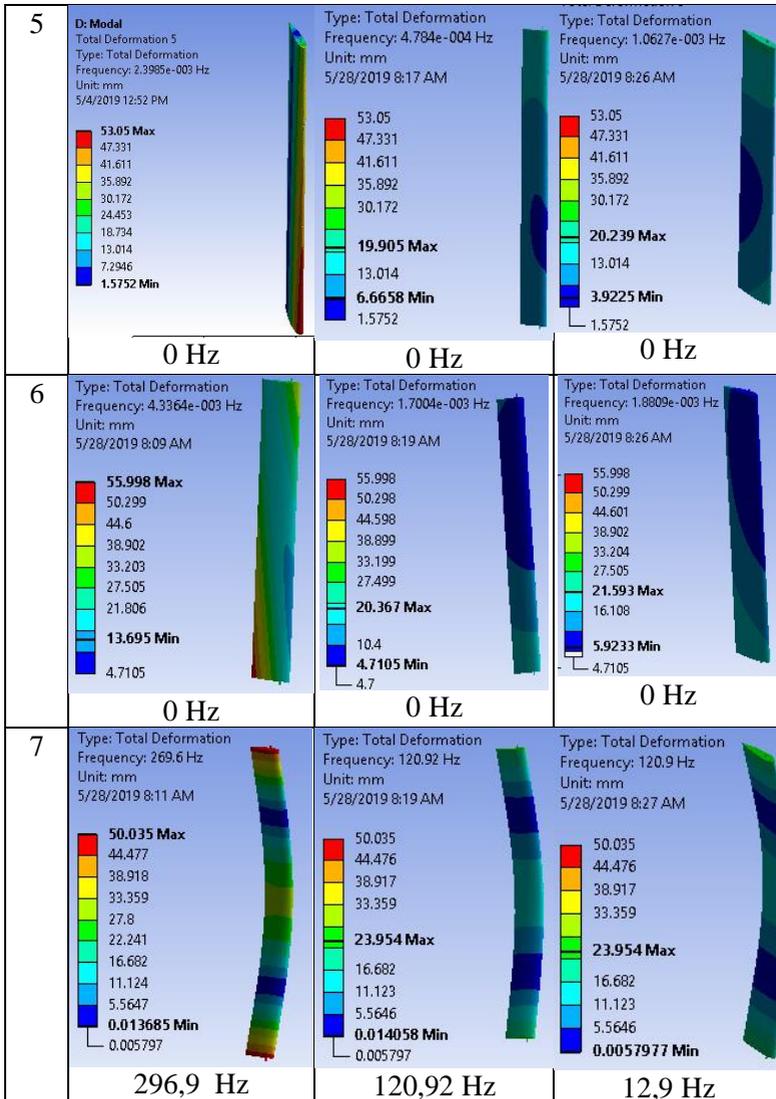
Gambar 4.82 Frekuensi Natural Pada *Blade 1, Blade 2, Blade 3*

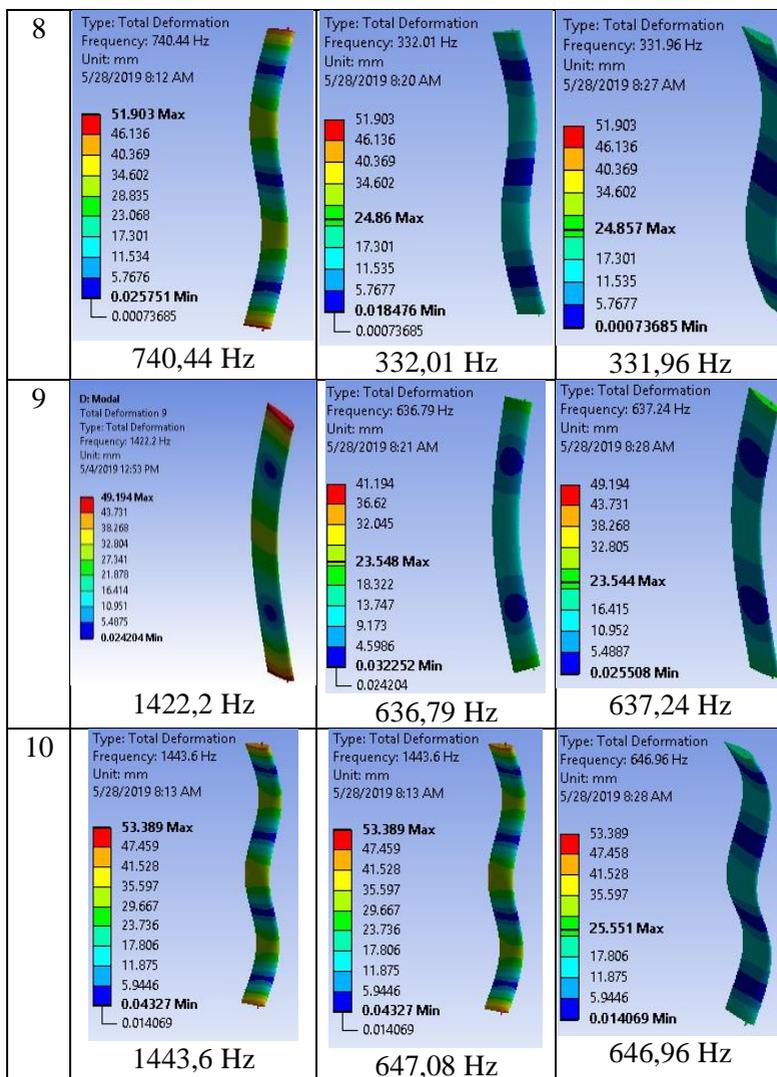
Pada Gambar 4.83 dapat diamati bahwa *blade* dalam memiliki nilai frekuensi yang lebih tinggi dibandingkan *blade* yang lain. Untuk bentuk moda dari setiap frekuensi dapat diamati pada Tabel 4.7 pada moda ke 8 keatas nilai frekuensi meningkat signifikan dan menghasilkan nilai defleksi yang paling besar.

Tabel 4.7 Bentuk Moda dan Frekuensi Natural Pada *Blade 1, Blade 2 dan Blade 3*

Moda ke-	Bentuk Moda dan Frekuensi		
	Blade 1	Blade 2	Blade 3
1	Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/28/2019 7:53 AM 38.895 Max 34.855 30.814 26.774 22.734 17.397 Min 10.613 6.5731 2.5329	Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/28/2019 8:14 AM 38.895 29.121 Max 22.734 18.694 14.654 10.613 5.0626 Min 2.5329	Type: Total Deformation Frequency: 0. Hz Unit: mm 5/28/2019 8:23 AM 38.895 34.855 28.806 Max 22.734 18.694 14.654 10.613 6.5732 2.5329 Min
	0 Hz	0 Hz	0 Hz

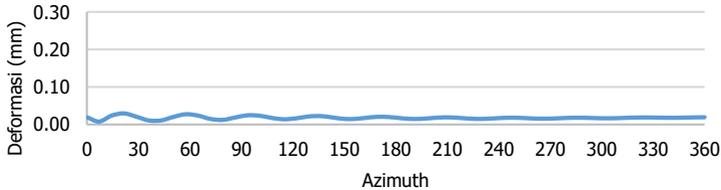






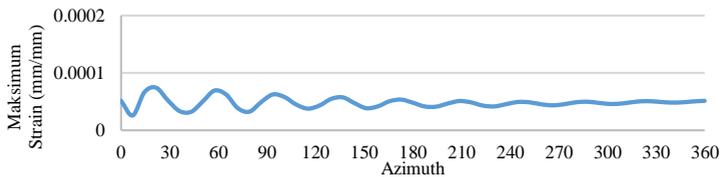
4.6.2 Blade Cascaded

Ketiga blade yang terletak pada jarak yang berbeda namun masih pada *array* yang sama disusun secara *cascaded* untuk mendapatkan nilai performansi turbin yang lebih baik [4]. *Blade* yang terusun *cascaded* ini kemudian dianalisis karakteristik mekanik material dan respon modanya.



Gambar 4.83 Deformasi SBC Stand Alone Terhadap Sudut Azzimuth

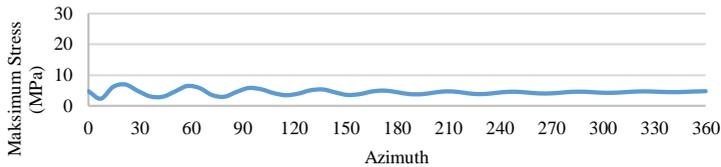
Dari hasil simulasi yang telah dilakukan yang ditunjukkan pada Gambar 4.84 deformasi yang terjadi pada SBC *stand alone* mengalami nilai yang fluktuatif. Hal ini terjadi karena *blade* bergerak mempertahankan posisinya secara terus menerus sehingga hasil yang terjadi menjadi fluktuatif.



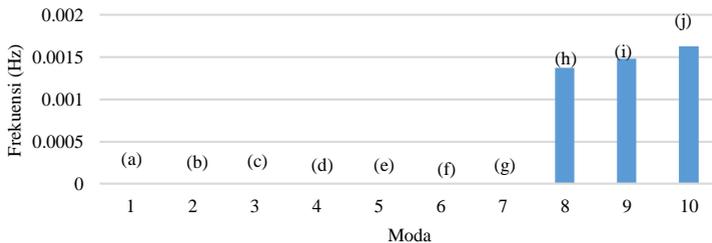
Gambar 4.84 Maksimum Strain yang Terjadi Pada Blade 1, Blade 2 dan Blade 3 Terhadap Sudut Azimuth

Hal ini juga terjadi pada maksimum *stress* dan maksimum *strain*. Gambar 4.85 dan 4.86 menunjukkan nilai maksimum stress serta maksimum strain pada setiap azimuth. Dapat diamati bahwa pola stress dan stress yang terjadi sama dan fluktuatif pada setiap azimuth. Hal ini dapat terjadi karena pada simulasi yang dilakukan menggunakan 6 *fixed support* pada masing – masing ujung *blade*

sehingga, pada saat simulasi *blade* yang mempertahankan posisinya akan menghasilkan nilai stress dan strai yang fluktuatif.



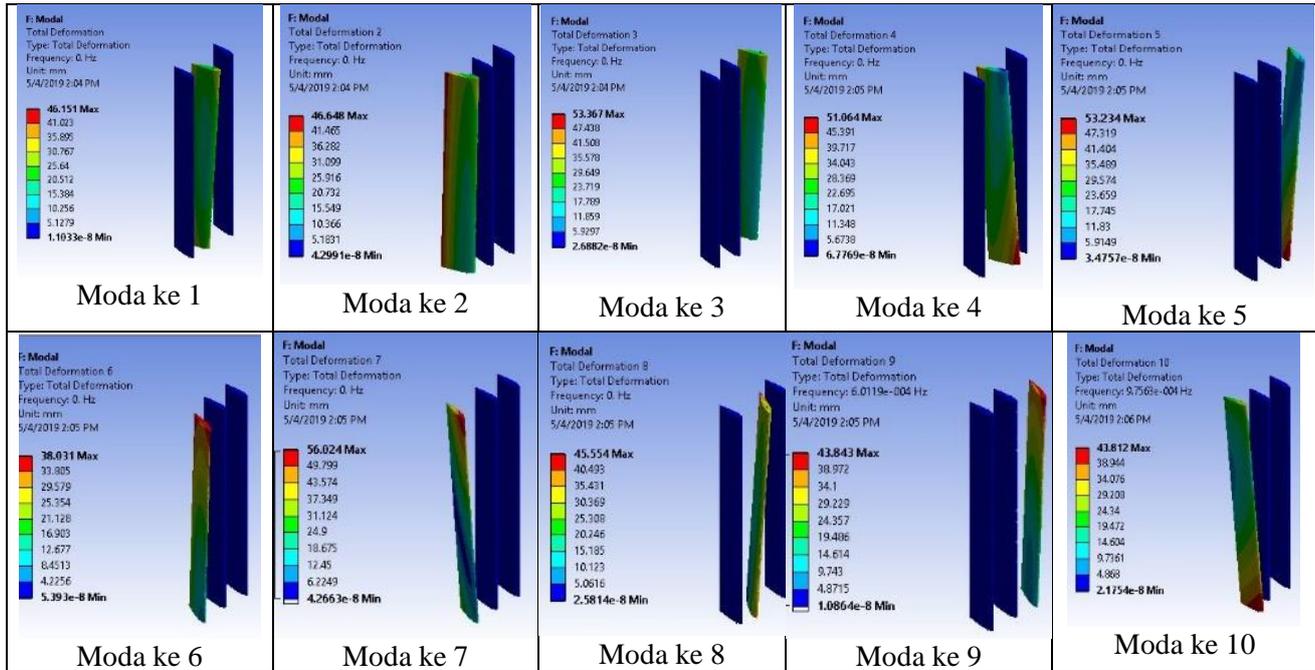
Gambar 4.85 Maksimum *Stress* Pada *Blade 1*, *Blade 2*, *Blade 2* dan *Blade 3* Terhadap Sudut Azimuth



Gambar 4.86 Frekuensi Natural Pada *SBC Stand Alone*

Pada setiap moda yang terdapat pada Gambar 4.64 dijelaskan pada Tabel 4.8 yang menggambarkan bentuk moda yang terjadi pada setiap moda. Gerakan yang terjadi pada kasus ini dominan rigid dan berfrekuensi natural pada angka nol, hal ini dikarenakan terdapa 3 *fixed support* pada bagian atas masing-masing *blade* yang menghasilkan analisis secara rigid pada setiap *fixed support*. Sehingga pada analisis 10 moda awal, gerakan yang terjadi adalah rigid dan frekuensi natural dominan pada angka 0. Adapun jika berdasarkan persamaan 4.1 dan 4.2 nilai frekuensi natural yang terjadi masih lebih kecil daripada frekuensi putaran.

Tabel 4.8 Bentuk Moda pada SBC Stand Alone



4.7 Diskusi

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan beban dinamik tekanan yang paling besar berada pada daerah bawah SBC, pada sudut $0 < \theta < 120$. Pada posisi tersebut *blade* berada pada posisi yang dekat dengan *inlet* aliran fluida. Sehingga pada posisi tersebut akan didapati nilai – nilai maksimum kegagalan sifat mekanik material *blade* daripada sudut azimuth yang lain.

Beban dinamik yang terjadi dapat menyebabkan deformasi, maksimum strain dan maksimum stress pada *blade*. Berdasarkan hasil simulasi pada setiap struktur, pengaruh perubahan material pada nilai deformasi tidak signifikan. Pada struktur solid deformasi minimum terjadi pada material carbon fiber dan deformasi minimum terdapat pada materual *carbon fiber* sebesar 0,89 mm dan nilai deformasi terbesar terjadi pada material *e glass frp* sebesar 1,03 mm.

Sementara itu nilai dari setiap variasi *safety factor* yang terjadi tetap berada pada angka 15 yang mana material tersebut termasuk kondisi aman *stress*, yang Callister menyatakan bahwa rentang nilai *safety factor* normal sebesar 1,2 hingga 4 [14]. Adapun perhitungan *safety factor* ini menggunakan perbandingan antara nilai maksimum stress pada simulasi terhadap karakteristik nilai *tensile yield strength* material. Dari setiap variasi yang dilakukan nilai maksimum stress simulasi memiliki nilai sangat lebih kecil dibandingkan dengan nilai *tensile yield strength*.

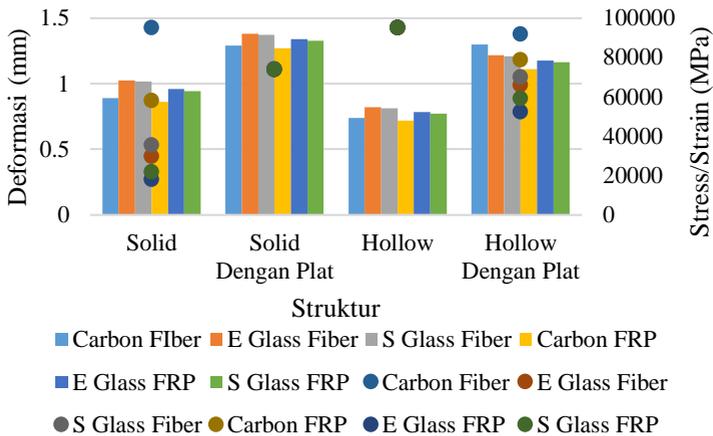
Selanjutnya akan dianalisis pengaruh perubahan struktur pada *blade*. Perubahan struktur mengakibatkan adanya perbedaan massa inersia pada *blade* hal ini mengakibatkan adanya perbedaan nilai deformasi pada setiap struktur perubahan nilai struktur ini terjadi nilai deformasi pada struktur *solid*, *solid* dengan sisipan plat, *hollow* dan *hollow* dengan sisipan plat secara berturut-turut adalah 0,89 mm, 1,28 mm, 0,73 dan 1,3 mm. Struktur *hollow* terlihat memiliki nilai deformasi terkecil dibandingkan struktur yang lain Penurunan nilai deformasi ini dapat terjadi karena semakin tebal bagian dari blade menyebabkan gaya inersia yang terjadi semakin besar. Saat massa blade semakin meningkat menyebabkan

keandalan blade menurun akibat beban massa inersia yang besar [20]. Nilai deformasi yang terjadi ini dapat menyebabkan perubahan bentuk yang dapat berakibat penurunan performansi *blade* dalam mengekstraksi energi. Kemudian jika diamati dari nilai stress dan strain

Parameter desain turbin hidrokinetik sebagai alat ekstraksi energi hidrokinetik penting untuk diperhatikan ketika akan mendesain. Beban dinamik air yang mengenai turbin akan menyebabkan turbin mengalami deformasi. Deformasi turbin dapat menyebabkan energi yang terekstraksi tidak optimal. Sehingga model turbin dengan nilai deformasi yang terkecil merupakan model turbin yang bagus. Analisis simulasi yang telah dilakukan secara keseluruhan dapat dirangkum pada Gambar 4.84. Jika ditinjau dari nilai deformasi yang digambarkan dengan titik dapat diamati bahwa struktur *hollow* dan material *carbon fiber* merupakan desain *blade* yang terbaik berdasarkan parameter deformasinya karena nilai deformasi yang terjadi paling kecil yaitu sebesar 0,74 mm dibandingkan desain *blade* yang lain. Namun jika mengambil aspek *stress* dan *strain* yang digambarkan dengan kurva garis, struktur solid dan material *E glass FRP* lebih unggul daripada desain blade yang lain karena nilai *stress/strain*nya paling kecil sebesar 17848,14 MPa. Nilai stress yang rendah ini berarti bahwa kemampuan material dalam menerima beban adalah minimum namun dengan kemampuan ekstraksi energi yang kurang lebih sama. Hal ini dapat menjadi pertimbangan dalam pemilihan desain *blade* terbaik dalam aspek yang akan dikehendaki oleh *designer*. Selain kekuatan mekanik material dalam segi fabrikasi struktur *hollow* termasuk dalam tingkat kerumitan yang lebih rumit dibandingkan struktur *solid*. Karena aspek geometri dari struktur *hollow* tersebut. Hal ini dapat berpengaruh pada biaya fabrikasi dari *blade*.

Selain kekuatan mekanik material pada penelitian ini ditinjau pula respon moda pada *blade*. Resonansi merupakan hal yang tidak diinginkan terjadi pada *blade* secara keseluruhan nilai pada moda ke empat memiliki kemungkinan osilasi. Pada Tabel 4.6 perbandingan frekuensi natural dari setiap simulasi yang telah

dilakukan. Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan kombinasi desain struktur hollow dengan sisipan plat dan variasi material pada struktur tersebut merupakan desain *blade* yang terbaik. Hal ini dikarenakan selisih antara nilai frekuensi natural dengan frekuensi angular turbin yang lebih besar sehingga kemungkinan terjadi osilasi lebih kecil



Gambar 4.87 Perbandingan Desain Material dan Struktur pada *Blade* Terhadap Karakteristik Mekanik Material

Adapun pada simulasi *SBC stand alone* yang dilakukan menunjukkan bahwa pada simulasi *blade* mengalami nilai deformasi, stress dan strain yang fluktuatif pada setiap sudut azimuth. Hal ini terjadi karena pada saat inisiasi pada simulasi digunakan *fixed support* pada bagian atas dan bawah *blade* untuk merepresentasikan hubungan antara *blade* yang akan dihubungkan dengan *arm*. Sehingga pada saat simulasi *blade* akan berusaha untuk menjaga posisinya.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan simulasi dan analisa data yang telah dilakukan, maka kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Perubahan Material Penyusun *blade* tidak menghasilkan perubahan yang signifikan terhadap nilai deformasi, maksimum stress, maksimum strain. Nilai deformasi minimum terjadi pada material *carbon fiber* dan maksimum yaitu *e glass FRP*.
2. Perubahan desain struktur *blade* berpengaruh terhadap kekuatan mekanik material. Berdasarkan parameter nilai deformasi. Deformasi minimum terjadi pada struktur *hollow* yaitu 0,89 mm dan deformasi maksimum terjadi pada struktur *hollow* dengan sisipan *plat* sebesar 1,13 mm. Sedangkan apabila ditinjau dari parameter *stress/strain* struktur *solid* merupakan desain struktur yang terbaik.
3. Desain struktur *hollow*-material *carbon fiber* merupakan desain *blade* yang terbaik ditinjau dari nilai deformasi minimum yaitu 0,89 mm dibandingkan desain *blade* yang lain. Namun jika mengambil aspek *stress/strain* struktur *solid* dan material *e glass FRP* lebih unggul daripada desain *blade* dengan nilai *stress/strainnya* sebesar 17848,1 MPa. Berdasarkan respon moda *blade*, kombinasi desain struktur *hollow* dengan sisipan plat dan variasi material pada struktur tersebut merupakan desain *blade* yang terbaik dengan selisih frekuensi ± 3 Hz.

5.2 Saran

Berikut ini adalah saran yang dapat diberikan peneliti untuk berkelanjutan penelitian. Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan desain *hollow-carbon* direkomendasikan untuk nilai deformasi yang minimum, desain *solid* - *e glass FRP* untuk nilai stress minimum dan desain *hollow* dengan sisipan plat berdasarkan

frekuensinya. Desain – desain *blade* ini selanjutnya dapat direkomendasikan untuk desain *blade* yang optimal

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Direktorat Jendral Ketenagalistrikan, Statistika Ketenagalistrikan 2015 Edisi 29 Tahun 2016, Jakarta: Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2016.
- [2] R. D. Ray and E. G.D, "A Brief Review of Tides in the Indonesian Seas," *Oceanography*, vol. 18, no. 4, pp. 74-79, 2005.
- [3] Kementrian. ESDM, "Energi Baru Terbarukan," 07 02 2014. [Online]. Available: <http://ebtke.esdm.go.id/post/2014/07/02/628/kebijakan.pengembangan.tenaga.air>.
- [4] R. Hantoro and E. Septyaningrum, "Novel Design of a Vertical Axis Hydrokinetic Turbine – Straight-Blade Cascaded (VAHT–SBC): Experimental and Numerical Simulation," *Journal Engineering Technology Science*, vol. 50, no. 1, pp. 73-86, 2018.
- [5] U. Asghar, "Modelling and Simulation of Flow Induced Vibrations in Vertical Axis Wind Turbine," *IEEE*, 2017.
- [6] C. Chen, M. Wang and L. Zhou, "Modal Analysis of Wind Turbine Blade Based on Ansys Modelling," *Advanced Material Research*, vol. 790, pp. 655-658, 2013.
- [7] P. A. Parker, L. M and E. Balaras, "Wake Structure of a Single Vertical Axis Wind Turbine," *International Journal of Heat Fluid Flow*, vol. 61, pp. 75-84, 2016.

- [8] S. B. Zanforlin and N. Bitossi, "Hydrodynamic Interaction Between Three Closely-spaced Vertical Axis Tidal Turbine," *Energy Procedia*, vol. 101, no. 520-527, pp. 520-527, 2016.
- [9] J. Anderson, *Fundamental of Aerodynamics*, 1984.
- [10] I. Malael, "Increase the Smart Cities Development by Using an Innovative Design for Vertical Axis Wind Turbine," in *27th.daaam.proceedings*, daam, 2017.
- [11] R. S. Raja, "Coupled Fluid Structure Analysis on a Cylinder Exposed to Ocean Wave Loading," Chalmers, Goteberg, Sweden, 2012.
- [12] Y. A. Jorobkin, "The mathematical challenges and modelling of hydroelasticity," *Philosophical transaction of the royal society*, 2011.
- [13] H. Xie, H. Ren, S. Qu and H. Tang, "Numerical and experimental study on hydroelasticity in water-entry problem of a composite ship-hull structure," *Composite Structures*, vol. 201, pp. 942-957, 2018.
- [14] W. D. Callister, "Design/Safety Factor," in *Materials Science and Engineering Eighth Edition*, John Wiley Co, 1940, pp. 182-183.
- [15] S. A. Putra, "Structure Crack Identification," *International Journal of Technology*, 2010.
- [16] H. A. Rasheed, "Constituent Materials and Properties," in *Strengthening Design of Reinforced Concrete with FRP*, 2014.

- [17] Okky Agassy. Firmansyah, "Studi Eksperimental Pengaruh Perbesaran Dimensi dan Konfigurasi Counter-Rotating Turbin Terhadap Performansi Turbin Arus Laut Vertical Axis Straight Blade Cascaded," ITS, Surabaya, 2017.
- [18] M. Rossander, "Evaluation of a Blade Force Measurement System for a Vertical Axis Wind Turbine Using Load Cells," *Energies*, Vols. 5973-5996, no. 8, 2015.
- [19] C. Chen and W. A min, "Modal Analysis of Wind Turbine Blade Based on Ansys Modelling," *Advanced Materials Research*, pp. Vol. 790 (2013) pp 655-658, 2013.
- [20] P. Roth-Johnson, R. Wirz and E. Lin, "structural design of spars for 100-m biplane wind turbine blades," *renewable energy*, vol. 71, pp. 133-155, 2014.
- [21] M. Heyder and G. Khun, "3D fatigue crack propagation: Experimental studies," *International Journal of Fatigue*, vol. 28, no. 5, pp. 627-634, 2006.

LAMPIRAN A

Azimuth	Deformasi Total Pada Struktur Solid (mm)					
	carbon fiber	e glass fiber	s glass fiber	carbon FRP	e glass FRP	s glass fiber 60 %
0	0.82897	0.96517	0.94923	0.80296	0.91734	0.8953
30	2.2512	2.2773	2.2734	2.2545	2.2989	2.2918
60	3.4656	3.4631	3.4516	3.4625	3.5392	3.5218
90	3.4619	3.5793	3.5511	3.4729	3.5919	3.5429
120	2.3144	2.5037	2.481	2.3227	2.4744	2.4408
150	0.93227	1.1053	1.0906	0.92542	1.0563	1.0274
180	0.21508	0.42637	0.41485	0.16718	0.32489	0.29225
210	0.87184	1.0079	0.99803	0.8361	0.93049	0.91083
240	1.5572	1.7008	1.6902	1.5169	1.6224	1.6018
270	2.2203	2.3541	2.3442	2.1817	2.2821	2.2623
300	2.3052	2.4302	2.421	2.267	2.3599	2.3417
330	3.128	3.2731	3.2618	3.0861	3.2185	3.1734
360	0.82897	0.96517	0.94923	0.80296	0.91734	0.8953
Rata-Rata	2.009124	2.045637	2.03967	2.006815	2.061431	2.03988

LAMPIRAN B

Azimuth	Maksimum <i>Strain</i> Pada Struktur Solid (mm/mm)					
	carbon fiber	e glass fiber	s glass fiber	carbon frp	e glass frp	s glass frp
0	0.000149	0.000523	0.000448	0.000242	0.000722	0.000604
30	0.000404	0.00118	0.001012	0.000701	0.001962	0.001654
60	0.000738	0.002255	0.001935	0.001285	0.003635	0.003081
90	0.000791	0.002443	0.002095	0.001382	0.003933	0.00333
120	0.000551	0.001614	0.001391	0.000956	0.002617	0.002225
150	0.000263	0.000745	0.000641	0.000462	0.001257	0.001068
180	6.76E-05	0.000136	0.000122	0.000131	0.000298	0.000264
210	0.000111	0.000363	0.000308	0.000165	0.000502	0.000417
240	0.000238	0.000835	0.000712	0.000403	0.001224	0.001022
270	0.000356	0.001203	0.001029	0.000609	0.001803	0.001513
300	0.000413	0.001387	0.001189	0.000714	0.002085	0.001757
330	0.000665	0.002197	0.001884	0.001161	0.003347	0.002824
360	0.000149	0.000523	0.000448	0.000242	0.000722	0.000604
Rata-Rata	0.000408	0.001267	0.001087	0.000705	0.001998	0.001689

LAMPIRAN C

Azimuth	Maksimum Stress Pada Struktur Solid (Mpa)					
	Carbon Fiber	E Glass Fiber	S Glass Fiber	Carbon FRP	E Glass FRP	S Glass Fiber 60 %
0	14.185	15.438	15.779	14.03	12.692	12.985
30	38.407	34.817	35.652	40.684	34.488	35.543
60	70.123	66.532	68.207	74.529	63.903	66.183
90	75.156	72.082	73.828	80.181	69.132	71.533
120	52.386	47.618	49.043	55.443	46.009	47.795
150	25.001	21.982	22.576	26.803	22.103	22.945
180	6.4225	4.0248	4.2921	7.5916	5.2346	5.6768
210	10.503	10.706	10.849	9.5723	8.8202	8.9623
240	22.59	24.632	25.109	23.368	21.508	21.963
270	33.823	35.508	36.283	35.315	31.686	32.509
300	39.276	40.94	41.9	41.415	36.656	37.741
330	63.206	64.842	66.415	67.316	58.83	60.682
360	14.185	15.438	15.779	14.03	12.692	12.985
Rata -Rata	38.78178	37.39492	38.31568	40.90826	35.12143	36.27636

LAMPIRAN D

azimuth	Deformasi Total Pada Struktur Solid dengan Sisipan Plat (mm)					
	carbon fiber	e glass fiber	s glass fiber	carbon FRP	e glass FRP	s glass fiber 60 %
0	1.2461	1.3124	1.309	1.22	1.2845	1.2705
30	2.1988	2.1746	2.1753	2.2187	2.2108	2.2142
60	3.1581	3.0195	3.0283	3.2128	3.1328	3.1516
90	3.6359	3.6452	3.6434	3.6565	3.6954	3.693
120	2.4274	2.2937	2.305	2.4647	2.3996	2.4173
150	0.91478	0.69061	0.70889	0.96313	0.81791	0.84875
180	0.6306	0.76755	0.75631	0.60212	0.68951	0.67001
210	1.3264	1.4562	1.4483	1.289	1.3894	1.3711
240	2.0071	2.1015	2.0968	1.9745	2.0508	2.0375
270	2.6178	2.7282	2.7212	2.5851	2.6669	2.651
300	2.7198	2.8112	2.8064	2.6878	2.7581	2.7452
330	3.5602	3.6487	3.6438	3.5283	3.5961	3.5836
360	1.2461	1.3124	1.309	1.22	1.2845	1.2705
Rata -Rata	2.089923	2.114468	2.112185	2.085385	2.106231	2.10167

LAMPIRAN E

azimuth	Maksimum strain pada solid dengan sisipan plat (mm/mm)					
	carbon fiber	e glass fiber	s glass fiber	carbon frp	e glass frp	s glass frp
0	0.000232	0.000493	0.000449	0.000304	0.000559	0.000518
30	0.000405	0.000644	0.00059	0.000477	0.000836	0.000761
60	0.000711	0.001304	0.001186	0.000915	0.001686	0.001539
90	0.000802	0.001474	0.001344	0.001022	0.001727	0.001682
120	0.000535	0.000918	0.00084	0.000677	0.001081	0.001063
150	0.000224	0.000339	0.000313	0.000282	0.000403	0.000415
180	9.81E-05	0.000168	0.000158	9.98E-05	0.000166	0.000151
210	0.000209	0.000377	0.000342	0.000226	0.000455	0.000394
240	0.000324	0.000684	0.00062	0.000424	0.000805	0.00075
270	0.00044	0.00091	0.000825	0.000574	0.00108	0.001007
300	0.000497	0.001018	0.000925	0.000649	0.001215	0.001133
330	0.000753	0.001539	0.001384	0.000985	0.0018	0.001667
360	0.000232	0.000493	0.000449	0.000304	0.000559	0.000518
Rata - Rata	0.000429	0.000819	0.000743	0.00055	0.000982	0.000925

LAMPIRAN F

azimuth	Maksimum Stress Pada Struktur Solid dengan Sisipan Plat (MPa)					
	carbon fiber	e glass fiber	s glass fiber	carbon frp	e glass frp	s glass frp
0	1.71E+01	36.346	33.069	22.38	41.202	38.17
30	1.76E+01	17.557	17.051	16.903	22.463	21.321
60	1.96E+01	35.032	32.003	26.524	47.026	43.312
90	2.99E+01	47.454	43.476	35.114	61.58	56.094
120	5.24E+01	96.067	87.393	67.381	124.19	113.36
150	5.91E+01	108.56	99.033	75.256	127.2	123.87
180	3.94E+01	67.633	61.902	49.841	79.637	78.324
210	1.65E+01	24.95	23.072	20.791	29.676	30.601
240	7.22E+00	12.352	11.658	7.3493	12.222	11.152
270	1.54E+01	27.791	25.184	16.624	33.506	29.034
300	2.39E+01	50.402	45.701	31.261	59.317	55.267
330	3.24E+01	67.028	60.8	42.285	79.549	74.14
360	5.55E+01	113.37	101.92	72.536	132.57	122.81
Rata - Rata	31.571216	60.34579	54.74599	40.50781	72.31417	68.1423

LAMPIRAN G

azimuth	Deformasi total pada struktur hollow (mm)					
	carbon fiber	e glass fiber	s glass fiber	carbon FRP	e glass FRP	s glass FRP
0	0.47378	0.56442	0.55719	0.45395	0.53371	0.51931
0	1.1981	1.2428	1.2384	1.193	1.2388	1.231
30	1.0428	1.1146	1.1033	1.0559	1.1397	1.0905
60	0.64246	0.77562	0.75988	0.63889	0.71301	0.69328
90	0.19442	0.39779	0.37926	0.15994	0.29552	0.26512
120	0.45816	0.53982	0.532	0.43827	0.48642	0.47556
150	0.67884	0.76056	0.75372	0.65621	0.71092	0.69956
180	0.88803	0.98141	0.97378	0.86266	0.92766	0.91419
210	0.95395	1.0452	1.0392	0.92539	0.99546	0.98212
240	1.087	1.1803	1.1739	1.0583	1.1296	1.1159
270	1.0585	1.1524	1.1463	1.0284	1.1015	1.0878
300	1.1956	1.2929	1.2863	1.1651	1.2504	1.2294
330	0.47378	0.56442	0.55719	0.45395	0.53371	0.51931
360	0.8998844	0.9415702	0.937738	0.891886	0.932064	0.919895
Rata -Rata	0.8998844	0.9415702	0.937738	0.891886	0.932064	0.919895

LAMPIRAN H

azimuth	Maksimum Strain Pada Struktur Hollow (mm/mm)					
	carbon fiber	e glass fiber	s glass fiber	carbon frp	e glass frp	s glass frp
0	8.74E-05	0.000171	0.000159	9.69E-05	0.000169	0.000156
30	0.000216	0.00034	0.000314	0.00028	0.000459	0.000424
60	0.000349	0.000623	0.000572	0.00046	0.000801	0.00074
90	0.000333	0.000621	0.000567	0.000446	0.000805	0.000738
120	9.11E-05	9.85E-05	9.58E-05	0.00011	0.000147	0.000136
150	7.59E-05	0.000109	0.000102	7.38E-05	9.31E-05	8.59E-05
180	0.000103	0.000177	0.000164	0.000103	0.000177	0.000163
210	0.000138	0.000287	0.000263	0.000167	0.000305	0.00028
240	0.000187	0.000373	0.000343	0.000228	0.000406	0.000374
270	0.000201	0.000404	0.000372	0.000248	0.000443	0.000409
300	0.000284	0.000569	0.000524	0.00036	0.000642	0.000593
330	8.74E-05	0.000171	0.000159	9.69E-05	0.000169	0.000156
360	0.000195	0.000346	0.000319	0.000243	0.000415	0.000383

LAMPIRAN I

	Maksimum Stress Pada Struktur Hollow (MPa)					
azimuth	carbon fiber	e glass fiber	s glass fiber	carbon frp	e glass frp	s glass frp
0	14.36358	25.47531	23.48149	17.90158	30.57515	28.23651
30	15.94	25.029	23.118	20.643	33.827	31.198
60	25.717	45.881	42.129	33.858	59.038	54.502
90	24.544	45.739	41.739	32.878	59.301	54.362
120	16.629	26.058	24.09	20.468	34.641	32.177
150	6.7095	7.256	7.058	8.104	10.804	10.017
180	5.5886	8.0199	7.4903	5.436	6.8552	6.3261
210	7.5866	13.068	12.073	7.5754	13.058	12.019
240	10.147	21.125	19.385	12.288	22.503	20.625
270	13.757	27.476	25.291	16.818	29.893	27.539
300	14.789	29.755	27.366	18.255	32.656	30.099
330	20.886	41.946	38.569	26.483	47.315	43.689
360	6.4403	12.631	11.737	7.1385	12.465	11.456
Rata - Rata	14.36358	25.47531	23.48149	17.90158	30.57515	28.23651

LAMPIRAN J

	Deformasi total pada struktur hollow dengan sisipan plat					
azimuth	carbon fiber	e glass fiber	s glass fiber	carbon fiber 60%	e glass fiber 60%	s glass fiber 60%
0	0.53696	0.61945	0.60863	0.53379	0.59249	0.5887
30	1.3952	1.4454	1.4385	1.405	1.4626	1.4555
60	1.7454	1.8234	1.8123	1.7681	1.8658	1.8562
90	1.5093	1.7182	1.6903	1.5296	1.6929	1.6743
120	1.1	1.315	1.2926	1.0889	1.2474	1.2301
150	0.47808	0.69064	0.67502	0.43695	0.59353	0.5793
180	0.42719	0.56796	0.55794	0.40209	0.49861	0.49184
210	0.70507	0.83191	0.82074	0.69092	0.78386	0.77721
240	0.99771	1.137	1.1233	0.98706	1.098	1.0896
270	1.2587	1.4195	1.4007	1.2566	1.382	1.3713
300	1.5056	1.6769	1.656	1.5074	1.6474	1.6351
330	1.5056	1.6769	1.656	1.5074	1.6474	1.6351
360	0.53696	0.61945	0.60863	0.53379	0.59249	0.5887
Rata - Rata	1.07808	1.152465	1.14176	1.088075	1.155528	1.149183

LAMPIRAN K

azimuth	Maksimum strain pada struktur hollow dengan sisipan plat (mm/mm)					
	carbon fiber	e glass fiber	s glass fiber	carbon fiber 60%	e glass fiber 60%	s glass fiber 60%
0	0.000119	0.000195	0.000179	0.000126	0.000184	0.000182
30	0.000292	0.00046	0.000428	0.000369	0.000546	0.000547
60	0.000507	0.000851	0.000789	0.000639	0.000982	0.00098
90	0.000512	0.00088	0.000813	0.00065	0.001015	0.001014
120	0.000357	0.000534	0.000504	0.000431	0.000619	0.000619
150	0.000145	0.000183	0.000175	0.000167	0.000219	0.000219
180	7.77E-05	0.000135	0.000126	8.58E-05	0.000135	0.000129
210	0.000115	0.000227	0.000209	0.000136	0.000226	0.000219
240	0.000209	0.000406	0.000374	0.000256	0.000419	0.000417
270	0.000286	0.000537	0.000495	0.000352	0.000565	0.000562
300	0.00031	0.000584	0.000539	0.000385	0.000619	0.000616
330	0.000454	0.000843	0.000778	0.000569	0.000908	0.000905
360	0.000119	0.000195	0.000179	0.000126	0.000184	0.000182

LAMPIRAN L

	Maksimum Stress pada Struktur Hollow dengan Sisipan Plat					
azimuth	carbon fiber	e glass fiber	s glass fiber	carbon fiber 60%	e glass fiber 60%	s glass fiber 60%
0	9.1715	14.972	13.75	9.703	14.164	13.982
28.80007	22.451	35.397	32.906	28.414	41.962	42.067
57.59869	38.999	65.445	60.659	49.171	75.5	75.416
93.60015	39.423	67.713	62.573	49.998	78.088	77.994
122.4013	27.452	41.109	38.771	33.181	47.582	47.578
151.1988	11.148	14.046	13.456	12.814	16.859	16.831
180	5.9736	10.419	9.6929	6.5964	10.395	9.9162
208.7975	8.8474	17.484	16.043	10.443	17.36	16.824
237.5987	16.103	31.193	28.764	19.721	32.232	32.091
273.6001	21.974	41.273	38.109	27.062	43.434	43.243
302.3977	23.837	44.935	41.464	29.625	47.587	47.382
331.1988	34.916	64.86	59.852	43.76	69.869	69.59
360	9.1715	14.972	13.75	9.703	14.164	13.982
	22.14888	37.85184	35.11387	27.44271	41.99829	41.86268

BIODATA PENULIS



Penulis bernama Izdihar Salsabilla Duma Putri lahir di Surabaya pada tanggal 5 Agustus 1997. Riwayat pendidikan penulis sebagai berikut SDN Dr. Sutomo VII Surabaya (2003-2009), SMPN 22 Surabaya (2009-2012), SMAN 5 Surabaya (2012-2015), dan sekarang sedang menempuh S-1 Teknik Fisika ITS dengan bidang minat yang diambil adalah Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan. Selama kuliah penulis aktif sebagai staff departemen ristek HMTF ITS, serta sebagai asisten Laboratorium Pengukuran Fisis.

