



TUGAS AKHIR - TM184835

**ANALISA STATIK DAN MODAL BESERTA USULAN
IMPROVEMENT BILAH TURBIN ANGIN 100 KW
P3TKEBTKE MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

Kelvin Pratama Indratmoko

NRP. 0211184000085

Dosen Pembimbing

Ir. Julendra Bambang Ariatedja, M.T.

NIP. 196807061999031004

Program Studi Sarjana

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



TUGAS AKHIR - TM184835

**ANALISA STATIK DAN MODAL BESERTA USULAN
IMPROVEMENT BILAH TURBIN ANGIN 100 KW
P3TKEBTKE MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

Kelvin Pratama Indratmoko

NRP. 02111840000085

Dosen Pembimbing

Ir. Julendra Bambang Ariatedja, M.T.

NIP. 196807061999031004

Program Studi S-1 Teknik Mesin

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



FINAL PROJECT - TM184835

**STATIC AND MODAL ANALYSIS WITH PROPOSED
IMPROVEMENT OF 100 KW P3TKEBTKE WIND TURBINE
BLADE BASED ON FINITE ELEMENT METHOD**

Kelvin Pratama Indratmoko

NRP. 02111840000085

Advisor

Ir. Julendra Bambang Ariatedja, M.T.

NIP. 196807061999031004

Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering

Departement of Mechanical Engineering

Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering

Sepuluh Nopember Institute of Technology

Surabaya

2022

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISA STATIK DAN MODAL BESERTA USULAN IMPROVEMENT BILAH TURBIN ANGIN 100 KW P3TKEBTKE MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: **Kelvin Pratama Indratmoko**
NRP. 0211184000085

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Ir. Julendra B. Ariatedja, M. T.  Pembimbing
2. Ir. Yusuf Kaelani, M.Sc.E.  Penguji
3. Putu Suwarta, ST. M.Sc., Ph.D.  Penguji

SURABAYA

JULI, 2022

APPROVAL SHEET

STATIC AND MODAL ANALYSIS WITH PROPOSED IMPROVEMENT OF 100 KW P3TKEBTKE WIND TURBINE BLADE BASED ON FINITE ELEMENT METHOD

FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements
for obtaining a degree Bachelor of Engineering at
Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Sepuluh Nopember Institute of Technology

By: **Kelvin Pratama Indratmoko**
NRP. 0211184000085

Approved by Final Project Examiner Team:

1. Ir. Julendra B. Ariatedja, M. T.

 Advisor

2. Ir. Yusuf Kaelani, M.Sc.E.

 Examiner

3. Putu Suwarta, S. T., M.Sc., Ph.D.

 Examiner

SURABAYA

JULI, 2022

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Kelvin Pratama Indratmoko / 02111840000085

Departemen : Teknik Mesin

Dosen Pembimbing / NIP : Ir. Julendra Bambang Ariatedja, M.T. / 196807061999031004

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Analisa Statik dan Modal Beserta Usulan Improvement Bilah Turbin Angin 100 kW P3TKEBTKE Menggunakan Metode Elemen Hingga” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 28 Juli 2022

Mengetahui

Dosen Pembimbing

Mahasiswa,


(Ir. Julendra Bambang Ariatedja, M.T.)
NIP. 196807061999031004


(Kelvin Pratama Indratmoko)
NRP. 021118410000085

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Kelvin Pratama Indratmoko / 0211184000085

Department : Teknik Mesin

Advisor / NIP : Ir. Julendra Bambang Ariatedja, M.T./ 196807061999031004

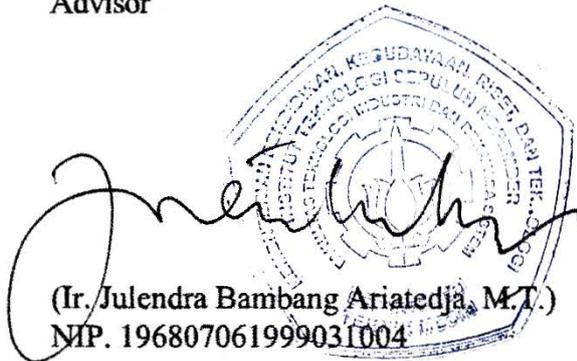
hereby declare that the Final Project with the title of “Static and Modal Analysis With Proposed Improvement of 100 KW P3TKEBTKE Wind Turbine Blade Based on Finite Element Method” is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing. If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 28 July 2022

Acknowledged

Advisor

Student,



(Ir. Julendra Bambang Ariatedja, M.T.)
NIP. 196807061999031004



(Kelvin Pratama Indratmoko)
NRP. 021111841000085

ANALISA STATIK DAN MODAL BESERTA USULAN *IMPROVEMENT* BILAH TURBIN ANGIN 100 KW P3TKEBTKE MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Nama Mahasiswa : Kelvin Pratama Indratmoko
NRP : 0211184000085
Jurusan : Teknik Mesin FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Julendra Bambang Ariatedja, M.T.

ABSTRAK

Puslitbang Ketenagalistrikan, Energi Baru Terbarukan, dan Konservasi Energi (P3KEBTKE) Kementerian ESDM telah melakukan pengembangan prototipe turbin angin berkapasitas 100 KW sebagai sarana penelitian yang telah selesai diproduksi dan terpasang di Desa Tamanjaya yang instalasinya telah selesai pada tahun 2012 dengan bilah turbin yang panjangnya kurang lebih 12 meter. Namun pada tahun 2016, bilah turbin angin tersebut patah dengan penyebab yang belum diketahui. Pada tahun 2021, sebuah tim dari PT. Lentera Bumi Nusantara telah melakukan kunjungan ke site PLT-Angin Tamanjaya, Sukabumi untuk melakukan inspeksi langsung pada bilah turbin angin 100 KW ini. Kegagalan bilah turbin terjadi pada daerah transisi bilah pertama dan ujung bilah ketiga.

Penelitian ini melakukan analisa kegagalan secara mekanik pada bilah turbin angin P3TKEBTKE menggunakan metode simulasi *fluid structure interaction* dan simulasi *modal* menggunakan *software* ANSYS untuk mengetahui potensi kegagalan pada beban operasional maksimum dan resonansi oleh angin akibat fenomena *vortex shedding*. Spesifikasi bilah turbin angin dimodelkan ulang menggunakan data dari jurnal P3TKEBTKE yang telah dipublikasikan sebelumnya dan dilengkapi dengan hasil inspeksi dari studi lapangan. Setelah penyebab kegagalan ditemukan, dilakukan *improvement* pada bilah dengan metode *Multi-Objective Genetic Algorithm* menggunakan variabel orientasi, tipe RVE, dan ketebalan dari komposit beserta distribusinya. Model geometri bilah juga dilakukan linearisasi sebagai pembanding untuk meminimalisir konsentrasi tegangan yang juga merupakan lokasi kegagalan dari bilah. Material yang digunakan sebagai variabel adalah *E-Glass/Epoxy* dengan konfigurasi *Unidirectional* ($\pm 35^\circ$, $\pm 45^\circ$, dan $\pm 55^\circ$) dan *Plain Woven* (0° , 35° , 45° , dan 55°).

Berdasarkan analisa kegagalan yang telah dilakukan, didapat bahwa penyebab kegagalan bilah turbin angin P3TKEBTKE apabila ditinjau secara mekanik disebabkan akibat kegagalan statik yang terjadi pada daerah transisi bilah dengan faktor kegagalan *Tsai-Wu* sebesar 1.2119 dengan letak yang sesuai dengan letak retakan aktual pada bilah turbin angin. Desain *improvement* terbaik dicapai pada bilah turbin angin yang terlinearisasi dengan susunan komposit *E-Glass/Epoxy* pada sisi *pressure* adalah 35° (*Plain Woven*) pada 0-11.4 m dengan jumlah 15 lamina, lalu tumpukan kedua adalah $\pm 55^\circ$ (*Unidirectional*) pada 0-7.6 m dengan jumlah 11 lamina, dan tumpukan terakhir 0° (*Plain Woven*) pada 0-3.8 m dengan jumlah 10 lamina dan pada sisi *suction* adalah $\pm 35^\circ$ (*Unidirectional*) pada 0-11.4 m dengan jumlah 13 lamina, lalu tumpukan kedua adalah 0° (*Plain Woven*) pada 0-7.6 m dengan jumlah 4 lamina, dan tumpukan terakhir 0° (*Plain Woven*) pada 0-3.8 m dengan jumlah 11 lamina. Hasil simulasi menunjukkan bahwa bilah turbin angin hasil *improvement* memiliki *maximum flapwise deflection* sebesar 280.4 mm, frekuensi natural pertama sebesar 2.61 Hz, dan nilai *safety factor* 3.316 namun dengan peningkatan massa sebesar 4.04% dan pengurangan *rated power* sebesar 8.82%.

Kata Kunci : Bilah Turbin Angin, Analisa Kegagalan, *Improvement*, *FSI*

MECHANICAL FAILURE ANALYSIS AND IMPROVEMENT OF P3TKEBTKE WIND TURBINE BLADE BASED ON FINITE ELEMENT METHOD

Student Name : Kelvin Pratama Indratmoko
NRP : 0211184000085
Departement : Mechanical Engineering FTIRS-ITS
Academic Supervisor : Ir. Julendra Bambang Ariatedja, M.T.

ABSTRACT

Research Center for Electricity, Renewable Energy, and Energy Conservation (P3KEBTTKE) of The Ministry of Energy and Mineral Resources has developed a 100 KW wind turbine prototype as a research facility that has been completed and installed in Tamanjaya Village, which has been completed in 2012 with a turbine blade that is have a radius more or less 12 meters. But in 2016, the wind turbine blade was failed with unknown causes. In 2021, a team from PT. Lentera Bumi Nusantara has visited the PLT-Angin Tamanjaya, Sukabumi site to conduct direct inspection on this 100 KW wind turbine blade. Failure of the turbine blades occurs in the first and third blade at transition region.

This study analyzed the cause of mechanical failure of P3TKEBTKE wind turbine blade using the Fluid Structure Interaction and Modal simulation with ANSYS software to determine the potential failure from maximum operational load and wind resonance due to vortex shedding phenomena. The specifications of the wind turbine blades are remodeled using data from the P3TKEBTKE journal that have been published previously and inspection results from field studies. After the cause of failure is found, an improvement is carried out on the blade with the Multi-Objective Genetic Algorithm method with variables using the orientation, the RVE type, the thickness of the composite, and its distribution. The geometry model of the blade is also linearized as a comparison to minimize the stress concentration which is also the failure location of the blade. The material used as a variable is E-Glass/Epoxy with Unidirectional ($\pm 35^\circ$, $\pm 45^\circ$, and $\pm 55^\circ$) and Plain Woven (0° , 35° , 45° , and 55°) configuration.

Based on the failure analysis that has been done, it is found that the cause of failure of the P3TKEBTKE wind turbine blades when reviewed mechanically is caused by static failures that occur with the Tsai-Wu failure factor of 1,2119 which corresponds the location of the actual cracks in the wind turbine blades. The best improvement design is achieved on the wind turbine blades that are lined with the composite composite arrangement on the pressure side is 35° (Plain Woven) at 0-11.4 m with the amount of 15 lamina, then the second pile is $\pm 55^\circ$ (Unidirectional) at 0-7.6 m with the number of 11 lamina, and the last pile is 0° (Plain Woven) at 0-3.8 m with the number of 10 lamina and on the suction side is $\pm 35^\circ$ (Unidirectional) at 0-11.4 m with the amount of 13 lamina, then the second pile is 0° (Plain Woven) at 0-7.6 m with a total of 4 lamina, and the last pile is 0° (Plain Woven) at 0-3.8 m with the number of 11 lamina. The simulation results show that the improved wind turbine blades have the first natural frequency of 2.61 Hz, and safety factor of 3.361 but with compromises of mass increase of 4.04% and reduction in rated power of 8.82%.

Keyword : Wind Turbine Blade, Failure Analysis, Improvement, FSI

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kehadiran Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul Analisa Kegagalan Mekanik dan *Improvement* Bilah Turbin Angin 100 KW P3TKEBTKE Menggunakan Metode Elemen Hingga. Dalam proses penyusunan Tugas Akhir ini banyak pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuan kepada penulis hingga akhirnya Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan Tugas Akhir ini, diantaranya:

1. Kedua orang tua penulis, Dhedik Indratmoko dan Eka Meutia Ali, adik penulis, Daryll Alessandro Indratmoko, nenek penulis, Susilawati, dan tante penulis Melati Ayuwangi yang telah memberikan dukungan dalam segala bentuk dan doa yang tidak ada henti-hentinya agar segala urusan penulis dimudahkan dan dilancarkan oleh Allah SWT.
2. Bapak Ir. Julendra Bambang Ariatedja, M.T. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan motivasi selama menyusun Tugas Akhir ini.
3. Bapak Ir. Yusuf Kaelani, M.Sc.E., Putu Suwarta, S.T., M.Sc., Ph.D., dan Alief Wikarta, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D., selaku dosen penguji sidang Tugas Akhir penulis yang telah memberikan banyak masukan dan saran untuk Tugas Akhir ini.
4. Ikralhaq Hilliriany Adriadi yang selalu memberikan bantuan, dukungan, dan mendampingi penulis dalam segala waktu.
5. Seluruh teman satu bimbingan (M. Tareqh Al-faqih Nasution, Ananda Ariwijaya, Arighi Dhika Pratama, Aldi Muhammad Ridho) serta teman-teman Lab. MBP (Mas Dary, Vikrant, Ridho Taqillah, Fazhli Chamidi, Rizaldy Aziz Amin, Ganesha Vishnu Mahendra, Rianti Ayu Pratiwi) yang selalu menemani malam saya di lab.
6. Mas dan Mbak yang telah membimbing saya (Manda, Puts, Adit, Sauki, Alfin, Gerry, Farrel, Farlen, Tegar, Abdur, Hanif, Eja, Theo) yang telah menempa saya dari segi moral dan tanggungjawab.
7. Seluruh pengurus Himpunan Mahasiswa Mesin ITS khususnya Departemen UMUM 2020/2021 yang telah mengajari saya apa arti integritas dan dedikasi.
8. Mas Aris dan Bu Aris penjaga Warkop Teluse. Terima kasih karena tanpa kalian penulis tidak memiliki tempat bernaung dan bersosialisasi dengan nyaman dan menyenangkan.
9. Segenap mentor dan warga Cihuy yang telah membimbing saya dalam pengetahuan energi baru terbarukan khususnya turbin angin.
10. Seluruh teman M61 yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu yang telah bersama menemani dan mewarnai masa perkuliahan penulis sedari zaman kepala botak.

Tugas Akhir ini merupakan salah satu mata kuliah wajib yang harus ditempuh oleh mahasiswa Teknik Mesin FTIRS–ITS agar memenuhi syarat kelulusan. Penulis menyadari laporan Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna. Untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran demi kesempurnaan laporan Tugas Akhir dan dapat bermanfaat bagi sekitar.

Surabaya, 14 Juli 2022

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	vii
APPROVAL SHEET	ix
PERNYATAAN ORISINALITAS	xi
STATEMENT OF ORIGINALITY	xiii
ABSTRAK	xv
ABSTRACT	xvii
KATA PENGANTAR	xix
DAFTAR GAMBAR	xxv
DAFTAR TABEL	xxxiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Dasar Teori	5
2.1.1 Turbin Angin	5
2.1.2 Bilah Turbin Angin.....	6
2.1.3 Turbin Angin 100 KW P3TKEBTKE	12
2.1.4 Fiber Reinforced Composite.....	13
2.1.5 Material Bilah Turbin Angin	20
2.1.6 Teori Kegagalan	22
2.1.7 Computational Fluid Dynamics.....	23
2.1.8 Reynold Number.....	27
2.1.9 Metode Elemen Hingga	27
2.1.10 Safety Factor.....	29
2.1.11 Fluid Structure Interaction.....	30
2.1.12 Vortex Shedding	31
2.1.13 Optimasi Desain	31
2.2 Studi Lapangan.....	35
2.3 Penelitian Terdahulu.....	37
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	47
3.1 <i>Flowchart</i> Penelitian	47
3.2 Studi Lapangan dan Literatur	48
3.3 Perumusan Masalah dan Tujuan Penelitian.....	48
3.4 Pengumpulan Data	48
3.5 Pemodelan 3D CAD	49
3.6 Pemodelan Mikrostruktur Komposit	51
3.7 Simulasi <i>Fluid Structure Interaction</i>	55
3.7.1 Simulasi CFD	57
3.7.2 Simulasi Static Structural	64
3.8 Simulasi <i>Modal</i>	68
3.9 Verifikasi dan Validasi	71
3.10 Analisa Kegagalan.....	82
3.10.1 Analisa Statik.....	82
3.10.2 Analisa Resonansi Angin.....	82

3.11	<i>Improvement</i>	83
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		89
4.1	Analisa Kegagalan Bilah	89
4.1.1.	Analisa Aerodinamika	89
4.1.2.	Analisa Statik.....	90
4.1.3.	Analisa Resonansi Angin.....	99
4.2	Hasil Proses <i>Improvement</i> Bilah	100
4.2.1	Hasil <i>Improvement</i> Bilah Optimum.....	100
4.2.2	Hasil <i>Improvement</i> Bilah Optimum (<i>Linearized</i>).....	104
4.2.3	Komparasi Properti Kekakuan Komposit Pada Bilah	110
4.3	Hasil Simulasi Bilah Setelah Proses <i>Improvement</i>	113
4.3.1	Hasil Simulasi Bilah Optimum.....	113
4.3.2	Hasil Simulasi Bilah Optimum (<i>Linearized</i>).....	117
4.3.3	Komparasi Bilah <i>Baseline</i> Dengan Optimum	120
4.4	Analisa Aeroelastisitas Statik	121
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		125
5.1	Kesimpulan.....	125
5.2	Saran.....	125
DAFTAR PUSTAKA		127
LAMPIRAN		131
BIODATA PENULIS		141

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Jenis Turbin Angin Berdasarkan Sumbu Putarnya (Wind Turbine Works, 2018)	5
Gambar 2. 2 Parameter Performa Turbin Angin terhadap Kecepatan Angin (Aslam, 2018) ...	6
Gambar 2. 3 Parameter pada <i>Airfoil</i> (Mamadaminov, 2013).....	6
Gambar 2. 4 Gaya-gaya Umum pada Bilah Turbin Angin yaitu (a) Gaya Sentrifugal dan (b) Gaya Aksial (Probst, Martinez, Elizondo, & Monroy, 2011).....	8
Gambar 2. 5 Hubungan (a) Profil <i>Blade Element</i> dengan (b) Profil Sudut Serang, Kecepatan, dan Gaya (Ledoux, Riffo, & Julien, 2021)	9
Gambar 2. 6 <i>Collar's Aeroelasticity Interaction Triangle</i> (Nithin & Kovvuri, 2019).....	11
Gambar 2. 7 Konstruksi Struktural Bilah Turbin Angin secara (a) 2 Dimensi dan (b) 3 Dimensi (Mishnaevsky, et al., 2017).....	12
Gambar 2. 8 Turbin Angin 100 KW P3TKEBTKE di Desa Tamanjaya-Sukabumi	13
Gambar 2. 9 Struktur Serat dan Matriks pada Lamina Komposit (a) <i>Unidirectional</i> dan (b) <i>Woven</i> (Daniel & Ishai, 2006)	13
Gambar 2. 10 Tumpukan Lamina yang Membentuk Laminasi <i>Multidirectional</i> (Daniel & Ishai, 2006)	14
Gambar 2. 11 Komposit dengan Konstruksi <i>Sandwich</i> (Daniel & Ishai, 2006)	14
Gambar 2. 12 Tipe Analisis pada Material Komposit (Daniel & Ishai, 2006)	15
Gambar 2. 13 Lamina dengan Sistem Koordinat Material Utama (Voyiadjis & Kattan).....	16
Gambar 2. 14 Lokasi dari Plies di Lamina (Halawa & Al-Huniti, 2019).....	18
Gambar 2. 15 Tipe Kegagalan Komposit.....	19
Gambar 2. 16 <i>Standard Wall Functions</i> (Avraham, 2020).....	24
Gambar 2. 17 Pemodelan Daerah Dekat Dinding Menggunakan (a) <i>Laminar Sub-layer</i> dan (b) <i>Log-law Region</i> (CFD Online, 2011).....	25
Gambar 2. 18 Uji Konvergensi Hasil MEH (Logan, 2002)	29
Gambar 2. 19 Konsep <i>Fluid Structure Interaction</i> (Ageze, Hu, & Wu, 2017).....	30
Gambar 2. 20 <i>Von Kármán Vortex Street</i>	31
Gambar 2. 21 Diagram Alir Proses Optimasi Desain (Weck, 2004).....	32
Gambar 2. 22 Contoh <i>Topology Optimization</i> (Weck, 2004).....	32
Gambar 2. 23 Contoh <i>Shape Optimization</i> (Weck, 2004)	33
Gambar 2. 24 Contoh <i>Size Optimization</i> (Weck, 2004).....	33
Gambar 2. 25 Flowchart Proses Algoritma Genetik.....	35
Gambar 2. 26 Dokumentasi Patahan Bilah Turbin Angin P3TKEBTKE.....	36
Gambar 2. 27 <i>Stacking Sequence Shell</i> Bilah Turbin Angin	36
Gambar 2. 28 <i>Stacking Sequence Shear Web</i> Bilah Turbin Angin.....	37
Gambar 2. 29 (a) <i>Blade element</i> dari bilah turbin angin dan (b) Parameter <i>blade element</i> (Firmansyah & Zulkarnain, 2012)	38
Gambar 2. 30 Domain dan <i>Boundary Conditions untuk Model</i> (Wang, Quant, & Kolios, 2016).....	39
Gambar 2. 31 Skematik pemodelan <i>one-way FSI</i> (Wang, Quant, & Kolios, 2016).....	40
Gambar 2. 32 Distribusi tekanan pada bilah pada kecepatan angin (a) 8 m/s, (b) 12 m/s, (c) 16 m/s, (d) 20 m/s, (e) 24 m/s (Wang, Quant, & Kolios, 2016)	40
Gambar 2. 33 Defleksi bilah pada kecepatan angin (a) 8 m/s, (b) 12 m/s, (c) 16 m/s, (d) 20 m/s, (e) 24 m/s (Wang, Quant, & Kolios, 2016)	41

Gambar 2. 34 Distribusi tegangan normal bilah pada kecepatan angin (a) 8 m/s, (b) 12 m/s, (c) 16 m/s, (d) 20 m/s, (e) 24 m/s (Wang, Quant, & Kolios, 2016).....	41
Gambar 2. 35 <i>Flowchart</i> Proses Investigasi Kegagalan Bilah Turbin Angin (Chou, Chiu, Huang, & Chi, 2013)	42
Gambar 2. 36 Distribusi <i>Tsai-Wu Failure Criterion</i> pada bilah (Chou, Chiu, Huang, & Chi, 2013).....	43
Gambar 2. 37 Frekuensi dan Klasifikasi Mode Getaran (Chou, Chiu, Huang, & Chi, 2013)	44
Gambar 2. 38 Koefisien Gaya <i>Lift</i> , <i>Drag</i> , dan Momen Aerodinamik terhadap Waktu pada $\alpha = 50^\circ$ (Meskell & Alberto, 2013).....	46
Gambar 2. 39 Kontur Kecepatan Angin pada $t = 10s$ dan $\alpha = 50^\circ$ (Meskell & Alberto, 2013)	46
Gambar 3. 1 <i>Flowchart</i> Penelitian	48
Gambar 3. 4 Bentuk Dasar <i>Airfoil</i> NACA 632415	49
Gambar 3. 5 Bentuk <i>Blade Span</i> dan Distribusi <i>Blade Element</i>	49
Gambar 3. 6 <i>Isometric View</i> Bilah Turbin Angin	50
Gambar 3. 7 <i>Root View</i> Bilah Turbin Angin.....	51
Gambar 3. 8 <i>Project Schematic</i> Pemodelan Mikrostruktur Komposit.....	52
Gambar 3. 9 <i>Representative Volume Element (RVE) E-Glass/Epoxy (Unidirectional)</i>	52
Gambar 3. 10 <i>Representative Volume Element (RVE) E-Glass/Epoxy (Yarn)</i>	53
Gambar 3. 11 Model Mikrostruktur <i>E-Glass/Epoxy (Plain Woven)</i>	54
Gambar 3. 12 <i>Flowchart</i> Simulasi <i>Fluid Structure Interaction</i>	56
Gambar 3. 13 Domain <i>Streamtube</i> Fluida dengan Sudut 120°	57
Gambar 3. 14 <i>Surface Mesh</i> pada Permukaan Bilah.....	58
Gambar 3. 15 <i>Surface Mesh</i> pada Permukaan Domain Fluida	58
Gambar 3. 16 <i>Volume Mesh</i> pada Domain Fluida	60
Gambar 3. 17 <i>Inflation</i> , <i>Peel</i> , dan <i>Buffer Layer</i> pada Daerah Dekat Permukaan Bilah	61
Gambar 3. 18 Plot Residual pada Simulasi CFD	62
Gambar 3. 19 Grafik Hasil <i>Grid Independence Test</i> Simulasi CFD.....	63
Gambar 3. 20 Kontur Distribusi y^+ Permukaan Bilah pada Sisi (a) <i>Pressure</i> dan (b) <i>Suction</i>	63
Gambar 3. 21 Nilai Rata-rata y^+ pada Permukaan Bilah.....	64
Gambar 3. 22 <i>Mesh</i> pada <i>Shell</i> Bilah Turbin Angin	64
Gambar 3. 23 <i>Mesh</i> pada <i>Shear Web</i> Bilah Turbin Angin.....	64
Gambar 3. 24 Orientasi dan Arah <i>Normal</i> Laminasi Komposit pada <i>Shell</i>	65
Gambar 3. 25 Orientasi dan Arah <i>Normal</i> Laminasi Komposit pada <i>Shear Web</i> (a) Bagian Kiri dan (b) Bagian Kanan.....	66
Gambar 3. 26 Nilai dan Lokasi <i>Rotational Velocity</i> pada Simulasi <i>Static Structural</i>	66
Gambar 3. 27 Arah Gaya Gravitasi pada Simulasi <i>Static Structural</i>	66
Gambar 3. 28 Lokasi <i>Fixed Support</i> pada Simulasi <i>Static Structural</i>	67
Gambar 3. 29 Grafik Hasil Uji Konvergensi Simulasi <i>Static Structural</i>	68
Gambar 3. 30 <i>Flowchart</i> Simulasi <i>Modal</i>	68
Gambar 3. 31 <i>Fixed Support</i> pada Simulasi <i>Modal</i>	69
Gambar 3. 32 Grafik Hasil Uji Konvergensi Simulasi <i>Modal</i>	70
Gambar 3. 33 <i>Rule of Mixture</i> Pada Modulus Elastisitas <i>E-Glass/Epoxy (Unidirectional)</i> ...	71

Gambar 3. 34 Putaran vs torsi bilah turbin pada kecepatan angin 12 m/s (Firmansyah & Zulkarnain, 2012)	73
Gambar 3. 35 <i>Force Report</i> Bilah Pada ANSYS FLUENT	74
Gambar 3. 36 Ilustrasi Geometri Bilah yang Disederhanakan.....	74
Gambar 3. 37 Grafik (a) C_L/α dan (b) C_D/α dari tiap elemen	76
Gambar 3. 38 <i>Free Body Diagram</i> Pada Bidang XZ.....	78
Gambar 3. 39 Letak <i>Centroid</i> dari Bilah Turbin Angin.....	78
Gambar 3. 40 <i>Free Body Diagram</i> Bidang XZ Dengan <i>Centroid</i>	79
Gambar 3. 41 <i>Free Body Diagram</i> Bidang YZ.....	79
Gambar 3. 42 <i>Force Reaction</i> dan <i>Moment Reaction</i> pada <i>Fixed Support</i> Hasil Simulasi	81
Gambar 3. 43 Flowchart Proses <i>Improvement</i> Bilah	84
Gambar 3. 44 Variasi Orientasi Komposit tipe <i>Unidirectional</i> dengan orientasi (a) $\pm 35^\circ$, (b) $\pm 45^\circ$ dan (c) $\pm 55^\circ$	85
Gambar 3. 45 Variasi Orientasi Komposit tipe <i>Plain Woven</i> dengan orientasi (a) 35° , (b) 45° dan (c) 55°	86
Gambar 4. 1 <i>Streamline</i> dan Kontur Kecepatan Angin Pada Bagian Bilah.....	89
Gambar 4. 2 Kontur <i>Pressure</i> Pada Bagian Bilah	89
Gambar 4. 3 Kontur Tekanan Pada Permukaan Bilah	90
Gambar 4. 4 Defleksi Bilah Secara <i>Flapwise</i>	91
Gambar 4. 5 Kontur <i>Maximum Principal Stress</i> Pada (a) Sisi <i>Pressure</i> dan (b) Sisi <i>Suction</i> Bilah.....	92
Gambar 4. 6 Kontur <i>Minimum Principal Stress</i> Pada (a) Sisi <i>Pressure</i> dan (b) Sisi <i>Suction</i> Bilah.....	93
Gambar 4. 7 Kontur <i>Inverse Reserve Factor</i> Pada Sisi <i>Pressure</i> Bilah	93
Gambar 4. 8 <i>Zoom In</i> Kontur <i>Inverse Reserve Factor</i> Beserta <i>Critical Ply</i> Pada Sisi <i>Pressure</i> Bilah.....	94
Gambar 4. 9 Distribusi <i>Stress</i> Secara Makromekanik Pada Sisi <i>Pressure</i> (a) Daerah ke-1 dan (b) Daerah ke-2.....	94
Gambar 4. 10 <i>Cross-Section View</i> Sisi <i>Pressure</i> Pada Daerah Kritis 1 (a) Sebelum Deformasi dan (b) Setelah Deformasi Dengan Perbesaran 5x	95
Gambar 4. 11 <i>Cross-Section View</i> Sisi <i>Pressure</i> Pada Daerah Kritis 2 (a) Sebelum Deformasi dan (b) Setelah Deformasi Dengan Perbesaran 5x	95
Gambar 4. 12 Kontur <i>Inverse Reserve Factor</i> Pada Sisi <i>Suction</i> Bilah.....	96
Gambar 4. 13 <i>Zoom In</i> Kontur <i>Inverse Reserve Factor</i> Beserta <i>Critical Ply</i> Pada Sisi <i>Suction</i> Bilah.....	96
Gambar 4. 14 Distribusi <i>Stress</i> Secara Makromekanik Pada Sisi <i>Suction</i>	97
Gambar 4. 15 <i>Cross-Section View</i> Sisi <i>Suction</i> Pada Daerah Kritis (a) Sebelum Deformasi dan (b) Setelah Deformasi Dengan Perbesaran 5x	97
Gambar 4. 16 Kontur <i>Safety Factor</i> Pada Struktur <i>Shear Web</i>	98
Gambar 4. 17 <i>Mode Shape</i> dan Frekuensi Natural Getaran Utama Bilah <i>Baseline</i>	99
Gambar 4. 18 Grafik Kriteria Konvergensi <i>Multi-Objective Genetic Algorithm</i> (MOGA) Pada Bilah Optimum	100
Gambar 4. 19 Grafik Massa Terhadap <i>Design Point</i> Pada Bilah Optimum	101
Gambar 4. 20 <i>Trade-off Scatter Plot Constraint</i> Terhadap <i>Objective</i> Pada Bilah Optimum	101

Gambar 4. 21 Kontur Ketebalan Pada Bilah Optimum Pada (a) Sisi <i>Pressure</i> dan (b) Sisi <i>Suction</i>	103
Gambar 4. 22 Distribusi Lamina Komposit Pada Struktur <i>Shell</i> (a) Sisi <i>Pressure</i> dan (b) Sisi <i>Suction</i> Pada Bilah Optimum	104
Gambar 4. 23 Grafik Distribusi Panjang <i>Chord</i> dan Sudut <i>Twist</i> Antara Ideal Dengan <i>Linearized</i>	105
Gambar 4. 24 Hasil Geometri Bilah Yang Terlinearisasi (<i>Linearized</i>)	106
Gambar 4. 25 Grafik Kriteria Konvergensi <i>Multi-Objective Genetic Algorithm</i> (MOGA) Hasil <i>Candidate Point</i> Proses MOGA Pada Bilah Optimum (<i>Linearized</i>)	106
Gambar 4. 26 Grafik Massa Terhadap <i>Design Point</i> Pada Bilah Optimum (<i>Linearized</i>)	107
Gambar 4. 27 <i>Trade-off Scatter Plot Constraint</i> Terhadap <i>Objective</i> Pada Bilah Optimum (<i>Linearized</i>)	107
Gambar 4. 28 Kontur Ketebalan Pada Bilah Optimum (<i>Linearized</i>).....	109
Gambar 4. 29 Distribusi Lamina Komposit Pada Struktur <i>Shell</i> (a) Sisi <i>Pressure</i> dan (b) Sisi <i>Suction</i> Pada Bilah Optimum (<i>Linearized</i>).....	110
Gambar 4. 30 Deformasi <i>Flapwise</i> Pada Bilah Optimum	113
Gambar 4. 31 <i>Maximum Principal Stress</i> Bilah Optimum Pada (a) Sisi <i>Pressure</i> (b) Sisi <i>Suction</i>	114
Gambar 4. 32 <i>Minimum Principal Stress</i> Bilah Optimum Pada (a) Sisi <i>Pressure</i> (b) Sisi <i>Suction</i>	115
Gambar 4. 33 Kontur <i>Safety Factor</i> Bilah Optimum Pada (a) Sisi <i>Pressure</i> dan (b) Sisi <i>Suction</i>	115
Gambar 4. 34 <i>Mode Shape</i> dan Frekuensi Natural Getaran Utama Bilah Optimum	116
Gambar 4. 35 Deformasi <i>Flapwise</i> Pada Bilah Optimum (<i>Linearized</i>).....	117
Gambar 4. 36 <i>Maximum Principal Stress</i> Bilah Optimum (<i>Linearized</i>) Pada (a) Sisi <i>Pressure</i> (b) Sisi <i>Suction</i>	117
Gambar 4. 37 <i>Minimum Principal Stress</i> Bilah Optimum (<i>Linearized</i>) Pada (a) Sisi <i>Pressure</i> (b) Sisi <i>Suction</i>	118
Gambar 4. 38 Kontur <i>Safety Factor</i> Bilah Optimum (<i>Linearized</i>) Pada (a) Sisi <i>Pressure</i> dan (b) Sisi <i>Suction</i>	119
Gambar 4. 39 <i>Mode Shape</i> dan Frekuensi Natural Getaran Utama Bilah Optimum (<i>Linearized</i>)	120
Gambar 4. 40 Kondisi Operasional Turbin Angin	122
Gambar 4. 41 Grafik Defleksi Terhadap Kecepatan Angin <i>Free-stream</i>	122
Gambar 4. 42 Grafik Tegangan Terhadap Kecepatan Angin <i>Free-stream</i>	123

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 <i>Material Properties</i> dari Kayu Balsa (<i>Air Dried</i>).....	21
Tabel 2. 2 <i>Material Properties</i> dari <i>E-Glass</i>	21
Tabel 2. 3 <i>Material Properties</i> dari <i>Epoxy</i>	21
Tabel 2. 4 <i>Material Properties</i> dari <i>E-Glass/Epoxy (Plain Woven)</i>	22
Tabel 2. 5 <i>Material Properties</i> dari <i>E-Glass/Epoxy (Unidirectional)</i>	22
Tabel 2. 6 Spesifikasi Turbin Angin P3TKEBTKE.....	37
Tabel 3. 1 <i>Material Properties</i> dari <i>E-Glass/Epoxy (Unidirectional)</i> yang telah dihomogenisasi	53
Tabel 3. 2 <i>Material Properties</i> dari <i>E-Glass/Epoxy (Yarn)</i> yang telah dihomogenisasi	54
Tabel 3. 3 <i>Material Properties</i> dari <i>E-Glass/Epoxy (Plain Woven)</i> yang telah dihomogenisasi	55
Tabel 3. 4 Perhitungan <i>Reynold Number</i> pada Seluruh <i>Blade Element</i>	59
Tabel 3. 5 Hasil <i>Grid Independence Test</i> Simulasi CFD.....	62
Tabel 3. 6 Hasil Uji Konvergensi Simulasi <i>Static Structural</i>	67
Tabel 3. 7 Hasil Uji Konvergensi Simulasi <i>Modal</i>	70
Tabel 3. 8 Nilai bilangan <i>Reynold</i> dan <i>Angle of Attack</i> pada tiap <i>Blade Element</i>	75
Tabel 3. 9 Nilai C_L dan C_D terhadap <i>Angle of Attack</i> pada tiap <i>Blade Element</i>	76
Tabel 3. 10 Hasil Kalkulasi Gaya Aksial dan Torsi pada tiap <i>Blade Element</i>	78
Tabel 3. 11 <i>Variables, Constraints, dan Objective</i> Dari Proses MOGA	85
Tabel 3. 12 Variasi Orientasi dan Tipe RVE	85
Tabel 4. 1 Hasil Frekuensi Natural Bilah P3TKEBTKE Dengan Tipe Getaran.....	99
Tabel 4. 2 Hasil <i>Candidate Point</i> Proses MOGA Pada Bilah Optimum	102
Tabel 4. 3 Perbandingan Distribusi Panjang <i>Chord</i> dan Sudut <i>Twist</i> Antara Ideal Dengan <i>Linearized</i>	105
Tabel 4. 4 Hasil <i>Candidate Point</i> Proses MOGA Pada Bilah Optimum (<i>Linearized</i>)	108
Tabel 4. 5 Hasil Frekuensi Natural Bilah Optimum Dengan Tipe Getaran.....	116
Tabel 4. 6 Hasil Frekuensi Natural Bilah Optimum (<i>Linearized</i>) Dengan Tipe Getaran.....	119
Tabel 4. 7 Komparasi Bilah Sebelum Dilakukan <i>Improvement (Baseline)</i> dan Setelah Dilakukan <i>Improvement (Optimum)</i>	120
Tabel 4. 8 Kondisi Operasional Turbin Angin.....	122

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam beberapa tahun terakhir, masa transisi ke arah energi baru terbarukan telah dianggap sebagai investasi dalam kebijakan dan teknologi yang akan mengubah sumber energi terbarukan menjadi sumber energi yang berdaya saing dan berkelanjutan. Meningkatnya permintaan energi secara global bersamaan dengan meningkatnya emisi gas berbahaya (NO_x, SO_x, dan lain-lain) yang disebabkan oleh sumber daya bahan bakar fosil konvensional telah membuat suatu desakan untuk meningkatkan penggunaan sumber energi terbarukan dalam pemenuhan kebutuhan energi setiap negara, termasuk Indonesia. Turbin angin merupakan seperangkat alat yang mengubah energi angin menjadi listrik. Teknologi ini merupakan sebuah terobosan yang berkembang pesat dalam pemanfaatan sumber daya alam yang dapat diperbarui yaitu angin. Ketersediaan yang tak terbatas merupakan salah satu alasan kuat untuk memanfaatkan energi angin di Indonesia. Energi angin dapat dijadikan penggerak mula untuk memutar turbin, dimana energi mekanik yang dihasilkan turbin digunakan untuk memutar generator untuk menghasilkan energi listrik. Oleh karena itu, salah satu komponen yang sangat penting dalam menentukan performa dari turbin angin adalah bilah yang merupakan komponen berbentuk airfoil yang berfungsi untuk menangkap energi angin dan mengubah energi kinetik udara menjadi energi mekanik sehingga dapat memutar rotor dari turbin angin melalui prinsip aerodinamika. Desain dari bilah sangat bervariasi dan harus sesuai dengan faktor geografis, performa aerodinamis, maupun strukturalnya.

Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2021-2030 menargetkan bahwa bauran Energi Baru Terbarukan (EBT) adalah 23% pada 2025, yang salah satu strateginya adalah pemanfaatan potensi energi angin (Jelita, 2021). Pada Indonesia Outlook Energy dicantumkan potensi energi angin sebesar 60,647 MW untuk kecepatan angin 4 meter perdetik atau lebih (Ditjen EBTKE, 2021). Menurut hasil penelitian Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN), dari 166 lokasi yang diteliti, terdapat 35 lokasi yang mempunyai potensi angin yang bagus dengan kecepatan angin diatas 5 meter perdetik pada ketinggian 50 meter. Daerah yang mempunyai kecepatan angin bagus tersebut, diantaranya Nusa Tenggara Barat (NTB), Nusa Tenggara Timur (NTT), pantai selatan Jawa dan Pantai Selatan Sulawesi. Disamping itu, LAPAN juga menemukan 34 lokasi yang kecepatan anginnya mencukupi dengan kecepatan 4 sampai 5 meter perdetik (Dewan Energi Nasional, 2016). Potensi angin Indonesia memang cukup besar, namun hingga tahun 2020 PLT-Angin baru terpasang sekitar 154 MW (Ditjen EBTKE, 2021) dengan perincian 75 MW di daerah Sidrap dan sebesar 72 MW di daerah Janeponto (Prasetyo, 2019). Energi angin yang dibangkitkan ini masih jauh dari potensi yang Indonesia miliki, yaitu sekitar 0,25% yang dibangkitkan, hal ini dipaparkan dalam Indonesia Outlook Energy (Ditjen EBTKE, 2021).

Untuk menjawab permasalahan ini, Puslitbang Ketenagalistrikan, Energi Baru Terbarukan, dan Konservasi Energi (P3KEBTKE) Kementerian ESDM telah melakukan langkah lebih awal dengan mengembangkan prototipe turbin angin berkapasitas 100 KW sebagai sarana penelitian yang telah selesai diproduksi dan terpasang di Desa Tamanjaya, Sukabumi yang pada saat itu merupakan kapasitas terbesar yang ada di Indonesia. Spesifikasi dari turbin angin ini telah disesuaikan dengan karakteristik angin di Indonesia. Puslitbangtek KEBTKE menyelesaikan instalasi PLT Bayu tersebut pada tahun 2012, mulai dari pengangkutan bilah turbin yang panjangnya kurang lebih 11 meter, mengangkat mesin yang beratnya mencapai 8 ton yang diletakkan di atas tower setinggi 35 meter. Namun pada tahun 2016, turbin angin 100 KW ini patah dengan penyebab yang belum diketahui. Pada tahun 2021 sebuah tim dari PT. Lentera Bumi Nusantara telah melakukan kunjungan ke site PLT-Angin

Tamanjaya, Sukabumi untuk melakukan inspeksi langsung pada bilah turbin angin 100 KW ini sebagai bahan studi kasus untuk pengembangan turbin angin yang akan dilakukan selanjutnya. Kegagalan bilah turbin terjadi pada daerah transisi bilah pertama dan ujung bilah ketiga. Untuk mengetahui penyebab kegagalan utama pada bilah, maka diperlukan sebuah analisa statik dan modal agar dapat memahami mekanika struktur dari bilah turbin angin, menganalisa penyebab potensial dan mekanisme kegagalannya, dan melakukan perbaikan dari sisi struktural agar dapat menghindari kerusakan serupa pada turbin angin di masa depan.

Penelitian serupa sebelumnya yang berjudul *Failure analysis of wind turbine blade under critical wind loads* telah melakukan pengumpulan data teknik, kasus-kasus historis, inspeksi lapangan, pengambilan sampel percobaan laboratorium, dan melakukan pemodelan yang relevan untuk menentukan potensi faktor penyebab insiden kegagalan bilah turbin angin yang dapat dilihat pada gambar 1.1.

Damage disaster	Number of times	Occurrence (%)
Lightning	38	32.48
Storm	33	28.21
Strong wind	18	15.38
Tornado	3	2.56
Resonance	3	2.56
Snowstorm	3	2.56
Human error	2	1.71
Hailstone	2	1.71
Defect	2	1.71
Self-destruct	2	1.71
Collapse	1	0.85
Blade fall	1	0.85
Technical defects	1	0.85
Transport	1	0.85
Bolt damage	1	0.85
Fire	1	0.85
Running out of control	1	0.85
Poorly designed	1	0.85
Strike	1	0.85
Mast damage	1	0.85
Explosion	1	0.85
Total	117	99.94

Gambar 1. 1 Ringkasan Penyebab Kegagalan Bilah Turbin Angin (Chou, Chiu, Huang, & Chi, 2013)

Berdasarkan data yang disajikan, maka hanya tiga kasus yang dapat ditinjau secara mekanika struktural dan merupakan variabel yang dapat dihindari dari segi pendesainan, yaitu badai, angin kuat, dan resonansi. Oleh karena itu, kegagalan dari bilah turbin angin diasumsikan disebabkan oleh kegagalan statik dengan kondisi operasional maksimum dan resonansi akibat *vortex shedding*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang sub bab 1.1, maka penulis merumuskan permasalahan sebagai berikut.

1. Apakah terjadi kegagalan statik atau resonansi yang terjadi pada Turbin Angin 100 KW P3TKEBTKE?
2. Bagaimana perbaikan rancangan terbaik dari struktur bilah turbin angin yang mampu bertahan terhadap kondisi terburuk operasionalnya?
3. Bagaimana karakteristik struktural dan aeroelastisitas statik bilah turbin angin setelah dilakukan *improvement*?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui dan menganalisa potensi kegagalan statik atau harmonik dari bilah turbin angin 100 KW P3TKEBTKE.
2. Mengetahui perbaikan rancangan terbaik dari struktur bilah turbin angin yang mampu bertahan terhadap kondisi terburuk operasionalnya.
3. Menganalisa karakteristik struktural dan aeroelastisitas statik bilah turbin angin setelah dilakukan *improvement*.

1.4 Batasan Masalah

Agar masalah yang muncul dapat dianalisis dengan baik, dapat mencapai tujuan dan tidak melebar dari permasalahan yang ada, maka diperlukan batasan – batasan antara lain :

1. Parameter desain bilah turbin angin menggunakan jurnal perancangan P3TKEBTKE yang telah dipublikasi sebelumnya dan dilengkapi hasil studi lapangan.
2. Properti material yang dipakai menggunakan properti yang telah didapat melalui studi literatur dan modul ANSYS *Engineering Data*.
3. Geometri dari *shear web* tegak lurus terhadap *spar cap* dan berjarak $0.25c$ dari *leading edge* dengan material kayu balsa dan bersifat isotropik.
4. Komposit yang digunakan pada *shell* dan *shear web* bilah turbin angin adalah *E-Glass/Epoxy (Plain Woven)*.
5. Ketebalan komposit untuk *shell* dan *shear web* adalah 2 cm dan 1 cm dengan ketebalan tiap *layer* 1 mm.
6. Fraksi volume *fiber* dari komposit *E-Glass/Epoxy (Unidirectional)* sebesar 0.6.
7. Fraksi volume *yarn fiber* dari komposit *E-Glass/Epoxy (Plain Woven)* sebesar 0.8 dan *yarn* sebesar 0.55.
8. Penelitian dilakukan dengan melakukan simulasi menggunakan *software* ANSYS R2 2021.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Sebagai penerapan ilmu pengetahuan dibidang energi baru terbarukan khususnya turbin angin dalam mempertimbangkan komponen pada aspek struktural.
2. Membantu mahasiswa dalam mengetahui dan memahami interaksi antara struktur dengan fluida khususnya angin.
3. Dapat digunakan sebagai referensi dan studi literatur dalam melakukan perancangan ulang bilah turbin angin 100 KW oleh PT. Lentera Bumi Nusantara untuk menghindari kerusakan serupa kedepannya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dasar Teori

Beberapa dasar teori yang mendukung dan relevan dengan masalah penelitian ini akan dijelaskan pada sub-bab ini, antara lain sebagai berikut.

2.1.1 Turbin Angin

Turbin angin adalah kincir angin yang digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik. Cara kerjanya adalah bilah menangkap energi kinetik dari angin lalu dikonversikan menjadi energi mekanik dengan prinsip aerodinamika, kemudian bilah turbin tersebut memutar shaft sehingga generator dapat berputar.

Turbin angin pun juga mempunyai jenis-jenisnya berdasarkan dari sumbu putar bilah pada turbin angin, sebagai berikut.

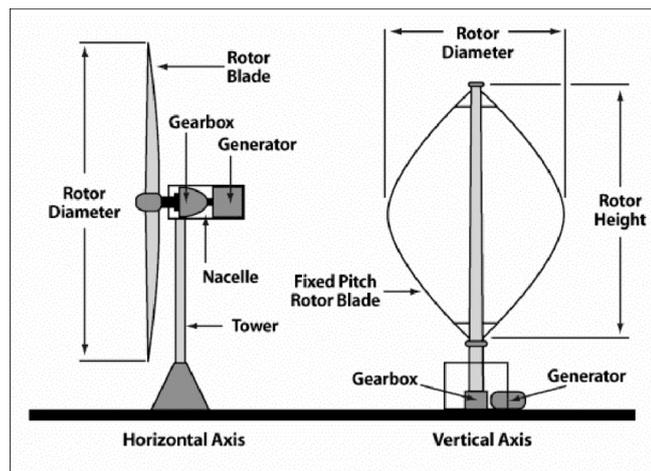
a) *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT)

HAWT merupakan turbin angin yang sumbu putar bilahnya sejajar dengan aliran angin, contohnya adalah *American Farm Windmill*, *Dutch Windmill*, dan *Propeller*. (Fox & McDonald, 2011)

b) *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT)

VAWT merupakan turbin angin yang sumbu putar bilahnya tegak lurus dengan aliran angin, contohnya adalah *Savonius*, *Split Savonius*, *Cup Anemometer*, *Darrieus*, *Giromill*, dan *Helical*. (Fox & McDonald, 2011)

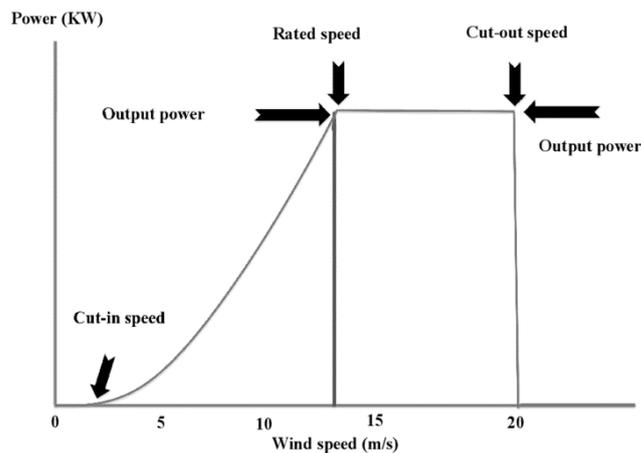
Ketinggian dan kapasitas turbin angin semakin berkembang dari tahu ketahu seiring dengan perkembangan zaman, mulai dari skala yang mikro, kecil, menengah dan skala yang besar.



Gambar 2. 1 Jenis Turbin Angin Berdasarkan Sumbu Putarnya (Wind Turbine Works, 2018)

Turbin angin memiliki parameter performa terhadap kecepatan angin, antara lain sebagai berikut.

- a) *Start-up wind speed* : kecepatan angin minimal agar bilah turbin dapat berputar.
- b) *Cut-in wind speed* : kecepatan angin dimana turbin angin mulai menghasilkan daya.
- c) *Rated wind speed* : kecepatan angin dimana turbin angin menghasilkan daya maksimum.
- d) *Survival wind speed* : kecepatan angin maksimal dari turbin angin agar dapat beroperasi secara aman.

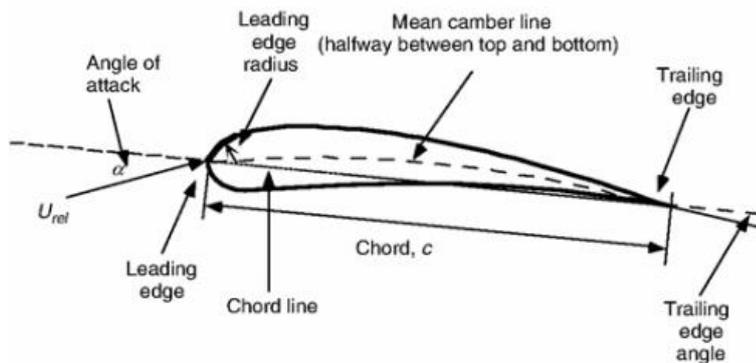


Gambar 2. 2 Parameter Performa Turbin Angin terhadap Kecepatan Angin (Aslam, 2018)

2.1.2 Bilah Turbin Angin

1. *Airfoil*

Airfoil adalah penampang berbentuk seperti sayap pesawat terbang, ekor, atau bilah pada turbin maupun *propeller* yang menghasilkan *lift* dan *drag* saat bergerak melalui udara. Tergantung pada ukuran bilah, karakteristik *airfoil* pada turbin angin mempengaruhi kinerja aerodinamis, jumlah daya mekanis yang dihasilkan oleh rotor, dan kekakuan bilah. (Mamadaminov, 2013)



Gambar 2. 3 Parameter pada *Airfoil* (Mamadaminov, 2013)

Airfoil secara umum dapat dibagi menjadi 4 bagian: *leading edge*, *trailing edge*, *upper surface* atau *suction side*, dan *lower surface* atau *pressure side*. *Airfoil* memiliki bagian-bagian seperti berikut.

- Leading edge* adalah bagian yang paling depan dari sebuah *airfoil*.
- Trailing edge* adalah bagian yang paling belakang dari sebuah *airfoil*.
- Chamber line* adalah garis yang membagi sama besar antara permukaan atas dan permukaan bawah dari *airfoil mean chamber line*.
- Chord line* adalah garis lurus yang menghubungkan *leading edge* dengan *trailing edge*.
- Chord* adalah jarak antara *leading edge* dengan *trailing edge*.
- Maximum chamber* adalah jarak maksimum antara *mean chamber line* dan *chord line*. Posisi maksimum *chamber* diukur dari *leading edge* dalam bentuk persentase *chord*.
- Maximum thickness* adalah jarak maksimum antara permukaan atas dan permukaan bawah *airfoil* yang juga diukur tegak lurus terhadap *chord line*.

Untuk kombinasi tertentu perbandingan maksimum *thickness-chord*, *maximum chamber-chord ratio*, dan *chordwise position chamber* untuk bagian atas dan bagian bawah *airfoil* sudah tersedia. Dimana dasar teori yang menyatakan gaya angkat dari *airfoil* adalah perbedaan tekanan pada bagian atas dan bawah *airfoil* itu sendiri. Sedangkan *moment* koefisien di denotasikan dengan persamaan *moment* terhadap $\frac{1}{4}$ *chord airfoil* dari bagian *leading edge*.

Meskipun *airfoil* dengan *chamber* pada ketebalan tertentu mempunyai sudut serang yang terus meningkat aliran akan mengalami separasi pada *trailing edge* dengan separasi yang semakin bergerak maju seiring bertambahnya sudut serang. Sudut dimana aliran akan mengalami separasi tergantung pada besar kecilnya nilai reynold number dan geometri *airfoil* itu sendiri. Semakin tebal *airfoil* maka akan menunda terjadinya separasi itu sendiri pada daerah *leading edge*, separasi ini juga akan meningkat seiring bertambahnya nilai Reynold.

Leading edge mendapat aliran dengan separasi akan menyebabkan separasi pada seluruh bagian *airfoil* dan akan secara tiba-tiba kehilangan gaya angkat. Disisi lain separasi pada *trailing edge* sebanding dengan meningkatnya sudut serang dimana akan menghasilkan *gradual stalling* (McCormick, 1995).

Keluarga *airfoil* merupakan suatu variasi dalam desain *airfoil* dimana memperluas fungsi dan efek dari aliran udara yang dihasilkan, sehingga dalam mendesain pesawat sesuai fungsinya dapat lebih tepat dalam pemilihan *airfoil*. Adapun contoh generasi awal keluarga *airfoil* adalah sebagai berikut.

a) **NACA *four-digit series***

Pada tahun 1932, NACA bereksperimen dengan *airfoil* berbentuk kurva yang disebut sebagai *four-digit section*. *Chamber* dan distribusi *thickness* dari *airfoil* dapat dilihat secara matematis dan distribusi tersebut tidak diturunkan melalui teori, tetapi dibentuk dan dioptimasi melalui eksperimen *efficient wing section* yang digunakan pada saat itu, yang kita kenal dengan *airfoil* Clark-Y.

Geometri *airfoil four-digit series* telah ditentukan. Seperti namanya, di mana angka pertama adalah *maximum camber* dalam persen *chord*, angka kedua adalah lokasi *maximum camber* di *chord*, dan dua angka terakhir adalah *maximum thickness* pada *airfoil* yang disajikan dalam persen dari panjang *chord*. Misalnya pada *airfoil* NACA 2412, maka *airfoil* ini memiliki ketebalan 12% dari panjang *chord* dan memiliki *camber* 2% yang terletak 0,2c dari *leading edge* (Anderson Jr., 1988)

b) **NACA *five-digit series***

NACA *five-digit series* dikembangkan pada tahun 1935 menggunakan distribusi ketebalan yang sama dengan *four-digit airfoil*. Rata-rata *chamber* didefinisikan secara langsung, bagaimanapun untuk menggeser posisi maksimum *chamber* ke depan akan menghasilkan gaya angkat yang lebih besar. Sehingga untuk ketebalan *chamber* yang dapat dilakukan komparasi dengan *airfoil* sebelumnya, *five-digit airfoil* memiliki koefisien angkat 0.1 sampai 0.2 lebih besar dibandingkan dengan *four-digit airfoil* (McCormick, 1995).

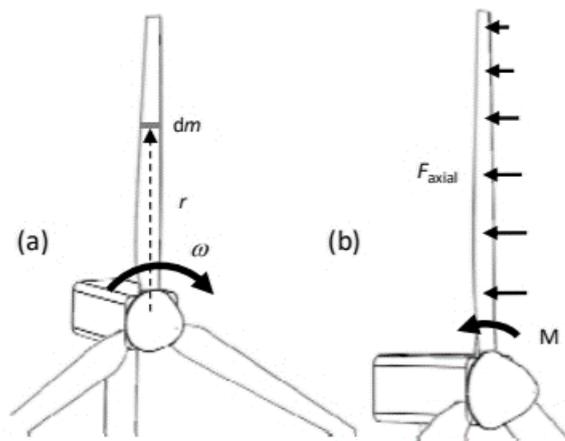
c) **NACA *six-digit series***

Pada awal tren energi angin sebagai sumber energi pada tahun 1970-an, *airfoil* NACA diadopsi untuk bilah turbin angin karena performa aerodinamisnya walaupun dengan ketebalan yang relatif besar. Seri ini dikembangkan dengan tujuan utama untuk memaksimalkan aliran laminar pada *airfoil*. NACA *four-digit series* lambat laun ditinggalkan karena sensitif terhadap kekasaran, sedangkan NACA *six-digit series* terutama NACA 63 and 64 masih sering digunakan di bilah turbin angin sampai sekarang (Timmer, 2009).

2. **Gaya-gaya Secara Umum**

Dalam penentuan desain dari bilah turbin angin berskala besar, aspek struktural sangat diperhitungkan dan lebih diutamakan daripada aspek aerodinamisnya. Terdapat dua tipe gaya

yang bekerja pada turbin angin, yaitu gaya inersia, aerodinamis, dan gravitasi (Probst, Martinez, Elizondo, & Monroy, 2011).

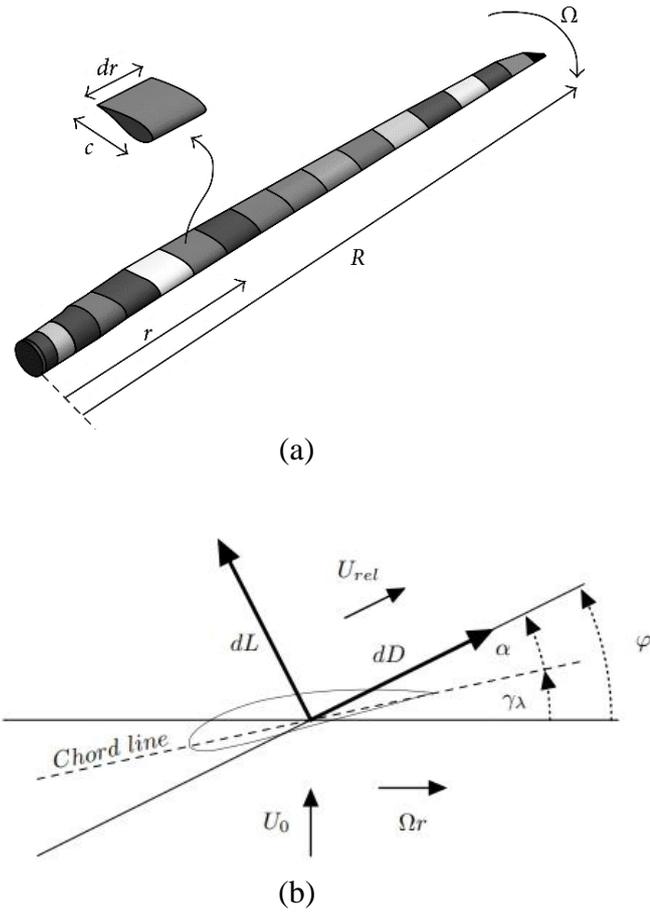


Gambar 2. 4 Gaya-gaya Umum pada Bilah Turbin Angin yaitu (a) Gaya Sentrifugal dan (b) Gaya Aksial (Probst, Martinez, Elizondo, & Monroy, 2011)

Gaya aksial terdiri dari gaya aerodinamis dan gaya gravitasi. Gaya aerodinamis adalah gaya yang timbul akibat interaksi dengan fluida sehingga menyebabkan distribusi tekanan atau tegangan dan tegangan geser pada permukaan benda. Gaya aerodinamis menimbulkan gaya aksial sehingga menyebabkan *bending moment* pada pangkal. Gaya aksial merupakan gaya resultan dari gaya *drag* dan *lift*. Variasi gaya aksial pada seluruh bagian bilah dapat dihitung secara tepat melalui metode numerik, salah satunya yaitu *Blade Element Momentum Theory*. Gaya aksial merupakan gaya resultan dari gaya angkat dan hambat. Gaya angkat menyebabkan pembengkokan pada arah *flapwise* dan aliran udara sekitar bilah menyebabkan tekukan *edgewise*. *Flapwise bending* menyebabkan beban tarik pada sisi *pressure* (*upwind*) dan beban kompresi pada sisi *suction* (*downwind*). Sedangkan *edgewise bending* menyebabkan beban tarik pada sisi *leading edge* dan beban kompresi pada sisi *trailing edge*. Gaya aksial ini juga menyebabkan bilah turbin dapat berputar. Ketika bilah berputar maka terdapat gaya sentrifugal yang bekerja pada bilah akibat efek semu yang ditimbulkan ketika sebuah benda melakukan gerak melingkar. Lalu gaya gravitasi adalah gaya yang terjadi akibat berat dari bilah itu sendiri.

3. *Blade Element Momentum*

Teori *Blade Element Momentum* (BEM) adalah model yang digunakan untuk mengevaluasi performa turbin yang mendorong atau mengekstraksi energi kinetik dari angin berdasarkan parameter mekanik dan geometris serta karakteristik aliran yang berinteraksi. Model ini dihasilkan dari kombinasi dua teori: Teori *Blade Element* dan Teori *Momentum*. Teori ini pertama dicetuskan oleh William Froude di tahun 1878 pada saat mempelajari perilaku turbin dari sudut pandang lokal. Dalam teori ini, bilah turbin dibagi menjadi beberapa bagian (*blade element*), dan didekatkan sebagai model planar. Pendekatan dengan teori ini menghasilkan ekspresi gaya-gaya yang bekerja pada masing masing *blade element* sebagai fungsi dari karakteristik aliran dan geometri bilah. Satuan yang mendasar dari model ini adalah dua koefisien eksperimental (biasanya dilambangkan oleh C_L dan C_D), yang masing-masing disebut *coefficient of lift* (koefisien angkat) dan *coefficient of drag* (koefisien hambat), yang menjelaskan gaya pada penampang sebagai fungsi *angle of attack* (sudut serang), yaitu sudut relatif antara bilah yang berputar dan aliran fluida. Hasilnya kemudian diintegrasikan di sepanjang bilah untuk mendapatkan nilai secara menyeluruh (Ledoux, Riffo, & Julien, 2021).



Gambar 2. 5 Hubungan (a) Profil *Blade Element* dengan (b) Profil Sudut Serang, Kecepatan, dan Gaya (Ledoux, Riffo, & Julien, 2021)

$$dL = C_L(\alpha) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_{rel}^2 \cdot c_\lambda \cdot dr \dots\dots\dots (2.1)$$

$$dD = C_D(\alpha) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_{rel}^2 \cdot c_\lambda \cdot dr \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana:

- dD : Gaya *drag* elementer
- dL : Gaya *lift* elementer
- U_{rel}^2 : Kecepatan angin relatif
- C_λ : Panjang chord
- ρ : Massa jenis udara
- α : *Angle of attack*
- dr : Lebar *blade element*
- $C_L(\alpha)$: *Coefficient of lift* pada angle of attack α
- $C_D(\alpha)$: *Coefficient of drag* pada angle of attack α

Parameter α disebut sudut serang dan didefinisikan sebagai sudut antara *chord* dan arah aliran, karenanya memenuhi hubungan sebagai berikut.

$$\alpha = \varphi - \gamma_\lambda \dots\dots\dots (2.3)$$

dimana $-\pi/2 < \gamma_\lambda < \pi/2$ adalah *twist angle* (juga disebut *local pitch*) dari bilah dan φ adalah *flow angle*. Parameter yang terkait dengan *blade element* dirangkum dalam gambar 2.5b.

Meskipun berubah dari satu profil ke profil lainnya, perilaku C_L dan C_D sebagai fungsi α dapat dijelaskan secara kualitatif secara umum. Koefisien C_L biasanya meningkat hampir secara linier sehubungan dengan α hingga α sudut kritis yang diberikan, dengan $0 < \alpha_s < \pi/2$, di mana fenomena *stall* terjadi. C_L kemudian berkurang dengan cepat, menyebabkan hilangnya *lift* secara tiba-tiba. Untuk C_D dikaitkan dengan gaya *drag*, selalu positif dan didefinisikan untuk semua sudut. Secara umum, koefisien ini sedikit meningkat dalam α hingga $\alpha = \alpha_s$, dan kemudian menjadi sangat besar. Oleh karena itu, kondisi $\varphi - \gamma_\lambda < \alpha_s$ selalu diperlukan dalam fase desain bilah.

Terdapat persamaan yang diusulkan oleh Glauert untuk memodelkan interaksi antara turbin dan aliran fluida terhadap dT (*thrust force*) dan dQ (torsi) yang berlaku pada tiap *blade element* dengan ketebalan tertentu. Pendekatan tersebut dapat diringkas sebagai berikut:

$$dT = \frac{B}{2} U_{rel}^2 (C_L(\varphi - \gamma_\lambda) \cos \varphi + C_D(\varphi - \gamma_\lambda) \sin \varphi) \rho c_\lambda dr \dots \dots \dots (2.4)$$

$$dQ = \frac{B}{2} U_{rel}^2 (C_L(\varphi - \gamma_\lambda) \sin \varphi - C_D(\varphi - \gamma_\lambda) \cos \varphi) \rho c_\lambda r dr \dots \dots \dots (2.5)$$

Dimana:

- dT : Gaya *thrust* elementer
- dQ : Torsi elementer
- B : Jumlah bilah
- r : Radius *blade element*
- γ_λ : *Twist angle*
- φ : *Flow angle*

Persamaan teori momentum diturunkan dengan asumsi bahwa gaya dari bilah pada aliran adalah konstan di setiap elemen annular. Kerangka kerja seperti itu sesuai dengan rotor dengan jumlah bilah yang tak terbatas. Namun, dalam situasi kehidupan nyata, modifikasi aliran di ujung bilah harus dimasukkan untuk memperhitungkan bahwa sirkulasi cairan di sekitar blade harus turun (secara eksponensial) ke nol ketika $r \rightarrow R$ yang disebut sebagai *tip loss correction*. Dalam hal ini, mengingat jumlah bilah B dan jari-jari r dari turbin dipertimbangkan, Glauert menggunakan *Prandtl tip function* f_λ sebagai berikut.

$$F_\lambda(\varphi) = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\exp \left(- \frac{\frac{B}{2} \left(1 - \frac{\lambda U_\infty}{\Omega R} \right)}{\left(\frac{\lambda U_\infty}{\Omega R} \right) \sin \varphi} \right) \right)$$

$$F_\lambda(\varphi) = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\exp \left(- \frac{\frac{B}{2} \left(1 - \frac{r}{R} \right)}{\left(\frac{r}{R} \right) \sin \varphi} \right) \right) \dots \dots \dots (2.6)$$

Prandtl tip function f_λ berfungsi sebagai faktor tambahan dalam persamaan (2.4) dan (2.5). Modifikasi ini memunculkan persamaan sebagai berikut.

$$dT = F_\lambda(\varphi) \frac{B}{2} U_{rel}^2 (C_L(\varphi - \gamma_\lambda) \cos \varphi + C_D(\varphi - \gamma_\lambda) \sin \varphi) \rho c_\lambda dr \dots \dots \dots (2.7)$$

$$dQ = F_\lambda(\varphi) \frac{B}{2} U_{rel}^2 (C_L(\varphi - \gamma_\lambda) \sin \varphi - C_D(\varphi - \gamma_\lambda) \cos \varphi) \rho c_\lambda r dr \dots \dots \dots (2.8)$$

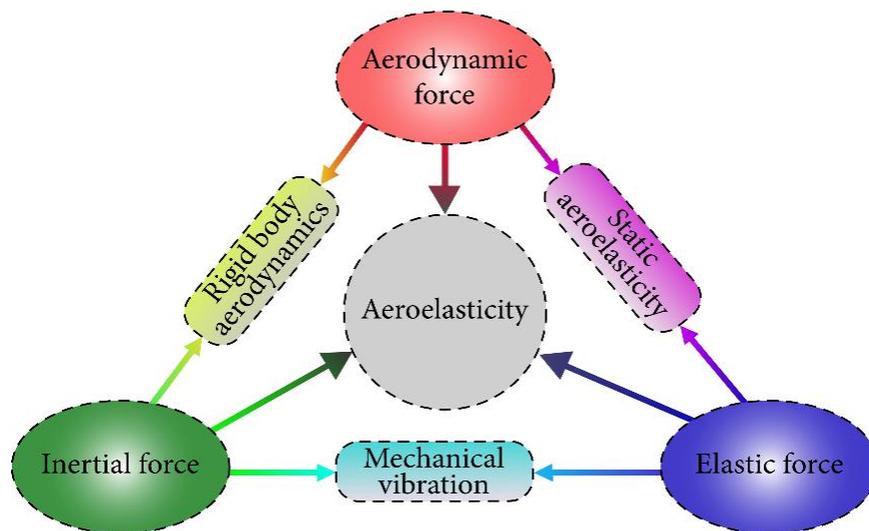
4. Aeroelasticity

Beban aerodinamis adalah beban yang terjadi pada struktur dengan aliran fluida di sekitar struktur tersebut, atau dalam hal ini udara (aero). Gaya-gaya aerodinamika tersebut muncul akibat perubahan momentum dan energi dari fluida ketika bergerak melewati benda

tersebut. Gaya-gaya aerodinamika tidak hanya bergantung terhadap properti dari aliran seperti temperatur, kecepatan, dan tekanan tetapi juga bergantung dari geometri benda yang dialirinya.

Dari sisi struktur, sebuah struktur memiliki elastisitas dikarenakan material solid yang menyusun struktur tersebut juga memiliki sifat elastisitas dan dipengaruhi juga oleh geometri dari struktur tersebut. Sifat elastis dari struktur berarti ketika struktur tersebut dikenai beban, maka struktur tersebut akan berdeformasi atau berubah bentuk, menuju keseimbangan baru antara struktur dan beban yang dikenai pada struktur tersebut. Deformasi dari struktur pun bergantung terhadap beban yang mengenainya. Dari penjelasan sebelumnya, sangatlah jelas dilihat bahwa ilmu aeroelastisitas menjelaskan interaksi yang selalu terjadi ketika struktur dialiri oleh fluida. Fluida yang mengalir akan terbangkitkan gaya-gaya fluida yang dipengaruhi oleh properti fluida dan geometri struktur yang dilalui. Dari struktur yang dikenai gaya tersebut, struktur tersebut akan berdeformasi, deformasi inilah yang kemudian mengubah geometri dari struktur. Geometri yang berubah akibat deformasi akan mengubah beban fluida yang terjadi pada struktur. Beban fluida yang berubah akan mengakibatkan deformasi akan berubah, deformasi yang berubah akan merubah lagi beban fluida yang terjadi pada struktur dan seterusnya.

Aeroelastik dilihat dari respon strukturnya dapat dipecah menjadi dua yaitu aeroelastik statik dan aeroelastik dinamik. Aeroelastik statik berarti struktur akan berdeformasi secara statik, dan aeroelastik dinamik berarti struktur berdeformasi secara dinamik. Deformasi statik dapat dilihat sebagai perubahan bentuk biasa akibat beban yang dikenai pada struktur. Deformasi dinamik dapat dilihat sebagai perubahan bentuk, tetapi perubahan bentuk ini disertai oleh vibrasi dari struktur, dikarenakan efek inersia akibat deformasi sudah cukup dominan dibandingkan deformasi statik (Nithin & Kovvuri, 2019).

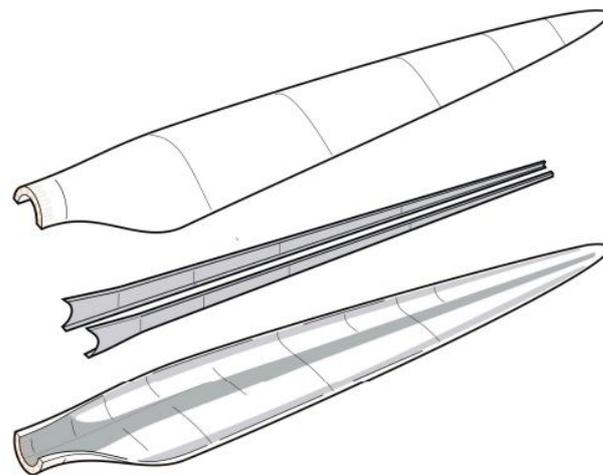
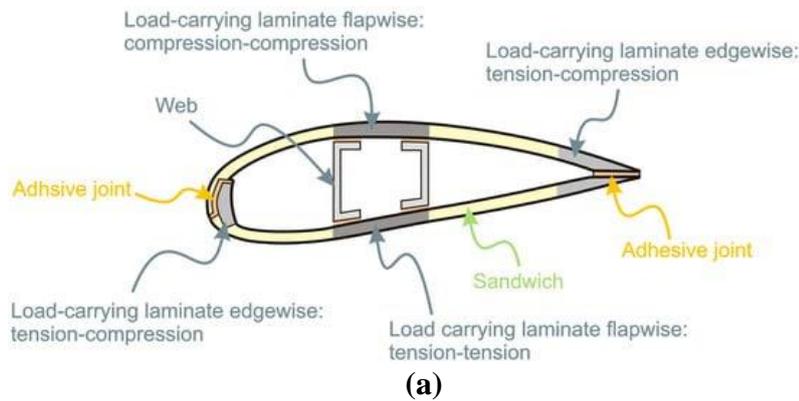


Gambar 2. 6 Collar's Aeroelasticity Interaction Triangle (Nithin & Kovvuri, 2019)

5. Struktur Bilah Turbin Angin

Bilah turbin angin terdiri dari dua sisi, yaitu sisi *suction* dan sisi *pressure*. Kedua sisi ini bergabung bersama dan menempel pada salah satu atau beberapa jaring integral (*shear web*) yang menghubungkan bagian atas dan bawah dari bilah atau dengan balok kotak (kotak *spar* dengan *shell fairings*) dengan menggunakan *adhesive joint*. Beban *flapwise* disebabkan oleh tekanan angin, dan beban *edgewise* disebabkan oleh kekuatan gravitasi dan beban torsi. *Flapwise bending* ditahan oleh *spar*, jaring internal atau *spar* di dalam bilah, sedangkan ujung profil menahan *edgewise bending*. Dari titik beban pada material, salah satu laminasi utama dalam *spar* utama mengalami beban tarik-kompresi siklik (sisi *pressure*). Sedangkan pada sisi satunya (sisi *suction*) dikenakan beban kompresi-kompresi siklik. Laminasi di *leading edge* dan

trailing edge yang menahan *bending moment* akibat beban gravitasi mengalami beban Tarik-kompresi. Pada bagian *shell* yang biasanya terbuat dari struktur *sandwich* ataupun tumpukan serat, dirancang untuk menahan *elastic buckling* karena pada tiap bagian bilah mengalami siklus beban yang berbeda. Maka dari itu, hampir semua bilah turbin angin yang terpasang menggunakan bahan yang berbeda pada tiap bagian bilah (Mishnaevsky, et al., 2017).



Gambar 2. 7 Konstruksi Struktural Bilah Turbin Angin secara (a) 2 Dimensi dan (b) 3 Dimensi (Mishnaevsky, et al., 2017)

2.1.3 Turbin Angin 100 KW P3TKEBTKE

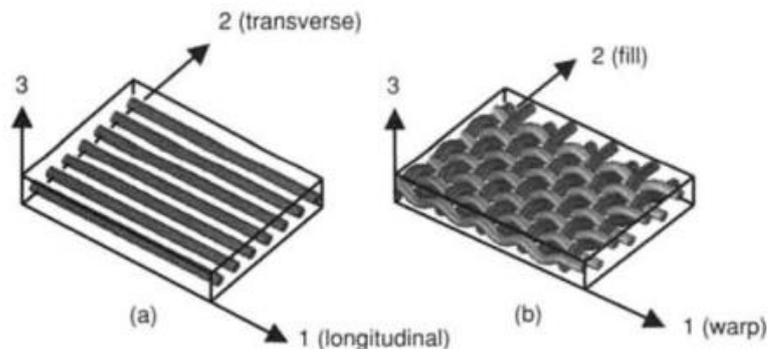
Turbin angin 100 KW milik Puslitbangtek KEBTKE (P3TKEBTKE) merupakan instalasi PLT Bayu tipe *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) yang telah selesai diproduksi dan terpasang di Desa Tamanjaya, Sukabumi untuk memanfaatkan energi angin yang relatif besar berdasarkan data yang diambil dari tanggal 29 Januari-14 Desember 2008. Turbin angin ini memiliki panjang bilah 12 meter yang terpasang di generator di ketinggian 35 meter dan dapat menghasilkan daya maksimum sebesar 100 KW. Komponen-komponen penting dari turbin angin ini diproduksi di dalam negeri, seperti PT. Dirgantara Indonesia untuk pembuatan bilah turbin (*blade*), PT. Pindad untuk pembuatan generator dan *power electronic*. sedangkan *gearbox* dan *drive control* dipabrikasi oleh PT. Pindad, PT. INKA, dan PT. Astra Internasional, yang saat itu sebagai pembuktian sinergi Barang Milik Negara (BMN) oleh Badan Litbang ESDM.



Gambar 2. 8 Turbin Angin 100 KW P3TKEBTKE di Desa Tamanjaya-Sukabumi

2.1.4 Fiber Reinforced Composite

Fiber Reinforced Composite (FRC) adalah komposit yang diperkuat oleh serat kuat dan dikelilingi oleh bahan matriks yang lebih lemah. Matriks berfungsi untuk mendistribusikan serat dan juga untuk mengirimkan beban ke serat. Ikatan antara serat dan matriks dibuat selama fase manufaktur bahan komposit. Hal ini memiliki pengaruh mendasar pada sifat mekanik dari bahan komposit. Serat terdiri dari ribuan filamen, masing-masing filamen memiliki diameter antara 5 dan 15 mikrometer, memungkinkan mereka untuk dapat diproduksi menggunakan mesin tekstil.

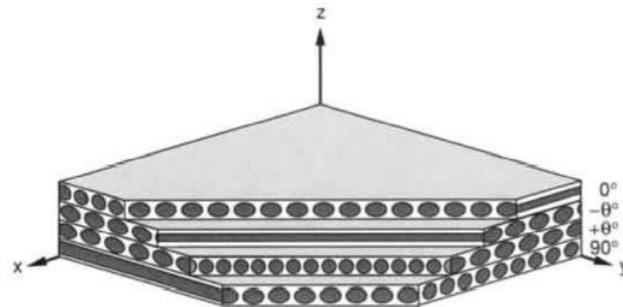


Gambar 2. 9 Struktur Serat dan Matriks pada Lamina Komposit (a) *Unidirectional* dan (b) *Woven* (Daniel & Ishai, 2006)

Lamina atau *ply* adalah lapisan bidang (atau melengkung) dari serat searah (*unidirectional*) atau kain tenun (*woven*) dalam matriks. Lamina adalah material ortotropik dengan sumbu material prinsipal atau *principal material axes* ke arah serat (longitudinal), normal terhadap serat di bidang lamina (transversal dalam bidang), dan normal ke bidang lamina. Sumbu utama ini masing-masing ditetapkan sebagai 1, 2, dan 3, secara berurutan. Dalam kasus komposit *woven*, arah *warp*, dan *fill* adalah arah *in-plane principal* 1 dan 2, secara berurutan.

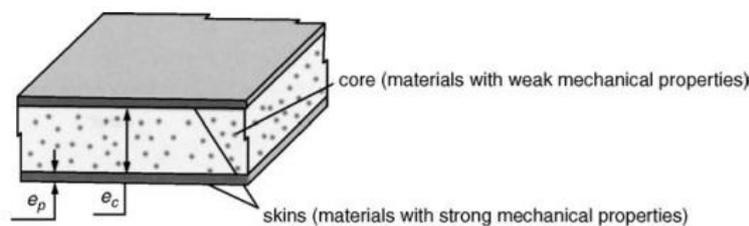
Laminasi adalah kumpulan dari dua atau lebih lamina atau lapisan searah yang ditumpuk bersama di berbagai orientasi. Lamina tersebut dapat memiliki ketebalan yang bervariasi dan

terdiri dari material yang berbeda karena orientasi sumbu material utama bervariasi antara tiap *ply*, lebih mudah untuk menganalisis laminasi menggunakan sistem tetap umum atau koordinat (x, y, z), seperti yang digunakan pada pasaran secara umum. Konfigurasi laminasi yang menunjukkan komposisi *ply*-nya disebut *lay-up*. Konfigurasi yang menunjukkan, selain komposisi *ply*, lokasi atau urutan yang tepat dari berbagai lapisan, disebut *stacking sequence*. Orientasi *ply* yang diberikan oleh sudut antara sumbu x referensi dan sumbu prinsipal material utama (orientasi serat atau arah *warp*) dari *ply*, diukur dengan arah berlawanan arah jarum jam pada bidang x - y . Laminasi komposit ditetapkan dengan cara yang menunjukkan angka, jenis, orientasi, dan menumpuk urutan lapisan.



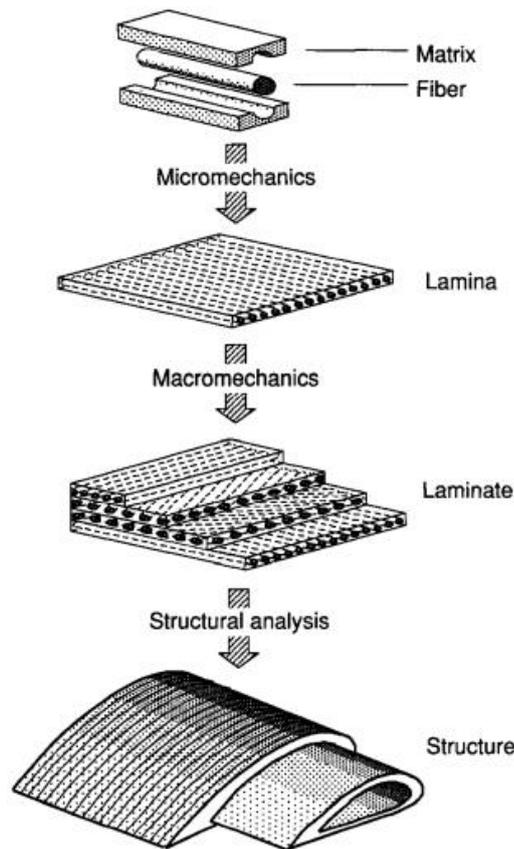
Gambar 2. 10 Tumpukan Lamina yang Membentuk Laminasi *Multidirectional* (Daniel & Ishai, 2006)

Struktur sandwich dihasilkan dari perakitan oleh ikatan atau las dari dua permukaan tipis atau kulit pada *core* yang lebih ringan yang biasa digunakan untuk menjaga agar kedua kulit tetap terpisah. Panel sandwich adalah jenis laminasi khusus yang terdiri dari dua lapisan tipis (permukaan atau kulit) dan *core* yang ringan, lebih tebal, dan kekakuan rendah. Bahan yang umum digunakan untuk lapisan adalah laminasi komposit dan logam, dengan *core* yang terbuat dari *honeycomb* metalik atau non-metalik, *cellular foams*, kayu balsa, dan *Truss*. Lapisan ini yang menahan hampir semua of beban dan momen, sedangkan *core* berfungsi untuk menstabilisasi lapisan terhadap *buckling* dan mendefinisikan kekakuan lentur, tegangan geser, dan perilaku tekan.



Gambar 2. 11 Komposit dengan Konstruksi *Sandwich* (Daniel & Ishai, 2006)

Material komposit dapat dilihat dan dianalisis pada tingkat yang berbeda dan pada skala yang berbeda, tergantung pada karakteristik dan perilaku tertentu yang sedang dipertimbangkan. Pada tingkat laminasi, analisis makromekanis diterapkan dalam bentuk teori laminasi yang berhubungan dengan perilaku keseluruhan sebagai fungsi dari sifat lamina dan *stacking sequence*. Akhirnya, pada tingkat komponen atau struktur, metode seperti Metode Elemen Hingga ditambah dengan teori laminasi dapat memprediksi perilaku keseluruhan struktur serta keadaan *stress* di setiap lamina.



Gambar 2. 12 Tipe Analisis pada Material Komposit (Daniel & Ishai, 2006)

Persamaan *density* dari komposit bergantung kepada fraksi volume matriks dan fiber yang dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\rho_c = V_f \rho_f + V_m \rho_m \dots \dots \dots (2.9)$$

Persamaan *longitudinal Young modulus* (E_1) pada elemen dengan hubungan matriks dan fiber dapat dituliskan sebagai berikut.

$$E_1 = V_f E_f + V_m E_m \dots \dots \dots (2.10)$$

Untuk nilai *transverse Young modulus* (E_2) digunakan persamaan berikut.

$$E_2 = \left(\frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \right)^{-1} \dots \dots \dots (2.11)$$

Untuk mencari nilai *longitudinal shear modulus* (G_{12}) dan *transverse shear modulus* (G_{23}) digunakan persamaan berikut.

$$G_{12} = G_m \frac{(1+V_f)G_f + V_m G_m}{V_m G_f + (1+V_f)G_m} \dots \dots \dots (2.12)$$

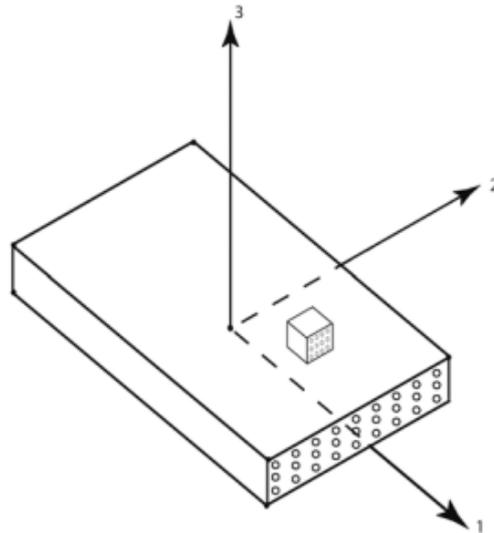
$$G_{23} = \frac{G_m K_m (G_m + G_f) + 2G_f G_m + K_m (G_f - G_m) V_f}{K_m (G_m + G_f) + 2G_f G_m - (K_m + 2G_m) (G_f - G_m) V_f} \dots \dots \dots (2.13)$$

Mengingat pertambahan panjang pada elemen disepanjang permukaan adalah sama, maka nilai *longitudinal poisson ratio* (ν_{12}) dan *transverse poisson ratio* (ν_{23}) dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$v_{12} = V_f v_f + V_m v_m \dots \dots \dots (2.14)$$

$$v_{23} = \frac{E_2}{2G_{23}} - 1 \dots \dots \dots (2.15)$$

Analisa struktur dari laminasi komposit dapat dilakukan dengan menggunakan *Classical Lamination Theory*. Tiap lapisan pada komposit dianggap *orthotropic* dan *linearly elastic*. *Orthotropic* adalah sifat material komposit, di mana kekuatan untuk tiap arah yang tegak lurus arah sumbu x, y, dan z berbeda-beda. Dalam aplikasinya pada material komposit, dapat diasumsikan kondisi *plane stress*, di mana kondisi ini hanya berfokus pada bagian *in plane*, sehingga arah *out of plane* dapat diabaikan pada material komposit. Jika ditunjukkan pada gambar 2.13, *plane stress* arah 3 (tiga) dapat diabaikan.



Gambar 2. 13 Lamina dengan Sistem Koordinat Material Utama (Voyiadjis & Kattan)

Dengan mengasumsikan kondisi *plane stress*, persamaan hubungan *stress-strain* yang awal mulanya adalah.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.16)$$

dengan diabaikannya *plane stress*, arah tiga yang mana nilai $\sigma_3 = \tau_{23} = \tau_{13} = 0$, maka rumus di atas dapat disederhanakan menjadi.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.17)$$

Jika matriks di atas di-*inverse* maka didapat persamaan matriks.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.18)$$

Di mana nilai dari Q_{ij} didapatkan dari rumus berikut.

$$Q_{11} = \frac{S_{22}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} \dots \dots \dots (2.19)$$

$$Q_{12} = -\frac{S_{12}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} \dots \dots \dots (2.20)$$

$$Q_{22} = \frac{S_{11}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} \dots \dots \dots (2.21)$$

$$Q_{66} = \frac{1}{S_{66}} \dots \dots \dots (2.22)$$

Dan nilai dari S_{ij} didapatkan dari rumus berikut.

$$S_{11} = \frac{1}{E_1} \dots \dots \dots (2.23)$$

$$S_{12} = -\frac{\nu_{12}}{E_1} \dots \dots \dots (2.24)$$

$$S_{22} = \frac{1}{E_2} \dots \dots \dots (2.25)$$

$$S_{66} = \frac{1}{G_{12}} \dots \dots \dots (2.26)$$

Makna dari notasi-notasi yang ada di atas antara lain ϵ merupakan simbol regangan normal, γ adalah simbol dari regangan geser, untuk E merupakan simbol dari modulus elastisitas, G merupakan simbol dari modulus *shear*, ν merupakan *poisson ratio*, σ merupakan tegangan normal, dan τ merupakan simbol dari tegangan geser. Untuk Q merupakan *stiffness* dari komponen yang mana rumusnya dapat diturunkan menjadi.

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \dots \dots \dots (2.27)$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \dots \dots \dots (2.28)$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \dots \dots \dots (2.29)$$

$$Q_{66} = G_{12} \dots \dots \dots (2.30)$$

Nilai ν_{21} didapat dengan menggunakan persamaan berikut.

$$\nu_{21} = \frac{E_2\nu_{12}}{E_1} \dots \dots \dots (2.31)$$

Transformasi antara lapisan material lokal menjadi lapisan material global perlu dilakukan dengan menggunakan formula berikut.

$$T = \begin{bmatrix} C^2 & S^2 & 2CS \\ S^2 & C^2 & -2CS \\ -CS & CS & C^2 - S^2 \end{bmatrix}, C = \cos \theta, S = \sin \theta \dots \dots \dots (2.32)$$

Dengan matriks transformasi di atas, matriks *stiffness global* dapat ditemukan dengan persamaan berikut.

$$[\bar{Q}] = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} [T] \dots \dots \dots (2.33)$$

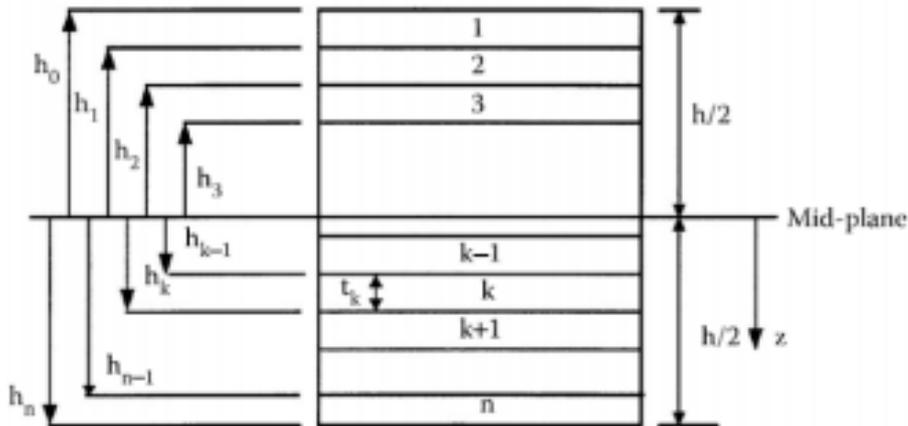
Setelah matriks *stiffness global* didapatkan, selanjutnya mencari matriks A_{ij} , B_{ij} , dan D_{ij} dengan menghitung menggunakan rumus di bawah ini, di mana h merupakan tinggi dari laminasi dan k merupakan angka dari *layer*.

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n [\bar{Q}_{ij}]_k (h_k - h_{k-1}), \quad i = 1,2,6; j = 1,2,6 \dots \dots \dots (2.34)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n [\bar{Q}_{ij}]_k (h_k^2 - h_{k-1}^2), \quad i = 1,2,6; j = 1,2,6 \dots \dots \dots (2.35)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n [\bar{Q}_{ij}]_k (h_k^3 - h_{k-1}^3), \quad i = 1,2,6; j = 1,2,6 \dots \dots \dots (2.36)$$

Di mana untuk $h_k = -\frac{h}{2} + \sum_{1}^k t$ (*bottom surface*), dapat dilihat pada gambar di bawah ini untuk ilustrasinya.



Gambar 2. 14 Lokasi dari Plies di Lamina (Halawa & Al-Huniti, 2019)

Matriks A_{ij} , B_{ij} , dan D_{ij} tersebut disusun menjadi seperti berikut:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.37)$$

Dimana:

$[A]$ = *extensional stiffness matrix*

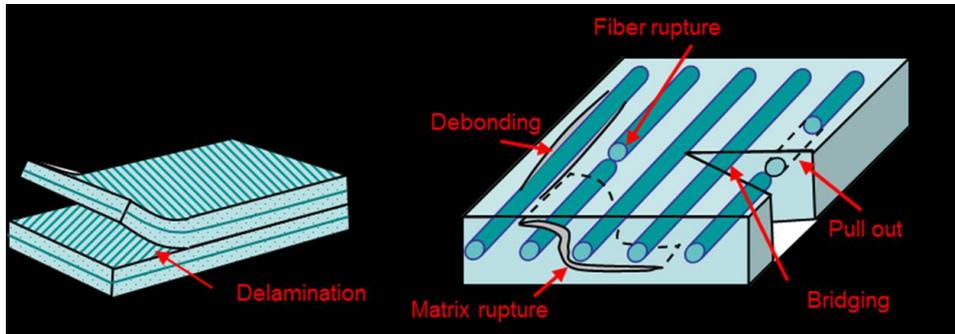
$[B]$ = *bending-extension coupling stiffness matrix*

$[D]$ = *bending stiffness matrix*

Dari definisi matriks kekakuan sebelumnya, maka ekspresi gaya dan *in-plane moment* adalah.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x^o \\ \varepsilon_y^o \\ \gamma_s^o \\ k_x \\ k_y \\ k_s \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.38)$$

Suatu komposit dianggap gagal apabila komposit tersebut tidak dapat berfungsi lagi dengan sempurna. Pada sebuah struktur pembebanan yang kecil mungkin hanya berakibat terjadinya deformasi yang kecil, namun pada struktur yang lain sudah mengakibatkan kegagalan. Hal tersebut terjadi karena perbedaan sifat mekanik tiap-tiap bahan pada komposit yang terdiri dari dua komponen utama kegagalan bisa dimulai dari salah satu komponen atau keduanya. (Hull D, 1981). Artinya, bahan komposit dikatakan gagal bila bahan tersebut telah rusak total ketika mendapat beban tertentu atau kurva tegangan-regangan yang ditunjukkan tidak lagi linier. Hal ini berlaku baik untuk lapisan tunggal maupun lamina (Daniel & Ishai, 2006).



Gambar 2. 15 Tipe Kegagalan Komposit

Secara mikromekanik komposit memiliki beberapa tipe kegagalan:

a) *Fiber rupture (Intralaminar)*

Fiber rupture atau patah pada serat terjadi ketika regangan penguat/serat lebih rendah daripada regangan matriks, sehingga saat menerima beban, pertambahan panjang matriks tidak diikuti oleh pertambahan panjang penguat. Dalam hal ini adalah serat. Alur patahan dimulai dari penguat/serat dan merambat ke matriks.

b) *Matrix rupture (translaminar)*

Matrix rupture atau patah pada matriks terjadi ketika terdapat beban yang bekerja melebihi kekuatan tarik maksimum dari matriks. Patahan ini kemudian dapat menjalar ke matriks lain sehingga dapat menyebabkan kerusakan total dari laminasi. Perpatahan ini sangat mudah terjadi pada matriks yang memiliki regangan yang rendah.

c) *Delamination*

Delamination atau delaminasi adalah kegagalan yang terjadi akibat terlepasnya ikatan antara satu lamina dengan lamina lainnya pada sebuah laminasi.

d) *Debonding*

Debonding adalah peristiwa terlepasnya ikatan antara lapisan penguat dengan matriks akibat gaya adhesi antar penguat dan matriks yang lemah. Kemampuan matriks untuk mengisi ruang antar serat pun juga berpengaruh terhadap ketahanan *debonding* sebuah lamina.

e) *Fiber pullout*

Fiber pullout adalah kegagalan berupa keluarnya *fiber* dari lubangnya pada matriks pada saat terjadinya regangan saat *fiber* mengalami patah.

f) **Micro buckling**

Micro buckling adalah jenis kegagalan komposit yang disebabkan adanya pembebanan tekan (*compressive*). Pembebanan tekan ini mengakibatkan bentuk serat berubah menjadi lebih menekuk (*buckling*) dan akhirnya patah. Serat juga dapat mengalami buckling tanpa terjadinya patah, namun hanya mengalami perubahan arah orientasi pada serat pendek. Kegagalan ini disebut sebagai *kink band failure*.

Kegagalan pada *fiber reinforced composites* bergantung pada properti material dari komponennya dan dapat terjadi pada tiga cara.

- Jika matriks bersifat *brittle* dan *interface* serat-matriks relatif kuat, matriks akan retak secara transversal.
- Jika *interface* relatif lemah dan *ultimate fiber strain* yang relatif tinggi, *fiber-matrix debonding* akan terjadi.
- Jika matriks bersifat *ductile* dan *interface* relatif kuat, *conical shear failure* akan terjadi pada matriks.

Dari sudut pandang makromekanik, kekuatan lamina bersifat anisotropik, yaitu bervariasi dengan orientasi serat. Maka dari itu terdapat teori kegagalan secara makromekanik untuk komposit yang merupakan perpanjangan dan adopsi dari teori kegagalan isotropic untuk menjelaskan kekuatan dan kekakuan anisotropi komposit. Empat kriteria kegagalan yang biasa digunakan untuk *fiber reinforced composite* adalah sebagai berikut.

- *Non-interactive*
 - *Maximum stress theory*
 - *Maximum strain theory*
- *Interactive*
 - *Tsai-Hill Theory (Deviatoric Strain Energy Theory)*
 - *Tsai-Wu Theory (Interactive tensor polynomial theory)*

Teori kegagalan dapat dibagi menjadi dua kelompok, yaitu non-interaktif dan interaktif. Untuk penerapan teori kegagalan yang tepat, pertama-tama kriteria kegagalan non-interaktif seperti *maximum stress theory* dan *maximum strain theory* diterapkan untuk memeriksa mode kegagalan. Lamina dapat menunjukkan kegagalan menggunakan teori non-interaktif. Jika tidak, lamina harus diperiksa menggunakan kriteria kegagalan interaktif karena terkadang interaksi berbagai tegangan dapat memulai kegagalan daripada tegangan independen (Jauhari, Mishra, & Thakur, 2017).

2.1.5 Material Bilah Turbin Angin

Beberapa material dengan properti kekakuan dan kekuatan yang digunakan pada bilah turbin angin yang diteliti antara lain adalah sebagai berikut.

1. Kayu Balsa

Ochroma pyramidale atau biasa disebut sebagai kayu balsa adalah sebuah kayu yang umum digunakan dalam pengaplikasian struktur yang membutuhkan *stiffness-to-weight ratio* yang tinggi, seperti bilah turbin angin. Bilah turbin angin biasanya menggunakan kayu balsa yang di laminasi *sandwich* menggunakan *fiberglass*. Kayu balsa bersifat *brittle* seperti kayu pada umumnya. Sifat elastis kayu balsa adalah anisotropik karena sifat elastis dan kayu bergantung pada arah seratnya. Kepadatan kayu serta *material properties* dari Kayu Balsa bervariasi dan bergantung pada tingkat kekeringan dari kayu tersebut. Untuk penelitian ini, digunakan *material properties* dari Kayu Balsa yang sudah dikeringkan dengan kandungan air 12-15% dan material dianggap isotropik untuk menyederhanakan permasalahan.

Tabel 2. 1 Material Properties dari Kayu Balsa (*Air Dried*)

<i>Property</i>	<i>Value</i>	<i>Unit</i>
Density	160	Kg.m3
Young's Modulus	2037.1	MPa
Bulk Modulus	2.83	MPa
Shear Modulus	0.74	MPa
Poisson's Ratio	0.38	Arbitrary
Tensile Ultimate Strength	73	MPa
Compressive Ultimate Strength	9	MPa

2. *E-Glass*

E-Glass adalah salah satu penguat polimer berbentuk serat yang paling banyak digunakan dengan hampir 90% dari semua FRP terbuat dari serat kaca. *E-glass* bersifat *brittle* dengan sifat elastisitas anisotropic karena bergantung pada arah seratnya. Namun saat belum dibentuk menjadi serat, sifat elastisitas dari *E-Glass* dapat dianggap sebagai isotropik. *E-glass* paling banyak digunakan pada bilah turbin angin karena harganya yang murah, memiliki densitas yang rendah, ketahanan yang baik terhadap korosi, modulus spesifik dan kekuatan spesifik relatif tinggi, insulasi yang efektif, dan tidak mudah menyerap air. Namun *e-glass* memiliki kekurangan yaitu ketahanan lelahnya yang rendah.

Tabel 2. 2 Material Properties dari *E-Glass*

<i>Property</i>	<i>Value</i>	<i>Unit</i>
Density	160	Kg.m3
Young's Modulus	72.4	GPa
Bulk Modulus	43.1	GPa
Shear Modulus	29.7	GPa
Poisson's Ratio XY	0.22	Arbitrary

3. *Epoxy*

Epoxy adalah material matriks atau *resin thermosetting* kelas prapolimer reaktif dan polimer yang mengandung gugus epoksida. Gugus fungsi epoksida juga secara kolektif disebut *epoxy*. Digunakan sejak tahun 1980-an dalam desain turbin, *epoxy resin* sebagian besar digunakan dalam komposit dan perekat yang diperlukan untuk menghasilkan bilah rotor angin dan elemen struktural lainnya untuk menghasilkan komposit dengan *strength-to-weight ratio* yang sangat tinggi, memungkinkan bilah turbin angin bertahan lebih lama dan lebih efisien untuk diproduksi.

Tabel 2. 3 Material Properties dari *Epoxy*

<i>Property</i>	<i>Value</i>	<i>Unit</i>
Density	2600	Kg.m3
Young's Modulus	3.78	GPa
Bulk Modulus	4.2	GPa
Shear Modulus	1.4	GPa
Poisson's Ratio	0.35	Arbitrary

4. *E-Glass/Epoxy*

E-Glass/Epoxy adalah material komposit dengan serat *E-Glass* sebagai penguat dan *epoxy* sebagai matriks-nya. Mayoritas komposit yang ditemukan di sektor energi digunakan dalam turbin angin adalah *E-Glass/Epoxy* dengan bentuk *woven* karena lebih ringan, resiko delaminasi dan retak yang rendah, manufaktur yang efisien, dan relatif lebih murah. Bentuk *woven* ini berarti arah seratnya bersifat biaxial 90 derajat yang dijahit membentuk *yarn*. Sifat elastisitas dari komposit ini adalah ortotropik karena bergantung pada arah seratnya.

Tabel 2. 4 Material Properties dari *E-Glass/Epoxy (Plain Woven)*

<i>Property</i>	<i>Value</i>	<i>Unit</i>
Tensile Strength X direction	490	MPa
Tensile Strength Y direction	490	MPa
Tensile Strength Z direction	54.6	MPa
Compressive Strength X direction	300	MPa
Compressive Strength Y direction	300	MPa
Compressive Strength Z direction	415	MPa
Shear Strength XY	27.3	MPa
Shear Strength YZ	179	MPa
Shear Strength XZ	179	MPa

Namun dari segi rasio kekakuan dan kekuatan maksimum spesifik, *E-Glass/Epoxy* dengan model *unidirectional* lebih unggul dibanding dengan *plain woven*. Namun keunggulan dari komposit dengan RVE *unidirectional* terbatas pada beban uniaksial, sehingga sangat berpengaruh terhadap arah pembebanan dan perlu dilakukan *stackup* dengan orientasi multiaksial.

Tabel 2. 5 Material Properties dari *E-Glass/Epoxy (Unidirectional)*

<i>Property</i>	<i>Value</i>	<i>Unit</i>
Tensile Strength X direction	783.3	MPa
Tensile Strength Y direction	64	MPa
Tensile Strength Z direction	64	MPa
Compressive Strength X direction	298	MPa
Compressive Strength Y direction	124	MPa
Compressive Strength Z direction	124	MPa
Shear Strength XY	38	MPa
Shear Strength YZ	69	MPa
Shear Strength XZ	38	MPa

2.1.6 Teori Kegagalan

Pada sub-bab ini akan dijelaskan mengenai teori kegagalan yang akan dipakai pada penelitian ini.

1. Mohr-Coulomb Theory (Brittle)

Tidak semua bahan memiliki kekuatan tekan yang sama dengan nilai tarik yang sesuai. Teori kegagalan *Mohr-Coulomb* adalah teori kegagalan yang digunakan untuk memprediksi kegagalan bahan yang kekuatannya dalam ketegangan dan kompresi tidak sama. Dalam penelitian ini, material yang digunakan bersifat *brittle* yang artinya tidak mengalami *yield*. Persamaan *Mohr-Coulomb* untuk material *brittle* adalah sebagai berikut:

$$\frac{\sigma_1}{S_{ut}} - \frac{\sigma_3}{S_{uc}} = 1 \dots \dots \dots (2.39)$$

Dimana:

- σ_1, σ_3 : Dimensional stress
- S_{ut} : Ultimate tensile strength
- S_{uc} : Ultimate compressive strength

Dikarenakan pada teori *Coulomb-Mohr* kita tidak perlu lingkaran *torsional yield strength*, kita bisa menyimpulkannya dari Persamaan (2.4) untuk *shear* murni τ , $\sigma_1 = -\sigma_3 = \tau$. *Torsional shear strength* terjadi ketika $\tau_{\max} = S_{sy}$. Substitusi $\sigma_1 = -\sigma_3 = S_{sy}$ ke dalam persamaan. (2.39) didapat.

$$S_{su} = \frac{S_{ut}S_{uc}}{S_{ut}+S_{uc}} \dots \dots \dots (2.40)$$

Dimana:

S_{su} : Ultimate shear strength

2. Tsai-Wu Failure Criterion

Kriteria kegagalan *Tsai-Wu* digunakan untuk menentukan faktor keamanan dari lamina komposit yang mengalami *plane stress*. Lamina komposit diprediksi akan mengalami kegagalan jika (Daniel & Ishai, 2006).

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_6\tau_{12} + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 = 1 \dots \dots (2.41)$$

$$F_1 = \frac{1}{F_{1t}} - \frac{1}{F_{1c}} \dots \dots \dots (2.42)$$

$$F_{11} = \frac{1}{F_{1t}F_{1c}} \dots \dots \dots (2.43)$$

$$F_2 = \frac{1}{F_{2t}} - \frac{1}{F_{2c}} \dots \dots \dots (2.44)$$

$$F_{22} = \frac{1}{F_{2t}F_{2c}} \dots \dots \dots (2.45)$$

$$F_6 = \frac{1}{F_{12t}} - \frac{1}{F_{12c}} \dots \dots \dots (2.46)$$

$$F_{66} = \frac{1}{F_{12t}F_{12c}} \dots \dots \dots (2.47)$$

$$2F_{12} = -1\sqrt{F_{11}F_{22}} \dots \dots \dots (2.48)$$

Dimana:

- F_1 : *stress* laminasi di sepanjang arah serat
- F_2 : *stress* laminasi melintang dari arah serat
- τ_{12} : *shear stress* laminasi
- F_{1t} : *material tensile strength* laminasi sepanjang arah serat
- F_{1c} : *material compressive strength* laminasi sepanjang arah serat
- F_{2t} : *material tensile strength* laminasi melintang dari arah serat
- F_{2c} : *material compressive strength* laminasi melintang dari arah serat
- F_{12t} : *positive shear strength* laminasi
- F_{12c} : *negative shear strength* of laminasi

2.1.7 Computational Fluid Dynamics

Komputasi dinamika fluida atau *Computational Fluid Dynamics* (CFD) merupakan suatu metode komputasi yang menggunakan metode numerik dan algoritma untuk menyelesaikan dan menganalisa aliran fluida, perpindahan panas, reaksi kimia, dan fenomena-fenomena lain dengan menyelesaikan persamaan matematika. Simulasi berbasis CFD telah dikembangkan mulai tahun 1960-an pada industri luar angkasa. Namun, saat ini simulasi CFD telah digunakan secara luas pada industri manufaktur hingga industri kimia. Keuntungan menggunakan CFD dalam analisa adalah *insight* (pemahaman mendalam), *foresight* (prediksi menyeluruh), dan *efficiency* (Anderson Jr., 1988). Aspek fisik dari aliran dinamik fluida

didasarkan pada prinsip hukum kekekalan massa, momentum dan energi. Pada umumnya terdapat tiga tahapan untuk melakukan proses simulasi CFD yaitu sebagai berikut.

1. Pre-processing

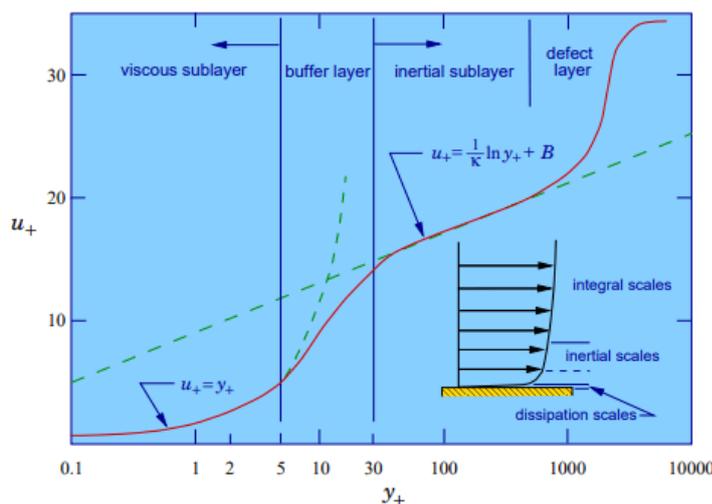
Pre-processing merupakan tahapan pertama untuk membangun dan menganalisis sebuah model CFD, yaitu dengan melakukan penggambaran geometri model, membuat *mesh* untuk membagi daerah komputasi menjadi sejumlah grid yang sesuai, menentukan parameter fisis dari kondisi batas model dan sifat-sifat fluidanya.

▪ **SST $k-\omega$ turbulence model**

Model turbulensi SST $K-\omega$ (Menter, 1993) adalah model turbulensi *Eddy-viscosity* dua persamaan yang telah menjadi sangat populer pada komputasi fluida sekarang untuk menangkap efek turbulensi pada fluida. Model turbulensi ini termasuk dalam keluarga model turbulensi *Reynold-averaged Navier-Stokes* dimana semua efek turbulensi dimodelkan penggunaan formulasi $k-\omega$ di bagian dalam *boundary layer* membuat model secara langsung dapat digunakan sampai ke dinding melalui *viscous sub-layer*. Maka dari itu, model SST $K-\omega$ dapat digunakan sebagai model turbulensi dengan Re rendah tanpa fungsi redaman ekstra. Formulasi SST juga beralih ke perilaku $k-\varepsilon$ pada aliran bebas dengan demikian menghindari masalah umum $K-\omega$ umum yang modelnya terlalu sensitif terhadap sifat turbulensi aliran masuk. model SST $K-\omega$ sering digunakan karena perilaku yang baik dalam *adverse pressure gradient* dan aliran separasi, sehingga membuat model SST $K-\omega$ lebih akurat dan dapat diandalkan untuk analisis aliran eksternal pada airfoil maupun objek dengan profil serupa (Soares, Araújo, & Rezende, 2017). Model SST $K-\omega$ memang menghasilkan tingkat turbulensi yang terlalu besar di daerah dengan ketegangan normal yang besar, seperti wilayah stagnasi dan wilayah dengan akselerasi yang kuat, namun kecenderungan ini jauh lebih jelas daripada dengan model $K-\varepsilon$ normal.

▪ **Wall Treatment**

Aliran turbulen adalah fenomena *omnipresent* dalam CFD (*Computational Fluid Dynamics*) dan secara signifikan dipengaruhi oleh keberadaan dinding, dimana wilayah yang terkena viskositas memiliki gradien besar dalam variabel solusi. Representasi yang akurat dari daerah didekat dinding menentukan prediksi yang bagus dari aliran turbulen pada dinding. Penting dalam pemodelan turbulen untuk menentukan ukuran sel yang tepat di dekat domain dinding. Model turbulensi memiliki batasan nilai y^+ pada dinding. Sebagai contoh, model turbulen $K-\omega$ SST mengharuskan nilai y^+ pada dinding diantara 30 dan 300. Aliran dengan kecepatan tinggi memiliki *boundary layer* yang tipis sehingga akan menghasilkan nilai y^+ yang sangat kecil, oleh karena itu ukuran elemen yang dekat dengan dinding harus dikurangi.



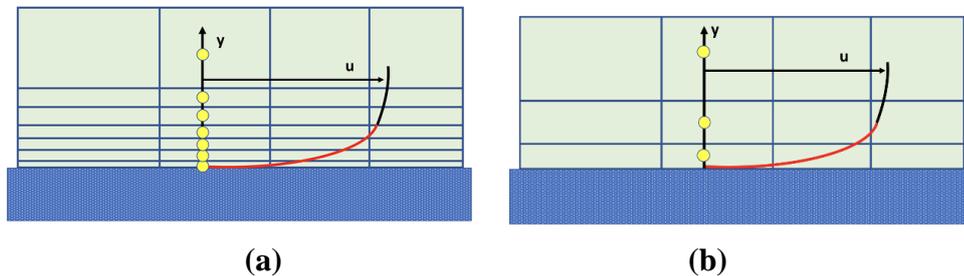
Gambar 2. 16 Standard Wall Functions (Avraham, 2020)

Persamaan *standard wall functions* adalah sebagai berikut.

$$U^+ = y^+ \text{ untuk } y^+ < 5 \dots\dots\dots(249)$$

$$U^+ = \frac{1}{k} \log(Ey^+) \text{ untuk } 30 < y^+ < 300 \dots\dots\dots(2.50)$$

Beberapa model turbulensi hanya valid di bidang turbulensi yang sepenuhnya terbentuk, dan tidak berkinerja baik di area dekat dengan dinding. Untuk menanggulangi hal tersebut, ada dua cara yang biasanya digunakan. Salah satu caranya adalah dengan mengintegrasikan turbulensi ke dinding. Model turbulensi dimodifikasi untuk memungkinkan wilayah yang terkena viskositas diselesaikan dengan semua sel ke dinding, termasuk *viscous sub-layer*. Apabila menggunakan model turbulensi dengan Reynold rendah untuk menyelesaikan daerah didekat dinding, sentroid sel pertama harus ditempatkan di *viscous sub-layer* ($y^+ = 1$) yang menyebabkan persyaratan sel mesh yang berlimpah. Dengan demikian, diperlukan sumber daya komputasi yang sangat besar. Cara lain adalah dengan menggunakan apa yang disebut sebagai *wall functions*, yang dapat memodelkan daerah dekat dinding. *Wall functions* adalah persamaan yang diturunkan secara empiris dan digunakan untuk memenuhi hukum fisika di daerah dekat dinding. sentroid sel pertama perlu ditempatkan di wilayah *log-law* ($30 < y^+ < 300$) untuk memastikan hasil yang akurat (Avraham, 2020).



Gambar 2. 17 Pemodelan Daerah Dekat Dinding Menggunakan (a) *Laminar Sub-layer* dan (b) *Log-law Region* (CFD Online, 2011)

Persamaan y^+ adalah sebagai berikut (CFD Online, 2011).

$$y^+ = \frac{\rho y^* u_\tau}{\mu} \dots\dots\dots(2.51)$$

Dimana:

- y^+ : jarak dinding normal non-dimensional
- u_τ : kecepatan gesekan
- v : kecepatan fluida
- y^* : tinggi dinding

Kecepatan gesekan adalah referensi berdasarkan tegangan geser dinding yang dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \dots\dots\dots(2.52)$$

Dimana:

- τ_w : Tegangan geser pada dinding
- ρ : Massa jenis fluida

Tegangan geser pada dinding dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$\tau_w = C_f \frac{1}{2} \rho U^2 \dots\dots\dots(2.53)$$

Dimana:

- C_f : Koefisien gesek pada dinding
- U : Kecepatan *freestream*

Perkiraan gesekan pada dinding dapat dirumuskan menggunakan *skin friction correlation Schlichting*:

$$C_f = [2 \log_{10}(Re) - 0.65]^{-2.3} \text{ untuk } Re < 10^9 \dots\dots\dots(2.54)$$

Dimana:

- Re : Bilangan *Reynold*

▪ **Grid Independence Study**

Proses *meshing* tidak bisa sepenuhnya diperhitungkan secara analitis, seperti ukuran mesh, ukuran y^+ , jenis *mesh*, dan lain sebagainya. Hal ini terjadi karena sifat dari geometri itu sendiri yang pada umumnya berbentuk kompleks sehingga tidak mungkin untuk menghitung satu persatu tiap komponen untuk *mesh* yang terbaik. Meskipun demikian, salah satu metode yang cukup umum digunakan dalam memverifikasi bahwa *mesh* yang digunakan sudah tepat adalah memastikan bahwa ketika konfigurasi diubah, maka tidak akan mempengaruhi hasil simulasi, atau dengan kata lain hasil simulasi sudah tidak sensitif atau tidak tergantung (*independence*) terhadap konfigurasi *mesh*. Proses pengujian ini dikenal dengan istilah “*mesh sensitivity test*” atau “*grid independence test (GIT)*”. *Grid independence test* bertujuan untuk membuktikan bahwa hasil simulasi yang telah konvergen adalah hasil dari *boundary condition* dan hukum fisika yang telah diterapkan, bukan karena ukuran meshnya.

Grid Independence Test dilakukan sebagai proses penting untuk desain *grid* optimal dari model CFD. Namun, mengingat bahwa proses *Grid Independence Test* tidak distandarasi, setiap peneliti melakukan tes menggunakan metode yang berbeda. Metode sampel acak digunakan untuk memilih *grid* optimal dengan membandingkan hasil CFD untuk kondisi *grid* yang dipilih secara acak untuk berbagai *grid* model target. Ini adalah metode *Grid Independence Test* yang paling banyak digunakan dan membandingkan laju aliran, suhu, dan indikator untuk analisis model simulasi yang berbeda untuk memilih *grid* optimal. Sementara itu, metode sampel acak memiliki batasan tergantung pada pengetahuan dan pengalaman peneliti karena tidak ada kriteria yang berlaku untuk pemilihan kondisi jaringan target uji. Namun, ini memperburuk keandalan hasil tes karena penilaian subyektif peneliti terlibat dalam *Grid Independence Test* karena tidak ada aturan khusus yang spesifik membahas tentang metode ini, hal ini dikarenakan tiap simulasi memiliki tujuan yang berbeda-beda. Oleh karena itu, biasanya dalam *Grid Independence Test* ditentukan variabel bebas dan tetap. Variabel bebas ditentukan berdasarkan parameter yang paling penting dalam simulasi.

2. Processing atau solving

Solving merupakan tahapan untuk menghitung kondisi-kondisi yang telah diterapkan pada saat *pre-processing*. Pada proses *solving*, perhitungan dilakukan dengan cara pendekatan numerik seperti elemen hingga, beda hingga serta volum hingga. Pada proses *solving* akan dilakukan iterasi hingga semua data yang dimasukkan dapat terhitung dan mencapai kondisi konvergen.

3. *Post-processing*

Post-processing merupakan langkah terakhir dalam simulasi CFD yaitu mengorganisasi dan menginterpretasikan data hasil simulasi CFD yang berupa kontur gambar, plot grafik, dan animasi. Visualisasi yang dapat ditampilkan pertama adalah kontur (*contour*) yang merupakan pola dari nilai parameter fisis yang disimulasikan seperti kontur kecepatan, tekanan dan *vorticity*. 15 Kedua adalah vektor (*vector*) yang merupakan arah dari besaran seperti vektor kecepatan. Ketiga adalah bentuk aliran (*streamline*) yang merupakan pergerakan kontinyu fluida yang bergerak sepanjang ruang. Keempat adalah *particle track* yang merupakan lintasan partikel hasil diskritisasi.

Hal yang paling mendasar mengapa konsep CFD banyak sekali digunakan dalam dunia industri adalah karena CFD dapat menganalisa suatu sistem fluida sehingga dapat mengurangi biaya eksperimen dan waktu dalam melakukan eksperimen tersebut. Dalam proses *design engineering* tahap yang harus dilakukan menjadi lebih pendek. Hal lain yang mendasari pemakaian konsep CFD adalah pemahaman lebih dalam akan suatu masalah yang akan diselesaikan atau dalam hal ini pemahaman lebih dalam mengenai karakteristik aliran fluida dengan melihat hasil berupa grafik, vektor, kontur, dan bahkan animasi. Ditinjau dari istilahnya, CFD bisa berarti suatu teknologi komputasi yang memungkinkan kita untuk mempelajari dinamika dari benda-benda atau zat-zat yang mengalir.

2.1.8 **Reynold Number**

Bilangan reynolds merupakan sebuah bilangan yang tidak berdimensi yang mempunyai hubungan dengan ρ (densitas), v (kecepatan), L (panjang MAC atau *mean aerodynamic chord*), μ (viskositas dinamik). Bilangan Reynolds dapat digunakan untuk menentukan jenis aliran, apakah aliran tersebut aliran laminar atau aliran turbulen. Adapun persamaan bilangan Reynolds, yang terdapat pada persamaan berikut.

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} \dots\dots\dots(2.55)$$

Jika nilai dari nilai reynold number yang dihasilkan sebesar 2300, maka aliran tersebut adalah aliran laminar tetapi apabila reynold number nya menghasilkan nilai diatas 4000, maka aliran tersebut adalah aliran turbulen. Sedangkan nilai reynold number berada diantara 2300 dan 4000 maka aliran tersebut dapat dikatakan sebagai aliran transisi.

2.1.9 **Metode Elemen Hingga**

Secara umum, analisis beban struktural dapat dilakukan dengan menggunakan dua metode pada kesetimbangan. Yang pertama adalah metode gaya atau fleksibilitas dengan gaya internal, dan yang kedua adalah metode perpindahan atau kekakuan dengan perpindahan nodal. Pada beberapa struktur, distribusi deformasi tidak dapat ditentukan dengan metode konvensional, sehingga perlu menggunakan metode elemen hingga (MEH).

MEH adalah metode numerik menggunakan daya komputasi untuk memecahkan permasalahan kompleks di sebagian besar rumpun *engineering*. Metode ini mendiskritisasi sebuah objek menjadi elemen kecil yang saling berhubungan yang disebut sebagai *finite element* (elemen hingga) untuk pemodelan struktural, di mana fungsi perpindahan digunakan yang terkait dengan masing-masing elemen ini. Seluruh elemen ini saling berhubungan secara langsung maupun tidak langsung dengan elemen lainnya, contohnya hubungan permukaan dan nodal. Kemudian, persamaan matematika dibangun untuk merepresentasikan benda tersebut (Logan, 2002).

1. Stiffness Matrix

Saat memodelkan suatu elemen, matriks kekakuan diperlukan untuk menghubungkan beban dalam bentuk gaya yang diterapkan dengan perpindahan berupa translasi pada nodal elemen. Hubungan ini diwakili oleh persamaan berikut (Logan, 2002).

$$[F]=[K][d] \dots\dots\dots (2.56)$$

Dimana:

[F] : Matriks kolom gaya dan *moment* pada nodal elemen

[K] : Matriks kekakuan elemen

[d] : Matriks kolom berisi perpindahan translasi pada nodal elemen

Persamaan kesetimbangan gaya (untuk satu dimensi) dapat dirumuskan menjadi persamaan berikut:

$$F_{1x} = k (d_{1x} - d_{2x}) \dots\dots\dots (2.57)$$

$$F_{2x} = k (d_{2x} - d_{1x}) \dots\dots\dots (2.58)$$

Dalam bentuk matriks, kedua persamaan di atas ditulis menjadi:

$$\begin{bmatrix} F_{1x} \\ F_{2x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{1x} \\ d_{2x} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.59)$$

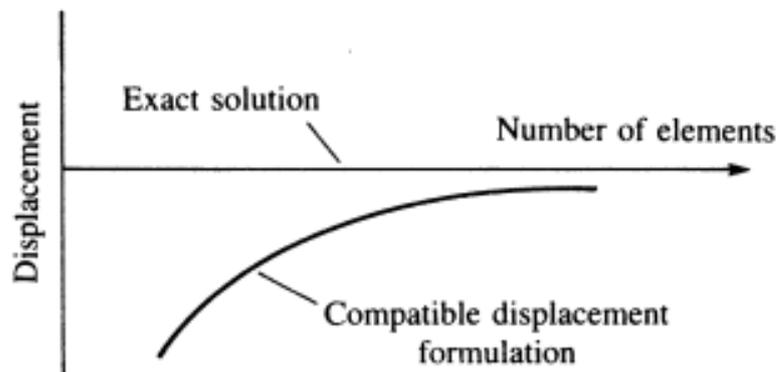
2. Prosedur MEH

Secara umum, permasalahan berbasis MEH dapat diselesaikan menggunakan *software* dengan langkah-langkah sebagai berikut (Logan, 2002).

- a) Pembuatan geometri awal struktur yang akan dianalisa.
- b) Penentuan jenis material yang akan digunakan. Hal ini meliputi massa jenis, modulus elastis, Poisson's ratio, dll dari material tersebut.
- c) Penentuan jumlah elemen yang akan diberikan pada model geometri tersebut.
- d) Pembuatan elemen pada model geometri tersebut (*Mesh generation*).
- e) Pemberian kondisi batas (*Boundary condition*). Hal ini meliputi pemberian jenis tumpuan sesuai dengan kondisi nyata seperti *fixed support*, *clamp*, dll.
- f) Pemberian kondisi pembebanan (*Loading condition*). Hal ini meliputi jenis dan lokasi pembebanan sesuai dengan kondisi nyata seperti beban gaya, tekanan, *moment*, dll.
- g) Analisa hasil. Langkah ini merupakan langkah terakhir dalam proses analisa MEH.
- h) Menginterpretasikan hasil yang di dapat.

3. Uji Konvergensi

Uji konvergensi pada analisis menggunakan metode elemen hingga bertujuan untuk mendapatkan hasil yang akurat pada jumlah elemen tertentu. Pada uji konvergensi ini suatu kasus dimodelkan dengan jumlah elemen yang berbeda-beda. Semakin tinggi jumlah elemen yang digunakan, maka hasil yang didapatkan akan semakin akurat. Jika jumlah elemen yang digunakan terlalu tinggi, waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan analisis juga semakin lama. Maka dari itu uji konvergensi ini selain digunakan untuk mendapatkan hasil yang akurat, juga digunakan untuk memilih jumlah elemen paling sedikit yang hasilnya tetap akurat. Jumlah elemen yang dapat memodelkan suatu kasus dengan akurat berbeda-beda. Pada analisis struktur, jumlah elemen yang sedikit dapat digunakan untuk menganalisis kasus-kasus sederhana dengan akurat. Namun pada kasus analisis struktur dengan geometri dan pembebanan yang kompleks diperlukan jumlah elemen yang banyak untuk mendapatkan pemodelan yang akurat (Logan, 2002).



Gambar 2. 18 Uji Konvergensi Hasil MEH (Logan, 2002)

4. Verifikasi

Verifikasi dapat didefinisikan sebagai langkah untuk membuktikan apakah simulasi melalui program komputer dapat menyelesaikan persamaan atau tidak. Menurut Law dan Kelton (1991), suatu model dapat dikatakan valid ketika model simulasi yang dibuat tidak ada perbedaan yang sangat signifikan dengan sistem nyatanya. Oleh karena itu, verifikasi dapat diartikan sebagai proses penerjemahan model simulasi konseptual kedalam bahasa pemrograman secara benar. Verifikasi simulasi dengan cara sederhana dapat dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan hasil lainnya yang memiliki permasalahan dan sistem MEH yang serupa (Logan, 2002).

5. Validasi

Validasi merupakan proses penentuan apakah model konseptual simulasi benar-benar merupakan representasi akurat dari sistem nyata yang dimodelkan (Logan, 2002). Validasi dilakukan dengan membandingkan dan memeriksa model apakah mewakili eksperimen. Suatu model dapat dikatakan valid ketika tidak memiliki perbedaan yang signifikan dengan sistem nyata yang diamati baik dari karakteristik maupun perilakunya (Logan, 2002).

2.1.10 Safety Factor

Untuk merancang elemen struktur dengan benar, perlu untuk memastikan bahwa jumlah tegangan yang dialami oleh material struktur sudah aman. Untuk menjamin keamanan ini, perlu ditentukan batas stress yang diijinkan, yang harus lebih kecil dari stress yang dihasilkan oleh gaya-gaya yang bekerja pada struktur. Ada banyak alasan untuk ini, salah satunya adalah besarnya beban yang dirasakan oleh berbagai bagian struktur dari hasil desain dapat berbeda dengan beban yang sebenarnya dialami oleh struktur tersebut. Karena perhitungan struktural dapat menjadi tidak akurat karena berbagai faktor yang tidak terduga seperti saat pembuatan komponen, getaran, korosi, guncangan, atau pembebanan mendadak (Hibbeler, 2011).

Salah satu metode untuk merumuskan pembebanan yang diperbolehkan (*allowable stress*), adalah metode *factor of safety* (F.S). Metode F.S adalah sebuah ratio dari *stress* yang dapat menyebabkan material gagal (σ_{fail}) dengan stress yang diperbolehkan (σ_{allow}), dimana nilai dari σ_{fail} ini didapatkan dari hasil eksperimen pengujian material, dan nilai F.S didasarkan pada beberapa pertimbangan, seperti keakuratan prediksi terhadap beban, kekuatan, perkiraan aus, efek lingkungan yang akan terekspos saat beroperasi, konsekuensi ketika mengalami kegagalan dan kerugian yang dapat terjadi ketika komponen gagal. Secara matematis, nilai *factor of safety* ini dituliskan sebagai berikut:

$$F. S. = \frac{\sigma_{fail}}{\sigma_{allow}} \dots\dots\dots (2.60)$$

Untuk material komposit yang merupakan material ortotropik, Tsai dan Wu mengusulkan kriteria kegagalan pada pemodelan kegagalan dalam komposit. Pada kriteria Tsai-Wu, kegagalan terjadi ketika fungsi *stress* kuadratik lebih daripada nol. Tujuan dari perhitungan ini adalah dua kali lipat: untuk menentukan faktor keamanan untuk pemuatan yang diberikan dan untuk menentukan komponen kekuatan lamina yang mengacu pada sistem koordinat apa pun. Faktor keamanan S_f untuk keadaan *stress* dua dimensi tertentu $\sigma_i(\sigma_1, \sigma_2, \tau_6)$ adalah pengali yang diterapkan pada semua komponen *stress* untuk menghasilkan keadaan kritis atau kegagalan sebagaimana didefinisikan oleh kriteria kegagalan yang dipilih, yaitu kriteria Tsai-Wu. Dengan demikian, untuk keadaan stres yang diberikan $(\sigma_1, \sigma_2, \tau_6)$, keadaan stres pada kegagalan adalah $(S_f\sigma_1, S_f\sigma_2, S_f\tau_6)$. Substitusi tegangan kritis dalam kriteria Tsai-Wu dalam persamaan (2.41) mendapatkan (Daniel & Ishai, 2006).

$$F_1 S_f \sigma_1 + F_2 S_f \sigma_2 + F_6 S_f^2 \tau_{12} + F_{11} S_f^2 \sigma_1^2 + F_{22} S_f^2 \sigma_2^2 + F_{66} S_f^2 \tau_{12}^2 + 2F_{12} S_f^2 \sigma_1 \sigma_2 = 1 \dots (2.61)$$

Atau

$$a S_f^2 \tau_{12} + b S_f - 1 = 0 \dots (2.62)$$

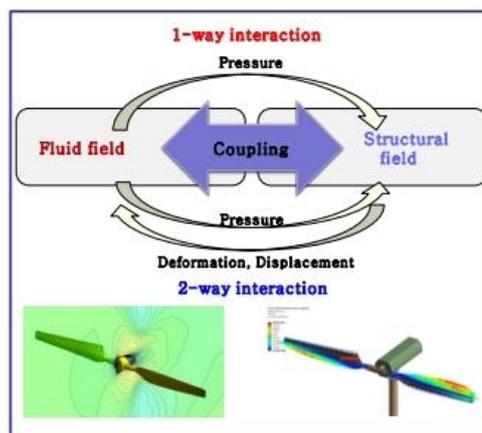
Dimana

$$a = F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{66} \tau_{12}^2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 \dots (2.63)$$

$$b = F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 \dots (2.64)$$

2.1.11 Fluid Structure Interaction

FSI digunakan dalam berbagai masalah multi-fisik dimana efek fluida mendominasi tetapi sulit untuk dievaluasi untuk bagian struktural, terutama pada bentuk 3D dengan tingkat kelengkungan yang tinggi. Salah satu contohnya adalah bilah turbin angin, sehingga ini adalah masalah yang menantang untuk diterapkan di simulasi FSI karena kesulitan dalam mengevaluasi kekuatan aerodinamis permukaan. Syarat mendasar untuk FSI adalah verifikasi nilai pemuatan tekanan dari CFD dan definisi antarmuka antara fluida dan domain struktural.



Gambar 2. 19 Konsep *Fluid Structure Interaction* (Ageze, Hu, & Wu, 2017)

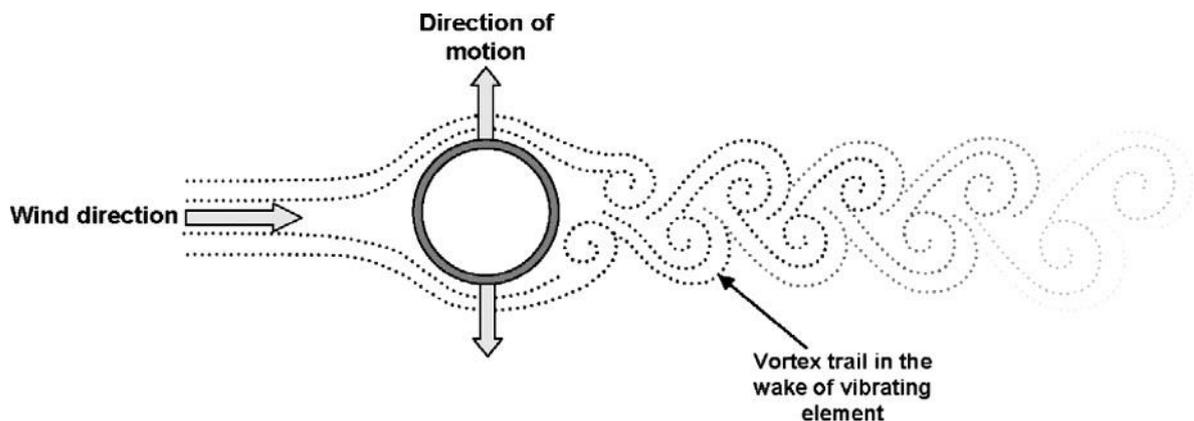
Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.19, *interface* mentransfer data dari fluida ke struktur atau struktur ke fluida. Interaksi ini disebut sebagai *1-way*. Apabila *interface* mentransfer data ke kedua sisi secara berturut-turut, maka disebut sebagai *2-way*. Domain fluida mentransfer tekanan dan temperature kepada struktur, dan struktur mentransfer deformasi kepada domain fluida. Dari interaksi ini, domain fluida memperbarui domain *mesh* dari deformasi struktural. Bagian struktural terdeformasi akibat beban tekanan atau suhu dari domain fluida. Tidak seperti metode BEM, bagian struktural dapat dimodelkan menggunakan

prosedur FEM. Respon dari struktur bergantung pada kualitas *solid modelling* dan material. Permukaan dari bagian struktural harus berbagi topologi yang identik dengan domain CFD.

Bilah angin yang berputar bergetar dengan frekuensinya untuk arah bentuk mode eigen pertama yang independent terhadap arah aliran angin tetapi bergantung pada sumbu lokal. frekuensi getar bilah angin tergantung pada kekakuan dan massa bilah. Jika *tower* dianggap, maka getaran dari menara akan digabungkan dengan bilah. Maka dari itu, bilah turbin angin 3 dimensi akan mengalami fluktuasi transien dan *vortex shedding*. CFD adalah salah satu opsi untuk menangkap efek *unsteady* ini, meskipun memiliki kesulitan numerik dan beberapa keterbatasan. Untuk mempertimbangkan efek *time-dependent unsteady* dari fluktuasi dan getaran dalam metode numerik, domain fluida harus diubah bersama dengan getaran struktural di simulasi *transient*. Oleh karena itu, untuk mensimulasikan masalah ini, *interface* harus memperhitungkan interaksi kedua belah pihak menggunakan 2-way FSI. 1-way FSI digunakan untuk masalah *steady static* dan 2-way masalah *unsteady transient* (Ageze, Hu, & Wu, 2017).

2.1.12 Vortex Shedding

Vortex Shedding adalah aliran berosilasi yang terjadi ketika cairan seperti udara atau air mengalir melewati *bluff* atau pengganggu (berlawanan dengan *streamline*) dengan kecepatan tertentu, tergantung pada ukuran dan bentuk objek. Dalam aliran ini, vortex terbentuk di bagian belakang *bluff* dan menjauh secara berkala dari kedua sisi objek dan membentuk *Von Kármán Vortex Street*. Aliran fluida yang melewati *bluff* menciptakan vortisitas tekanan rendah bergantian di belakang objek. Objek akan cenderung bergerak ke arah zona tekanan rendah. (Jika sebuah struktur memiliki kekakuan yang kurang dan vortex shedding cocok dengan frekuensi resonansi struktur, maka struktur akan beresonansi, bergetar dengan osilasi harmonik yang didorong oleh energi aliran, dan akan terjadi fluktuasi beban.



Gambar 2. 20 *Von Kármán Vortex Street*

Frekuensi di mana *vortex shedding* terjadi dapat diprediksi dengan *Strouhal Number*:

$$St = f \frac{B}{U} \dots \dots \dots (2.65)$$

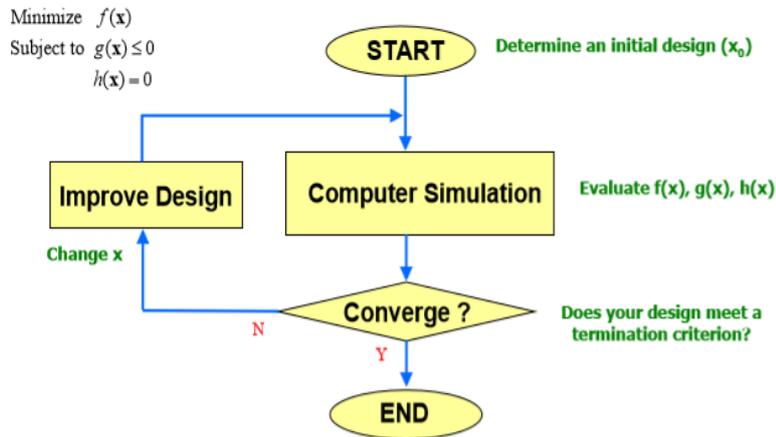
Dimana:

- St : *Strouhal Number*
- B : Panjang karakteristik *bluff body*
- U : Kecepatan fluida
- F : Frekuensi *vortex shedding*

2.1.13 Optimasi Desain

Optimasi desain merupakan proses pencarian atau pemilihan desain yang menjadi kriteria “desain terbaik” dan memenuhi batasan-batasan (*constraint*) permintaan desain. Kriteria “desain terbaik” dikenal dengan menentukan *objective function*, dan batasan

permintaan *design* atau *design requirements* disebut dengan istilah *constraint*. Contoh *objective function* di dalam optimasi desain yang sering digunakan adalah seperti meminimalkan biaya produksi atau memaksimalkan efisiensi produksi. Secara matematis, proses optimasi desain ditunjukkan pada Gambar 2.21.

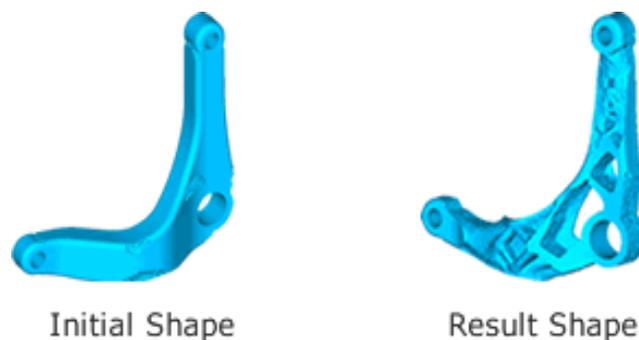


Gambar 2. 21 Diagram Alir Proses Optimasi Desain (Weck, 2004)

Dewasa kini, semakin berkembang *software* komputer yang dapat membantu dalam komputasi optimasi desain tersebut. Dalam mendapatkan “desain terbaik” maka suatu desain harus melalui prosedur seperti Gambar 2.21. Optimasi desain ini banyak diterapkan untuk mengoptimasi desain suatu struktur fisis atau biasa dikenal dengan sebutan optimasi struktur atau *structural optimization*. Ada tiga jenis metode *structural optimization* yang sering digunakan, yaitu *size optimization*, *shape optimization* dan *topology optimization*. Perbedaan dari ketiga metode optimasi ini didasarkan pada variabel yang digunakan saat melakukan optimasi (Weck, 2004).

1. *Topology Optimization*

Topology optimization atau optimasi topologi merupakan salah satu jenis optimasi struktur yang bertujuan untuk menentukan desain yang optimal berdasarkan distribusi tegangan pada suatu material di dalam ruang desain tertentu. Variabel desain yang sering digunakan pada optimasi topologi adalah massa dan volume, seperti pada gambar 2.22 (Weck, 2004).

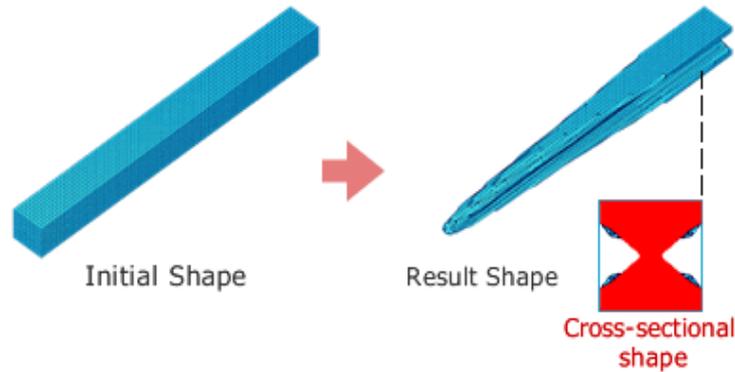


Gambar 2. 22 Contoh *Topology Optimization* (Weck, 2004)

2. *Shape Optimization*

Shape optimization atau optimasi bentuk merupakan salah satu jenis optimasi struktur yang berdasarkan pada variabel geometri melalui koordinat nodal elemen. Sehingga desain

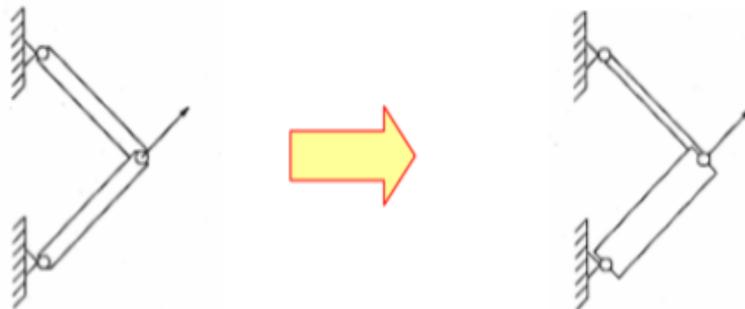
hasil yang didapati itu terdapat lengkungan baru yang memiliki volume lebih kecil dari volume desain awal, seperti pada gambar 2.23 (Weck, 2004).



Gambar 2. 23 Contoh *Shape Optimization* (Weck, 2004)

3. *Size Optimization*

Size optimization atau optimasi ukuran merupakan salah satu jenis optimasi struktur yang berdasarkan pada variabel dimensi terhadap sumbu utama. Sehingga optimasi hanya pada ukuran panjang, lebar dan juga tebal, seperti pada gambar 2.24 (Weck, 2004).



Gambar 2. 24 Contoh *Size Optimization* (Weck, 2004)

Seseorang dapat mempertimbangkan aspek evolusi biologis dan teori seleksi alam sebagai dasar dari mendefinisikan algoritma genetika, dengan aplikasi untuk optimasi pencarian dalam komputasi dan kecerdasan buatan pencarian data yang besar dan tidak terorganisir paling efektif dengan menggunakan *genetic algorithm* atau algoritma genetik. Masalah kompleks umum yang dibatasi dan tidak dibatasi dapat secara efektif diselesaikan dengan algoritma genetik. Algoritma genetik sebagian besar digunakan untuk pembelajaran mesin dan tujuan optimisasi dan sebagainya.

Genetic Algorithm (GA) adalah algoritma berbasis pencarian umum yang ditetapkan pada konsep seleksi alam dan keturunan. GA adalah bagian dari kelompok komputasi yang jauh lebih besar yang disebut sebagai komputasi evolusioner. Dalam algoritma genetik, untuk masalah yang diberikan, solusi yang diperoleh kemudian melalui rekombinasi serta proses mutasi (mirip dengan genetik biologis), menyebabkan menghasilkan keturunan baru dan prosesnya mendapatkan ulangan untuk beberapa generasi. Masing-masing gen diberi kelebihan unik yang diputuskan oleh nilai fungsi objektifnya dan individu yang lebih bagus memiliki kemungkinan lebih besar kawin untuk menghasilkan individu yang lebih baik. Proses ini memastikan untuk menciptakan individu yang lebih baik atau solusi yang lebih baik dalam generasi yang berhasil, yang berlanjut hingga mencapai kriteria tujuan akhir. Algoritma genetik sebagian besar adalah kriteria berbasis probabilitas di alam, sebaliknya mereka bekerja dengan baik terhadap pencarian acak lokal (yang menggunakan solusi acak, namun tidak dapat

untuk mengidentifikasi solusi terbaik), karena data historis juga terlibat ke dalamnya membuatnya kompleks dan canggih secara alami.

a) Selection (Pengkodean Kromosom)

Kromosom akan berada dalam format yang menyimpan informasi yang terkait dengan solusi yang dipersonifikasikannya. Cara pengkodean yang banyak digunakan adalah format *string* biner. Setelah itu kromosom akan terlihat seperti berikut.

Chromosome 1	1101100100110110
Chromosome 2	1101111000011110

Setiap kromosom dapat diplot dengan *string* biner. Masing-masing bit yang diakomodasi dalam *string* juga bertanggung jawab mengandung beberapa aspek atau standar solusi.

b) Crossover

Setelah terkonfirmasi pada pengkodean yang terpilih untuk digunakan, maka dapat dilanjut ke operasi *crossover*. Fungsi *crossover* pada bagian-bagian gen dari kromosom induk yang menghasilkan penciptaan keturunan baru. Proses paling sederhana untuk dieksekusi ini adalah pemilihan titik *crossover* secara acak, mengambil kisaran dari titik induk pertama hingga titik ini. Ilustrasi *crossover* adalah sebagai berikut.

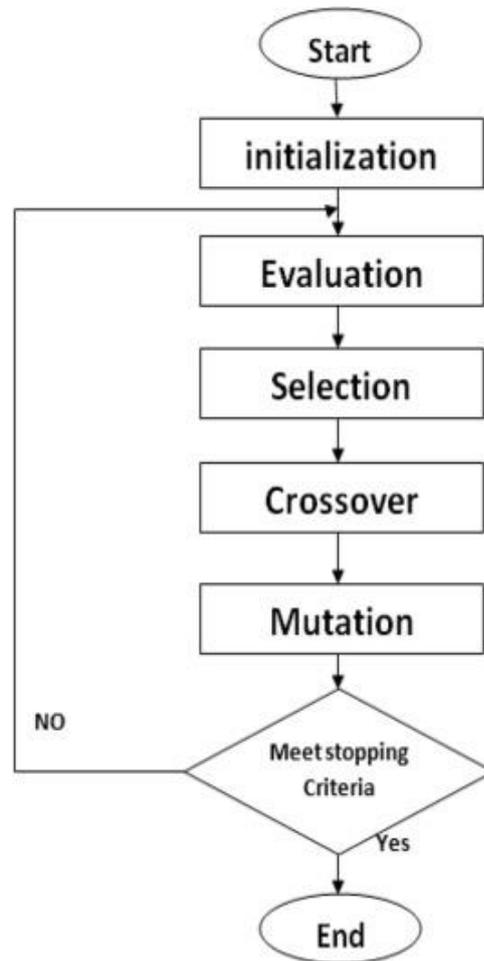
Chromosome 1	11011 00100110110
Chromosome 2	11011 11000011110
Offspring 1	11011 11000011110
Offspring 2	11011 00100110110

Ada banyak cara berbeda untuk membuat *crossover*, seperti kita dapat memilih banyak titik *crossover* lainnya. *Crossover* bisa lebih kompleks dan rumit bergantung pada pengkodean kromosom.

c) Mutation

Setelah *crossover* dilakukan, langkah selanjutnya adalah mutasi. Mutasi disengaja untuk mencegah hasil solusi atau populasi jatuh ke dalam optimum lokal. Hasil keturunan dari *crossover* berubah secara acak dengan operasi mutasi. Dalam pengkodean biner, kita dapat mengganti beberapa bit yang dipilih secara acak dari 0 ke 1 atau 1 ke 0. Contoh operasi mutasi adalah seperti yang diberikan di bawah ini (Lambora, Gupta, & Chopra, 2019).

Original Offspring 1	1101111000011110
Mutated Offspring 1	1100111000011110
Original Offspring 2	1101100100110110
Mutated Offspring 2	1101101100110110



Gambar 2. 25 Flowchart Proses Algoritma Genetik

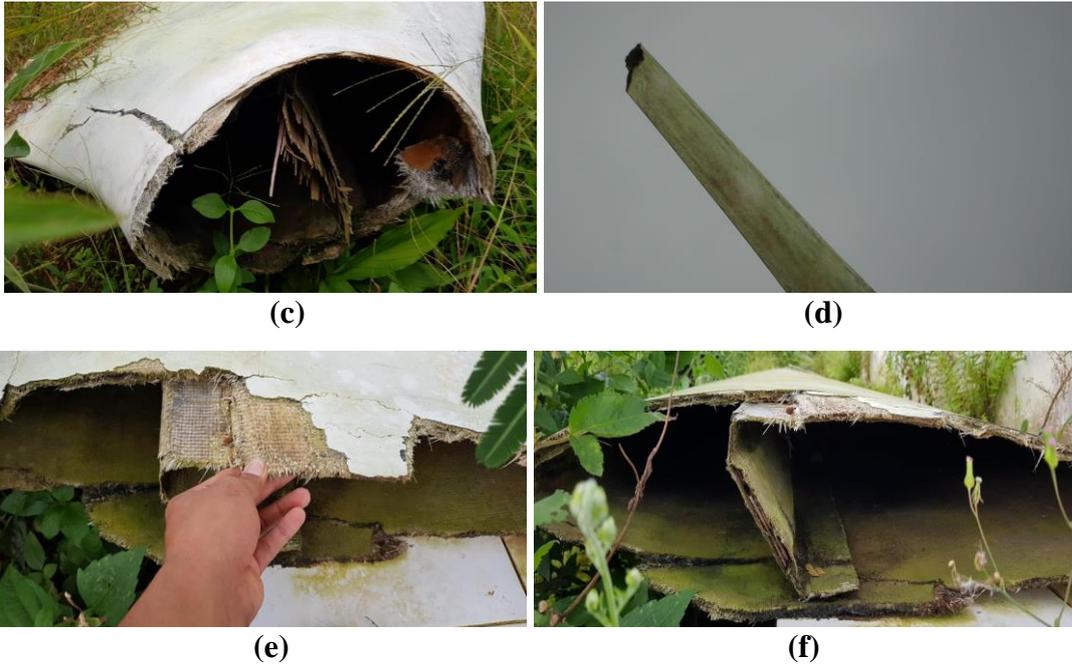
2.2 Studi Lapangan

Pada tahun 2016, turbin angin 100 KW ini patah dengan penyebab yang belum diketahui. Kegagalan terjadi pada bilah pertama pada daerah transisi dan bilah ketiga pada bagian *tip*. Berdasarkan studi lapangan, diketahui bahwa material penyusun utama dari struktur *shell* bilah turbin angin merupakan komposit *E-Glass/Epoxy* yang berbentuk rajutan (*plain woven*) dengan tebal kurang lebih 2 cm dan konstruksi *shear web* berupa *sandwich* dengan kayu balsa sebagai inti dan *E-Glass/Epoxy* sebagai penguat yang masing-masing berketebalan 1 cm. Orientasi serat pada *shell* maupun *shear web* diketahui sejajar dengan *spanwise*.



(a)

(b)



Gambar 2. 26 Dokumentasi Patahan Bilah Turbin Angin P3TKEBTKE

Gambar 2.26 merupakan dokumentasi dari studi lapangan yang telah dilakukan oleh PT. Lentera Bumi Nusantara dengan rincian sebagai berikut.

- (a) Tampak keseluruhan Turbin Angin P3TKEBTKE
- (b) Tampak patahan bilah pertama pada transisi bilah yang masih terpasang
- (c) Tampak patahan bilah pertama pada bilah yang jatuh
- (d) Tampak patahan bilah ketiga pada bilah yang masih terpasang
- (e) Tampak patahan bilah ketiga pada bilah yang jatuh
- (f) Tampak *shear web* dari bilah turbin angin P3TKEBTKE

Distribusi komposit dari bilah turbin angin diketahui memiliki ketebalan yang *uniform* baik pada *shell* maupun *shear web*. Struktur dari *shear web* adalah *sandwich* sebagai penopang dari *shell*. Adapun *stacking sequence* dari bilah turbin angin adalah sebagai berikut.

	Layer	RVE	Sudut
20	20	Plain Woven	0
19	19	Plain Woven	0
18	18	Plain Woven	0
17	17	Plain Woven	0
16	16	Plain Woven	0
15	15	Plain Woven	0
14	14	Plain Woven	0
13	13	Plain Woven	0
12	12	Plain Woven	0
11	11	Plain Woven	0
10	10	Plain Woven	0
9	9	Plain Woven	0
8	8	Plain Woven	0
7	7	Plain Woven	0
6	6	Plain Woven	0
5	5	Plain Woven	0
4	4	Plain Woven	0
3	3	Plain Woven	0
2	2	Plain Woven	0
1	1	Plain Woven	0
0	1	Plain Woven	0

Gambar 2. 27 *Stacking Sequence Shell* Bilah Turbin Angin

Layer	RVE	Sudut	
15	10	Plain Woven	0
14	9	Plain Woven	0
13	8	Plain Woven	0
12	7	Plain Woven	0
11	6	Plain Woven	0
10	5	Plain Woven	0
9	4	Plain Woven	0
8	3	Plain Woven	0
7	2	Plain Woven	0
6	1	Plain Woven	0
5			
4			
3			
2			
1			
0	1	Balsa Wood	-
1			
2			
3			
4			
5			
6	1	Plain Woven	0
7	2	Plain Woven	0
8	3	Plain Woven	0
9	4	Plain Woven	0
10	5	Plain Woven	0
11	6	Plain Woven	0
12	7	Plain Woven	0
13	8	Plain Woven	0
14	9	Plain Woven	0
15	10	Plain Woven	0

Gambar 2. 28 Stacking Sequence Shear Web Bilah Turbin Angin

2.3 Penelitian Terdahulu

Terdapat publikasi perancangan dari bilah turbin angin 100 KW P3TKEBTKE dan beberapa penelitian yang secara khusus meneliti struktur dan kegagalan bilah turbin angin baik secara simulasi maupun eksperimental dan *vortex shedding* yang akan dijadikan sebagai tinjauan pustaka dari penelitian ini, antara lain sebagai berikut.

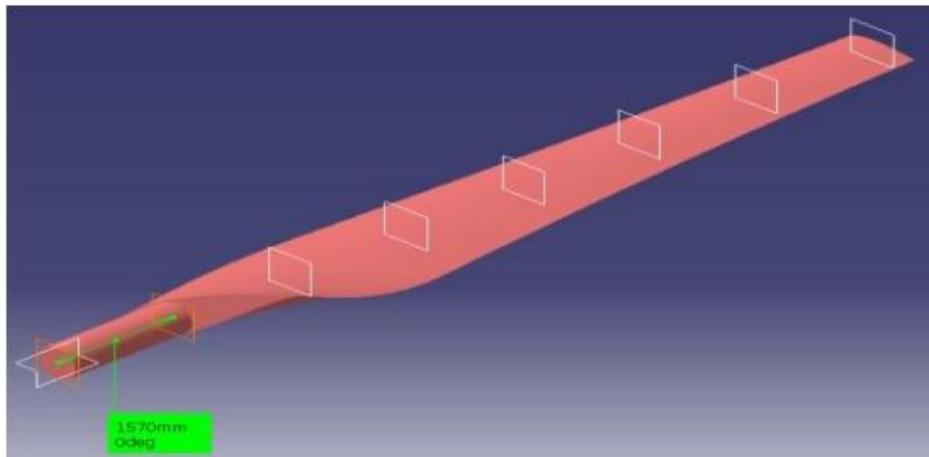
1. **Perancangan Bilah Turbin Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLT-Angin) Kapasitas 100 KW Menggunakan Studi Aerodinamika** (Firmansyah & Zulkarnain, 2012)

Pada penelitian ini digunakan jurnal *Perancangan Bilah Turbin Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLT-Angin) Kapasitas 100 KW Menggunakan Studi Aerodinamika* yang telah dipublikasi oleh Puslitbangtek Ketenagalistrikan Energi Baru, Terbarukan, dan Konversi Energi (P3TKEBTKE) sebagai dasar desain dari penelitian ini. Data potensi angin yang digunakan berasal dari laporan pengukuran angin P3TKEBT di lokasi Desa Tamanjaya-Sukabumi dari tanggal 29 Januari-14 Desember 2008, dan telah ditentukan spesifikasi turbin angin sebagai berikut.

Tabel 2. 6 Spesifikasi Turbin Angin P3TKEBTKE

Rated Capacity	100 KW
Cut-in wind speed	2.5 m/s
Cut-off wind speed	21 m/s
Rated wind speed	12 m/s
Maximum rotor speed	80 rpm
Tip speed ratio (TSR)	6.5
Jumlah Rotor	3

Desain bilah turbin angin kapasitas daya 100 KW dilakukan dengan simulasi dan analisis aerodinamik dan struktur dengan menggunakan perangkat lunak *Engineering Fluid Dynamic* (EFD). Profil *airfoil* bilah turbin PLT-Angin 100 KW digunakan adalah profil NACA 632415. Profil *airfoil* ini digunakan karena efektif dipergunakan pada turbin angin dengan radius bilah lebih besar dari 10 meter. Geometri bilah turbin dirancang terdiri dari beberapa *airfoil* yang membentuknya dikarenakan bilah turbin mengalami kecepatan angin relatif yang berbeda pada tiap bagian bilah turbin angin. Oleh karena itu, diperlukan beberapa kerangka *airfoil* yang disebut sebagai *blade element* untuk membentuk geometri bilah turbin.



(a)

Pena mpa ng	r	λ_r	Φ	c	β
1	1,55	0,65	37,98	2,99	32,28
2	3,13	1,31	24,90	2,65	19,2
3	4,70	1,97	17,94	2,08	12,24
4	6,28	2,63	13,88	1,67	8,18
5	7,85	3,29	11,27	1,38	5,57
6	9,43	3,95	9,47	1,17	3,77
7	10,75	4,61	8,16	1,01	2,46

(b)

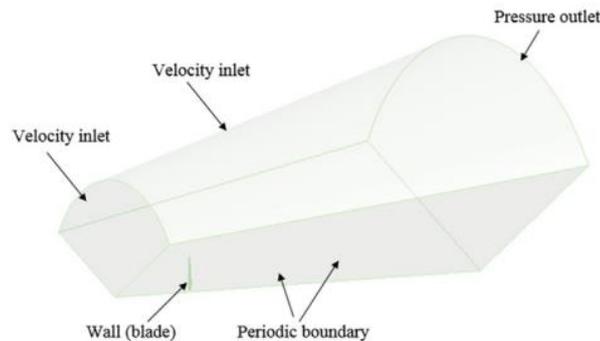
Gambar 2. 29 (a) *Blade element* dari bilah turbin angin dan (b) Parameter *blade element* (Firmansyah & Zulkarnain, 2012)

Hasil yang didapatkan dari perancangan adalah dimensi bilah turbin PLT-Angin yang memiliki unjuk kerja optimal secara aerodinamika dengan efisiensi bilah turbin sebesar 30,6% pada *rated wind speed* yaitu pada kecepatan angin 12 m/s dengan putaran bilah turbin 75 rpm. Bilah turbin rancangan telah dibuat cetak birunya (*blue print design*) dan telah selesai diproduksi serta terpasang pada PLT-Angin Desa Tamanjaya-Sukabumi.

2. *Fluid Structure Interaction Modelling of Horizontal-axis Wind Turbine Blades Based on CFD and FEA* (Wang, Quant, & Kolios, 2016)

Pada tahun 2016 telah dilakukan penelitian oleh Lin Wang et. al. dengan judul *Fluid Structure Interaction Modelling of Horizontal-axis Wind Turbine Blades Based on CFD and FEA* yang skema simulasinya akan digunakan pada penelitian ini. Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk menganalisa respon struktural dari bilah turbin angin WindPACT 1.5 MW dengan metode *Fluid Structure Interaction*. Dalam penelitian ini, model FSI untuk bilah turbin angin

pada skala penuh dibuat dengan beban aerodinamis dengan 5 skenario kecepatan angin didapat menggunakan model CFD menggunakan modul ANSYS *FLUENT*, dan respons struktural bilah ditentukan dengan menggunakan FEA (*Finite Element Analysis*) yang diimplementasikan dalam modul ANSYS *Static Structural*. Interface CFD dan FEA didasarkan pada *one-way coupling*, di mana beban aerodinamis yang dihitung dari pemodelan CFD dimasukkan ke pemodelan FEA sebagai *boundary condition*. Karena model turbin angin simetris terhadap pusat putarannya, ketiga bilah dapat dimodelkan menggunakan hanya 1 bilah saja dalam segmen domain *stream tube* radial 120° dengan *periodic boundary* untuk mengurangi waktu simulasi. Domain dan *boundary condition* untuk model digambarkan pada Gambar 2.30.

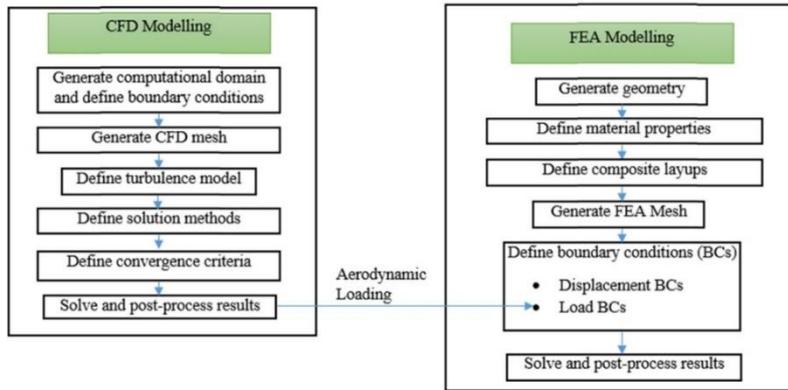


Gambar 2. 30 Domain dan *Boundary Conditions* untuk Model (Wang, Quant, & Kolios, 2016)

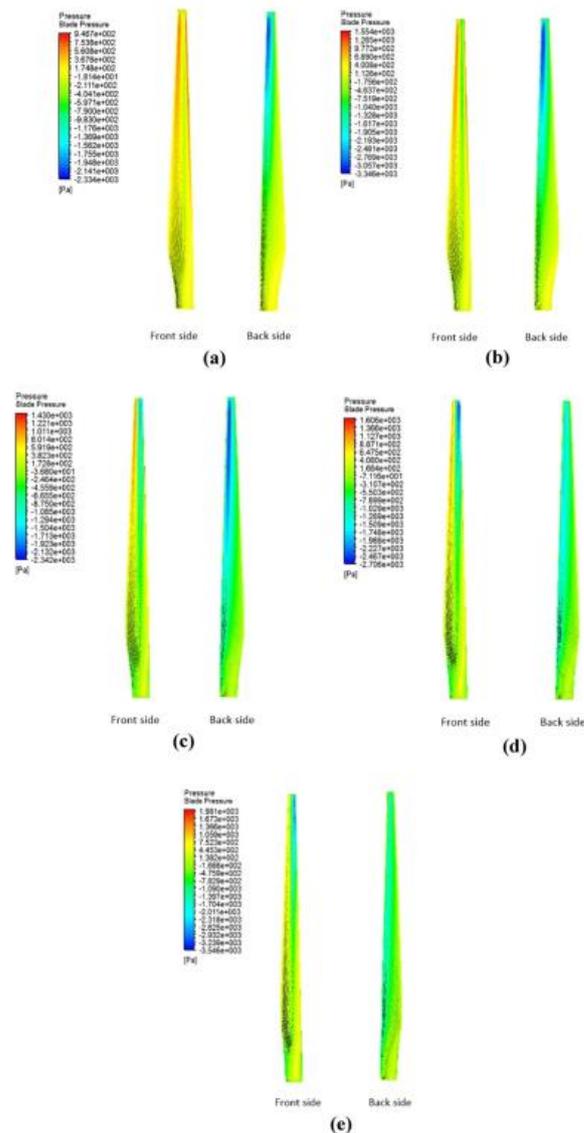
Velocity inlet memiliki radius 120 m, berjarak 90 m dari bilah dan di set ke *freestream velocity*. Lalu *pressure outlet* di set ke *atmospheric pressure* dengan radius 240 m, berjarak 350 m dari belakang bilah turbin angin. Permukaan luar dari domain juga di set *velocity inlet* dengan kecepatan yang sama dengan primary inlet. Bilah dianggap sebagai dinding diam *non-slip*, dan *rotating frame* diterapkan ke semua domain untuk memperhitungkan kecepatan putar dari rotor. Hal ini menghindari kebutuhan untuk menggunakan *rotating mesh* dan memungkinkan masalah *unsteady* dimodelkan menggunakan simulasi *steady-state*, dan secara signifikan mengurangi waktu komputasi.

Model FEA dari bilah turbin angin dibuat menggunakan modul ANSYS *Static Structural*, yang merupakan perangkat lunak pemodelan FEA yang sering digunakan. Model FEA kemudian diterapkan pada pemodelan FEA bilah turbin angin WindPACT 1.5MW. Geometri bilah turbin angin 1,5 MW WindPACT dibuat berdasarkan informasi bentuk aerodinamis (yaitu *chord*, *twist angle*, dan bentuk airfoil penampang) yang diberikan dalam Malcolm dan Hansen (2002), Griffin (2001), Malcolm dan Hansen (2003), Resor dan Bushnell (2011). Bilah turbin angin WindPACT 1.5 MW terbuat dari 5 macam material, yaitu *gel coat*, *random mat*, *CDB340 triaxial fabric*, kayu balsa, dan spar cap komposit (70% *unidirectional* dan 30% *triaxial fabric*).

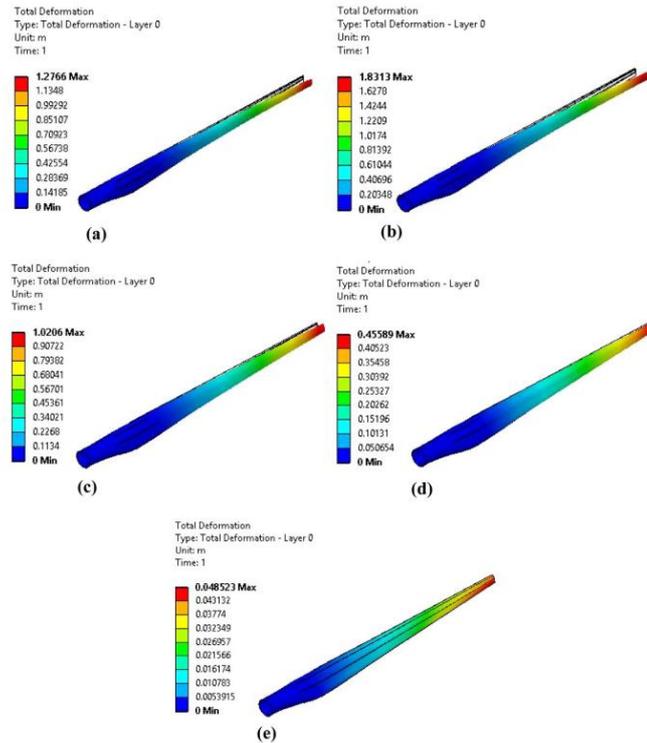
Selain beban aerodinamik, terdapat dua beban penting yang telah diterapkan pada bilah, yaitu beban gravitasi dan beban sentrifugal, dimana disebabkan oleh putaran dari bilah. Beban-beban tersebut dianggap statis. Lalu *fixed support* diterapkan pada pangkal bilah. Metode coupling dari pemodelan FSI didasarkan pada *one-way coupling*. Domain fluida diselesaikan menggunakan CFD sampai kriteria konvergensi tercapai. Tekanan aerodinamis pada blade yang diperoleh dari pemodelan CFD kemudian dipetakan ke model FEA sebagai *boundary condition* beban. Setelah itu, model FEA digunakan untuk menghitung respons struktural bilah (seperti deformasi dan distribusi tegangan) ketika mengalami beban aerodinamis, gravitasi dan sentrifugal. Skema *one-way* FSI pemodelan disajikan pada gambar 2.31.



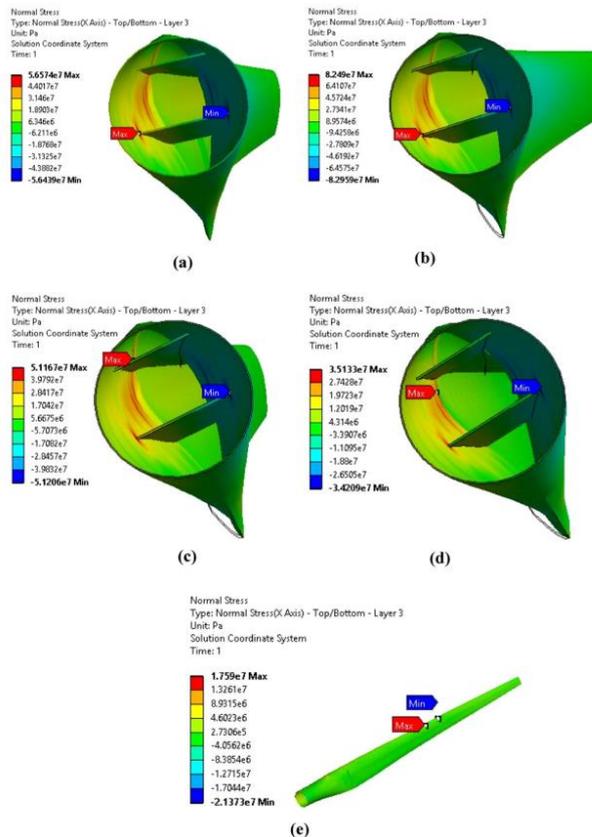
Gambar 2. 31 Skematik pemodelan *one-way* FSI (Wang, Quant, & Kolios, 2016)



Gambar 2. 32 Distribusi tekanan pada bilah pada kecepatan angin (a) 8 m/s, (b) 12 m/s, (c) 16 m/s, (d) 20 m/s, (e) 24 m/s (Wang, Quant, & Kolios, 2016)



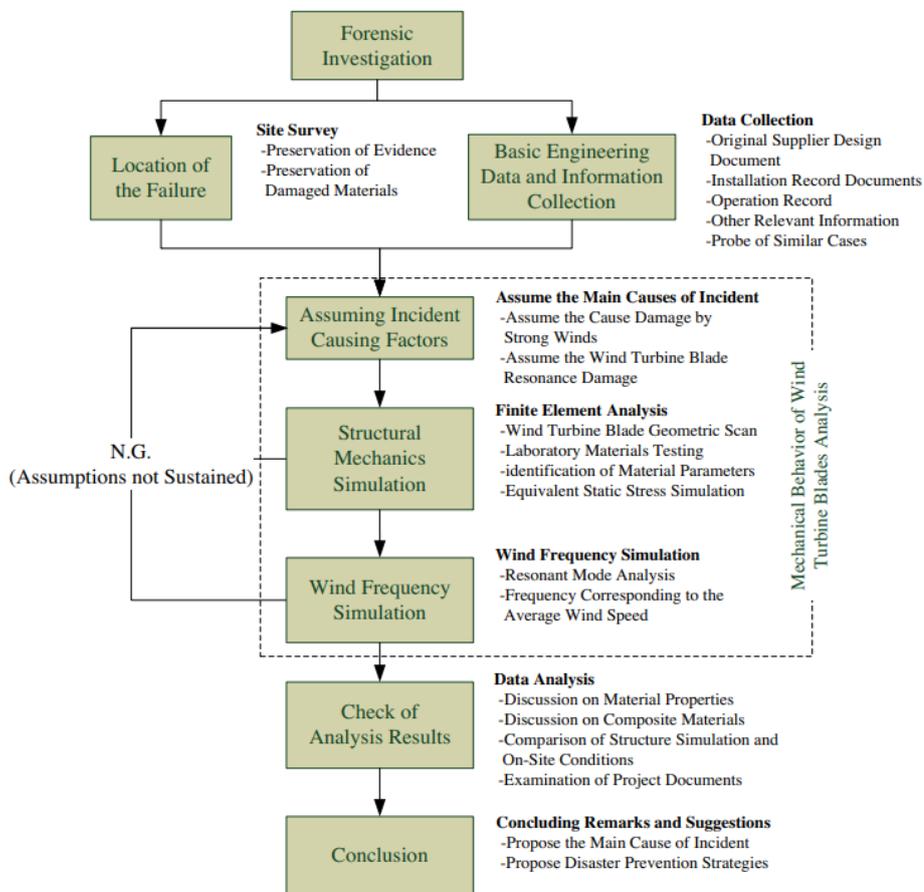
Gambar 2. 33 Defleksi bilah pada kecepatan angin (a) 8 m/s, (b) 12 m/s, (c) 16 m/s, (d) 20 m/s, (e) 24 m/s (Wang, Quant, & Kolios, 2016)



Gambar 2. 34 Distribusi tegangan normal bilah pada kecepatan angin (a) 8 m/s, (b) 12 m/s, (c) 16 m/s, (d) 20 m/s, (e) 24 m/s (Wang, Quant, & Kolios, 2016)

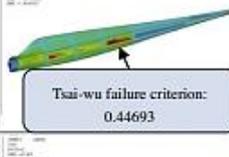
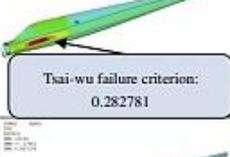
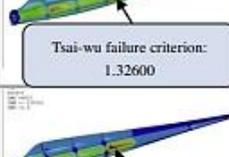
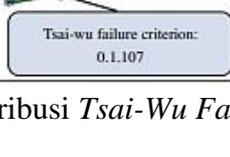
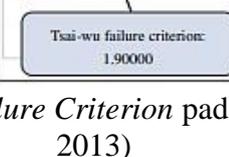
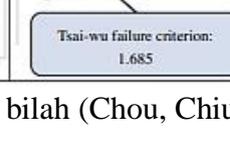
3. **Failure Analysis of Wind Turbine Blade Under Critical Wind Loads** (Chou, Chiu, Huang, & Chi, 2013)

Penelitian serupa yang pernah dilakukan sebelumnya juga dijadikan sebagai referensi bagi pelaksanaan penelitian ini, yaitu penelitian berjudul *Failure Analysis of Wind Turbine Blade Under Critical Wind Loads* tahun 2013 oleh Jui-Sheng Chou et al. untuk memahami mekanisme yang memicu delaminasi pada bilah dan pada angin kencang, penelitian ini melakukan inspeksi di tempat, eksperimen lab material, studi literatur, dan simulasi FEA. Pada September 2008, angin topan Jangmi menyebabkan kerusakan signifikan di Site PLT-Angin Taiwan yang terletak di Taman Industri Pesisir Changhua di Taichung, dengan kecepatan angin maksimum melebihi 53,4 m/s. Berdasarkan analisis data yang dikumpulkan dan tinjauan kasus historis, tiga penyebab utama insiden kerusakan diidentifikasi: (1) kekuatan material bilah yang kurang kuat, (2) frekuensi angin dan efek resonansi, dan (3) kesalahan pada tahap pemasangan. Berdasarkan hasil penelitian ini, sebuah model dibuat untuk memahami mekanika struktur dari bilah turbin angin. Setelah menganalisis secara komprehensif penyebab potensial kegagalannya, penulis mengidentifikasi mekanisme delaminasi permukaan komposit, penyebab utama dari kegagalan, dan strategi untuk mencegah kerusakan serupa di masa depan. Distribusi tegangan pada bilah menggunakan data yang didapat dari *sample test* dan parameter material yang di rekomendasikan dua jurnal referensi sebagai pembandingan. Tsai-Wu *failure criteria* digunakan untuk menilai tipe kegagalan dan keparahannya.



Gambar 2. 35 Flowchart Proses Investigasi Kegagalan Bilah Turbin Angin (Chou, Chiu, Huang, & Chi, 2013)

Variasi dan parameter ini menggunakan data yang diperoleh dalam uji sampel bilah WT dan parameter material yang direkomendasikan dalam [26,29], distribusi tegangan bilah dimodelkan dalam enam kondisi kecepatan angin rata-rata: 50 m/s, 53,4 m/s (rata-rata kecepatan angin maksimum yang tercatat selama Topan Jangmi), 60 m/s, 70 m/s, 80 m/s, dan 90 m/s. Berdasarkan hasil, didapat besar kecepatan angin dan kontur kriteria kegagalan Tsai-Wu yang menyebabkan kegagalan pada bilah turbin angin pada variasi kecepatan angin dan parameter desain. Kriteria kegagalan Tsai-Wu yang lebih dari satu menunjukkan kegagalan material komposit. Hasil analisis menunjukkan bahwa bilah dapat menahan gaya yang disebabkan oleh kecepatan angin 80 m/s, yang melebihi kecepatan angin maksimum 53,4 m/s yang direkam selama Topan Jangmi. Oleh karena itu, tanpa adanya kekuatan eksternal lainnya, tidak ada kegagalan yang akan terjadi pada bilah selama badai topan. Pada FEA ini menunjukkan bahwa resistensi angin bervariasi relatif sedikit antara model bilah. Kedua faktor penentu adalah properti material dan ketebalan bahan komposit.

Wind speed (m/sec)	Model constructed according to the parameters recommended in [26]	Model constructed according to the parameters recommended in [29]	Model constructed according to this study's parameters
50	 Tsai-wu failure criterion: 0.165537	 Tsai-wu failure criterion: 0.36089	 Tsai-wu failure criterion: 0.323
53.4	 Tsai-wu failure criterion: 0.206808	 Tsai-wu failure criterion: 0.44693	 Tsai-wu failure criterion: 0.399
60	 Tsai-wu failure criterion: 0.282781	 Tsai-wu failure criterion: 0.58345	 Tsai-wu failure criterion: 0.521
70	 Tsai-wu failure criterion: 0.467039	 Tsai-wu failure criterion: 0.89672	 Tsai-wu failure criterion: 0.798
80	 Tsai-wu failure criterion: 0.734088	 Tsai-wu failure criterion: 1.32600	 Tsai-wu failure criterion: 1.178
90	 Tsai-wu failure criterion: 0.1.107	 Tsai-wu failure criterion: 1.90000	 Tsai-wu failure criterion: 1.685

Gambar 2. 36 Distribusi *Tsai-Wu Failure Criterion* pada bilah (Chou, Chiu, Huang, & Chi, 2013)

Selain analisis statik, resonansi struktural yang disebabkan oleh aliran angin turbulen juga dianalisis. Karena efek angin pada bilah turbin angin adalah beban dinamis, nilai frekuensi

angin memengaruhi mode resonansi dari bilah. Dalam paper ini, frekuensi getaran natural diperoleh dengan menggunakan fungsi analisis modal pada perangkat lunak ANSYS. Konsep dasarnya adalah menggunakan metode elemen hingga untuk menentukan frekuensi getaran bilah. Persamaan dibawah menunjukkan bahwa tujuannya adalah untuk mengidentifikasi frekuensi dan mode getaran natural untuk bilah turbin angin. Setelah getaran modal dianalisis, frekuensi getaran bilah dimasukkan ke rumus dibawah untuk mendapat kecepatan angin yang dapat menyebabkan resonansi getaran.

Model constructed according to the parameters recommended in [26]		Model constructed according to the parameters recommended in [29]		Model constructed according to this study's parameters	
Mode	Frequency (Hz)	Mode	Frequency (Hz)	Mode	Frequency (Hz)
1	0.025	1	0.065	1	0.028
2	0.028	2	0.175	2	0.030
3	0.075	3	0.196	3	0.088
4	0.126	4	0.354	4	0.140
5	0.159	5	0.542	5	0.182
6	0.252	6	0.681	6	0.283
7	0.266	7	0.958	7	0.294
8	0.318	8	1.077	8	0.322
9	0.355	9	1.128	9	0.400
10	0.467	10	1.249	10	0.507
11	0.469	11	1.338	11	0.517
12	0.592	12	1.384	12	0.532
13	0.648	13	1.431	13	0.663
14	0.718	14	1.471	14	0.708
15	0.726	15	1.485	15	0.781
16	0.814	16	1.543	16	0.809
17	0.817	17	1.569	17	0.826
18	0.876	18	1.656	18	0.891
19	0.913	19	1.685	19	0.922
20	0.962	20	1.759	20	0.930
21	1.047	21	1.795	21	0.958
22	1.061	22	1.830	22	1.020
23	1.092	23	1.839	23	1.027
24	1.124	24	1.872	24	1.079

Gambar 2. 37 Frekuensi dan Klasifikasi Mode Getaran (Chou, Chiu, Huang, & Chi, 2013)

Dari simulasi yang sudah dilakukan dengan ANSYS, mode resonansi dapat diklasifikasikan sebagai getaran struktur utama atau sebagai getaran struktur lokal. Struktur utama dianalisis seperti gambar di atas. Gambar 2.37 menunjukkan frekuensi natural yang sesuai dengan setiap mode getaran. Analisis getaran lokal dalam 3D menunjukkan bahwa posisi pemicu resonansi sesuai dengan kegagalan aktual dari bilah turbin angin di site. Getaran lokal di bilah turbin angin dapat menyebabkan kegagalan pada bagian yang lebih lemah dari struktur. Ketika getaran natural struktur cocok dengan frekuensi beban eksternal, efek resonansi dapat menguatkan respons struktural. Selain itu, efek resonansi juga meningkatkan kemungkinan kegagalan *fatigue* dari getaran. Namun untuk menentukan beban dinamis angin pada bilah sangat sulit untuk dilakukan. Sebuah penelitian sebelumnya yang berjudul *Asymmetric Vortex Shedding Flow Past an Inclined Flat Plate at High Incidence* (Lam & Leung, 2005) yang melakukan eksperimen investigasi peristiwa *vortex shedding* pada sebuah plat *angle of attack* α

= 20°, 25° and 30° menyarankan bahwa *vortex frequency* dapat diperkirakan dengan persamaan berikut:

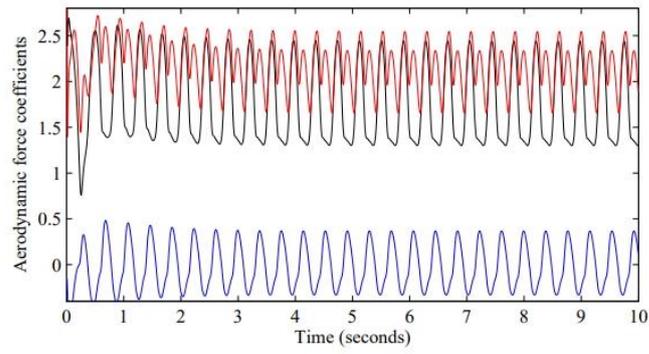
$$f \frac{B}{U} = 0.15 \dots \dots \dots (2.66)$$

Hasil frekuensi yang diberikan pada Gambar 2.37 menunjukkan bahwa frekuensi vortex pada model bilah yang dibangun dengan *material properties* yang direkomendasikan dalam [29] memiliki frekuensi natural lokal sebesar 1.25 Hz sehingga sesuai dengan kecepatan angin rata-rata sekitar 25 m/s. Kecepatan angin rata-rata yang sesuai untuk *material properties* yang direkomendasikan dalam [26] memiliki frekuensi natural lokal sebesar 0.9 Hz dan kecepatan angin sesuai dengan 18 m/s sedangkan model dalam penelitian ini memiliki frekuensi natural lokal sebesar 0.7 Hz sehingga sesuai dengan kecepatan angin rata-rata sebesar 14 m/s. Artinya, selama operasi jangka panjang di bawah kecepatan angin yang ditunjukkan di atas, *vortex* dapat menyebabkan delaminasi permukaan akibat resonansi lokal dari bilah dan kerusakan retak yang dihasilkan dari kelelahan material. Sehingga, pada penelitian ini disimpulkan bahwa penyebab kegagalan dari bilah turbin angin yang diteliti bukan karena akibat angin masif, namun karena fenomena *vortex shedding* yang menyebabkan resonansi pada bilah.

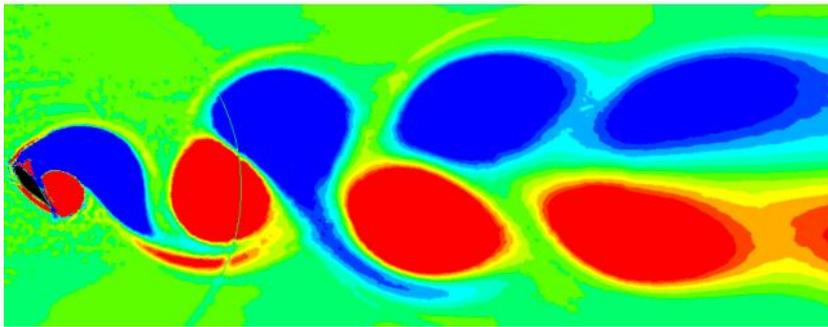
4. *Vortex Shedding from a Wind Turbine Blade Section at High Angles of Attack*
(Meskell & Alberto, 2013)

Pada tahun 2013 telah dilakukan penelitian yang menginvestigasi fenomena vortex shedding pada bilah turbin angin yang berjudul *Vortex Shedding from a Wind Turbine Blade Section at High Angles of Attack* oleh Alberto Pellegrino dan Craig Meskell yang akan dijadikan dasaran nilai *Strouhal Number* untuk analisa resonansi angin pada penelitian ini. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari perilaku *wake* di belakang airfoil pada bilangan *Reynold* tinggi, yang dapat dianggap sebagai *bluff body*. Aliran *unsteady* di sekitar potongan bilah turbin angin dua dimensi stasioner (NREL S809) telah disimulasikan menggunakan RANS *unsteady* menggunakan ANSYS *Fluent* dengan model turbulensi SST pada $Re = 10^6$ dan sudut serang tinggi. Dua rentang sudut serang telah dipertimbangkan, positif = [20° → 160°] dan negatif = [-20° → 160°]. Rentang = [0° → ±20°] dan = [180° → ±20°] tidak dipertimbangkan karena pada sudut-sudut ini alirannya adalah sebagian besar menempel pada airfoil sehingga fenomena *vortex shedding* tidak akan terjadi.

Pada sudut serang yang tinggi, bagian bilah turbin angin (NREL S809) akan berperilaku sebagai *bluff body* yang menyebabkan *vortex shedding* dan karenanya akan mengalami beban yang berfluktuasi. Secara umum, bentuk *vortex* sesuai dengan apa yang terlihat dalam literatur untuk *bluff body* secara umum, menunjukkan bahwa proses *vortex shedding* telah ditangkap dengan benar. Ketika panjang *chord* dari bagian bilah digunakan untuk frekuensi *vortex shedding*, *Strouhal Number* bervariasi dari 0,12 hingga 0,16 untuk sudut negatif = [-40° → 150°] dan dari 0,11 hingga 0,15 untuk sudut positif = [40° → 140°]. Dari hasil penelitian ini diketahui bahwa camber airfoil tidak secara substansial mempengaruhi koefisien gaya, menunjukkan bahwa hasil yang ditemukan mungkin berlaku untuk bilah turbin dengan geometri yang berbeda.



Gambar 2. 38 Koefisien Gaya *Lift*, *Drag*, dan Momen Aerodinamik terhadap Waktu pada $\alpha = 50^\circ$ (Meskell & Alberto, 2013)

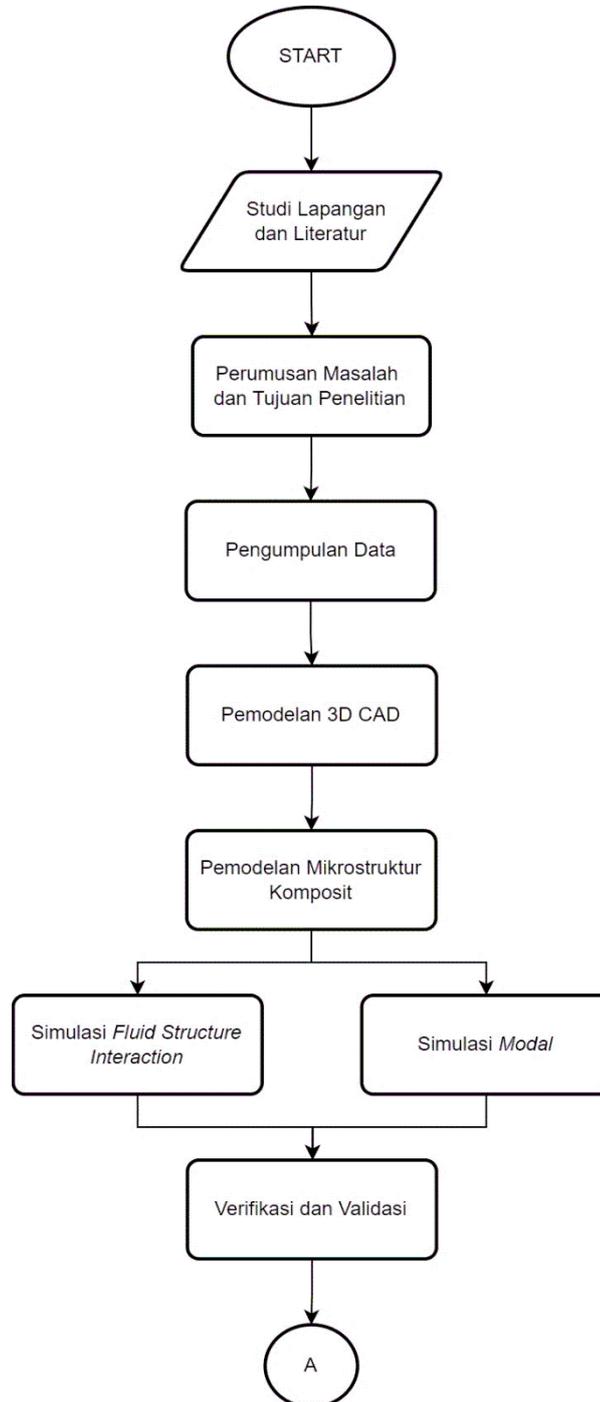


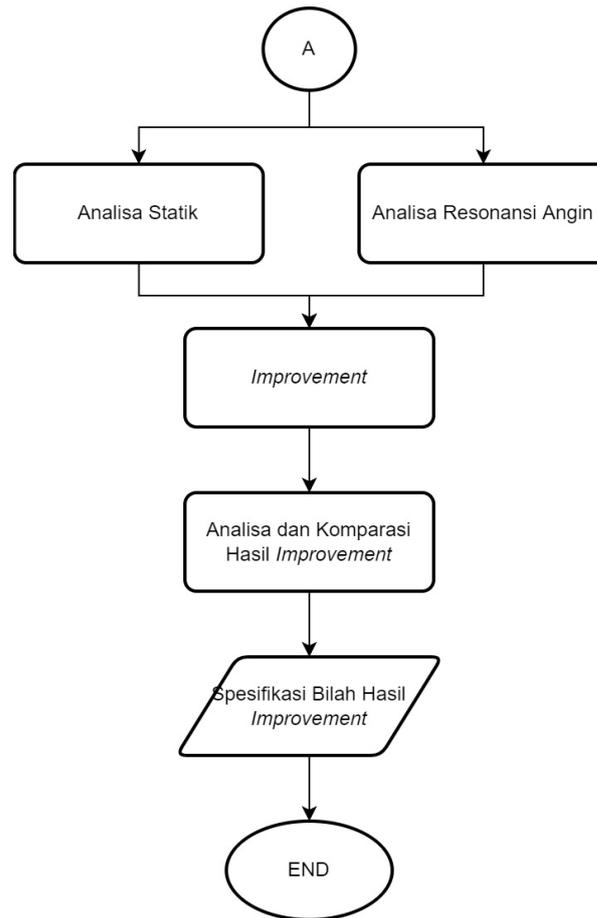
Gambar 2. 39 Kontur Kecepatan Angin pada $t = 10s$ dan $\alpha = 50^\circ$ (Meskell & Alberto, 2013)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 *Flowchart* Penelitian

Penelitian ini terdiri dari beberapa tahap dan perlu dilakukan pemahaman terhadap metode-metode agar memperoleh hasil yang diinginkan. Metode pengerjaan penelitian tugas akhir telah dijelaskan secara garis besar oleh *flowchart* penelitian pada gambar 3.1. Penjelasan secara rinci mengenai *flowchart* penelitian adalah sebagai berikut.





Gambar 3. 1 *Flowchart* Penelitian

3.2 Studi Lapangan dan Literatur

Langkah pertama pada penelitian ini adalah studi lapangan dan literatur. Studi lapangan bertujuan untuk menginvestigasi titik patahan beserta rancangan bilah seperti material dan konstruksi dari bilah turbin angin. Studi literatur bertujuan untuk mendalami landasan teori yang akan digunakan pada penelitian ini. Studi literatur dimulai dari mencari jurnal perancang terdahulu yang merancang bilah P3TKEBTKE dan topik yang sejenis, yaitu mengenai dinamika, simulasi, analisa, dan macam-macam kegagalan pada konstruksi bilah turbin angin. Studi literatur kemudian dilanjutkan dengan mempelajari beberapa artikel mengenai desain dasar konstruksi bilah turbin angin, *software* elemen hingga dan CFD, sifat mekanik material kayu dan komposit, dan juga dasar teori dari ilmu teknik mesin yang terkait seperti mekanika fluida, mekanika kekuatan material, dan kegagalan material.

3.3 Perumusan Masalah dan Tujuan Penelitian

Rumusan masalah ditetapkan untuk mengidentifikasi langkah yang harus dilakukan agar mencapai tujuan dari suatu penelitian. Rumusan masalah diperoleh dari studi literatur dan lapangan yang telah dilakukan sebagaimana yang telah ditampilkan pada BAB I.

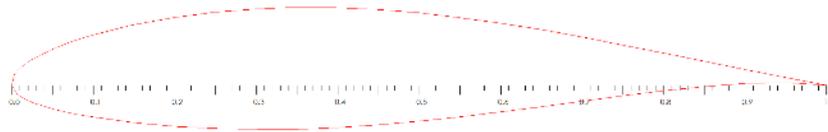
3.4 Pengumpulan Data

Untuk melakukan proses simulasi, perlu mengetahui terlebih dahulu geometri serta properti material serupa dari bilah turbin angin P3TKEBTKE. Geometri bilah turbin angin didapat dari jurnal *Perancangan Bilah Turbin Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLT-Angin) Kapasitas 100 KW Menggunakan Studi Aerodinamika* yang telah dipublikasi oleh

Puslitbangtek Ketenagalistrikan Energi Baru, Terbarukan, dan Konversi Energi (P3TKEBTKE). Lalu properti material dari *Plain Woven E-Glass/Epoxy* dan kayu Balsa ditentukan melalui pengumpulan data properti material serupa yang umum di pasaran. Namun, material tersebut dianggap cukup untuk merepresentasikan karakteristik sifat dari material yang akan digunakan pada penelitian ini.

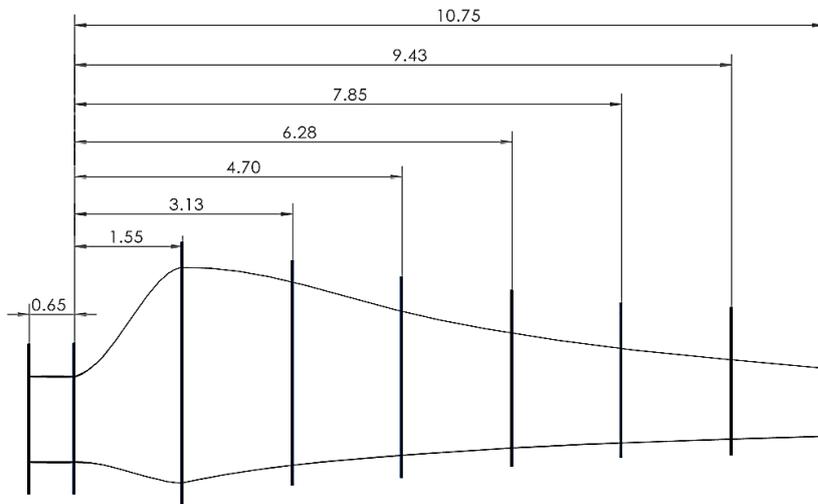
3.5 Pemodelan 3D CAD

Tahap awal pemodelan dari penelitian ini adalah dengan mencari geometri airfoil yang dipakai oleh bilah turbin angin. Bilah turbin angin yang telah dirancang oleh P3TKEBTKE menggunakan airfoil NACA 632415. Profil airfoil ini efektif dipergunakan pada turbin angin dengan radius bilah lebih besar dari 10 m.



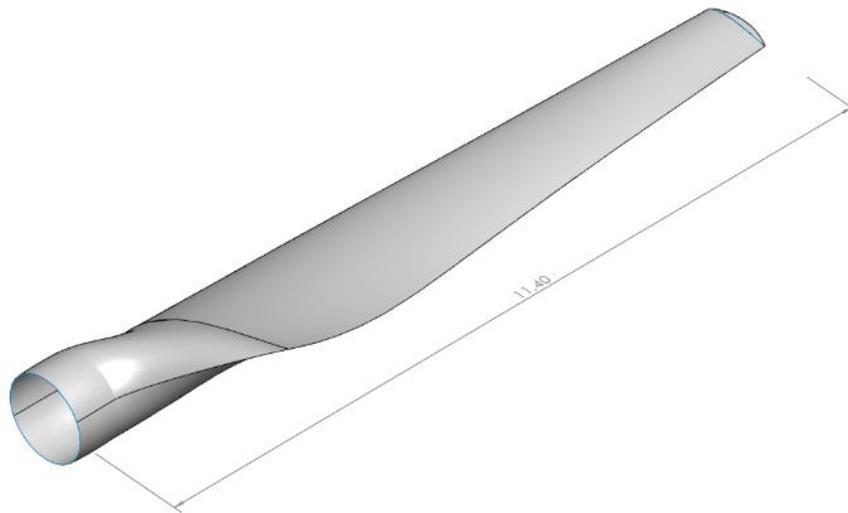
Gambar 3. 2 Bentuk Dasar *Airfoil* NACA 632415

Selanjutnya dalam membuat desain 3D bilah, diperlukan parameter distribusi *twist angle* dan *chord*. Geometri bilah turbin memiliki keunikan, dimana bilah turbin merupakan gabungan antara beberapa airfoil yang membentuknya. Hal ini dikarenakan bilah turbin mengalami kecepatan angin relatif yang berbeda pada tiap bagian bilah turbin angin. Oleh karena itu diperlukan beberapa kerangka airfoil yang disebut sebagai *blade element* untuk membentuk geometri bilah turbin. Berdasarkan studi literatur, rancangan bilah turbin dibagi menjadi tujuh bagian dengan jarak antar bagian airfoil (r) 1,5 m dengan panjang chord (c) dan blade setting (β) yang berbeda pada tiap bagian (*blade element*) airfoil. Selanjutnya dilakukan pembentukan pangkal (*root*) bilah yang berfungsi sebagai penghubung bilah dengan generator. Jarak antara *blade span* dengan ujung *root* diketahui sebesar 2,2 meter dengan panjang transisi sebesar 1,55 meter dan panjang *root* sebesar 0,65 meter. Jari-jari *root* diketahui sebesar 0,625 meter. Maka dapat dilakukan *3D modelling* bilah turbin angin berdasarkan data parameter *blade element* bilah turbin dari perancangan terdahulu sebagai berikut.

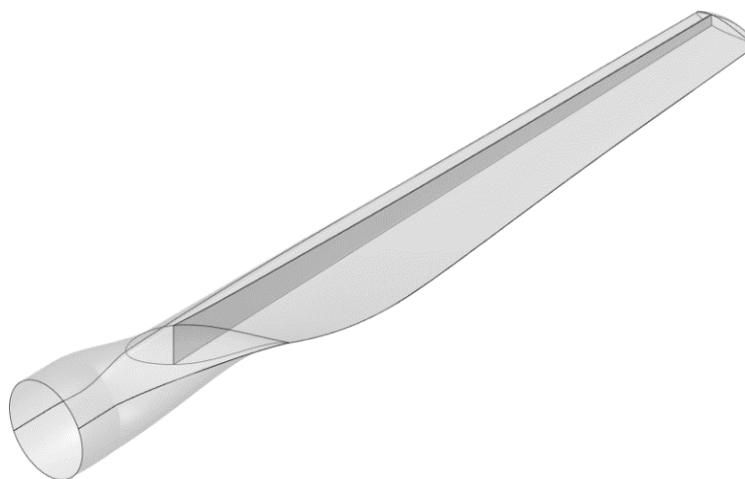


Gambar 3. 3 Bentuk *Blade Span* dan Distribusi *Blade Element*

Telah ditemukan secara teoritis maupun eksperimen bahwa jika terdapat gaya aerodinamik yang diterapkan pada jarak $1/4$ dari belakang *leading edge* pada hampir semua airfoil kecepatan rendah, besar momen aerodinamik tetap hampir konstan pada semua sudut serang. Lokasi dimana momen aerodinamik tetap konstan pada airfoil biasa disebut sebagai *aerodynamic center* (ac) (Benson, 2006). Maka dari itu, mayoritas perancangan bilah turbin angin menggunakan pusat aerodinamis sebagai lokasi pusat dari *twist angle* airfoil dan peletakan *shear web* di mana gaya aerodinamis yang terjadi tidak menyebabkan momen sehingga mengeleminasi gaya puntir pada bilah. Oleh karena itu pada penelitian ini digunakan jarak $1/4$ dibelakang *leading edge* sebagai pusat *twist angle* dan *shear web*. Pada Gambar 3.6 yang menunjukkan bilah turbin angin secara *isometric view* dan gambar 3.7 menunjukkan letak *shear web* secara lebih jelas.

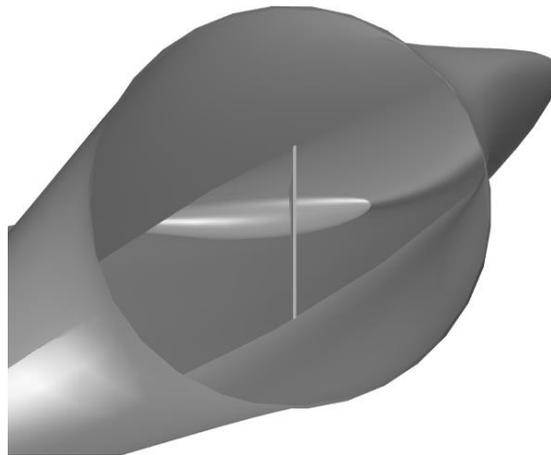


(a)



(b)

Gambar 3. 4 *Isometric View* Bilah Turbin Angin



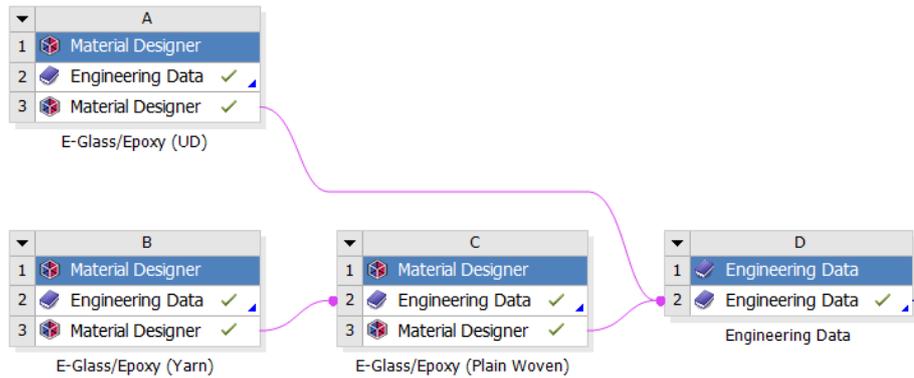
Gambar 3. 5 *Root View* Bilah Turbin Angin

3.6 Pemodelan Mikrostruktur Komposit

Sifat mekanik dari komposit bergantung pada komponen material pembentuk, tipe RVE (*Representative Volume Element*), dan arah orientasinya. Maka dari itu, sifat mekanik komposit adalah ortotropik. Sebelum melakukan analisa komposit secara makrostruktur, komposit perlu dimodelkan secara mikrostruktur untuk mendapat elastisitas ortotropik secara mikromekanik. Pemodelan ini dapat dilakukan dengan modul ANSYS *Material Designer*. Dalam *Material Designer*, kita dapat memodelkan dan menganalisis material secara mikrostruktur untuk memperoleh properti material yang dihomogenisasi. *Material Designer* mengasumsikan bahwa bahan yang digunakan memiliki struktur mikro yang representatif: *Representative Volume Element* (RVE). Dalam teori material komposit, RVE adalah volume kecil material yang masih cukup besar untuk menunjukkan sifat material makroskopis di mana pengukuran dapat dilakukan yang akan menghasilkan nilai representatif dari komposit secara keseluruhan. Dengan *periodic boundary*, RVE ini dapat dengan mudah diidentifikasi sebagai satu sel satuan, dan sel unit ini akan menduplikasi dirinya sendiri dalam ketiga arah koordinat. Dengan demikian, satu unit tersebut berisi semua informasi tentang material dan dapat mempertimbangkan dengan hanya menggunakan properti sel satuan tunggal.

Proses homogenisasi dimulai dengan pemodelan RVE. Proses ini membutuhkan pembuatan geometri yang disederhanakan, serta definisi sifat-sifat bahan dari bahan-bahan penyusun. Selanjutnya, geometri serat dan matriks disatukan untuk analisis elemen hingga. Model RVE yang telah dimodelkan kemudian diberi beberapa kasus beban makroskopis, dan responsnya dihitung. Data material yang dihomogenisasi dihitung dari hasil respon regangan.

Dari properti mikrostruktur, kita dapat memperoleh data material rata-rata kekakuan atau elastisitas linier yang dapat digunakan pada simulasi makrostruktur. Data sifat mekanik komponen penyusun material komposit ditentukan, lalu dimodelkan dan dianalisis berdasarkan fraksi volumenya, dan sifat material yang dihomogenisasi akan didapatkan dan dapat diimpor ke *engineering data* untuk analisis makromekanik.

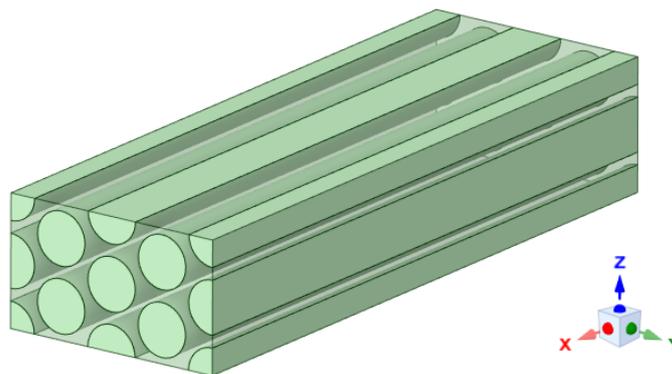


Gambar 3. 6 Project Schematic Pemodelan Mikrostruktur Komposit

Pada penelitian ini, komposit yang digunakan adalah *E-Glass* dengan matriks resin *Epoxy*. Model RVE yang akan digunakan adalah *unidirectional* dan *woven* dengan tipe *weaving* berupa *plain*. Kedua RVE yang akan dipakai menggunakan ketebalan *fabric* sebesar 0.5 mm untuk tipe *unidirectional* dan 1 mm untuk tipe *plain woven*.

1. *E-Glass/Epoxy (Unidirectional)*

Pemodelan *E-Glass/Epoxy* dengan tipe RVE *unidirectional* dilakukan sebagai salah satu variasi konfigurasi komposit yang akan digunakan sebagai variabel *improvement* dari bilah turbin angin. Geometri dari *E-Glass/Epoxy (Unidirectional)* adalah hexagonal dengan fraksi volume serat sebesar 0.6 dan diameter serat sebesar 5 μm . Kedua parameter tersebut dipilih dengan mempertimbangkan aspek *manufacturability* dari komposit *unidirectional*.



Gambar 3. 7 Representative Volume Element (RVE) *E-Glass/Epoxy (Unidirectional)*

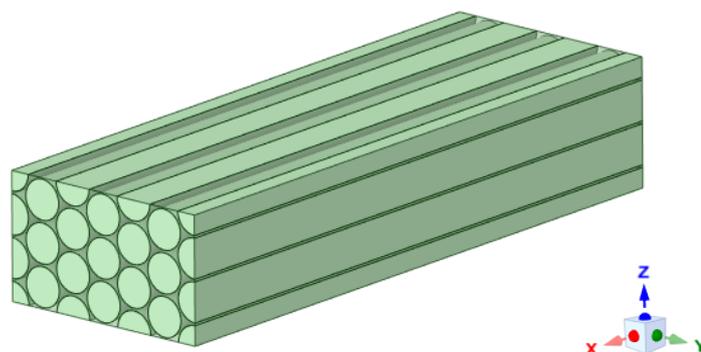
Proses *meshing* dilakukan secara *default* dengan menggunakan *periodic meshing* agar mendapatkan *mesh* yang memiliki *boundary* simetris secara translasi. Setelah proses *meshing* dilakukan proses analisis dan didapat properti elastisitas ortotropik dari komposit yang telah di homogenisasi. Hasil properti kekakuan dari simulasi mikrostruktur *E-Glass/Epoxy (Unidirectional)* kemudian dilengkapi properti kekuatan yang didapat dari studi literatur dengan fraksi volume serat yang serupa. Konstanta *Tsai-Wu* yang digunakan pada penelitian ini disederhanakan menjadi -1 pada seluruh bidang agar menyerupai kriteria kegagalan *Von mises*, dengan rincian sebagai berikut.

Tabel 3. 1 *Material Properties* dari *E-Glass/Epoxy (Unidirectional)* yang telah dihomogenisasi

Property	Value	Unit	Keterangan
Density	2024	Kg/m ³	ANSYS <i>Material Designer</i>
Young Modulus X Direction	44968	MPa	
Young Modulus Y Direction	13098	MPa	
Young Modulus Z Direction	13098	MPa	
Poisson Ratio XY Direction	0.26468	Arbitrary	
Poisson Ratio YZ Direction	0.39555	Arbitrary	
Poisson Ratio XZ Direction	0.26468	Arbitrary	
Shear Modulus XY	4798.2	MPa	
Shear Modulus YZ	4701	MPa	
Shear Modulus XZ	4798.2	MPa	
Tensile Strength X direction	783.3	MPa	<i>Icten et al.</i>
Tensile Strength Y direction	64	MPa	
Tensile Strength Z direction	64	MPa	
Compressive Strength X direction	298	MPa	
Compressive Strength Y direction	124	MPa	
Compressive Strength Z direction	124	MPa	
Shear Strength XY	38	MPa	
Shear Strength YZ	69	MPa	
Shear Strength XZ	38	MPa	ANSYS <i>Engineering Data</i>
Tsai-Wu Constant XY	-1	Arbitrary	
Tsai-Wu Constant YZ	-1	Arbitrary	
Tsai-Wu Constant XZ	-1	Arbitrary	

2. *E-Glass/Epoxy (Plain Woven)*

Proses pemodelan mikrostruktur dari komposit *E-Glass/Epoxy* dengan model RVE *woven* terdiri dari dua tahap, yaitu pemodelan *yarn* dan pemodelan *fabric*. Secara mikrostruktur, penyusun dari *yarn* komposit dengan RVE *woven* adalah *unidirectional fiber* yang juga bersifat ortotropik. Oleh karena itu, pemodelan *yarn* bertujuan agar dapat menangkap efek sifat ortotropik dari *yarn* terhadap hasil properti material ortotropik dari komposit *woven*.



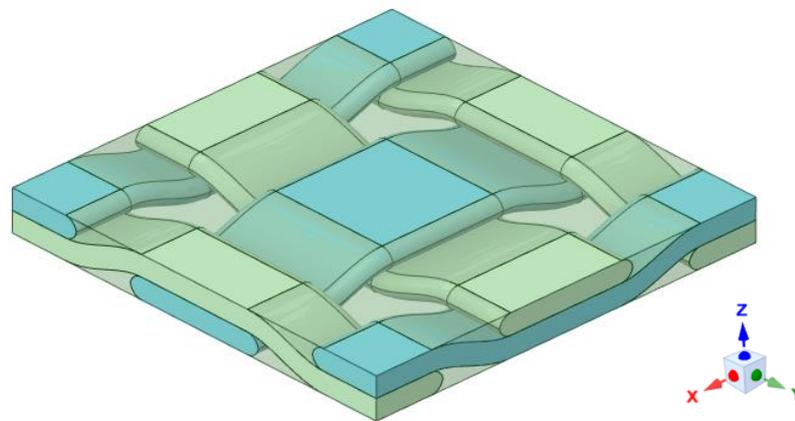
Gambar 3. 8 *Representative Volume Element (RVE) E-Glass/Epoxy (Yarn)*

Geometri dari komposit yang digunakan adalah hexagonal dengan Fraksi volume serat dari *yarn* adalah 0.8 dan diameter serat sebesar 5 μm . Proses *meshing* secara *default* dengan menggunakan *periodic meshing* agar mendapatkan *mesh* yang memiliki *boundary* simetris

secara translasi. Hasil properti kekakuan dari *yarn* didapat dari ANSYS *Material Designer* sebagai berikut.

Tabel 3. 2 *Material Properties* dari *E-Glass/Epoxy (Yarn)* yang telah dihomogenisasi

Property	Value	Unit	Keterangan
Density	1945.5	Kg/m ³	ANSYS <i>Material Designer</i>
Young Modulus X Direction	58688	MPa	
Young Modulus Y Direction	25655	MPa	
Young Modulus Z Direction	25655	MPa	
Poisson Ratio XY Direction	0.24023	Arbitrary	
Poisson Ratio YZ Direction	0.31825	Arbitrary	
Poisson Ratio XZ Direction	0.24023	Arbitrary	
Shear Modulus XY	9438.1	MPa	
Shear Modulus YZ	9739	MPa	
Shear Modulus XZ	9438.1	MPa	



Gambar 3. 9 Model Mikrostruktur *E-Glass/Epoxy (Plain Woven)*

Properti kekakuan dari *yarn* kemudian digunakan sebagai *fiber* pada pemodelan *E-Glass/Epoxy Woven*. Tipe *weaving* yang digunakan pada penelitian ini *plain* dengan bentuk *flattened lenticular*. Untuk mempermudah analisis, maka *shear angle* yang digunakan adalah 0° agar simetris. *Yarn spacing* yang digunakan adalah 5 mm karena yang paling umum di pasaran. Fraksi volume *yarn fiber* dari komposit *E-Glass/Epoxy (Plain Woven)* sebesar 0.8 dan *yarn* sebesar 0.55. Setelah itu dilakukan proses *meshing* secara *default* dengan menggunakan *periodic meshing* agar mendapatkan *mesh* yang memiliki *boundary* simetris secara translasi. Setelah proses *meshing* dilakukan proses analisis dan didapat properti elastisitas ortotropik dari komposit yang telah di homogenisasi. Konstanta *Tsai-Wu* yang digunakan pada penelitian ini disederhanakan menjadi -1 pada seluruh bidang agar menyerupai kriteria kegagalan *Von Mises*. Lalu dengan dilengkapi kekuatan ortotropik material komposit yang diperoleh melalui studi literatur, maka didapat properti material *E-Glass/Epoxy (Plain Woven)* sebagai berikut.

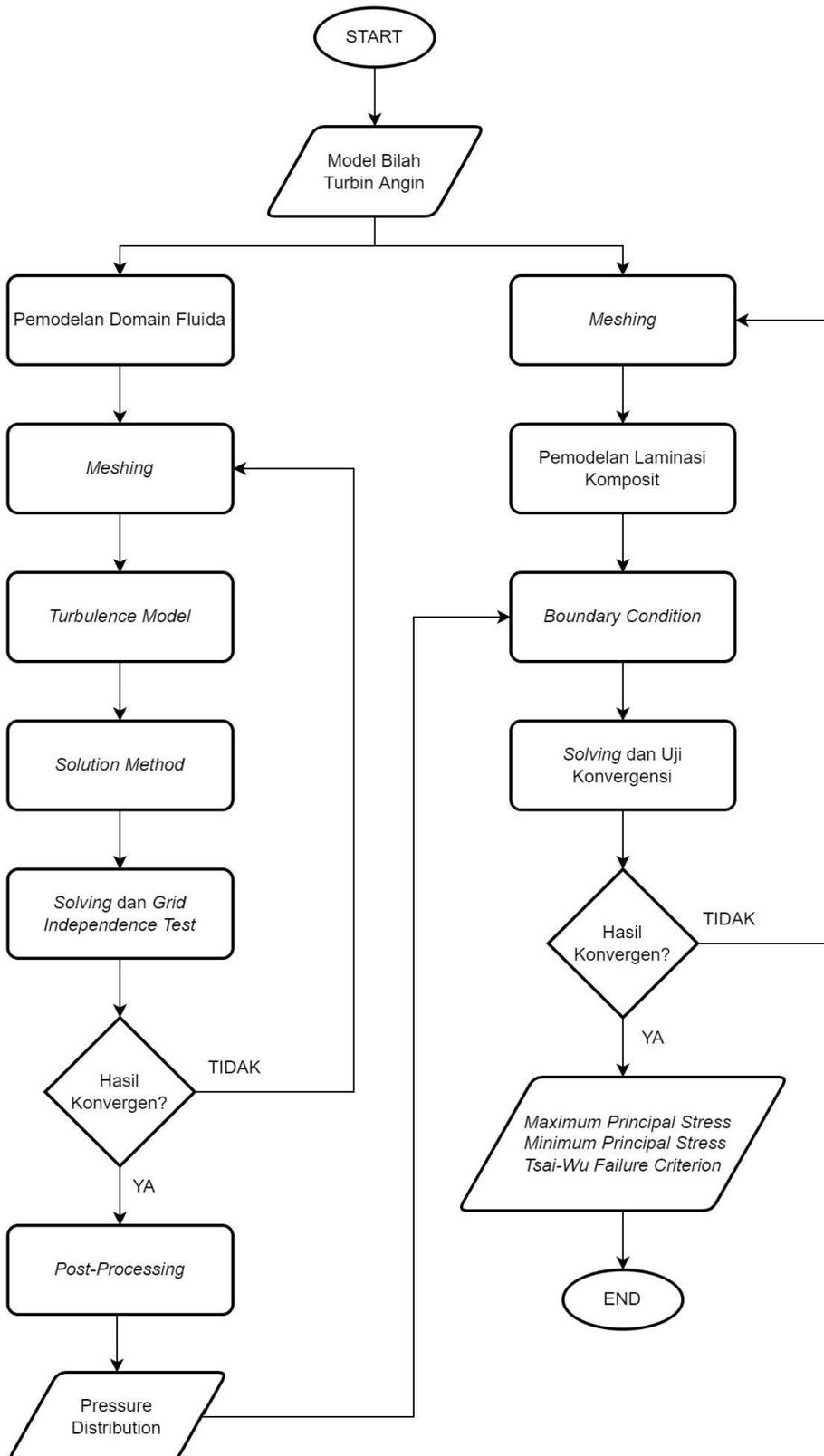
Tabel 3. 3 *Material Properties* dari *E-Glass/Epoxy (Plain Woven)* yang telah dihomogenisasi

Property	Value	Unit	Keterangan
Density	1945.5	Kg/m ³	ANSYS Material Designer
Young Modulus X Direction	25077	MPa	
Young Modulus Y Direction	25077	MPa	
Young Modulus Z Direction	15704	MPa	
Poisson Ratio XY Direction	0.17481	Arbitrary	
Poisson Ratio YZ Direction	0.30377	Arbitrary	
Poisson Ratio XZ Direction	0.30377	Arbitrary	
Shear Modulus XY	5021	MPa	
Shear Modulus YZ	4898.3	MPa	
Shear Modulus XZ	4898.3	MPa	
Tensile Strength X direction	490	MPa	MatWeb
Tensile Strength Y direction	490	MPa	
Tensile Strength Z direction	54.6	MPa	
Compressive Strength X direction	300	MPa	
Compressive Strength Y direction	300	MPa	
Compressive Strength Z direction	415	MPa	
Shear Strength XY	27.3	MPa	
Shear Strength YZ	179	MPa	
Shear Strength XZ	179	MPa	
Tsai-Wu Constant XY	-1	Arbitrary	ANSYS Engineering Data
Tsai-Wu Constant YZ	-1	Arbitrary	
Tsai-Wu Constant XZ	-1	Arbitrary	

E-Glass/Epoxy dengan tipe RVE *plain woven* memiliki properti kekakuan dan kekuatan yang berbeda dengan *unidirectional*. Pada *plain woven* terdapat *in-plane properties* (*warp* dan *fill*) yang memiliki nilai sama ($E_1 = E_2, G_{13} = G_{23}, \nu_{13} = \nu_{23}, F_{1t} = F_{2t}, F_{1c} = F_{2c}$, dan $F_{12} = F_{13}$), sedangkan pada *unidirectional* memiliki perbedaan pada *in-plane properties* (longitudinal dan transversal), namun dengan nilai *in-plane* dan *out-of-plane transverse* yang sama ($E_2 = E_3, G_{12} = G_{13}, \nu_{12} = \nu_{13}, F_{2t} = F_{3t}, F_{2c} = F_{3c}$, dan $F_{12} = F_{13}$). Perbedaan tersebut disebabkan karena pada komposit dengan tipe RVE *woven* memiliki fiber sebagai *warp* dan *fill* ke arah x dan y, sedangkan pada tipe RVE *unidirectional* hanya terdapat fiber secara longitudinal ke arah x. Secara kekakuan dan kekuatan, nilai maksimum (*warp* dan *fill*) pada tipe RVE *woven* memiliki nilai pada yang lebih rendah daripada kekakuan dan kekuatan arah longitudinal pada tipe RVE *unidirectional*.

3.7 Simulasi *Fluid Structure Interaction*

Pada tahap ini dilakukan simulasi *Fluid Structure Interaction* menggunakan *one-way coupling* dengan tahapan sebagai berikut.



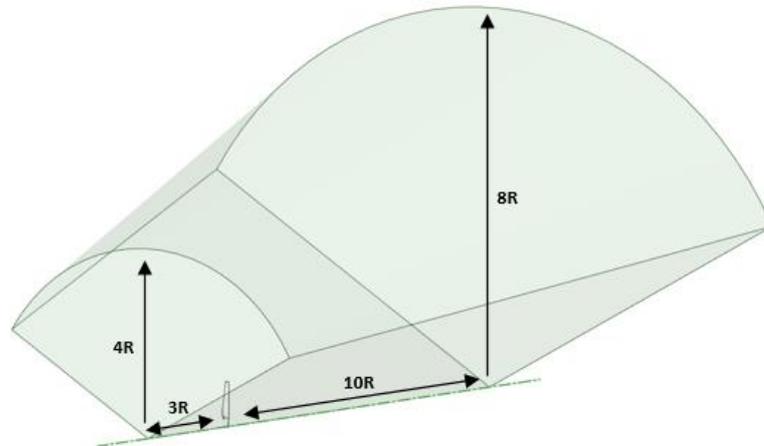
Gambar 3. 10 *Flowchart Simulasi Fluid Structure Interaction*

3.7.1 Simulasi CFD

Model FSI untuk bilah turbin angin pada skala penuh dibuat dengan menggunakan model CFD menggunakan modul ANSYS *FLUENT* terlebih dahulu untuk mendapatkan beban aerodinamis. Tahapannya adalah sebagai berikut.

1. Pemodelan Domain Fluida

Model FSI untuk bilah turbin angin pada skala penuh dibuat dengan menggunakan model CFD menggunakan modul ANSYS *FLUENT* terlebih dahulu untuk mendapatkan beban aerodinamis. Karena model turbin angin simetris terhadap pusat putarannya, ketiga bilah dapat dimodelkan menggunakan hanya 1 bilah saja dalam segmen domain *stream tube* radial 120° dengan *periodic boundary* untuk mengurangi waktu simulasi. Sebuah eksperimen turbin angin (Hand, et al., 2001) telah menunjukkan bahwa *wake expansion* di belakang blade karena rotasi blade tersebut adalah ekspansi kerucut, dan oleh karena itu domain dalam penelitian ini menggunakan bentuk kerucut untuk memungkinkan ekspansi *wake*. Metode ini kerap disebut sebagai *rotating frame motion*. Radius dari domain fluida adalah 24 m. Permukaan depan dari domain merupakan *velocity inlet* yang berjarak 36 m dari depan bilah se bagai tempat masuk *freestream velocity* dengan radius sebesar 48 m, dan permukaan belakang domain merupakan *pressure outlet* yang berjarak 120 m dari belakang bilah dengan radius 96 m. Permukaan kiri dan kanan merupakan permukaan yang akan ditetapkan menjadi *periodic boundary*.



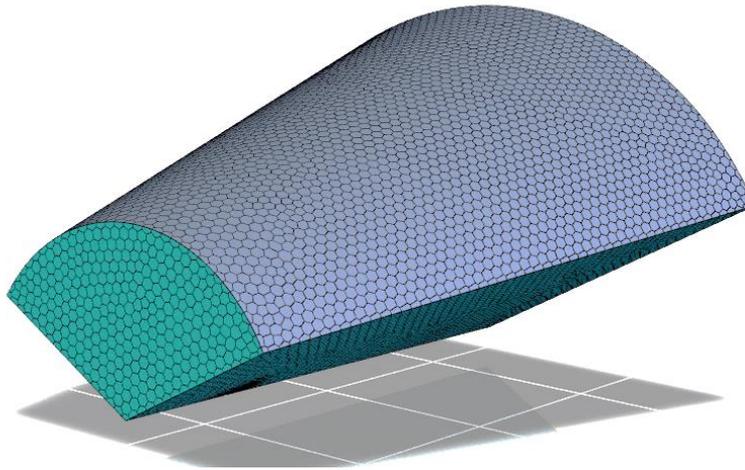
Gambar 3. 11 Domain *Streamtube* Fluida dengan Sudut 120°

2. Meshing

Proses *meshing* pada domain *streamtube* dilakukan menggunakan *FLUENT Meshing Watertight Geometry* dimana *meshing* dilakukan secara berurutan, dimulai dari *surface mesh* pada permukaan-permukaan dari domain, lalu diproses menjadi *grid* melalui *volume mesh*. *Surface mesh* pertama-tama dilakukan pada permukaan bilah dengan *curvature* sebesar 8° . Hal ini dilakukan agar *mesh* dapat menangkap kelengkungan dari profil *airfoil* bilah, sehingga tidak mempengaruhi akurasi komputasi secara signifikan. Pada tahap ini juga terdapat pendefinisian *mesh* minimum dan maksimum yang diizinkan yang nilai rinciannya akan dijelaskan pada tahap *Grid Independence Test*. Selain itu *surface mesh* diterapkan pada permukaan domain fluida dengan *curvature* sebesar 10° . *Mesh element* yang digunakan merupakan *polyhedral* yang sangat bagus digunakan pada permukaan dengan kelengkungan yang tinggi, namun dengan akurasi dan waktu komputasi yang relatif lebih bagus dibanding *mesh element* yang lain. Rincian ukuran *mesh* yang digunakan pada *surface mesh* ini akan dijelaskan pada tahap *Grid Independence Study*.



Gambar 3. 12 *Surface Mesh* pada Permukaan Bilah



Gambar 3. 13 *Surface Mesh* pada Permukaan Domain Fluida

Inflation layer diterapkan pada permukaan bilah agar dapat menangkap efek *boundary layer* dengan baik. 20 *inflation layer* digunakan dengan *growth rate* sebesar 1.2. Pada penelitian ini model turbulen yang dipakai adalah SST K- ω sehingga tinggi lapisan pertama harus memiliki nilai non-dimensional $y^+ < 5$ untuk daerah *laminar sub-layer* atau $30 < y^+ < 300$ untuk daerah *log-law*. Pada penelitian ini dipilih daerah *log-law* sebagai *wall function* karena bilangan *Reynold* pada penelitian ini relatif tinggi, sehingga *boundary layer* yang terjadi pada permukaan bilah akan sangat kecil. Daerah *buffer* dihindari pada CFD karena merupakan daerah dengan error yang tinggi. Oleh karena itu, dipilih target nilai y^+ sebesar 100 untuk menghindari daerah *buffer* dan meringankan beban komputasi. Apabila target nilai y^+ pada seluruh permukaan bilah adalah konstan, maka *first layer height* terkecil berada pada daerah dengan bilangan *Reynold* terbesar. Oleh karena itu, dilakukan perhitungan bilangan *Reynold* pada seluruh *blade element*. Contoh perhitungan menggunakan elemen pertama adalah sebagai berikut.

Perhitungan *headwind* yaitu angin akibat pergerakan bilah yang berputar pada 80 rpm atau 8.4 rad/s:

$$\Omega r = \omega r$$

$$\Omega r = (8.4)(2.8)$$

$$\Omega r = 23.52 \text{ m/s}$$

Setelah itu dilakukan perhitungan *relative wind* yaitu resultan dari *real wind* yaitu kecepatan angin *freestream*, dan *headwind* sebagai berikut:

$$U_{rel} = \sqrt{U_0^2 + \Omega r^2}$$

$$U_{rel} = \sqrt{21^2 + 23.52^2}$$

$$U_{rel} = 31.531 \text{ m/s}$$

Selanjutnya dilakukan perhitungan *Reynold Number* dimana *Blade element* pertama memiliki panjang *chord* sebesar 2.99 m, massa jenis dan viskositas dinamis dari angin adalah 1.164 kg/m^3 dan $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$:

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu}$$

$$Re = \frac{(1.164)(31.531)(2.99)}{0.000017894}$$

$$Re = 6132697$$

Reynold Number pada seluruh elemen juga dihitung dengan langkah-langkah yang sama dan rinciannya dapat dilihat pada tabel 3.4.

Tabel 3. 4 Perhitungan *Reynold Number* pada Seluruh *Blade Element*

Element	r (m)	U ₀ (m/s)	Ωr (m/s)	U _{rel} (m/s)	c _λ (m)	Re
1	2.8	21	23.52	31.531	2.99	6132697
2	4.38		36.792	42.363	2.65	7302666
3	5.95		49.98	54.213	2.08	7335145
4	7.53		63.252	66.647	1.67	7240062
5	9.1		76.44	79.272	1.38	7116153
6	10.68		89.712	92.137	1.17	7012387
7	12		100.8	102.964	1.01	6764776

Berdasarkan hasil, didapat bahwa *Reynold Number* terbesar adalah 7335145. Oleh karena itu, nilai ini yang digunakan untuk melakukan perhitungan *first layer height*. Langkah selanjutnya adalah memperkirakan gesekan pada dinding dengan menggunakan *skin friction correlation Schlichting*:

$$C_f = [2 \log_{10}(Re) - 0.65]^{-2.3}$$

$$C_f = [2 \log_{10}(7335145) - 0.65]^{-2.3}$$

$$C_f = 0.00270234214$$

Sehingga tegangan geser pada dinding dapat dihitung sebagai berikut:

$$\tau_w = C_f \frac{1}{2} \rho U^2$$

$$\tau_w = (0.00270234214) \frac{1}{2} (1.164)(54.213)^2$$

$$\tau_w = 4.622428472 \text{ Pa}$$

Setelah itu dilakukan perhitungan kecepatan gesekan dengan referensi tegangan geser dinding yang telah didapat:

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$$

$$u_\tau = \sqrt{\frac{4.622428472}{1.164}}$$

$$u_\tau = 1.992776576 \text{ m/s}$$

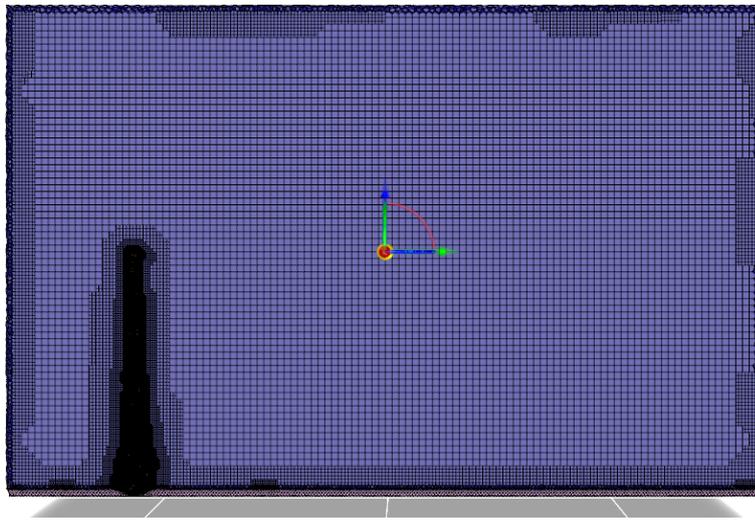
Terakhir dilakukan perhitungan *first layer height* untuk *inflation layer* dengan menggunakan persamaan y^+ :

$$y^+ = \frac{\rho y^* u_\tau}{\mu}$$

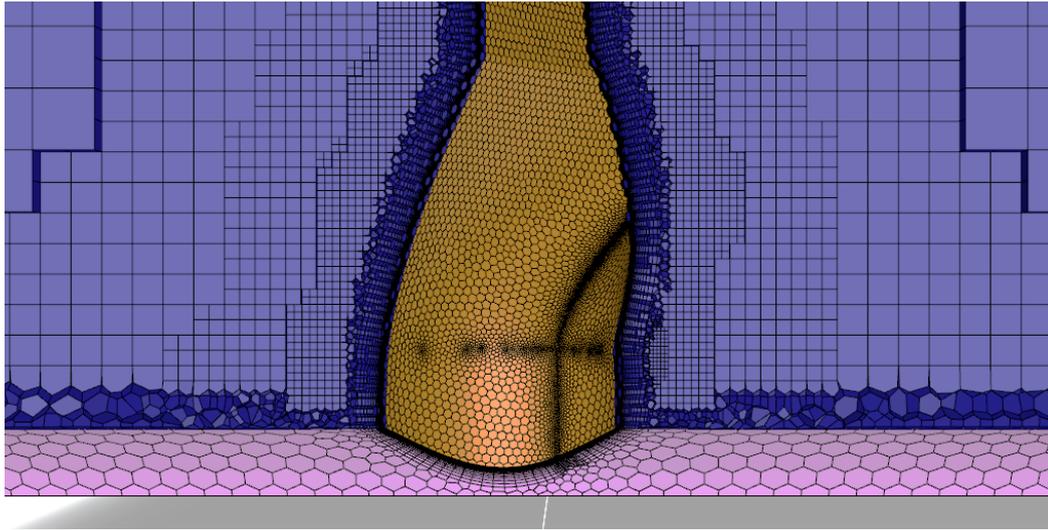
$$100 = \frac{(1.164)y(1.992776576)}{0.000017894}$$

$$y^* = 0.00077 \text{ m}$$

20 *inflation layer* diterapkan pada permukaan bilah dengan *first layer height* sebesar 0.00077 m. Selanjutnya pada tahap *volume mesh*, *mesh element* yang digunakan adalah *poly-hexcore*, dimana bagian yang dekat dengan permukaan domain merupakan *polyhedral* dengan inti atau bagian tengah berupa *hexahedral*. *Poly-hexcore* dipilih karena *mesh element* ini akan menghasilkan jumlah elemen yang lebih sedikit dengan kualitas *mesh* yang lebih baik, sehingga dapat meningkatkan performa *solver* dengan lebih baik (Zore et al., 2019). Ukuran *volume mesh* yang digunakan adalah 0.01 m untuk ukuran minimum dan 2.56 m untuk ukuran maksimum. *Peel layer* sebanyak satu diterapkan pada bilah sebagai pengontrol *gap* dari *hexcore mesh* dengan permukaan bilah, lalu dilanjut dengan *buffer layer* sebanyak empat agar transisi ukuran *mesh* dari bilah menuju *volume mesh* menjadi lebih halus.



Gambar 3. 14 *Volume Mesh* pada Domain Fluida



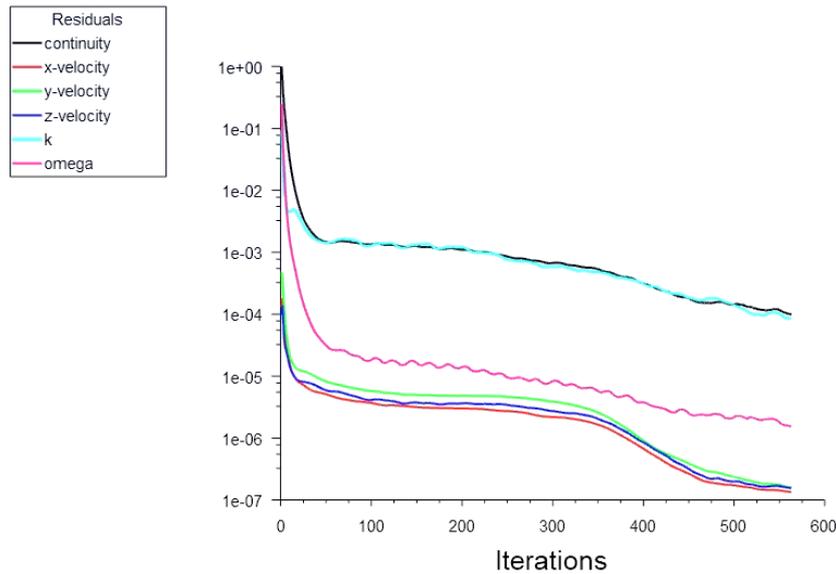
Gambar 3. 15 *Inflation, Peel, dan Buffer Layer* pada Daerah Dekat Permukaan Bilah

3. *Turbulence Model*

Model turbulensi yang digunakan adalah model SST K- ω (Menter, 1993) yang merupakan model yang sering digunakan karena perilaku yang baik dalam menangkap *adverse pressure gradient* dan aliran separasi, sehingga membuat model SST K- ω lebih akurat dan dapat diandalkan untuk analisis aliran eksternal pada airfoil maupun objek dengan profil serupa (Soares, Araújo, & Rezende, 2017). Model SST K- ω memang menghasilkan tingkat turbulensi yang terlalu besar di daerah dengan ketegangan normal yang besar, seperti wilayah stagnasi dan wilayah dengan akselerasi yang kuat, namun kecenderungan ini jauh lebih jelas daripada dengan model K- ϵ normal. Model turbulen ini juga sering digunakan pada studi mengenai turbin angin dengan hasil yang baik (Mo & Lee, 2012).

4. *Solution Method*

Kecepatan angin pada penelitian ini berada di wilayah *subsonic* dan jauh dibawah 0.3 Mach, sehingga udara dapat dianggap sebagai *incompressible* (Anderson, 2011). Oleh karena itu, kepadatan fluida adalah konstan, sehingga tipe *solver* yang akan digunakan pada simulasi ini adalah *pressure-based*. Densitas udara yang dipakai adalah pada kondisi temperatur 1.225 kg/m² dan viskositas dinamis udara juga adalah 1.7894×10^{-5} kg/ms⁻¹. Permukaan luar dari domain juga di set *velocity inlet* dengan kecepatan angin 21 m/s. Bilah dianggap sebagai dinding diam *non-slip*, dan *rotating frame* diterapkan ke semua domain untuk memperhitungkan kecepatan putar dari rotor dengan kecepatan 80 rpm atau 8.4 rad/s. Persamaan inkompresibel RANS (*Reynold-Averaged Navier-Stokes*) diselesaikan menggunakan algoritma *coupled*, dimana *solver* akan menyelesaikan persamaan momentum dan kontinuitas secara berpasangan, sehingga mempermudah konvergen. Kriteria konvergen diatur menjadi 10^{-4} karena nilai residual ini sering digunakan pada simulasi CFD bilah turbin angin. Inisialisasi dilakukan dengan metode hybrid dan *solving* dilakukan hingga residual mencapai kriteria konvergen.



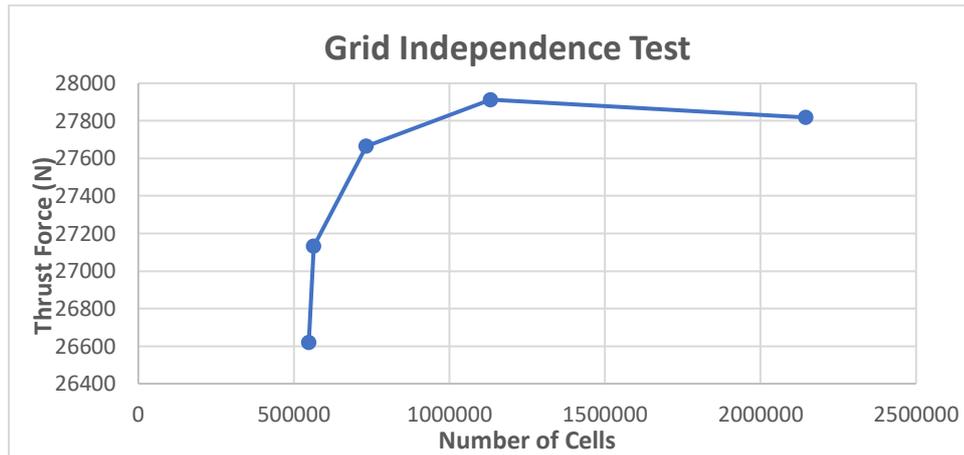
Gambar 3. 16 Plot Residual pada Simulasi CFD

5. Solving dan Grid Independence Study

Proses *solving* dilakukan menggunakan *FLUENT solver*, dimana *solver* ini menggunakan *cell-centered approach*. Akan tetapi hasil yang didapatkan dari proses *solving* belum tentu merupakan hasil yang akurat akibat *mesh* yang digunakan. Proses *meshing* tidak bisa sepenuhnya diperhitungkan secara analitis, seperti ukuran mesh, ukuran y^+ , jenis mesh, dan lain sebagainya. Hal ini terjadi karena sifat dari geometri itu sendiri yang pada umumnya berbentuk kompleks sehingga tidak mungkin untuk menghitung satu persatu tiap komponen untuk mesh yang terbaik. Oleh karena itu, dilakukan *Grid Independence Test* yang bertujuan untuk membuktikan bahwa hasil simulasi yang telah konvergen adalah hasil dari *boundary condition* dan hukum fisika yang telah diterapkan, tanpa pengaruh dari resolusi *mesh*. Proses ini dilakukan secara *iterative* dengan memperkecil ukuran *mesh* hingga hasil simulasi *independent* terhadap perubahan ukuran *mesh*. Variabel bebas yang digunakan pada pengujian ini adalah ukuran dari *local surface mesh* pada bilah dan *global surface mesh*. Lalu variabel tetap pada pengujian ini adalah *curvature*, *first layer height*, jumlah *inflation layer*, *buffer layer*, *peel layer*, dan ukuran dari *volume mesh*. Nilai acuan yang digunakan pada pengujian ini adalah *thrust force*, yaitu gaya resultan dari gaya *lift* dan *drag* yang bekerja pada bilah turbin angin.

Tabel 3. 5 Hasil *Grid Independence Test* Simulasi CFD

No.	Local Surface Mesh (Blade)		Global Surface Mesh		Volume Mesh		Number of cells	Thrust (N)	Relative Error
	Local min size (m)	Local max size (m)	Min Size (m)	Max Size (m)	Min Size (m)	Max Size (m)			
1	0.05	0.1	0.04	3	0.01	2.56	548032	26618	-
2	0.04	0.09	0.04		0.01		563720	27132	1.894%
3	0.03	0.08	0.03		0.01		733364	27666	1.930%
4	0.02	0.07	0.02		0.01		1132190	27913	0.885%
5	0.01	0.06	0.01		0.01		2146022	27817	-0.345%

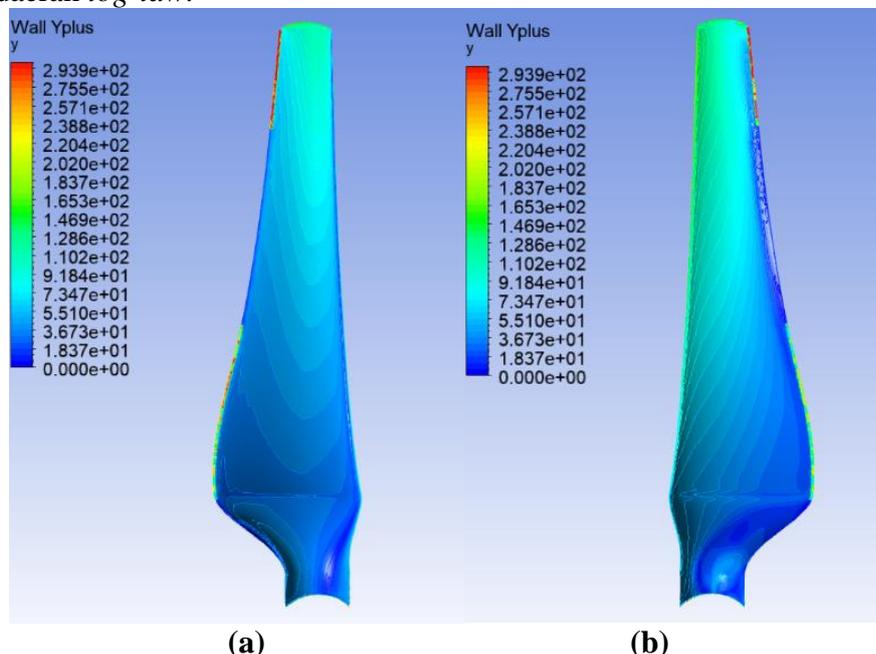


Gambar 3.17 Grafik Hasil *Grid Independence Test* Simulasi CFD

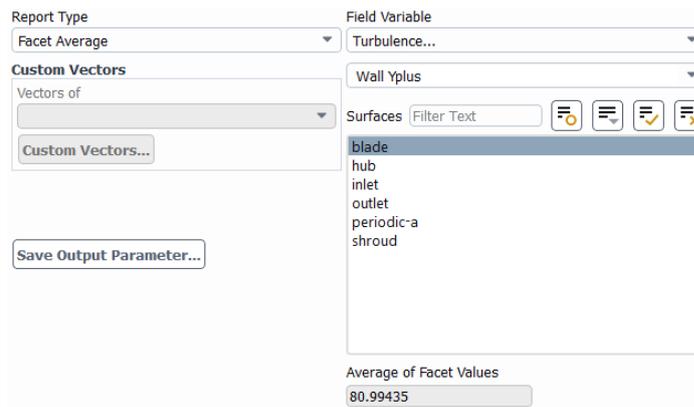
Berdasarkan hasil, didapat bahwa simulasi telah konvergen pada iterasi ke-5. Oleh karena itu, hasil simulasi yang didapat dengan menggunakan konfigurasi pada iterasi ke-5 akan digunakan sebagai hasil yang valid.

6. *Post-Processing*

Tahap *post-processing* dilakukan dengan mengorganisasi dan menginterpretasikan data hasil simulasi CFD yang berupa kontur gambar, plot grafik, dan animasi. Visualisasi yang dapat ditampilkan pertama adalah kontur (*contour*) *absolute pressure* dan *dynamic pressure*. Kedua adalah bentuk aliran (*streamline*) dari angin. Visualisasi ini dilakukan pada *span* bilah. Selain itu, pada tahap ini juga mengevaluasi distribusi nilai y^+ dan distribusi tekanan pada permukaan bilah. Evaluasi distribusi nilai y^+ bertujuan untuk memvalidasi apakah y^+ sesuai dengan yang diharapkan. Berdasarkan hasil, didapat bahwa rata-rata nilai y^+ adalah 80.99, dimana nilai ini berada pada daerah *log-law*. Hasil nilai rata-rata y^+ cukup jauh dari nilai y^+ yang mungkin bisa disebabkan karena permukaan bilah yang tingkat kelengkungannya yang relatif tinggi. Namun hasil yang didapat masih sangat dapat diterima karena sebagian besar nilai y^+ masih di daerah *log-law*.



Gambar 3.18 Kontur Distribusi y^+ Permukaan Bilah pada Sisi (a) *Pressure* dan (b) *Suction*



Gambar 3. 19 Nilai Rata-rata y^+ pada Permukaan Bilah

3.7.2 Simulasi Static Structural

1. Meshing

Sebelum dilakukannya pemodelan komposit, model 3D CAD perlu melalui proses *meshing* terlebih dahulu. Pada model *shell*, digunakan *face meshing* agar mendapat bentuk *mesh* yang terstruktur. Bentuk *mesh* yang digunakan adalah *quadrilateral*.



Gambar 3. 20 Mesh pada *Shell* Bilah Turbin Angin

Selanjutnya dalam pemodelan komposit pada *shear web*, model 3D CAD *shear web* juga perlu melalui proses *meshing* terlebih dahulu. Pada model *shear web*, *element order* yang digunakan adalah *quadratic* karena lebih bagus untuk merepresentasikan deformasi *bending*. Lalu dilakukan *mesh method* yaitu *MultiZone* agar mendapatkan *mesh* yang terstruktur.



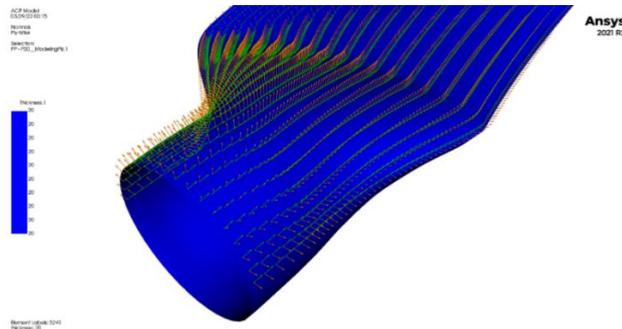
Gambar 3. 21 Mesh pada *Shear Web* Bilah Turbin Angin

Rincian ukuran elemen *mesh* yang digunakan akan didapatkan setelah dilakukannya uji konvergensi, yang rinciannya dapat dilihat pada tahap uji konvergensi nanti.

2. Pemodelan Laminasi Komposit

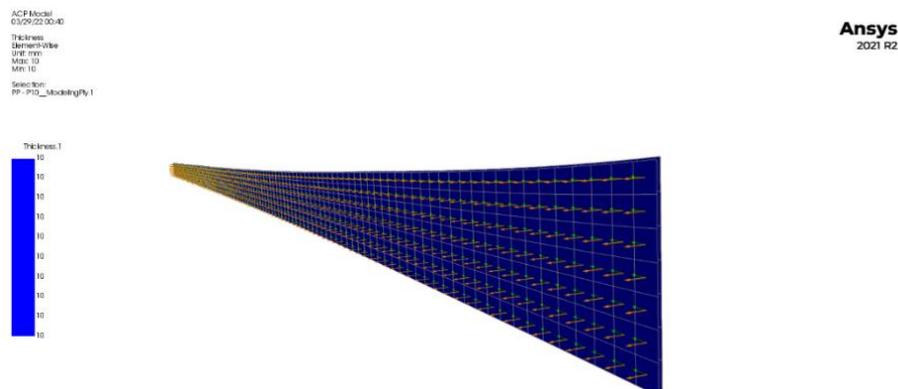
Tahap selanjutnya merupakan tahap pemodelan makrostruktur komposit, dimana material komposit mikrostruktur yang telah dirancang lalu dimodelkan menjadi laminasi agar perilaku komposit dan efek properti material terhadap arah orientasi serat dapat didefinisikan dengan baik untuk digunakan pada simulasi FEM. Pada tahap ini digunakan modul *ANSYS Composite PrepPost (ACP)* yang berfungsi sebagai pemodelan laminasi (*Pre*). *ACP (Pre)* dapat menghasilkan model FEM dengan daerah laminasi yang telah ditentukan secara *layer-by-layer*. Pemodelan dilakukan dengan pendefinisian lamina (*UD, Fabric, Stack-up*) lalu dilanjutkan dengan pendefinisian urutan tumpukan dan orientasi lamina menjadi laminasi yang menyelimuti daerah struktur yang telah ditentukan. Pada tahap ini pemodelan dibagi menjadi dua, yaitu pemodelan *shell* dan *shear web*.

Pemodelan komposit pada *shell* turbin angin dilakukan pada lapisan luar permukaan dari *shell* yang telah dibuat melalui 3D CAD. Laminasi komposit terdiri dari 20 lamina yang masing-masing berketebalan 1 mm. Total ketebalan dari laminasi komposit *shell* adalah 20 mm. Arah orientasi normal dari komposit adalah ke arah *spanwise* dan arah tumpukan lamina komposit adalah normal terhadap permukaan *shell*, seperti pada gambar berikut.

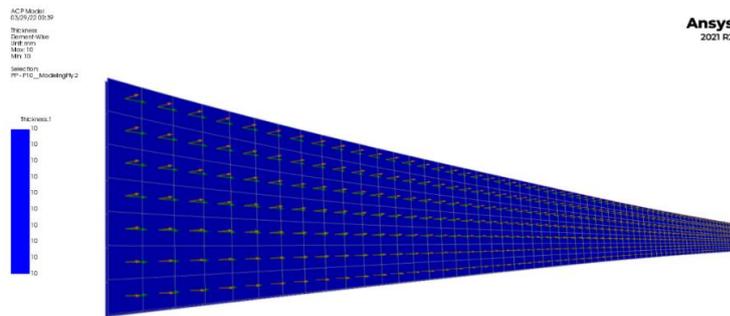


Gambar 3. 22 Orientasi dan Arah *Normal* Laminasi Komposit pada *Shell*

Selanjutnya adalah pemodelan komposit pada komponen *shear web* dimana konstruksi kompositnya adalah *sandwich* dengan *core* kayu Balsa. Oleh karena itu, komposit memiliki dua daerah laminasi komposit, yaitu pada sisi kiri dan kanan dari kayu Balsa. Arah tumpukan lamina komposit memiliki dua arah yang masing-masing normal terhadap permukaan. Masing-masing laminasi komposit terdiri dari 10 lamina yang masing-masing berketebalan 1 mm, sehingga total ketebalan laminasi komposit pada masing-masing permukaan adalah 10 mm. Arah orientasi normal dari komposit juga ke arah *spanwise*. Lebih jelasnya ada pada gambar berikut.



(a)

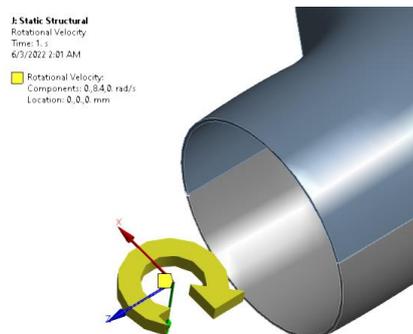


(b)

Gambar 3. 23 Orientasi dan Arah *Normal* Laminasi Komposit pada *Shear Web* (a) Bagian Kiri dan (b) Bagian Kanan

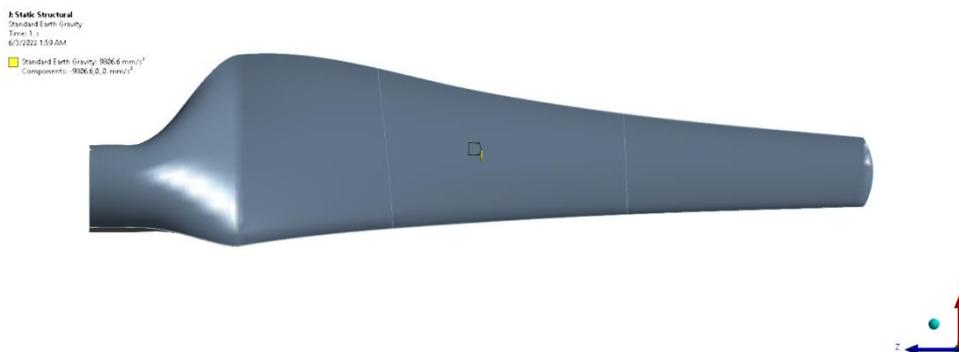
3. *Boundary Condition*

Selain beban aerodinamis yang didapat dari simulasi CFD, ada sumber beban yang terdapat pada bilah, yaitu beban sentrifugal dan beban gravitasi. Ketika bilah berputar maka terdapat gaya sentrifugal yang bekerja pada bilah akibat efek semu yang ditimbulkan ketika sebuah benda melakukan gerak melingkar. Dalam penelitian ini, kecepatan rotasi rotor diterapkan pada struktur bilah untuk memperhitungkan beban sentrifugal, dengan kecepatan putar sebesar 80 rpm atau 8.4 rad/s. Sumbu putar dari bilah sesuai dengan jarak sumbu putar bilah terhadap shaft generator, yaitu 0.6 m.



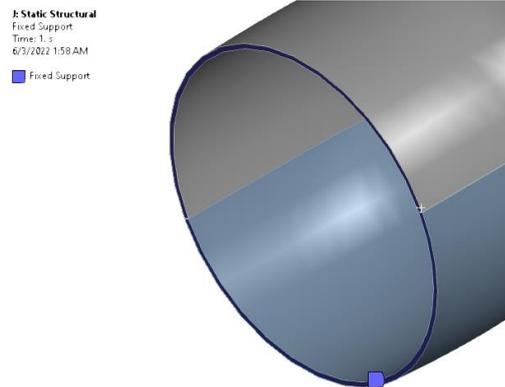
Gambar 3. 24 Nilai dan Lokasi *Rotational Velocity* pada Simulasi *Static Structural*

Lalu agar dapat menangkap efek gravitasi bumi pada bilah, gaya gravitasi sebesar 9.8 m/s² diterapkan pada seluruh *body* bilah ke arah -X.



Gambar 3. 25 Arah Gaya Gravitasi pada Simulasi *Static Structural*

Fixed support diterapkan pada permukaan pangkal bilah yang merepresentasikan sambungan bilah ke generator.



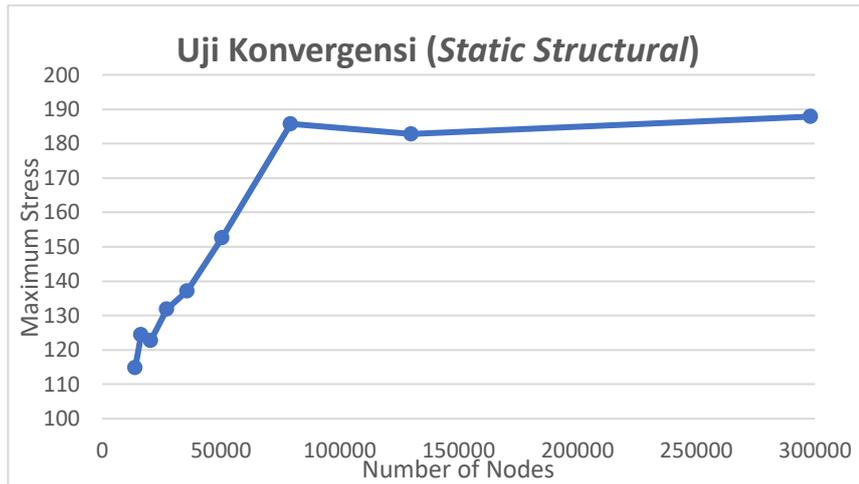
Gambar 3. 26 Lokasi *Fixed Support* pada Simulasi *Static Structural*

4. *Solving* dan Uji Konvergensi

Setelah menentukan geometri, properti material, laminasi komposit, mesh, dan boundary condition, maka dapat dilakukan simulasi *Static Structural*. Proses solving dilakukan dengan menggunakan *direct solver*. Hasil analisis dari simulasi ini seperti distribusi stress dan *safety factor* dapat di plot pada tiap elemen menggunakan ANSYS *post-processing*. Untuk memastikan bahwa hasil telah konvergen, maka dilakukan uji konvergensi. Jumlah dan ukuran elemen yang akan digunakan juga dapat diperoleh dari uji konvergensi. Uji konvergensi dilakukan secara manual dengan melakukan variasi ukuran elemen pada *shell* dan *shear web*. Nilai *maximum principal stress* terbesar digunakan sebagai acuan uji konvergensi ini. Kemudian, hasil ukuran elemen dengan nilai error terkecil dan *element quality* terbesar akan dipilih untuk menjadi ukuran elemen dalam simulasi ini dan untuk tahap *improvement*. Rincian uji konvergensi yang telah dilakukan adalah sebagai berikut.

Tabel 3. 6 Hasil Uji Konvergensi Simulasi *Static Structural*

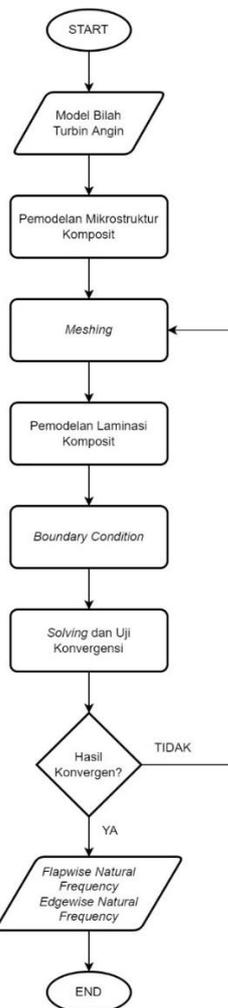
No.	Element Size	Nodes	Element	Skewness	Orthogonal	Maximum Stress	Relative Error
1	100	13907	6190	0.24239	0.90759	114.82	
2	90	16366	7333	0.24147	0.90803	124.53	7.79%
3	80	20540	9261	0.24068	0.9089	122.84	-1.37%
4	70	27197	13672	0.23423	0.91159	131.96	6.91%
5	60	35874	18210	0.24176	0.90766	137.14	3.78%
5	50	50578	25822	0.24154	0.90745	152.64	10.15%
6	40	79284	36815	0.24326	0.91023	185.76	17.83%
7	30	130162	60495	0.24713	0.90284	182.76	-1.64%
8	20	298264	140155	0.24343	0.90113	187.86	2.72%



Gambar 3.27 Grafik Hasil Uji Konvergensi Simulasi *Static Structural*

Dari hasil uji konvergensi yang dapat dilihat dalam grafik pada gambar 3.29 dan tabel 3.6 didapatkan metode meshing dengan nilai error terkecil pada ukuran element sebesar 30 mm dengan *relative error* sebesar -1.64%.

3.8 Simulasi Modal



Gambar 3.28 Flowchart Simulasi Modal

1. Pemodelan Mikrostruktur Komposit

Material komposit yang digunakan pada simulasi *modal* sama seperti yang digunakan pada simulasi *Static Structural*, yaitu *E-Glass/Epoxy (Plain Woven)* dengan tipe RVE, tipe *weaving*, fraksi volume, ketebalan, dan properti material material penyusun yang sama. Oleh karena itu konfigurasi, tahapan penodelan mikrostruktur komposit dan hasil properti material yang telah dihomogenisasi adalah sama dengan yang telah dilakukan pada pemodelan mikrostruktur komposit yang sudah dilakukan pada tahap simulasi *Static Structural*.

2. Meshing

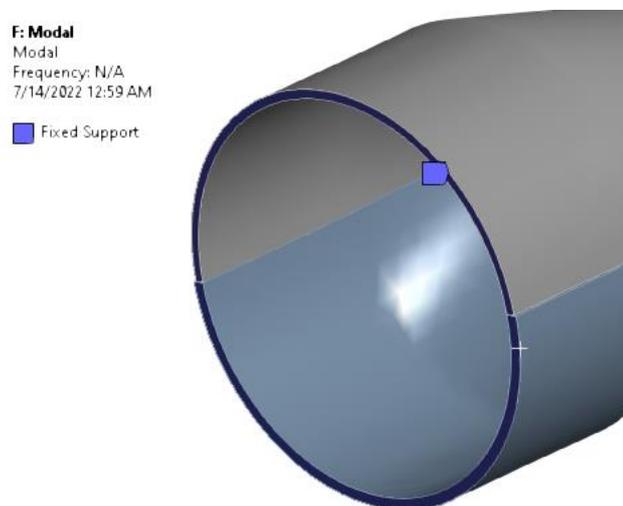
Sebelum dilakukannya pemodelan komposit, model 3D CAD perlu melalui proses meshing terlebih dahulu. Karena geometri yang dipakai pada simulasi *Modal* sama dengan yang digunakan pada simulasi *Static Structural*, maka konfigurasi *mesh* yang digunakan pada simulasi ini sama dengan yang digunakan pada simulasi *Static Structural* namun tanpa menggunakan *mesh refinement*, baik *shell* maupun *shear web*. Rincian ukuran elemen *mesh* yang digunakan akan didapatkan setelah dilakukannya uji konvergensi, yang rinciannya dapat dilihat pada tahap uji konvergensi nanti.

3. Pemodelan Laminasi Komposit

Model laminasi komposit yang digunakan pada simulasi *Modal* adalah sama dengan yang telah dimodelkan pada simulasi *Static Structural*. Laminasi komposit pada *shell* terdiri dari 20 lamina yang masing-masing berketebalan 1 mm. Total ketebalan dari laminasi komposit *shell* adalah 20 mm. Arah orientasi normal dari komposit adalah ke arah *spanwise* dan arah tumpukan lamina komposit adalah normal terhadap permukaan *shell*. Lalu pemodelan komposit pada komponen *shear web* dilakukan pada dua daerah laminasi komposit, yaitu pada sisi kiri dan kanan dari kayu Balsa. Arah tumpukan lamina komposit memiliki dua arah yang masing-masing normal terhadap permukaan. Masing-masing laminasi komposit terdiri dari 10 lamina yang masing-masing berketebalan 1 mm, sehingga total ketebalan laminasi komposit pada masing-masing permukaan adalah 10 mm. Pada tahap ini juga digunakan modul *ANSYS Composite PrepPost (ACP)* yang berfungsi sebagai pemodelan laminasi (*Pre*).

4. Boundary Condition

Pada simulasi *Modal*, *boundary condition* yang diterapkan hanya *fixed support*. *Fixed support* diterapkan pada permukaan pangkal bilah yang merepresentasikan sambungan bilah ke generator.



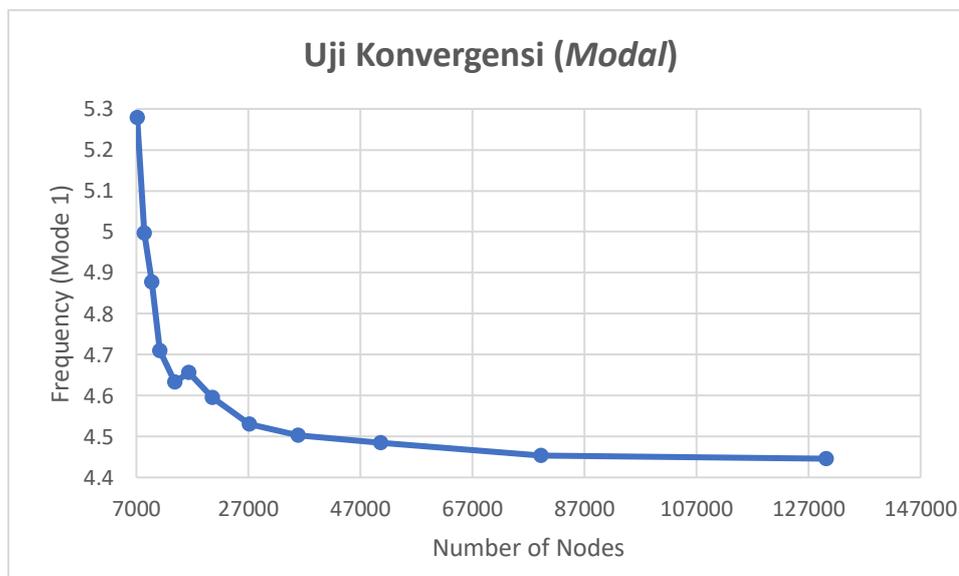
Gambar 3. 29 *Fixed Support* pada Simulasi *Modal*

5. Solving dan Uji Konvergensi

Simulasi *Modal* dilakukan untuk mencari nilai frekuensi natural dengan mode getarannya yang dapat di plot dengan menggunakan ANSYS *post-processing*. Proses solving dilakukan dengan menggunakan *direct solver*. Setelah itu, untuk memastikan bahwa hasil telah konvergen, maka dilakukan uji konvergensi. Uji konvergensi ini juga bertujuan untuk menentukan jumlah dan ukuran elemen yang tepat. Uji konvergensi dilakukan secara manual dengan melakukan variasi ukuran elemen pada *shell* dan *shear web*. Nilai frekuensi natural terkecil digunakan sebagai acuan uji konvergensi ini. Kemudian, hasil ukuran elemen dengan nilai error terkecil dan element quality terbesar akan dipilih untuk menjadi ukuran elemen dalam simulasi ini dan tahap *improvement*. Rincian uji konvergensi yang telah dilakukan adalah sebagai berikut.

Tabel 3. 7 Hasil Uji Konvergensi Simulasi *Modal*

No.	Element Size	Nodes	Element	Skewness	Orthogonal	Frequency	Relative Error
1	140	7137	3087	0.25791	0.89626	5.278351	
2	130	8402	3646	0.25155	0.90386	4.996584	5.64%
3	120	9720	4255	0.24719	0.90617	4.876938	2.45%
4	110	11200	4940	0.24288	0.90856	4.709257	3.56%
5	100	13911	6191	0.24547	0.90738	4.632499	1.66%
6	90	16366	7333	0.24737	0.90211	4.656293	0.51%
7	80	20540	9261	0.24852	0.90344	4.594934	1.34%
8	70	27197	13672	0.24138	0.90728	4.530125	1.43%
9	60	35874	18210	0.24724	0.90744	4.502428	0.62%
10	50	50578	25822	0.24876	0.90521	4.485142	0.39%
11	40	79284	36815	0.24521	0.90221	4.453674	0.71%
12	30	130162	60495	0.24111	0.90467	4.445901	0.17%



Gambar 3. 30 Grafik Hasil Uji Konvergensi Simulasi *Modal*

3.9 Verifikasi dan Validasi

Hasil dari analisis mikromekanik komposit menggunakan ANSYS *Material Designer* perlu dilakukan validasi untuk memastikan bahwa hasil elastisitas ortotropik sudah sesuai dengan teori *rule of mixture*. Validasi ini dilakukan pada komposit *E-Glass/Epoxy (yarn)* dengan memastikan bahwa *Young modulus* dari hasil simulasi masih didalam batas atas dan bawah teoritis, sedangkan untuk *density*, *shear modulus* dan *poisson ratio* akan dilakukan perhitungan *relative error* elastisitas ortotropik secara teoritis.

Hasil simulasi *density* dari komposit dicocokkan dengan perhitungan *density* secara teoritis sebagai berikut.

$$\rho_c = V_f \rho_f + V_m \rho_m$$

$$\rho_c = (0.8)(1450) + (0.2)(1160)$$

$$\rho_c = 2312 \text{ kg/m}^3$$

$$\varepsilon = \frac{\rho_c \text{ teoritis} - \rho_c \text{ simulasi}}{\rho_c \text{ teoritis}} \times 100\%$$

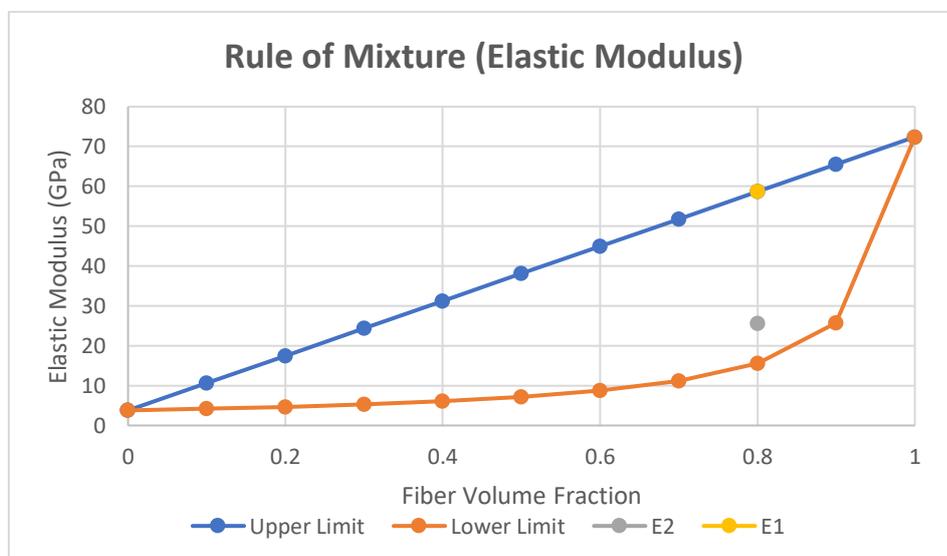
$$\varepsilon = \frac{2312 - 2312}{2312} \times 100\%$$

$$\varepsilon = 0\%$$

Untuk hasil simulasi *Young modulus* secara longitudinal dan transversal dilakukan perhitungan *upper limit* dan *lower limit* dengan persamaan sebagai berikut.

$$E_1 = V_f E_f + V_m E_m$$

$$E_2 = \left(\frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \right)^{-1}$$



Gambar 3. 31 *Rule of Mixture* Pada Modulus Elastisitas *E-Glass/Epoxy (Unidirectional)*

Berdasarkan hasil, dapat dilihat bahwa baik *Young modulus* secara longitudinal dan transversal masih didalam batas teoritis sehingga hasil tersebut dapat dikatakan valid.

Perhitungan nilai *longitudinal shear modulus* (G_{12}) dan *transverse shear modulus* (G_{23}) beserta *relative error* adalah sebagai berikut.

$$G_{12} = G_m \frac{(1 + V_f)G_f + V_m G_m}{V_m G_f + (1 + V_f)G_m}$$

$$G_{12} = 1.4 \frac{(1 + 0.8)(29.672) + (0.2)(1.4)}{(0.2)(29.672) + (1 + 0.8)(1.4)}$$

$$G_{12} = 9.438 \text{ GPa}$$

$$E_r = \frac{G_{12} \text{ teoritis} - G_{12} \text{ simulasi}}{G_{12} \text{ teoritis}} \times 100\%$$

$$E_r = \frac{8.891 - 9.438}{8.891} \times 100\%$$

$$E_r = -6.61\%$$

$$G_{23} = \frac{G_m K_m (G_m + G_f) + 2G_f G_m + K_m (G_f - G_m) V_f}{K_m (G_m + G_f) + 2G_f G_m - (K_m + 2G_m) (G_f - G_m) V_f}$$

$$G_{23} = \frac{(1.4)(4.2)(1.4 + 29.672) + 2(29.672)(1.4) + (4.2)(29.672 - 1.4)(0.8)}{4.2(1.4 + 29.672) + 2(29.672)(1.4) - (4.2 + 2(1.4))(29.672 - 1.4)(0.8)}$$

$$G_{23} = 7.817 \text{ GPa}$$

$$E_r = \frac{G_{23} \text{ teoritis} - G_{23} \text{ simulasi}}{G_{23} \text{ teoritis}} \times 100\%$$

$$E_r = \frac{7.817 - 9.737}{7.817} \times 100\%$$

$$E_r = -24.56\%$$

Sedangkan perhitungan nilai longitudinal poisson ratio (v_{12}) dan transverse poisson ratio (v_{23}) beserta *relative error* adalah sebagai berikut berikut.

$$v_{12} = V_f v_f + V_m v_m$$

$$v_{12} = (0.8)(0.22) + (0.2)(0.35)$$

$$v_{12} = 0.246$$

$$E_r = \frac{v_{12} \text{ teoritis} - v_{12} \text{ simulasi}}{v_{12} \text{ teoritis}} \times 100\%$$

$$E_r = \frac{0.246 - 0.24}{0.246} \times 100\%$$

$$E_r = 2.34\%$$

$$v_{23} = \frac{E_2}{2G_{23}} - 1$$

$$v_{23} = \frac{25.655}{2(9.737)} - 1$$

$$v_{23} = 0.317$$

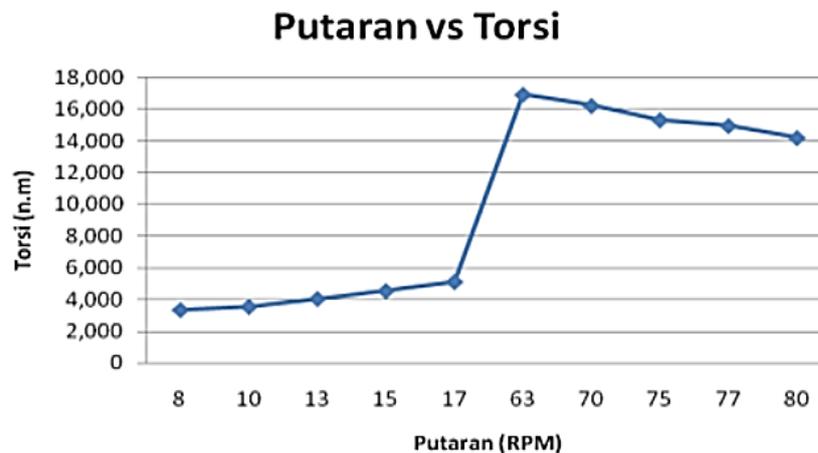
$$E_r = \frac{v_{23} \text{ teoritis} - v_{23} \text{ simulasi}}{v_{23} \text{ teoritis}} \times 100\%$$

$$E_r = \frac{0.317 - 0.318}{0.317} \times 100\%$$

$$E_r = -0.3\%$$

Berdasarkan plot dan perhitungan *error* dari *Young modulus*, *shear modulus*, dan *poisson's ratio* dengan hasil yang kecil, dapat dibuktikan bahwa hasil simulasi telah sesuai dengan teori yang ada.

Selanjutnya untuk memastikan hasil simulasi CFD yang telah dilakukan telah sesuai dengan simulasi sebelumnya, maka akan dilakukan perhitungan error dari nilai hasil simulasi yang telah dilakukan dengan hasil simulasi yang dilakukan oleh perancangan terdahulu. Data yang tersedia dari perancangan sebelumnya menyediakan grafik putaran terhadap torsi dari bilah yang telah dirancang pada *rated wind speed*, yaitu 12 m/s.

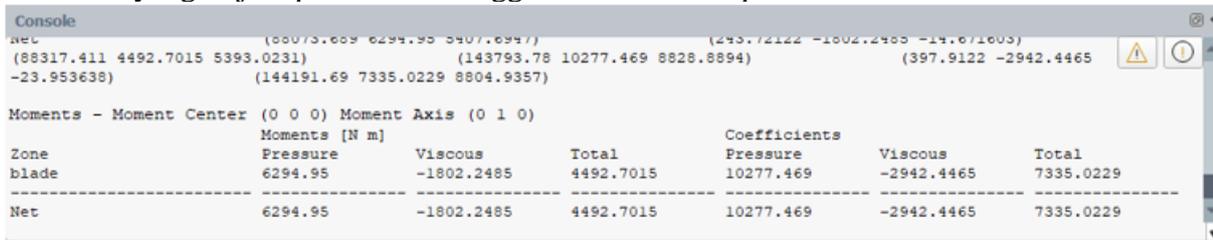


Gambar 3. 32 Putaran vs torsi bilah turbin pada kecepatan angin 12 m/s (Firmansyah & Zulkarnain, 2012)

Pada kecepatan putar 80 rpm, besar torsi pada ketiga bilah adalah sebesar 14000 Nm. Karena pada penelitian ini hanya dilakukan simulasi pada salah satu bilah, maka perlu dicari torsi pada salah satu bilah.

$$\begin{aligned}\tau_{tot} &= N \times \tau \\ 14000 &= 3 \times \tau \\ \tau &= 4666,667 \text{ Nm}\end{aligned}$$

Hasil dari simulasi yang telah dilakukan kemudian diuji coba ulang dengan kecepatan angin 12 m/s dan kecepatan putar 80 rpm. Melalui software ANSYS Fluent, kita dapat mencari total torsi yang terjadi pada bilah menggunakan *Force Reports*.



Moments - Moment Center (0 0 0) Moment Axis (0 1 0)						
Zone	Pressure	Viscous	Total	Coefficients Pressure	Viscous	Total
blade	6294.95	-1802.2485	4492.7015	10277.469	-2942.4465	7335.0229
Net	6294.95	-1802.2485	4492.7015	10277.469	-2942.4465	7335.0229

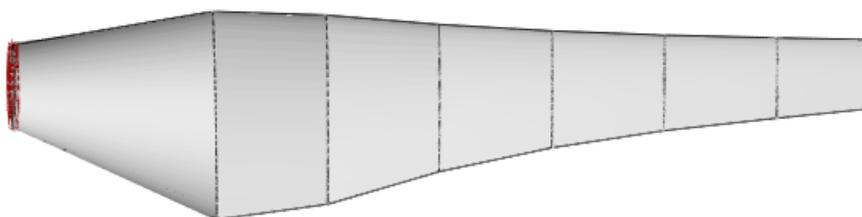
Gambar 3. 33 *Force Report* Bilah Pada ANSYS FLUENT

Dengan kedua nilai tersebut maka error dari simulasi dapat ditemukan dengan melakukan perbandingan nilai torsi pada perancangan terdahulu dengan hasil simulasi sebagai berikut.

$$\begin{aligned}E_r &= \frac{\tau_{perancangan} - \tau_{simulasi}}{\tau_{perancangan}} \times 100\% \\ E_r &= \frac{4666.667 - 4492.7015}{4666.667} \times 100\% \\ E_r &= 3.78\%\end{aligned}$$

Didapatkan error dari hasil simulasi terhadap perancangan terdahulu sebesar 3.78%. Error ini bisa disebabkan oleh metode simulasi dan model turbulensi yang berbeda. Namun nilai error yang relatif kecil membuktikan bahwa metode simulasi yang digunakan masih representatif terhadap simulasi yang telah dilakukan oleh perancangan terdahulu.

Selanjutnya validasi simulasi dari penelitian ini dapat dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi terhadap teori yang telah ada. Pada penelitian ini, digunakan teori *Blade Element Momentum* sebagai beban aerodinamika dan gaya sentrifugal akibat gerakan berputar dari bilah. Gambar 3.36 menunjukkan ilustrasi geometri bilah P3TKEBTKE yang telah disederhanakan dengan membaginya menjadi beberapa *blade element*. Penyederhanaan ini dilakukan untuk menentukan distribusi gaya dan torsi dari tiap *blade element* menggunakan teori *Blade Element Momentum*.



Gambar 3. 34 Ilustrasi Geometri Bilah yang Disederhanakan

Contoh perhitungan yang akan dilakukan menggunakan *blade element* ke-2 pada Tabel 3.1. Pertama-tama, *flow angle* (φ) lokal dari *blade element* perlu dicari sebagai berikut.

$$\varphi = \cos^{-1}\left(\frac{\Omega_r}{U_{rel}}\right)$$

$$\varphi = \cos^{-1}\left(\frac{36.79}{42.36}\right)$$

$$\varphi = 38.62^\circ$$

Angle of attack lokal dari *blade element* dapat dicari sebagai berikut.

$$\alpha = \varphi - \gamma_\lambda$$

$$\alpha = 38.62^\circ - 19.2^\circ$$

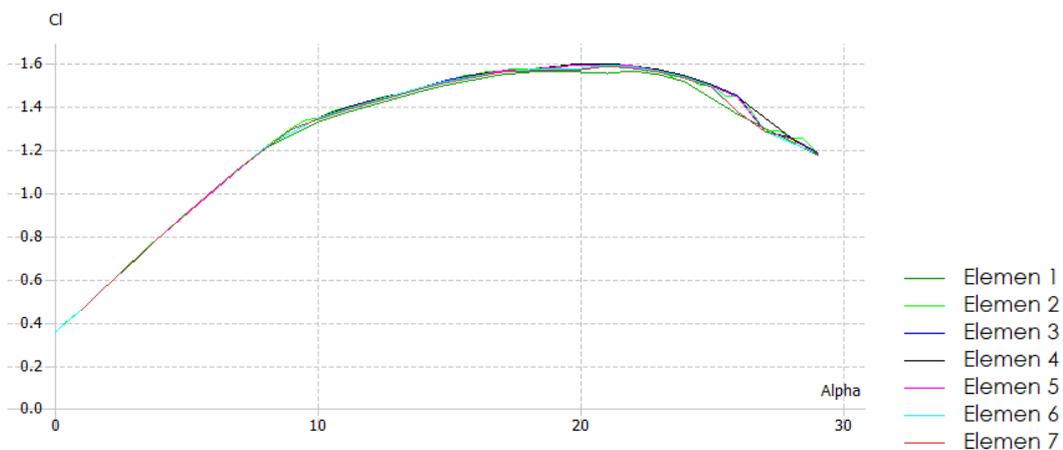
$$\alpha = 19.42^\circ$$

Angle of attack lokal pada tiap *blade element* juga dicari untuk mendapatkan nilai *lift coefficient* (C_L) dan *drag coefficient* (C_D) dengan hasil sebagai berikut.

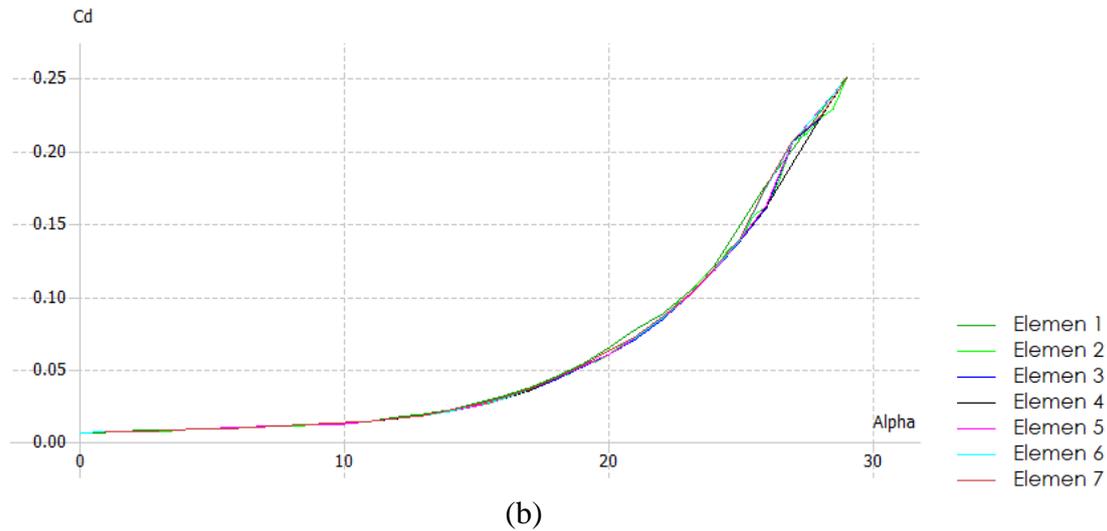
Tabel 3. 8 Nilai bilangan Reynold dan *Angle of Attack* pada tiap *Blade Element*

Element	r (m)	U_0 (m/s)	Ω_r (m/s)	U_{rel} (m/s)	c_λ (m/s)	Re	γ_λ	φ	α
0	0	21	0	21.00	1.2	1725159	0	90.00	0
1	2.2		23.52	31.53	2.99	5057664	32.28	58.20	25.92
2	3.78		36.79	42.36	2.65	6104490	19.2	38.62	19.42
3	5.35		49.98	54.21	2.08	6367533	12.24	28.01	15.77
4	6.93		63.25	66.65	1.67	6491236	8.18	21.71	13.53
5	8.5		76.44	79.27	1.38	6537835	5.57	17.67	12.10
6	10.08		89.71	92.14	1.17	6563795	3.77	14.85	11.08
7	11.4		100.80	102.96	1.01	6410254	2.46	13.09	10.63

Setelah *angle of attack* lokal didapat, *lift coefficient* (C_L) dan *drag coefficient* (C_D) dapat dicari dengan menggunakan *software XFOIL*. Kedua nilai tersebut dicari dengan bilangan Reynold dan *angle of attack* dari tiap *blade element*.



(a)



Gambar 3. 35 Grafik (a) C_L/α dan (b) C_D/α dari tiap elemen

Berdasarkan hasil, dapat dilihat bahwa nilai C_L dan C_D terhadap α tidak berbeda secara signifikan terhadap bilangan *Reynold*. Pada elemen ke-2, didapat nilai C_L dan C_D pada $\alpha = 19.42^\circ$ sebesar 1.566 dan 0.056. nilai C_L dan C_D terhadap variasi α pada tiap *blade element* juga dicari dengan hasil sebagai berikut.

Tabel 3. 9 Nilai C_L dan C_D terhadap *Angle of Attack* pada tiap *Blade Element*

Element	Re	α	C_L	C_D
0	1725159	0	0	1.2
1	5057664	25.92	1.36	0.162
2	6104490	19.42	1.566	0.056
3	6367533	15.77	1.53	0.031
4	6491236	13.53	1.466	0.021
5	6537835	12.10	1.42	0.016
6	6563795	11.08	1.384	0.014
7	6410254	10.63	1.36	0.013

Setelah itu sebelum menghitung gaya-gaya yang bekerja pada bilah, *Prandtl tip function* (f_λ) perlu ditentukan sebagai faktor *tip loss correction* sebagai berikut.

$$F_\lambda(\varphi) = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\exp \left(-\frac{\frac{B}{2} \left(1 - \frac{r}{R}\right)}{\left(\frac{r}{R}\right) \sin \varphi} \right) \right)$$

$$F_\lambda(\varphi) = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\exp \left(-\frac{\frac{1}{2} \left(1 - \frac{4.38}{12}\right)}{\left(\frac{4.38}{12}\right) \sin 19.42^\circ} \right) \right)$$

$$F_\lambda(\varphi) := 0.93$$

Selanjutnya, gaya dan torsi yang bekerja pada *blade element* dikalkulasi menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$dN_2 = F_\lambda(\varphi) \frac{B}{2} U_{rel}^2 (C_L(\varphi - \gamma_\lambda) \sin \varphi - C_D(\varphi - \gamma_\lambda) \cos \varphi) \rho c_\lambda dr$$

$$N_2 = \int_{r_2}^{r_3} F_\lambda(\varphi) \frac{B}{2} U_{rel}^2 (C_L(\varphi - \gamma_\lambda) \sin \varphi - C_D(\varphi - \gamma_\lambda) \cos \varphi) \rho c_\lambda dr$$

$$N_2 = (0.93 \frac{1}{2} 42.36^2 (1.566 \sin 19.42^\circ - 0.056 \cos 19.42^\circ) 1.225 \cdot 2.65) (5.35 - 3.78)$$

$$N_2 = 1603.53 N$$

$$dT_2 = F_\lambda(\varphi) \frac{B}{2} U_{rel}^2 (C_L(\varphi - \gamma_\lambda) \cos \varphi + C_D(\varphi - \gamma_\lambda) \sin \varphi) \rho c_\lambda dr$$

$$T_2 = \int_{r_2}^{r_3} F_\lambda(\varphi) \frac{B}{2} U_{rel}^2 (C_L(\varphi - \gamma_\lambda) \cos \varphi + C_D(\varphi - \gamma_\lambda) \sin \varphi) \rho c_\lambda dr$$

$$T_2 = (0.93 \frac{1}{2} 42.36^2 (1.566 \cos 19.42^\circ + 0.056 \sin 19.42^\circ) 1.225 \cdot 2.65) (5.35 - 3.78)$$

$$T_2 = 3393.94 N$$

$$dQ_{x2} = F_\lambda(\varphi) \frac{B}{2} U_{rel}^2 (C_L(\varphi - \gamma_\lambda) \cos \varphi + C_D(\varphi - \gamma_\lambda) \sin \varphi) \rho c_\lambda r dr$$

$$Q_{x2} = \int_{r_2}^{r_3} F_\lambda(\varphi) \frac{B}{2} U_{rel}^2 (C_L(\varphi - \gamma_\lambda) \cos \varphi + C_D(\varphi - \gamma_\lambda) \sin \varphi) \rho c_\lambda r dr$$

$$Q_{x2} = (0.93 \frac{1}{2} 42.36^2 (1.566 \cos 19.42^\circ + 0.056 \sin 19.42^\circ) 1.225 \cdot 2.65) (5.35^2 - 3.78^2)$$

$$Q_{x2} = 13287.28 Nm$$

$$dQ_{y2} = F_\lambda(\varphi) \frac{B}{2} U_{rel}^2 (C_L(\varphi - \gamma_\lambda) \sin \varphi - C_D(\varphi - \gamma_\lambda) \cos \varphi) \rho c_\lambda r dr$$

$$Q_{y2} = \int_{r_2}^{r_3} F_\lambda(\varphi) \frac{B}{2} U_{rel}^2 (C_L(\varphi - \gamma_\lambda) \sin \varphi - C_D(\varphi - \gamma_\lambda) \cos \varphi) \rho c_\lambda r dr$$

$$Q_{y2} = (0.93 \frac{1}{2} 42.36^2 (1.566 \sin 19.42^\circ - 0.056 \cos 19.42^\circ) 1.225 \cdot 2.65) (5.35^2 - 3.78^2)$$

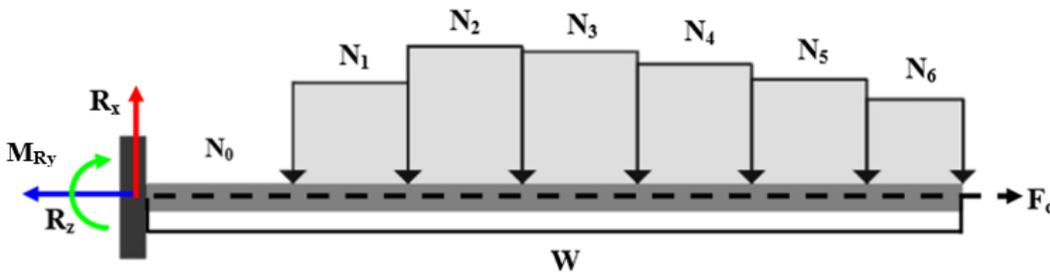
$$Q_{y2} = 5125.21 Nm$$

Kalkulasi dilakukan pada seluruh *blade element* dengan hasil sebagai berikut.

Tabel 3. 10 Hasil Kalkulasi Gaya Aksial dan Torsi pada tiap *Blade Element*

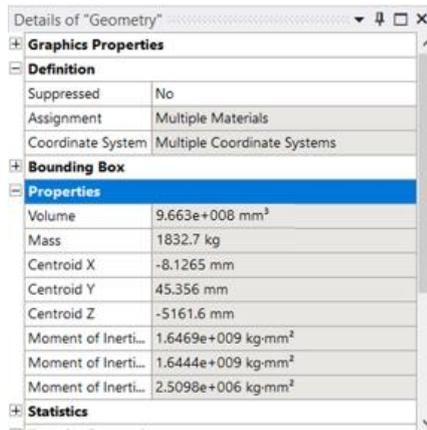
Element	r (m)	U_{rel} (m/s)	φ	C_L	C_D	$F_{\lambda}(\varphi)$	N (N)	T (N)	Q_x (Nm)	Q_y (Nm)
0	0	21.00	90.00	0	1.2	1	0	602.89	467.24	0.00
1	2.2	31.53	58.20	1.36	0.162	0.99	1183.09	1491.79	3490.78	4374.10
2	3.78	42.36	38.62	1.566	0.056	0.93	1603.53	3393.94	13287.28	9856.18
3	5.35	54.21	28.01	1.53	0.031	0.88	1545.71	4824.62	26487.19	13407.76
4	6.93	66.65	21.71	1.466	0.021	0.81	1399.29	5757.22	40674.74	15521.01
5	8.5	79.27	17.67	1.42	0.016	0.73	1220.67	6300.66	54437.70	16663.67
6	10.08	92.14	14.85	1.384	0.014	0.60	985.79	5116.69	51627.44	13129.57
7	11.4	102.96	13.09	1.36	0.013	0	0	0	0	0

Dengan didapatkannya gaya aksial dan torsi dari tiap blade element, maka reaksi pada tumpuan kearah vertical dapat dihitung menggunakan *Simple Beam Model*. Perhitungan gaya reaksi tumpuan dilakukan untuk membandingkan reaksi dari perhitungan tangan dengan yang didapat dari simulasi. Gaya reaksi dihitung pada bidang XZ dan YZ dengan hukum kesetimbangan. *Freebody diagram* dari perhitungan gaya reaksi pada bilah turbin angin dimodelkan menjadi sebuah beam yang diberikan *fixed support* pada salah satu sisinya seperti berikut.



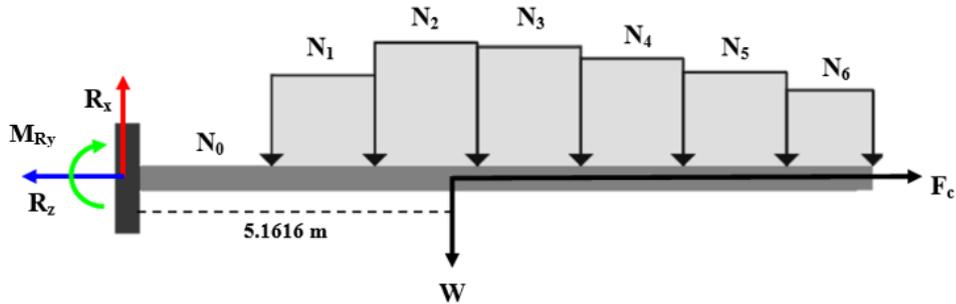
Gambar 3. 36 *Free Body Diagram* Pada Bidang XZ

Pada bidang XZ, bilah mengalami beban normal yang menyebabkan bilah berputar dan beban akibat berat dari bilah itu sendiri, yang disebut sebagai beban gravitasi. Massa dari bilah terdistribusi secara *non-uniform* terhadap span. Untuk memudahkan perhitungan, maka dapat disederhanakan dengan menggunakan *centroid* dari bilah yang dapat dilihat pada modul ANSYS *Static Structural*.

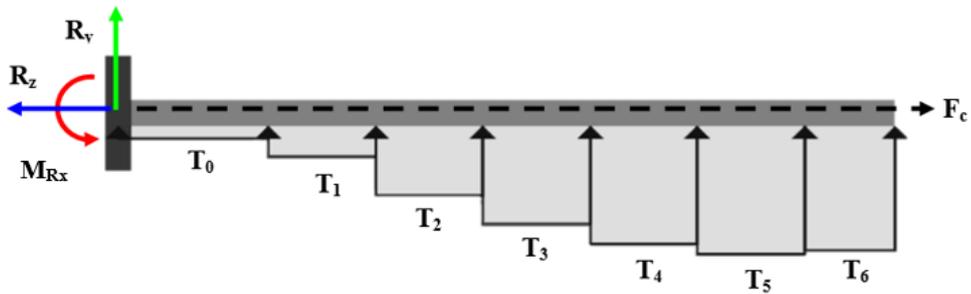


Gambar 3. 37 Letak *Centroid* dari Bilah Turbin Angin

Dapat dilihat bahwa letak *centroid* dari bilah berada pada -5.151 m terhadap sumbu Z. *Centroid* ini adalah sebagai pusat massa yang akan digunakan sebagai pusat beban gravitasi dan sentrifugal, seperti pada gambar 3.40.



Gambar 3. 38 *Free Body Diagram* Bidang XZ Dengan Centroid



Gambar 3. 39 *Free Body Diagram* Bidang YZ

Nilai dari masing-masing reaksi pada tumpuan dapat ditentukan menggunakan hukum kesetimbangan melalui perhitungan berikut:

- Gaya reaksi tumpuan kearah sumbu x (R_x)

$$\sum F_x = 0$$

$$R_x - N_0 - N_1 - N_2 - N_3 - N_4 - N_5 - N_6 - N_7 - W = 0$$

$$R_x = N_0 + N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6 + N_7 + mg$$

$$R_x = 0 + 1183.09 + 1603.53 + 1545.71 + 1399.29 + 1220.67 + 985.79 + 0$$

$$+ (1832.7)(9.8)$$

$$R_x = 25898.54 \text{ N}$$

- Gaya reaksi tumpuan kearah sumbu y (R_y)

$$\sum F_y = 0$$

$$R_y + T_0 + T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7 = 0$$

$$R_y = -T_0 - T_1 - T_2 - T_3 - T_4 - T_5 - T_6 - T_7$$

$$R_y = 0 - 1491.79 - 3393.94 - 4824.62 - 5757.22 - 6300.66 - 5116.69 - 0$$

$$R_y = -26884.92 \text{ N}$$

- Gaya reaksi tumpuan kearah sumbu z (R_z)

$$\sum F_z = 0$$

$$-R_z + m\omega^2 r = 0$$

$$R_z = m\omega^2(r_{centroid} + r_{hub})$$

$$R_z = (1832.7)(8.4^2)(5.1616 + 0.6)$$

$$R_z = 745063.1016 \text{ N}$$

- Gaya reaksi moment sumbu x (M_{Rx})

$$\sum M_{Rx} = 0$$

$$M_{Rx} + Q_{x0} + Q_{x1} + Q_{x2} + Q_{x3} + Q_{x4} + Q_{x5} + Q_{x6} + Q_{x7} = 0$$

$$-M_{Rx} = Q_{x0} + Q_{x1} + Q_{x2} + Q_{x3} + Q_{x4} + Q_{x5} + Q_{x6} + Q_{x7}$$

$$-M_{Rx} = 467.24 + 3490.78 + 13287.28 + 26487.19 + 40674.74 + 54437.7 + 51627.44$$

$$+ 0$$

$$M_{Rx} = -190472.37 \text{ N.m}$$

- Gaya reaksi moment sumbu y (M_{Ry})

$$\sum M_{Ry} = 0$$

$$M_{Ry} + Q_{y0} + Q_{y1} + Q_{y2} + Q_{y3} + Q_{y4} + Q_{y5} + Q_{y6} + Q_{y7} = 0$$

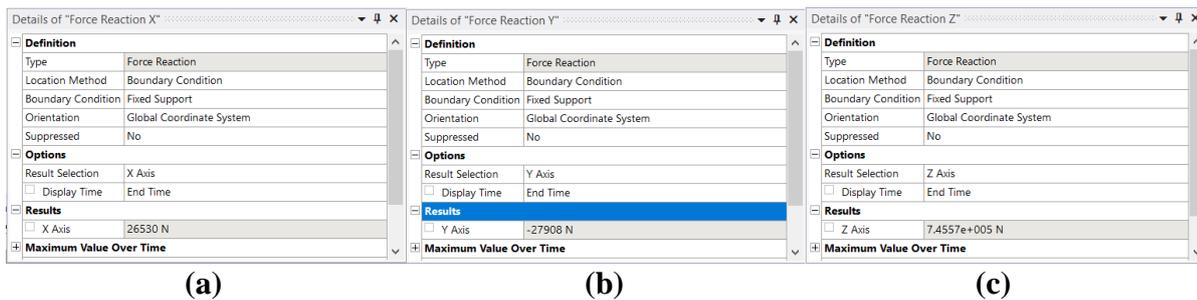
$$-M_{Ry} = Q_{y0} + Q_{y1} + Q_{y2} + Q_{y3} + Q_{y4} + Q_{y5} + Q_{y6} + Q_{y7} + mgr$$

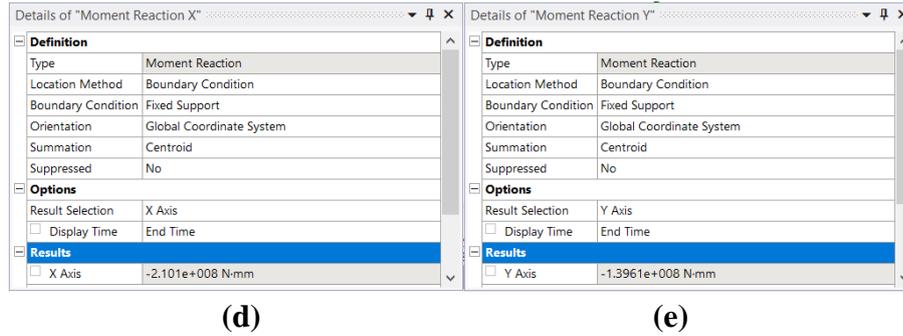
$$-M_{Ry} = 0 + 4374.1 + 9856.18 + 13407.76 + 15521.01 + 16663.67 + 13129.57 + 0$$

$$+ (1832.7)(9.8)(5.1614)$$

$$M_{Ry} = -165653.41 \text{ N.m}$$

Setelah itu untuk mendapatkan nilai reaksi pada simulasi *Static Structural* digunakan *probe Force Reaction* dan *Moment Reaction* pada *Fixed Support* seperti pada gambar 3.42.





Gambar 3. 40 Force Reaction dan Moment Reaction pada Fixed Support Hasil Simulasi

Dengan kelima nilai pada reaksi tumpuan tersebut maka error dari simulasi dapat ditemukan dengan melakukan perbandingan nilai reaksi pada tumpuan perhitungan dan hasil simulasi sebagai berikut.

- Error gaya reaksi sumbu x

$$E_r = \frac{R_x - F_{rx}}{R_x} \times 100\%$$

$$E_r = \frac{25898.54 - 26530}{25898.54} \times 100\%$$

$$E_r = -2.44\%$$

- Error gaya reaksi sumbu y

$$E_r = \frac{R_y - F_{ry}}{R_y} \times 100\%$$

$$E_r = \frac{-26884.92 - (-27908)}{-26884.92} \times 100\%$$

$$E_r = 3.805\%$$

- Error gaya reaksi sumbu z

$$E_r = \frac{R_z - F_{rz}}{R_z} \times 100\%$$

$$E_r = \frac{745063.1016 - 745570}{745063.1016} \times 100\%$$

$$E_r = -0.000569\%$$

- Error moment reaksi sumbu x

$$E_r = \frac{R_{Qx} - M_{rx}}{R_{Qx}} \times 100\%$$

$$E_r = \frac{-190472.37 - (-210100)}{-190472.37} \times 100\%$$

$$E_r = -10.35\%$$

➤ Error moment reaksi sumbu y

$$E_r = \frac{R_{Qy} - M_{rx}}{R_{Qy}} \times 100\%$$

$$E_r = \frac{-165653.41 - (-139510)}{-165653.41} \times 100\%$$

$$E_r = -18.65\%$$

Berdasarkan hasil perhitungan *error*, didapat bahwa error gaya reaksi menunjukkan persentase yang cukup rendah. Namun pada moment reaksi memiliki *error* yang cukup tinggi. Hal ini disebabkan karena metode *Blade Element Momentum* berbasis asumsi fluida sebagai aliran yang *inviscid* dengan model *natural transition* sedangkan model turbulensi CFD yang digunakan pada penelitian ini adalah $k-\omega$ SST yang menggunakan model *fully turbulent*. Oleh karena itu, perhitungan menggunakan metode *Blade Element Momentum* mengabaikan efek *viscous* dari fluida yang mengalir, sehingga tidak dapat menangkap efek separasi dan vortex pada *tip* yang mungkin terdapat pada bilah (Alkhabbaz, Yang, Weerakoon, & Lee, 2021). Selain itu, efek segmentasi dari elemen dan interpolasi *polar data* juga berpengaruh terhadap akurasi dari perhitungan *Blade Element Momentum* (Bangga, 2018). Segmentasi elemen pada bilah mengakibatkan beban angin yang terjadi pada bilah dari kontinu menjadi diskrit, sehingga distribusi beban akan menjadi kurang akurat. Ukuran dari domain fluida pada CFD juga berpengaruh terhadap hasil simulasi CFD dimana semakin besar domainnya maka semakin baik. Namun, hal tersebut membutuhkan biaya komputasi yang lebih tinggi. Oleh karena itu, error yang masih dibawah 20% masih dapat diterima karena efek dari simplifikasi model analitis yang telah dilakukan.

3.10 Analisa Kegagalan

Untuk memahami mekanisme kegagalan bilah, perlu dilakukan analisis secara komprehensif penyebab potensial kegagalannya. Terdapat dua analisa yang akan dilakukan, yaitu Analisa Statik dan Analisa Resonansi Angin.

3.10.1 Analisa Statik

Analisa statik dilakukan dengan mengevaluasi distribusi tegangan dan kriteria kegagalan dari model. kriteria kegagalan *Tsai-Wu* digunakan untuk mengevaluasi tipe kegagalan dan keparahan dari bilah. Secara umum, untuk komposit FRP, kriteria ini dapat memprediksi apakah material telah mencapai titik kegagalan dengan persamaan 2.41. Hasil nilai kriteria kegagalan *Tsai-Wu* yang melebihi 1 mengindikasikan potensi kegagalan. Pada Analisa ini, kegagalan dapat diidentifikasi dengan kriteria kegagalan *Tsai-Wu* yang terdapat pada ANSYS, dan spektrum warna di plot untuk merepresentasikan daerah dan tingkat keparahan kegagalan. Kegagalan statik diasumsikan bahwa bilah turbin angin mengalami kegagalan pada *cut-off wind speed* dengan kecepatan angin sebesar 21 m/s dan pada *maximum rotor speed* dengan kecepatan putar sebesar 80 rad/s.

3.10.2 Analisa Resonansi Angin

Sebagai tambahan dari analisa statik yang telah dilakukan, resonansi struktural yang disebabkan oleh fenomena *vortex shedding* juga dianalisa. ketika frekuensi natural dari sebuah struktur cocok dengan frekuensi gaya eksternal, maka efek resonansi dapat mengamplifikasi

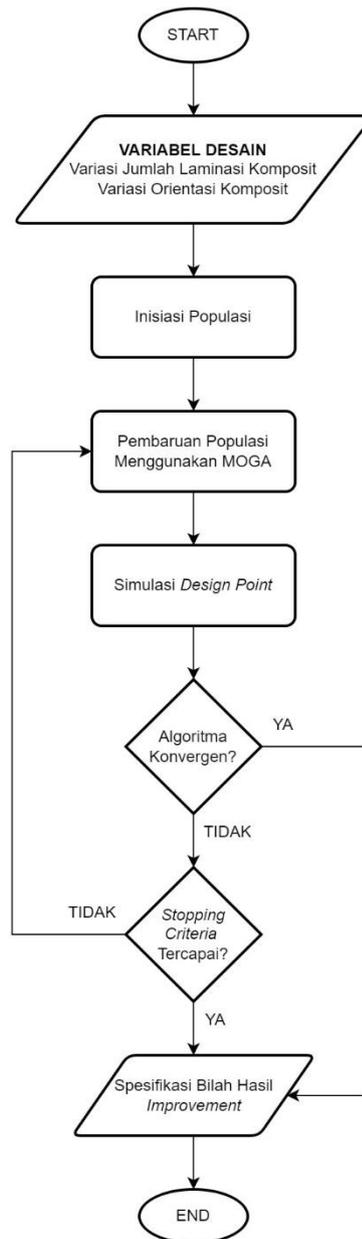
respons struktural. Karena efek dari *vortex shedding* pada bilah turbin angin adalah beban dinamis, maka frekuensi dari *vortex shedding* mempengaruhi mode resonansi pada bilah. Pada sudut serang yang tinggi, bagian bilah turbin angin akan berperilaku sebagai *bluff body* yang menyebabkan *vortex shedding* dan karenanya akan mengalami beban yang berfluktuasi. Secara jangka panjang, efek resonansi ini juga dapat meningkatkan probabilitas kegagalan *fatigue* akibat getaran yang dialami. Namun, mengestimasi frekuensi gaya eksternal di struktur bilah pada kondisi kecepatan angin yang tinggi sangatlah susah. Permasalahan tersebut dapat disimplifikasi dengan mencari kecepatan angin yang dapat menyebabkan resonansi pada struktur bilah dengan menggunakan persamaan 2.42. Beberapa penelitian terdahulu, seperti pada studi eksperimental yang berjudul *Sebuah penelitian sebelumnya yang berjudul Asymmetric Vortex Shedding Flow Past an Inclined Flat Plate at High Incidence* (Lam & Leung, 2005) telah melakukan eksperimen investigasi peristiwa *vortex shedding* pada sebuah plat *angle of attack* $\alpha = 20^\circ, 25^\circ, \text{ dan } 30^\circ$ menyarankan bahwa vortex frequency dapat diperkirakan menggunakan *Strouhal Number* sebesar 0.15. Selain itu, terdapat juga studi simulasi numerik yang berjudul *Vortex Shedding from a Wind Turbine Blade Section at High Angles of Attack* (Meskell & Alberto, 2013) yang menyarankan bahwa ketika panjang *chord* dari bagian bilah digunakan untuk frekuensi *vortex shedding*, *Strouhal Number* bervariasi dari 0,12 hingga 0,16 untuk sudut negatif = $[-40^\circ \rightarrow 150^\circ]$ dan dari 0,11 hingga 0.15 untuk sudut positif = $[40^\circ \rightarrow 140^\circ]$. Oleh karena itu digunakan nilai *Strouhal Number* sebesar 0.15 yang didasari oleh kedua penelitian tersebut, sehingga persamaan *Strouhal Number* menjadi.

$$0.15 = f \frac{B}{U} \dots \dots \dots (3.1)$$

Pada analisa ini, frekuensi natural yang telah didapat dari simulasi *Modal* digunakan untuk mengestimasi kecepatan angin yang dapat menyebabkan resonansi struktur bilah, dengan mengasumsikan bahwa resonansi terjadi ketika frekuensi natural bilah cocok dengan frekuensi *vortex shedding* yang menyebabkan gaya eksternal. Frekuensi natural yang digunakan adalah rata-rata dari frekuensi *flapwise* dan *edgewise*. Frekuensi natural yang digunakan adalah rata-rata dari frekuensi *flapwise* dan *edgewise*. Kegagalan diasumsikan bahwa bilah turbin angin mengalami kegagalan apabila terdapat fenomena *vortex shedding* pada kecepatan angin operasional dari bilah turbin angin, yaitu pada rentang kecepatan angin hingga 21 m/s yang merupakan batas maksimum operasional turbin angin.

3.11 *Improvement*

Desain struktural bilah turbin angin melibatkan banyak pertimbangan seperti kekuatan, stabilitas, biaya dan getaran. Massa adalah salah satu pertimbangan perbaikan yang penting untuk desain sebuah bilah. Distribusi massa dari bilah mempengaruhi besarnya gaya sentrifugal dan gaya gravitasi yang bekerja ketika beroperasi. Bilah dengan distribusi massa yang baik tidak hanya akan memberikan beban yang lebih rendah pada bilah dan komponen turbin angin yang lain, tetapi juga mengurangi biaya, yang bermanfaat untuk seluruh sistem turbin, termasuk fondasi. Oleh karena itu, perbaikan menggunakan proses optimasi struktural untuk redistribusi massa bilah akan dilakukan pada penelitian ini. Proses *improvement* dilakukan menggunakan ANSYS *Direct Optimization* dengan menggunakan metode *Multi-Objective Genetic Algorithm* (MOGA). Proses ini dapat dilihat pada gambar 3.43 dibawah.



Gambar 3. 41 Flowchart Proses *Improvement* Bilah

MOGA (*Multi-Objective Genetic Algorithm*) yang digunakan dalam *improvement* ini adalah varian *hybrid* dari NSGA-II (*Non-dominated Sorted Genetic Algorithm-II*) berdasarkan konsep elitisme terkontrol. Tipe ini mendukung semua jenis parameter input di ANSYS. Skema peringkat *Pareto* dilakukan dengan metode penyortiran yang cepat dan tidak didominasi yang merupakan metode yang jauh lebih cepat daripada metode peringkat *Pareto* tradisional. Solusi *Pareto front* pertama diarsipkan dalam sampel terpisah secara internal dan berbeda dari set sampel yang berevolusi. Hal ini bertujuan untuk memastikan gangguan minimal pada pola *Pareto front* yang sudah tersedia dari iterasi sebelumnya.

Jumlah sampel yang telah diinisiasi diulang dan diperbarui dengan setiap iterasi. Jumlah sampel tersebut harus lebih besar dari atau sama dengan jumlah parameter input dan output yang diaktifkan, tetapi kurang dari atau sama dengan jumlah sampel awal. Pada penelitian ini digunakan jumlah iterasi maksimum sebesar 25 dengan 50 sampel per iterasi. Persentase *Pareto*

maksimum yang diijinkan adalah 70% dan target persentase *convergence stability* sebesar 2%. Adapun *objective function*, *constraint*, dan *design variable* dari proses MOGA adalah sebagai berikut.

Tabel 3. 11 *Variables, Constraints, dan Objective* Dari Proses MOGA

<i>Variables</i>	Jumlah Laminasi Komposit Tipe RVE Komposit Orientasi Komposit
<i>Constraints</i>	Safety Factor ≥ 1.485 First Natural Frequency ≥ 1.575 Hz <i>Flapwise</i> Deflection ≤ 4 m
<i>Objective</i>	Minimize Weight

Jumlah laminasi komposit dipilih sebagai variabel *improvement* karena berhubungan dengan massa dari bilah. Selain jumlah laminasi komposit, variabel *improvement* pada bilah juga menggunakan pengubahan orientasi komposit. Orientasi komposit biasanya dipertimbangkan pada manufaktur bilah turbin angin karena perbedaan kekuatan terhadap beban geser dan tekan. Adapun variasi orientasi dan tipe RVE yang digunakan sebagai variable desain pada penelitian ini dengan rincian seperti pada tabel 3.12 serta gambar 3.44 dan gambar 3.45.

Tabel 3. 12 Variasi Orientasi dan Tipe RVE

No.	Orientasi Serat	Tipe RVE	Ketebalan
1	$\pm 35^\circ$	<i>Unidirectional</i>	1 mm
2	$\pm 45^\circ$		1 mm
3	$\pm 55^\circ$		1 mm
4	0°	<i>Plain Woven</i>	1 mm
5	35°		1 mm
6	45°		1 mm
7	55°		1 mm

Layer	Sudut	Lamina
1		
2	35	Unidirectional
0,5		
1	-35	Unidirectional
0		

(a)

Layer	Sudut	Lamina
1		
2	45	Unidirectional
0,5		
1	-45	Unidirectional
0		

(b)

Layer	Sudut	Lamina
1		
2	55	Unidirectional
0,5		
1	-55	Unidirectional
0		

(c)

Gambar 3. 42 Variasi Orientasi Komposit tipe *Unidirectional* dengan orientasi (a) $\pm 35^\circ$, (b) $\pm 45^\circ$ dan (c) $\pm 55^\circ$

	Layer	Sudut	Lamina
1	1	35	Plain Woven
0			

(a)

	Layer	Sudut	Lamina
1	1	45	Plain Woven
0			

(b)

	Layer	Sudut	Lamina
1	1	55	Plain Woven
0			

(c)

Gambar 3. 43 Variasi Orientasi Komposit tipe *Plain Woven* dengan orientasi (a) 35°, (b) 45° dan (c) 55°

Variabel desain tersebut akan digunakan untuk menciptakan *design point* dan dilakukan simulasi statik dan *Modal* untuk memastikan apakah material telah mempunyai kekuatan material yang cukup untuk menahan beban dengan deformasi terbatas sebesar 4 mm dan aman terhadap resonansi angin. Berdasarkan standar *International Electrotechnical Commission* (IEC) 1400-1, *safety factor* yang diperbolehkan pada desain struktur bilah turbin angin komersial seminimal mungkin sebesar 1.485 (Musial & Butterfield, 1997). Lalu agar bilah aman terhadap resonansi angin dengan kecepatan angin lebih dari 21 m/s, maka frekuensi natural minimal dari bilah dapat diperkirakan menggunakan *Strouhal Number* dengan perhitungan sebagai berikut.

$$B = c_{avg} = 2 \text{ m}$$

$$f \frac{B}{U} = 0.15$$

$$f = 0.15 \frac{U}{B}$$

$$f = (0.15) \frac{21}{2}$$

$$f = 1.575 \text{ Hz}$$

Selain itu, model turbin angin yang telah dirancang oleh P3TKEBTKE mempunyai distribusi panjang *chord* dan sudut *twist* non-linear non-linear dari panjang *chord blade* dan sudut *twist* seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.25. Linearisasi profil blade menjadi praktik umum dalam industri turbin angin karena menyediakan geometri bilah menjadi lebih sederhana, dapat meringankan kompleksitas manufaktur, mengurangi tekukan untuk menghindari konsentrasi tegangan, dan untuk mengurangi biaya produksi. Beberapa studi dan pendekatan telah diadopsi untuk linearisasi profil blade, salah satunya adalah penelitian yang berjudul “*A novel linearization approach of chord and twist angle distribution for 10 kW horizontal axis wind turbine*”. Berdasarkan penelitian ini, linearisasi profil bilah dapat dilakukan antara elemen sepanjang rentang *span* dari bilah. Profil bilah dapat dilinearisasi melalui rentang antara elemen dengan profil panjang *chord* dan profil sudut *twist* dapat diperkirakan sebagai berikut (Alkhabbaz, Yang, Weerakoon, & Lee, 2021).

$$C_i = C_x + \left[\frac{C_{x'} - C_x}{r_{x'} - r_x} \right] (r_i - r_x) \dots \dots \dots (3.2)$$

$$\beta_i = \beta_x + \left[\frac{\beta_{x'} - \beta_x}{r_{x'} - r_x} \right] (r_i - r_x) \dots \dots \dots (3.3)$$

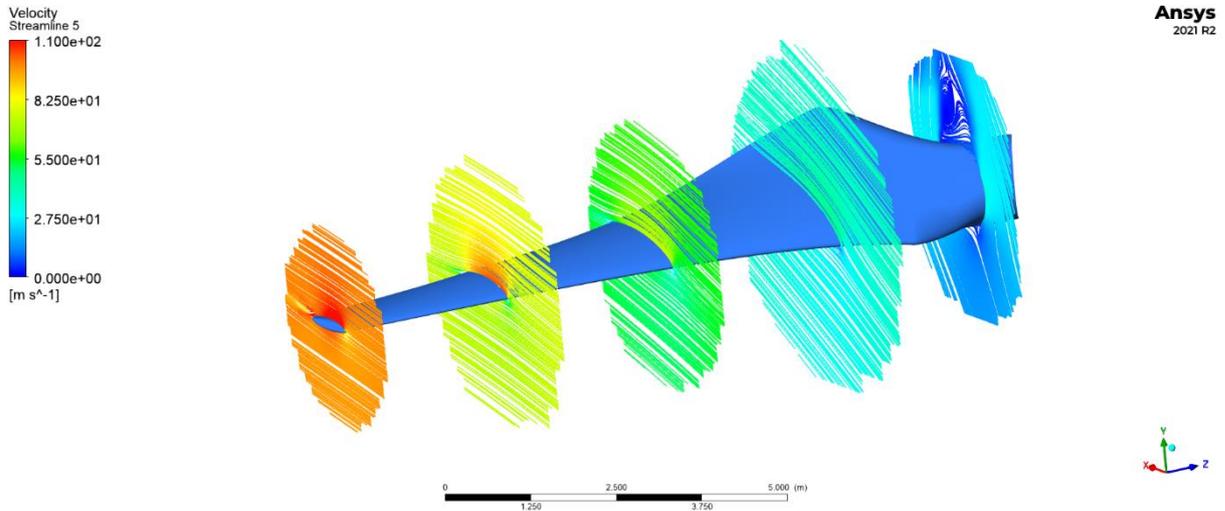
Di mana subskrip x mengacu pada posisi elemen bilah antara titik kontrol. Linearisasi tersebut diterapkan untuk mendapat seluruh profil panjang *chord* dan sudut *twist* pada seluruh elemen bilah.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

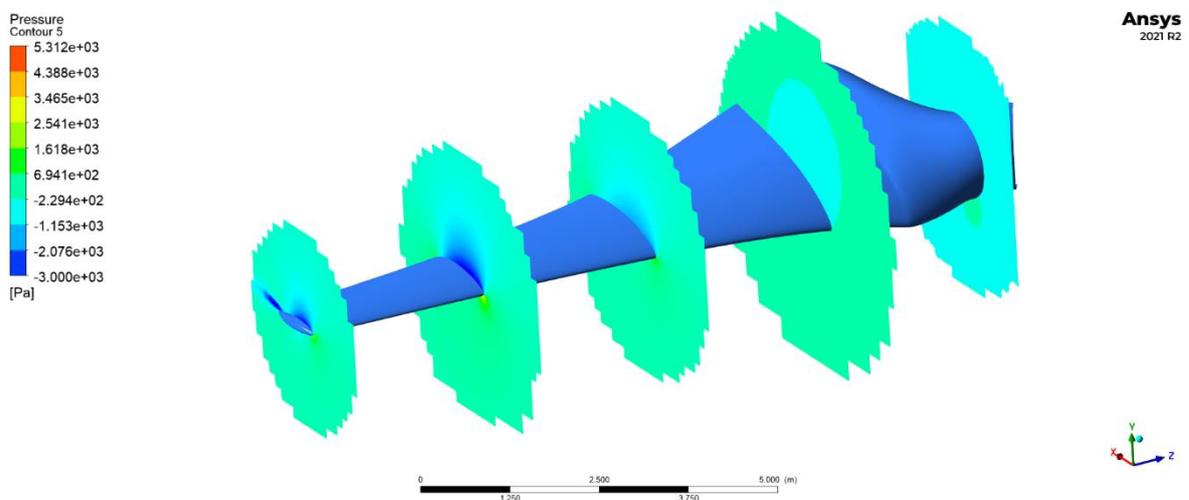
4.1 Analisa Kegagalan Bilah

4.1.1. Analisa Aerodinamika



Gambar 4. 1 *Streamline* dan Kontur Kecepatan Angin Pada Bagian Bilah

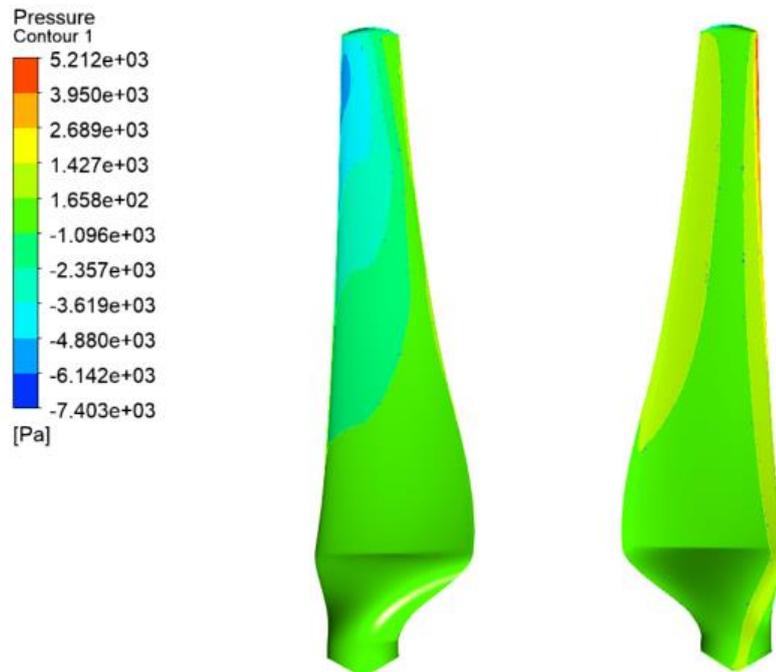
Gambar 4.1 menunjukkan *streamline* bilah turbin angin pada jarak 6%, 25%, 50%, 75% dan 95% terhadap panjang *span*. Dapat diamati bahwa arah angin berbeda pada tiap jarak *span*. Hal itu disebabkan oleh gerakan berputar dari bilah. Semakin ke ujung bilah, maka *headwind* akan lebih tinggi sehingga mengakibatkan resultan kecepatan angin lebih tinggi juga dengan arah yang semakin condong ke arah putar bilah. Berdasarkan gambar, dapat terlihat bahwa tidak terjadi separasi antara angin dengan permukaan bilah, sehingga pada kondisi ini bilah tidak terjadi *stall*.



Gambar 4. 2 Kontur *Pressure* Pada Bagian Bilah

Pada gambar 4.2, terlihat bahwa tekanan angin tertinggi berada pada *leading edge* dari bilah. Hal ini yang menimbulkan gaya *drag*, yang melawan perputaran dari bilah. Selain itu,

dapat dilihat juga bahwa tekanan terendah terdapat pada sisi *suction* dari bilah. Kontur berbentuk *airfoil* menyebabkan aliran angin pada sisi *pressure* lebih rendah dan sisi *suction* lebih tinggi, sehingga terjadi tekanan yang lebih tinggi pada sisi *pressure* dan tekanan yang lebih rendah pada sisi *suction*. Resultan dari gaya *lift* dan *drag* pada arah sumbu y menyebabkan gaya tangensial. Sedangkan resultan gaya *lift* dan *drag* pada sumbu x menyebabkan gaya normal yang menyebabkan bilah dapat berputar.



Gambar 4. 3 Kontur Tekanan Pada Permukaan Bilah

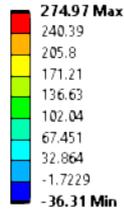
Selanjutnya kontur tekanan pada sisi depan (*pressure*) dan belakang (*suction*) dihasilkan seperti pada gambar 4.3. Pada gambar, terlihat bahwa tekanan terbesar berada di *leading edge* pada sisi *pressure* dekat *tip* bilah sebesar 5.212 kPa, dan tekanan terkecil berada di *leading edge* pada sisi *suction* dekat *tip* bilah sebesar -7.403 kPa. *Twist angle* dari bilah berfungsi untuk menyesuaikan angin relatif lokal yang terjadi pada bilah akibat *real wind* dan *headwind*. Maka dari itu, tekanan maksimum bergeser ke arah *leading edge* dan titik stagnasi bergeser ke permukaan sisi *suction*, menyebabkan tekanan negatif yang semakin rendah pada bagian belakang bilah. Selain itu, karena turbin angin mengalami *headwind* yang disebabkan oleh gerakan berputar dari bilah, maka terdapat tekanan dinamis tambahan dari *headwind* yang menyebabkan terjadinya gaya *drag*, sehingga tekanan maksimum semakin bergeser ke arah *leading edge*. Hal ini dibuktikan dengan tekanan yang lebih tinggi semakin ke ujung bilah dimana kecepatan *headwind* semakin besar seiring pertambahan jari-jari.

4.1.2. Analisa Statik

Hasil pembebanan dari CFD, gaya gravitasi, dan gaya sentrifugal menghasilkan respon struktur bilah secara statik yang dapat di evaluasi dengan ANSYS untuk mendapatkan kontur tegangan dan kegagalan. Beban dari angin menyebabkan struktur bilah mengalami defleksi, yang biasa disebut sebagai fenomena aeroelastik.

J: Static Structural

Directional Deformation
Type: Directional Deformation(Y Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 1 s
6/26/2022 4:06 PM

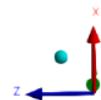
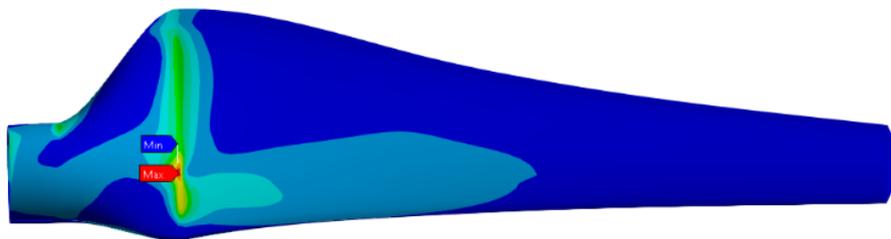
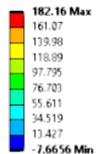


Gambar 4. 4 Defleksi Bilah Secara *Flapwise*

Defleksi bilah secara *flapwise* ditunjukkan pada gambar 4.4. Selain itu, hub dari turbin angin ditentukan dengan *overhang* atau *tower clearance* sebesar 4 m. Berdasarkan gambar, defleksi bilah secara *flapwise* adalah sebesar 0.275 m. Nilai tersebut jauh lebih rendah dari jarak *overhang*, yang menunjukkan bilah tidak mungkin menabrak menara pada kondisi operasional maksimum.

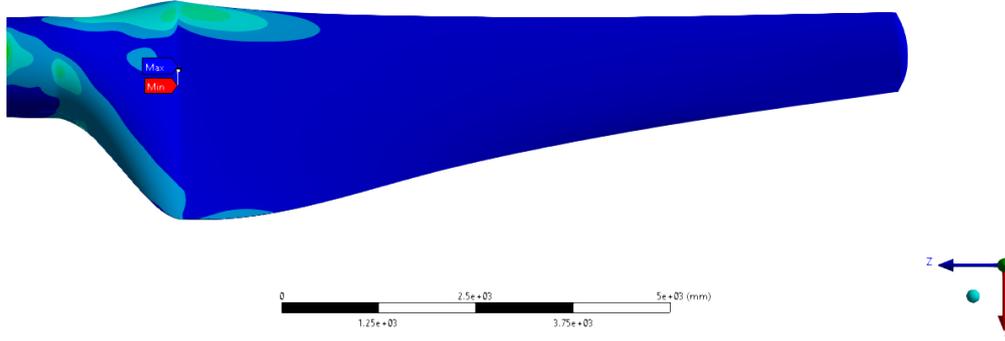
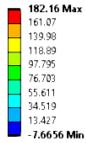
J: Static Structural

Maximum Principal Stress
Type: Maximum Principal Stress - Top/Bottom - Layer 0
Unit: MPa
Time: 1 s
6/26/2022 10:31 PM



(a)

J-Static Structural
 Maximum Principal Stress
 Type: Maximum Principal Stress - Top/Bottom - Layer 0
 Unit: MPa
 Time: 1 s
 6/25/2022 11:31 PM

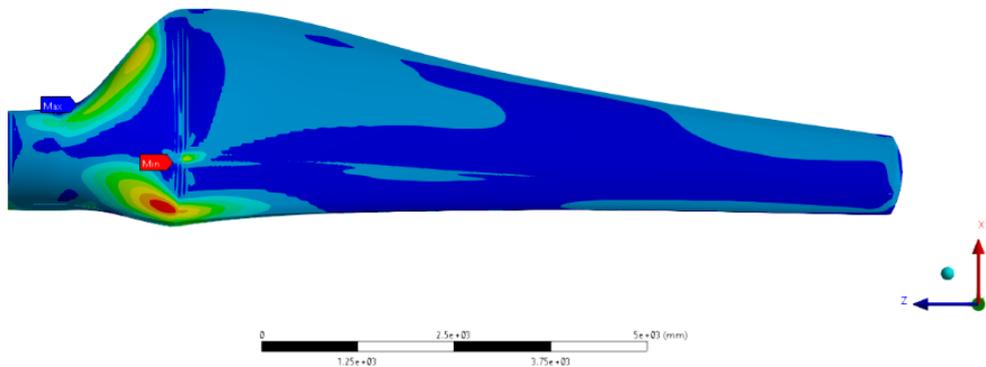
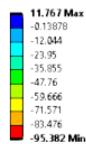


(b)

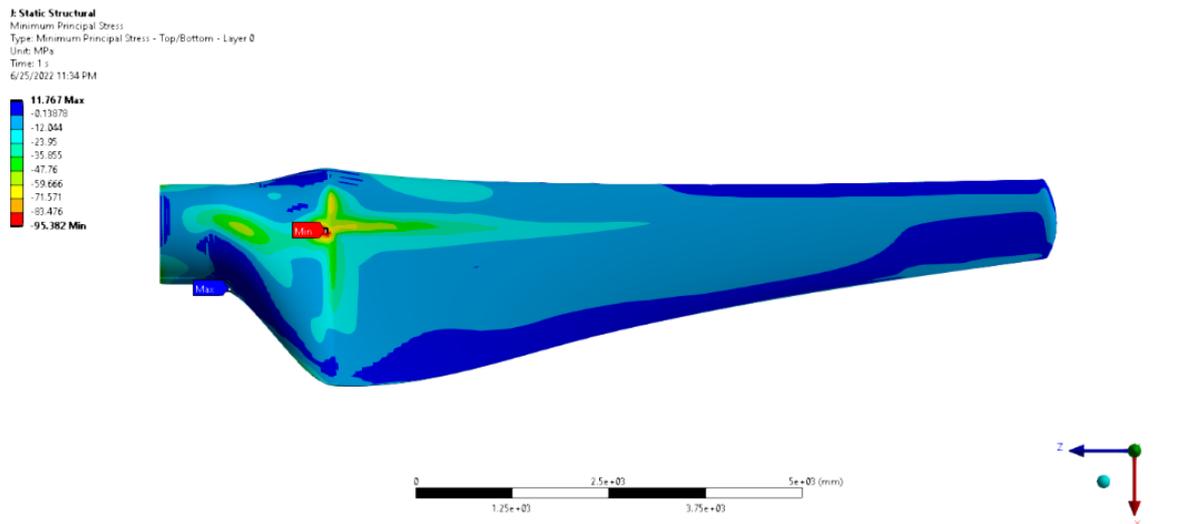
Gambar 4. 5 Kontur *Maximum Principal Stress* Pada (a) Sisi *Pressure* dan (b) Sisi *Suction* Bilah

Gambar 4.5 menunjukkan kontur *maximum principal stress* pada sisi *pressure* dari bilah turbin angin. Tegangan terbesar terjadi pada bagian tekukan di daerah transisi antara profil airfoil dengan pangkal dengan nilai sebesar 182.16 MPa. Berdasarkan gambar, dapat dilihat bahwa *principal stress* cukup besar pada sepanjang tekukan transisi sisi *pressure*. *Maximum principal stress* yang besar pada sisi *pressure* dibanding sisi *suction* disebabkan karena bilah mengalami gaya sentrifugal akibat gerak berputar bilah dan tegangan tarik akibat *bending* yang disebabkan oleh gaya *thrust* dari angin, sehingga tegangan tarik semakin besar.

J-Static Structural
 Minimum Principal Stress
 Type: Minimum Principal Stress - Top/Bottom - Layer 0
 Unit: MPa
 Time: 1 s
 6/25/2022 11:34 PM



(a)

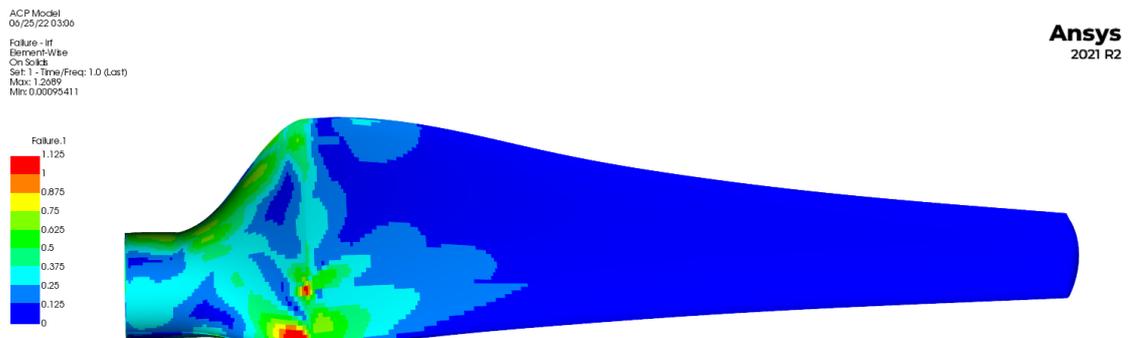


(b)

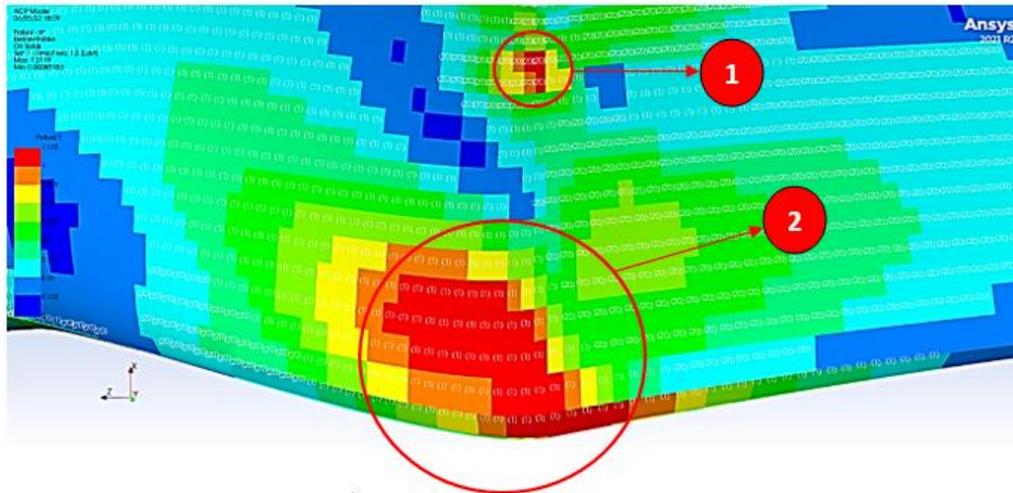
Gambar 4. 6 Kontur *Minimum Principal Stress* Pada (a) Sisi *Pressure* dan (b) Sisi *Suction* Bilah

Di sisi lain, *principal stress* menunjukkan angka negatif dengan kontur *minimum principal stress* terjadi pada sisi *suction* yang dapat dilihat pada gambar 4.6. Nilai minimum dari *principal stress* terdapat pada bagian tekukan di daerah transisi antara profil airfoil dengan pangkal dengan nilai sebesar -95.382 MPa. Pada sisi *suction*, *minimum principal stress* juga cukup besar pada bagian tekukan transisi di tengah dan daerah *leading edge*. *Minimum principal stress* yang besar pada tengah transisi disebabkan karena bilah mengalami tegangan kompresi akibat *bending* yang disebabkan oleh gaya *thrust* dari angin. Lalu pada bagian transisi daerah *leading edge*, nilai *minimum principal stress* yang besar disebabkan oleh tegangan kompresi akibat gaya gravitasi dan torsi yang menyebabkan bilah berputar.

Selanjutnya pada gambar 4.7 adalah kontur *inverse reserve factor* dengan kriteria kegagalan *Tsai-Wu* pada sisi *pressure*. Berdasarkan kontur, terdapat dua titik kegagalan potensial, yaitu pada daerah lekukan *leading edge* dengan nilai sebesar 1.1624 dan bagian lekukan pada daerah transisi dengan nilai sebesar 1.2119. *Inverse reserve factor* pada bilah juga bernilai cukup besar pada daerah *root* dimana mengalami beban *bending* paling besar, Kontur lebih detail dengan keterangan lamina kritis dapat dilihat pada gambar 4.8 dibawah.

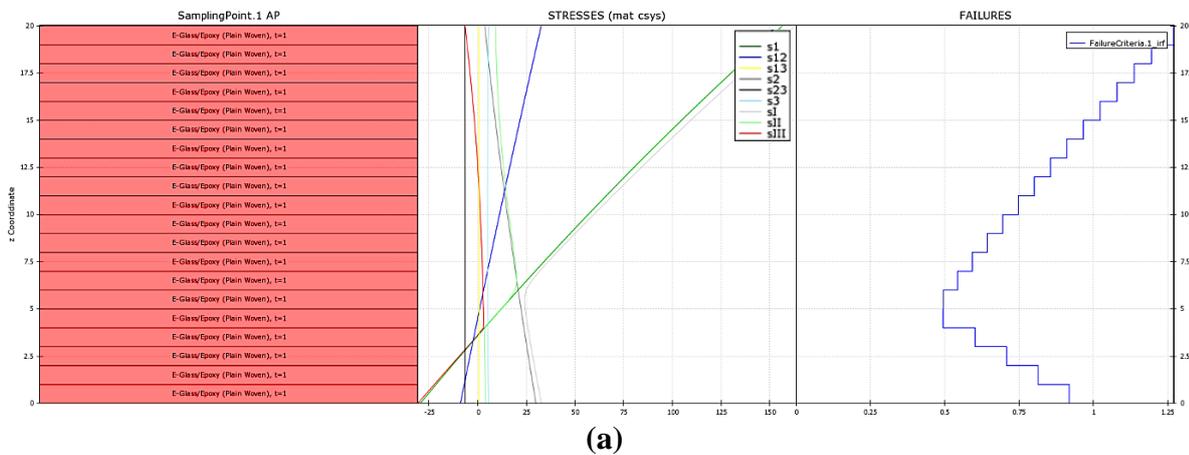


Gambar 4. 7 Kontur *Inverse Reserve Factor* Pada Sisi *Pressure* Bilah

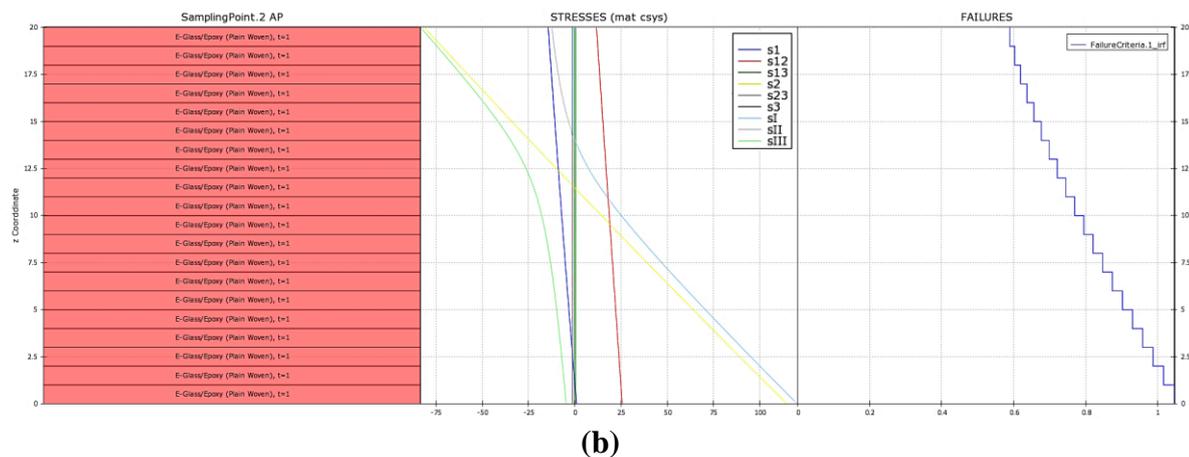


Gambar 4. 8 Zoom In Kontur *Inverse Reserve Factor* Beserta *Critical Ply* Pada Sisi *Pressure* Bilah

Berdasarkan pada gambar diatas, dapat dilihat bahwa pada daerah 1 lamina kritikal berada pada tumpukan ke-20 dan pada daerah 2 berada pada tumpukan ke-1. Lamina kritikal mengindikasikan bahwa lamina tersebut mengalami tegangan paling besar dibanding tumpukan yang lain ketika mengalami beban yang teraplikasi. Rincian tegangan yang bekerja pada dua daerah kritis ini dapat dilihat secara makromekanik pada gambar 4.9.



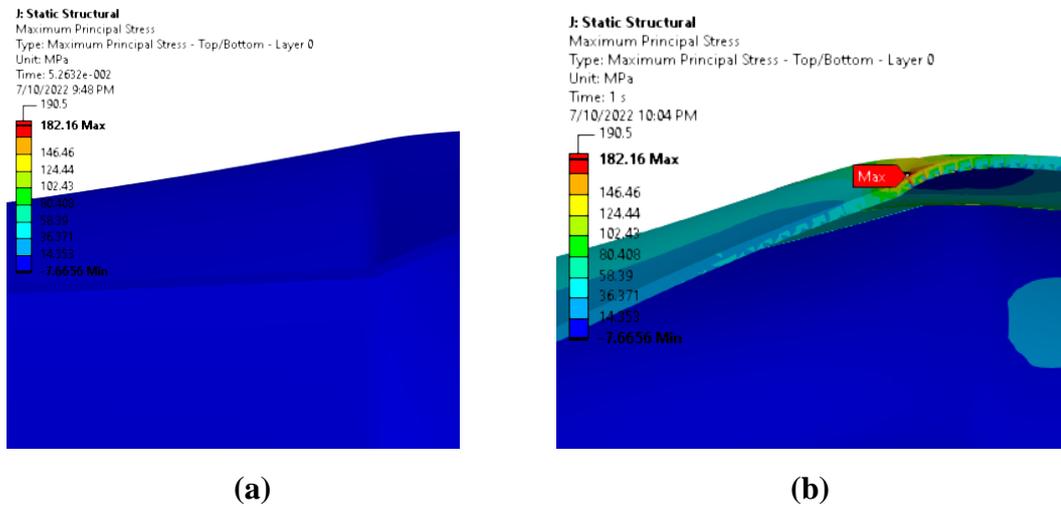
(a)



(b)

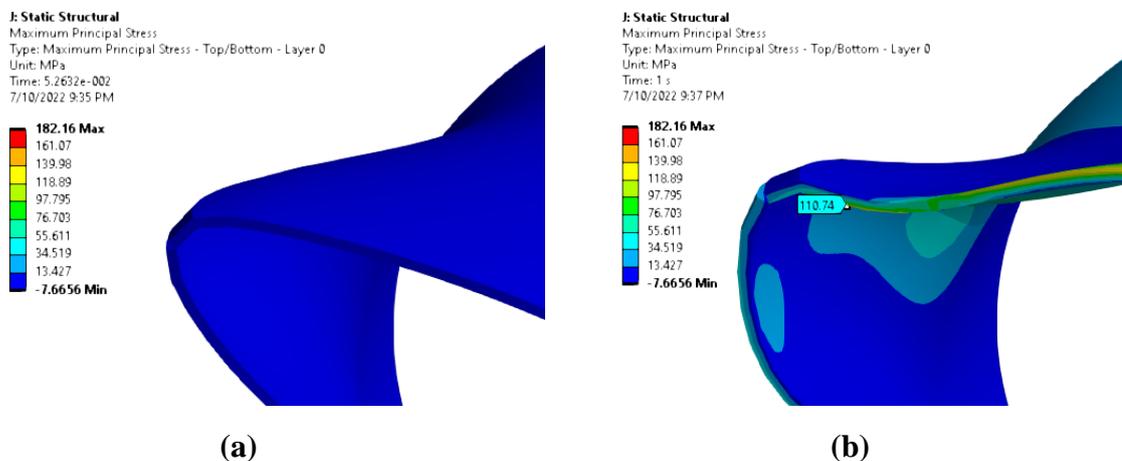
Gambar 4. 9 Distribusi *Stress* Secara Makromekanik Pada Sisi *Pressure* (a) Daerah ke-1 dan (b) Daerah ke-2

Pada gambar 4.9 (a), hasil grafik menunjukkan bahwa tegangan dominan yang bekerja pada lamina kritis daerah ke-1 adalah σ_1 (*maximum principal stress*) dengan nilai sebesar 182.16 MPa. Nilai σ_1 yang dominan menunjukkan bahwa tegangan yang terjadi pada titik ini didominasi oleh tegangan tarik. Tegangan dominan yang terjadi pada komposit adalah pada tensor σ_1 sebesar 180.41 MPa. Hal ini disebabkan karena ketika bilah mengalami gaya *thrust* akibat angin, bilah mengalami *bending* yang menyebabkan terdapat tegangan pada struktur bilah, dengan maksimum tegangan tarik terjadi di bagian terluar komposit pada *shell*. Bentuk deformasi yang terjadi pada bagian tersebut dapat dilihat pada gambar 4.10.



Gambar 4. 10 *Cross-Section View Sisi Pressure* Pada Daerah Kritis 1 (a) Sebelum Deformasi dan (b) Setelah Deformasi Dengan Perbesaran 5x

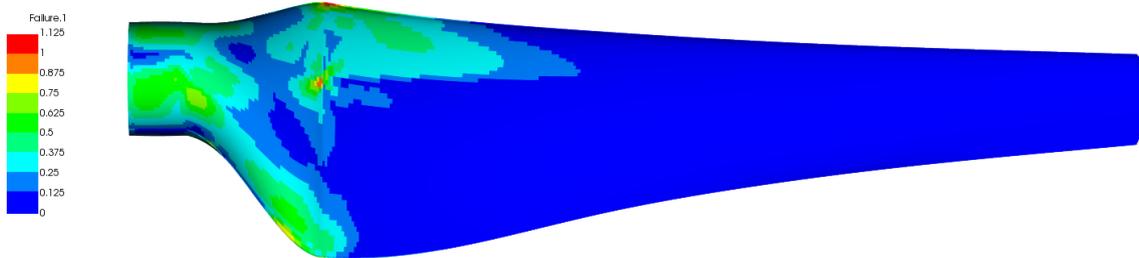
Kemudian pada gambar 4.9(b), hasil grafik pada lamina kritis daerah ke-2 menunjukkan bahwa tegangan dominan yang terjadi adalah σ_1 (*maximum principal stress*) dengan nilai sebesar dan 115 MPa. Pada daerah ini juga didominasi oleh tegangan tarik. Namun berbeda dengan sebelumnya, tegangan dominan yang terjadi pada komposit adalah pada tensor σ_2 sebesar 110.74 MPa. Hal ini disebabkan pada tekukan *leading edge* di daerah tersebut mengalami kontraksi akibat beban dari *shear web*. Bentuk deformasi yang terjadi pada bagian tersebut dapat dilihat pada gambar 4.11.



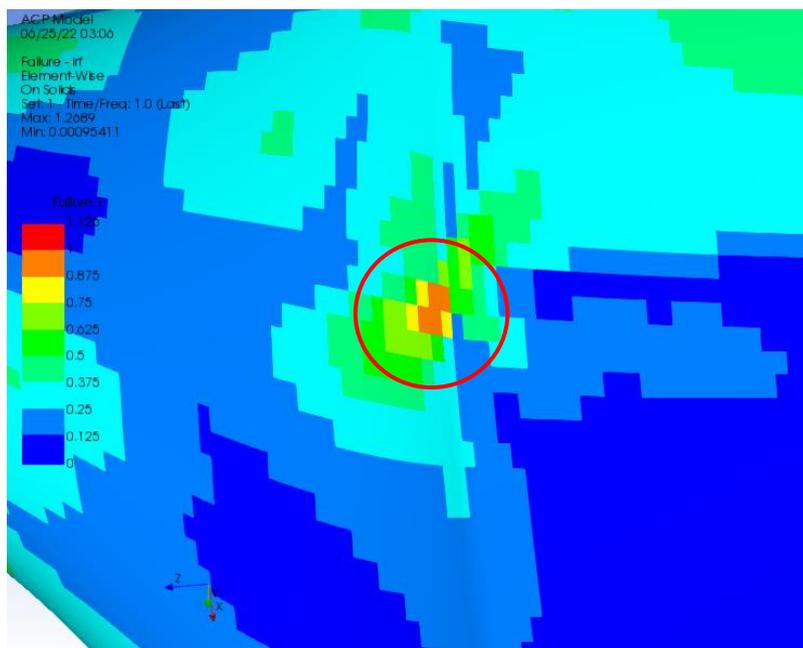
Gambar 4. 11 *Cross-Section View Sisi Pressure* Pada Daerah Kritis 2 (a) Sebelum Deformasi dan (b) Setelah Deformasi Dengan Perbesaran 5x

ACP Model
06/25/22 03:06
Failure - Irf
Element-Wise
On Solids
Set: 1 - Time/Freq: 1.0 (Last)
Max: 1.2089
Min: 0.00095411

Ansys
2021 R2

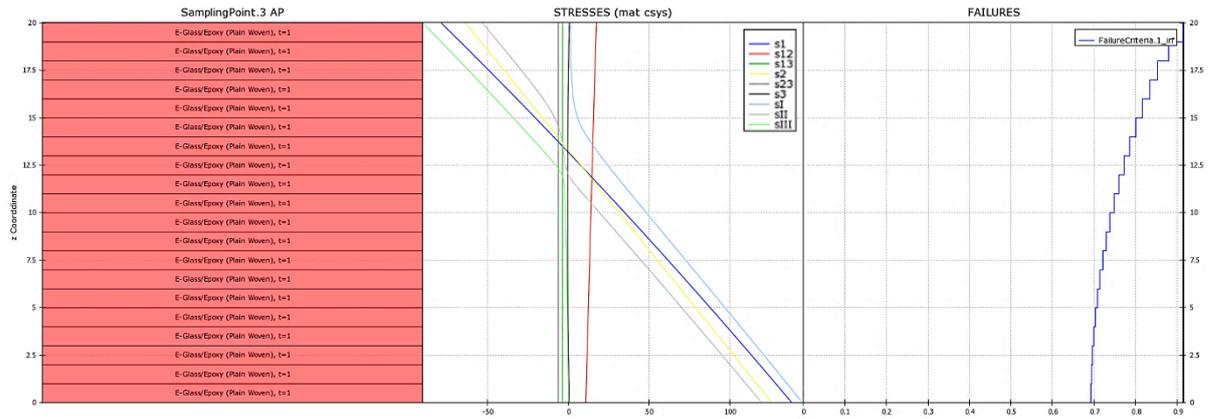


Gambar 4. 12 Kontur *Inverse Reserve Factor* Pada Sisi *Suction* Bilah



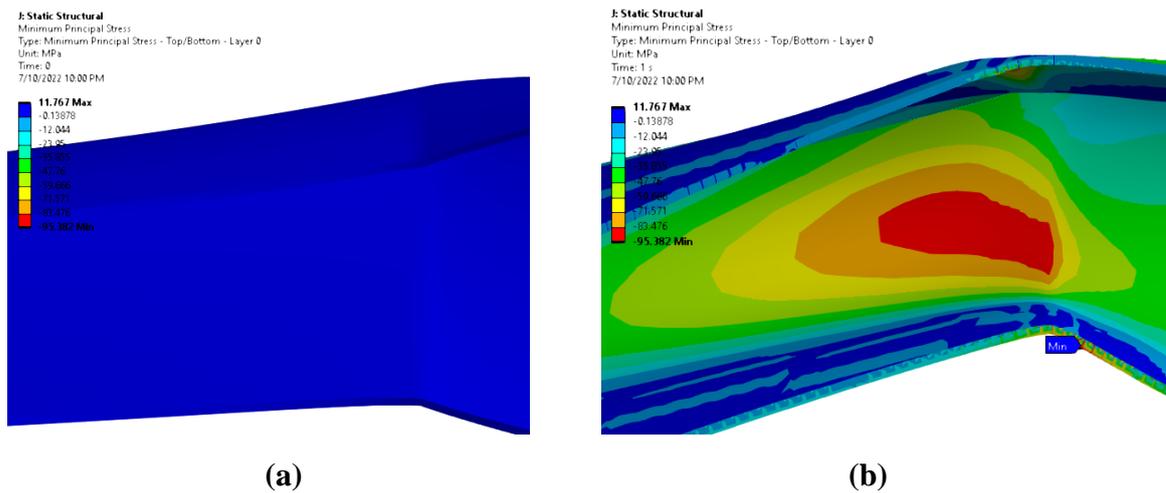
Gambar 4. 13 *Zoom In* Kontur *Inverse Reserve Factor* Beserta *Critical Ply* Pada Sisi *Suction* Bilah

Selanjutnya pada gambar 4.12 adalah kontur *inverse reserve factor* dengan kriteria kegagalan *Tsai-Wu* pada sisi *suction*. Berdasarkan kontur, terdapat satu titik kritikal yaitu pada daerah lekukan di tengah profil transisi dengan nilai sebesar 0.912. Nilai *inverse reserve factor* masih dibawah 1 mengindikasikan bahwa kegagalan secara statik diprediksi tidak terjadi pada titik ini. Kontur lebih detail dengan keterangan lamina kritis dapat dilihat pada gambar 4.13 diatas.



Gambar 4. 14 Distribusi *Stress* Secara Makromekanik Pada Sisi *Suction*

Tegangan pada sisi *suction* secara makromekanik dapat dilihat pada gambar 4.14. Berdasarkan grafik dapat dilihat bahwa tegangan dominan yang bekerja pada lamina kritis adalah σ_{II} (*intermediate principal stress*) dan σ_{III} (*minimum principal stress*) dengan nilai sebesar -84.803 MPa dan -95.382 MPa. Hasil dari grafik menunjukkan bahwa tegangan dominan yang terjadi pada komposit adalah σ_1 dan σ_2 dengan nilai masing-masing sebesar -85.874 MPa dan -95.058 MPa. Hal ini disebabkan karena ketika bilah mengalami gaya *thrust* akibat angin, bilah mengalami *bending* yang menyebabkan terdapat tegangan pada struktur bilah, dan pada sisi *suction* terjadi tegangan kompresi dengan tegangan terbesar terjadi di bagian terluar komposit pada *shell*. Bentuk deformasi yang terjadi pada bagian tersebut dapat dilihat pada gambar 4.10.



Gambar 4. 15 *Cross-Section View* Sisi *Suction* Pada Daerah Kritis (a) Sebelum Deformasi dan (b) Setelah Deformasi Dengan Perbesaran 5x

Selanjutnya gambar 4.16 menunjukkan kontur *safety factor* pada struktur *shear web* bilah dengan teori kegagalan *Mohr-Coulomb* pada *core* yang berupa kayu balsa dan teori kegagalan *Tsai-Wu* pada *skin* yang berupa komposit. Berdasarkan kontur dapat dilihat bahwa pada struktur *shear web* tidak ditemukan indikasi kegagalan dimana hasil *safety factor* menunjukkan nilai 1.54256.



Gambar 4. 16 Kontur *Safety Factor* Pada Struktur *Shear Web*

Analisa ini menunjukkan bahwa ketika bilah beroperasi pada titik operasional maksimum (kecepatan putar maksimum pada *cut-off wind speed*) dimana bilah mengalami gabungan beban sentrifugal, gravitasi, dan angin maka akan terjadi kegagalan material pada struktur *shell* pada lokasi yang telah ditunjukkan pada gambar 4.8. Letak faktor *Tsai-Wu* dari hasil simulasi menunjukkan letak yang sama dimana kegagalan diprediksi terjadi pada daerah transisi. Oleh karena itu, terdapat tiga faktor penentu dari kegagalan statik:

7. Geometri

Panjang *chord* dan *maximum thickness* elemen 1 pada profil airfoil bilah memiliki perbedaan panjang yang signifikan terhadap radius dari pangkal. Radius pangkal harus cukup besar agar cukup kuat untuk menahan beban *bending* dan sentrifugal dan menghindari transisi panjang *chord* ekstrim di transisi antara profil airfoil dan pangkal. Namun di sisi lain ketika radius pangkal menyesuaikan panjang *chord*, maka akan terjadi perbedaan panjang antara *thickness* dari elemen 1 pada profil airfoil dengan radius pangkal bilah, sehingga memaksa untuk terjadinya tekukan pada daerah transisi bilah. Dalam kasus bilah yang diteliti, profil airfoil yang digunakan pada bilah yaitu NACA 632415 memiliki *thickness-to-chord ratio* yang rendah, sehingga memaksa terjadinya transisi ekstrim antara profil airfoil terhadap pangkal bilah. Akibatnya, terjadinya konsentrasi tegangan pada bagian tekukan tersebut akibat karakterisasi komposit yang memiliki daya tahan lemah terhadap tekukan. Airfoil jenis ini juga memaksa geometri bilah memiliki distribusi *twist angle* yang cukup ekstrim, sehingga secara manufaktur tidak memungkinkan untuk memasang *box spar* sebagai perbaikan struktur *spar* bilah.

Penggunaan satu jenis airfoil untuk seluruh panjang merupakan desain yang inefisien. Setiap segmen bilah mempunyai kecepatan angin relatif dan kebutuhan kekuatan struktur yang berbeda sehingga bentuk airfoil pada tiap segmen juga harus menyesuaikan aspek aerodinamis dan struktural yang berbeda-beda. Daerah pada pangkal pada umumnya memiliki *thickness-to-chord ratio* yang besar yang penting untuk menahan beban yang intensif. Semakin ke *tip*, maka bilah akan semakin tipis karena beban yang semakin berkurang, *headwind* yang semakin tinggi, dan performa aerodinamis kritis yang semakin tinggi.

8. Kekuatan Material

Kekuatan material dari *E-Glass/Epoxy (Plain Woven)* yang digunakan belum cukup kuat untuk menahan tegangan yang terjadi pada bilah. Hal tersebut dapat ditinjau dari properti material dari *E-Glass/Epoxy (Plain Woven)*. Selain itu, komposit sangat berpengaruh terhadap orientasinya. Orientasi yang tidak sesuai dengan arah tegangan dari bilah dapat mempengaruhi kekuatan material dari komposit itu sendiri.

9. Ketebalan Komposit

Ketebalan komposit sangat berpengaruh terhadap kekuatan dari struktur bilah. Komposit yang lebih tebal menyebabkan tegangan dari struktur dapat terdistribusi lebih kecil sehingga tegangan tersebut menjauhi *strength properties* dari material. Pada kasus bilah yang

diteliti, jumlah laminasi komposit tidak cukup tebal untuk menahan tegangan dari bilah, sehingga tegangan yang terjadi pada bilah melampaui tegangan yang diizinkan berdasarkan faktor *Tsai-Wu*.

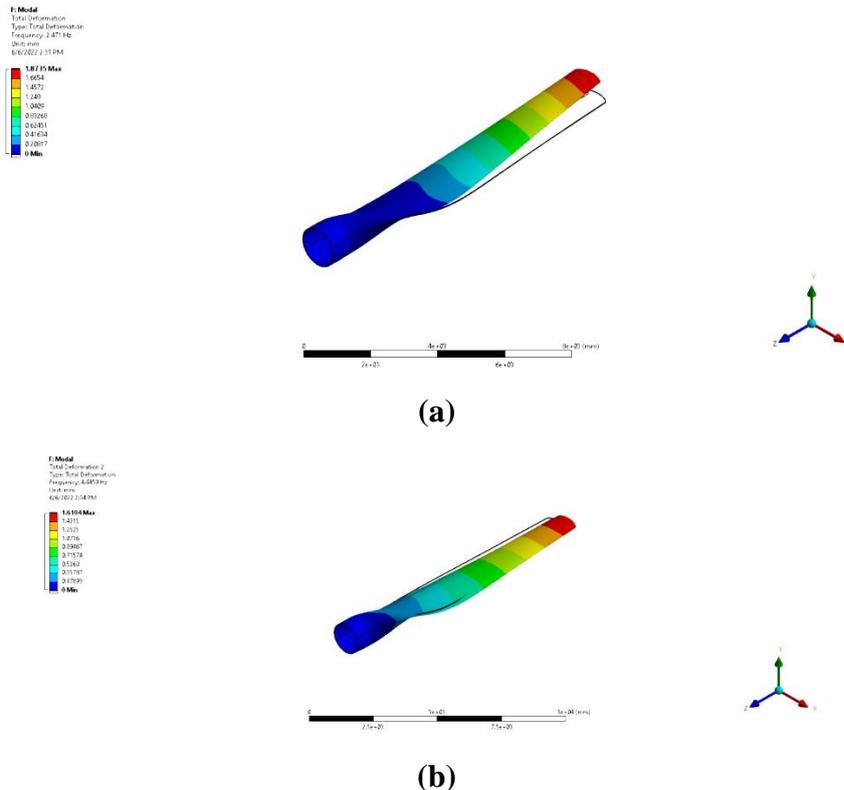
4.1.3. Analisa Resonansi Angin

Gambar menunjukkan frekuensi natural pada setiap setiap mode getaran. Ketika frekuensi natural dari struktur cocok dengan frekuensi beban eksternal, efek resonansi akan memperkuat respons struktural. Seiring waktu, efek resonansi juga meningkatkan kemungkinan kegagalan fatik akibat getaran.

Tabel 4. 1 Hasil Frekuensi Natural Bilah P3TKEBTKE Dengan Tipe Getaran

Mode	Natural Frequency (Hz)	Tipe Getaran
1	2.471	Utama
2	4.4459	Utama
3	9.2446	Lokal
4	16.726	Lokal
5	18.683	Lokal
6	25.204	Lokal
7	29.383	Lokal
8	30.745	Lokal

Berdasarkan hasil simulasi *Modal* menggunakan ANSYS, mode resonansi dapat diklasifikasikan sebagai getaran struktur utama atau sebagai getaran struktur lokal. Pada analisa ini, getaran struktur utama menunjukkan bahwa posisi pemicu resonansi sesuai dengan letak kegagalan aktual dari bilah turbin angin sehingga getaran ini yang digunakan sebagai penyebab resonansi dan dapat menyebabkan kegagalan pada bagian yang lebih lemah dari struktur bilah.



Gambar 4. 17 *Mode Shape* dan Frekuensi Natural Getaran Utama Bilah *Baseline*

Selanjutnya, frekuensi dari *vortex* dapat diestimasi menggunakan persamaan 3.9 dengan perhitungan sebagai berikut.

$$B = c_{avg} = 2 \text{ m}$$

$$f = \omega_{n \text{ avg}} = 3.458 \text{ Hz}$$

$$f \frac{B}{U} = 0.15$$

$$U = (3.458) \frac{2}{0.15}$$

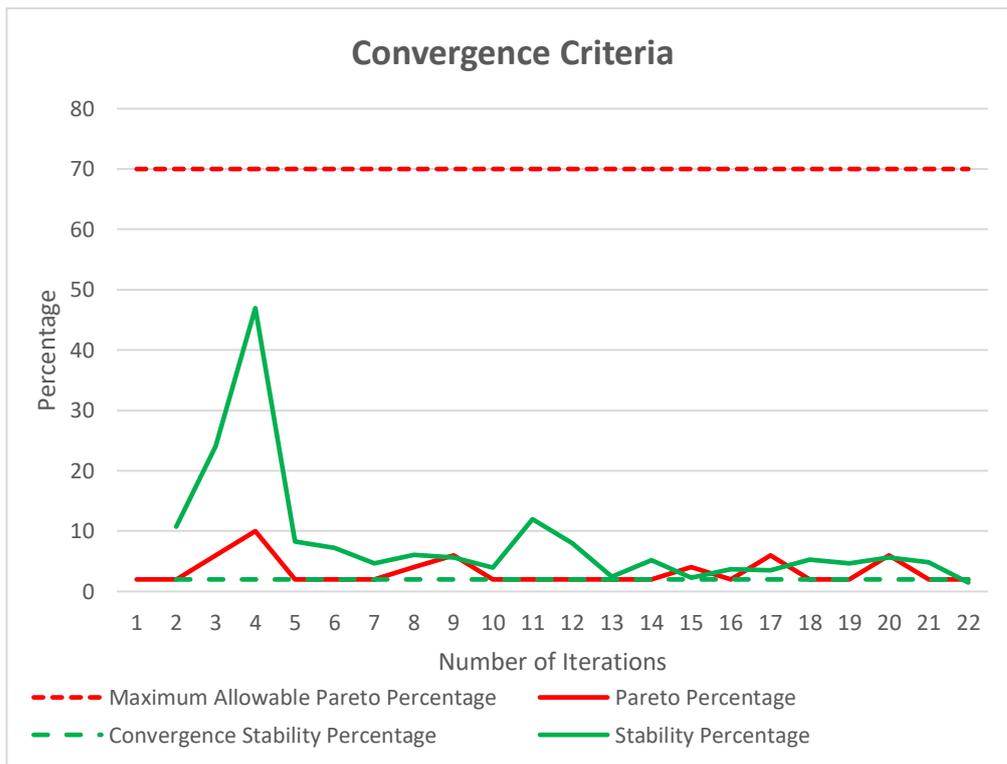
$$U = 46.106 \text{ m/s}$$

Berdasarkan perhitungan, struktur bilah dengan frekuensi natural struktur utama akan menghasilkan *vortex* yang dapat menyebabkan resonansi pada kecepatan angin sebesar 46.1 m/s. Berdasarkan nilai tersebut, kegagalan akibat resonansi tidak mungkin untuk terjadi akibat kecepatan angin sebesar itu masih diluar rentang operasional dari turbin angin.

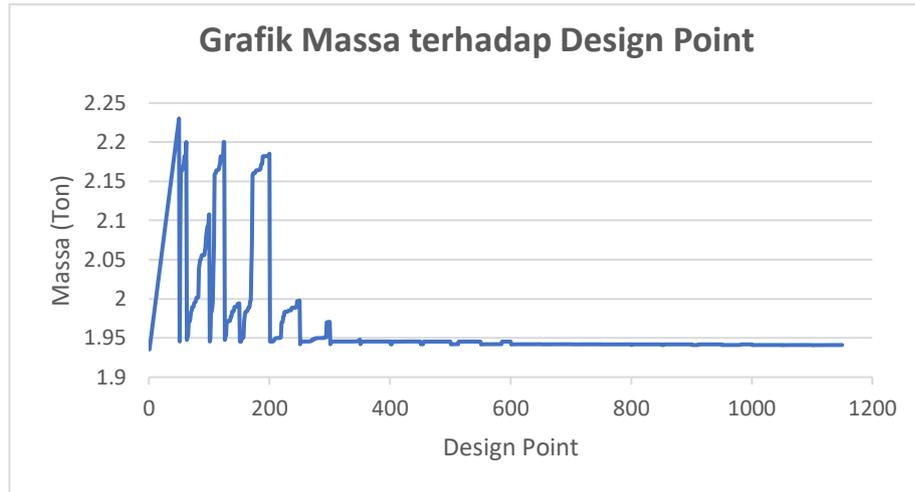
4.2 Hasil Proses *Improvement* Bilah

Bagian ini menjelaskan hasil proses *improvement* dengan menggunakan *Multiobjective Genetic Algorithm* serta konfigurasi dan distribusi jumlah komposit pada bilah dengan geometri awal dan yang terlinearisasi.

4.2.1 Hasil *Improvement* Bilah Optimum

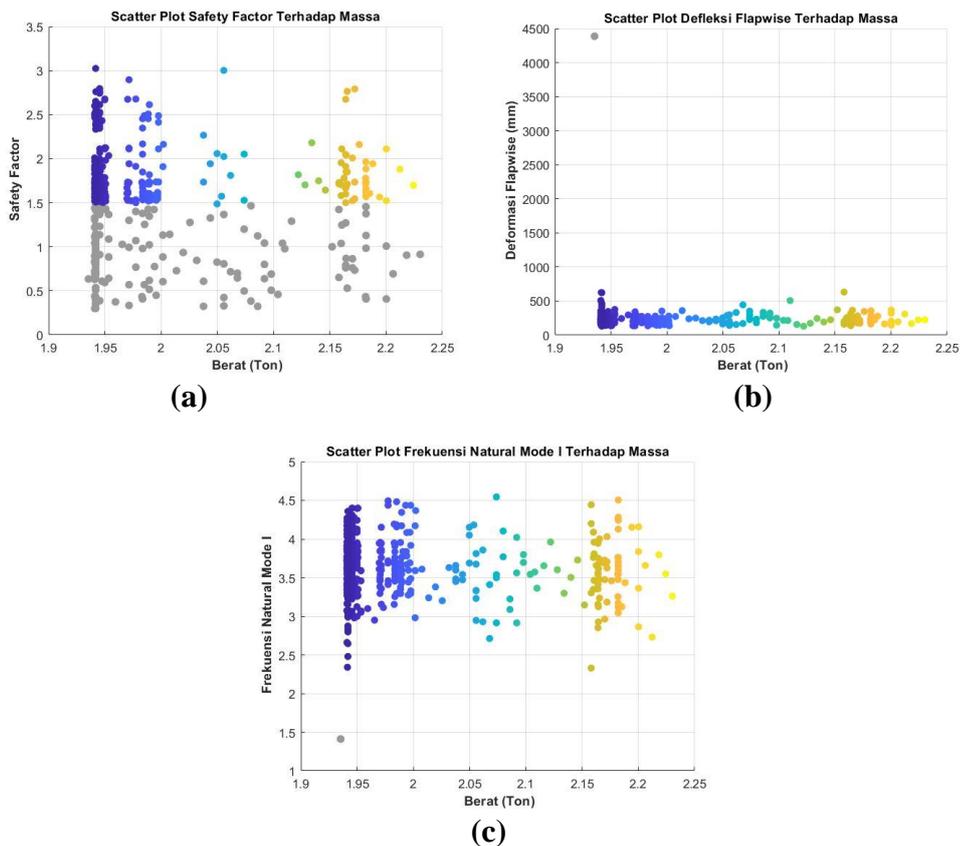


Gambar 4.18 Grafik Kriteria Konvergensi *Multi-Objective Genetic Algorithm* (MOGA) Pada Bilah Optimum



Gambar 4. 19 Grafik Massa Terhadap *Design Point* Pada Bilah Optimum

Gambar 4.18 menunjukkan prosedur konvergensi *objective function* untuk massa minimum dari bilah. Untuk bilah P3TKEBTKE yang teroptimasi, 1150 *design point* telah tersimulasikan dengan variabel yang telah ditentukan yang rinciannya dapat dilihat di lampiran. Persentase Pareto tidak melebihi batas maksimum yang diizinkan yaitu 70% dan persentase *stability* saat konvergen sebesar 1.58%. Rincian evolusi massa bilah terhadap *design point* dapat dilihat pada gambar 4.19.



Gambar 4. 20 Trade-off Scatter Plot Constraint Terhadap *Objective* Pada Bilah Optimum

Gambar 4.20 menunjukkan grafik *tradeoff* berupa *scatter plot* dari *constraint* (*safety factor*, defleksi *flapwise*, dan frekuensi natural mode 1 terhadap *objective* yaitu massa. *Constraint* dari *safety factor* minimum sebesar 1.485, defleksi *flapwise* sebesar 4 mm, dan frekuensi natural mode 1 minimum sebesar 1.575 Hz. *Design point* yang tidak memenuhi kriteria atau *constraint* ditandai sebagai desain tidak layak dengan plot berwarna abu-abu dan sisanya adalah titik desain yang layak dengan warna kontur. Desain yang semakin mendekati *objective* ditandai dengan warna biru dan yang menjauhi *objective* ditandai dengan warna kuning.

Hasil dari optimasi yang telah dilakukan pada struktur *shell* bilah menghasilkan 3 kandidat desain terbaik berdasarkan *objective* yang telah ditetapkan, dengan rincian parameter input dan output dapat dilihat pada tabel 4.2.

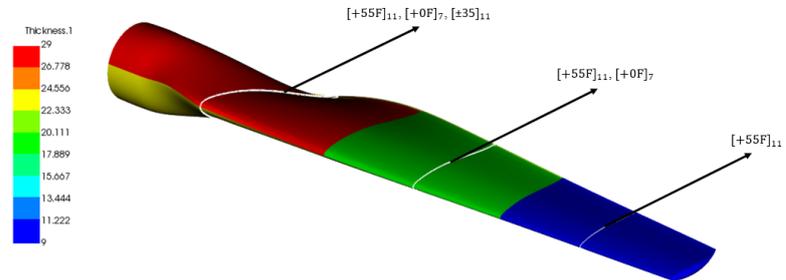
Tabel 4. 2 Hasil *Candidate Point* Proses MOGA Pada Bilah Optimum

			Candidate Point 1	Candidate Point 2	Candidate Point 3
Input Parameter	Number of Ply	Ply Group 1 Sisi <i>Pressure</i>	11	11	11
		Ply Group 2 Sisi <i>Pressure</i>	7	7	7
		Ply Group 3 Sisi <i>Pressure</i>	11	11	11
		Ply Group 1 Sisi <i>Suction</i>	9	9	9
		Ply Group 2 Sisi <i>Suction</i>	12	12	9
		Ply Group 3 Sisi <i>Suction</i>	3	3	3
	Ply Material	Ply Group 1 Sisi <i>Pressure</i>	55° (Plain Woven)	55° (Plain Woven)	55° (Plain Woven)
		Ply Group 2 Sisi <i>Pressure</i>	0° (Plain Woven)	35° (Plain Woven)	35° (Plain Woven)
		Ply Group 3 Sisi <i>Pressure</i>	±35° (UD)	±45° (UD)	±45° (UD)
		Ply Group 1 Sisi <i>Suction</i>	45° (Plain Woven)	45° (Plain Woven)	45° (Plain Woven)
		Ply Group 2 Sisi <i>Suction</i>	45° (Plain Woven)	35° (Plain Woven)	45° (Plain Woven)
		Ply Group 3 Sisi <i>Suction</i>	0° (Plain Woven)	0° (Plain Woven)	0° (Plain Woven)
Output Parameter	Total Massa (Ton)		1.946	1.949	1.949
	Frekuensi Natural Mode I (Hz)		3.53	3.41	3.27
	Safety Factor Minimum		1.86	1.78	1.59
	Maksimum Deformasi <i>Flapwise</i> (mm)		191.80	203.20	220.33

Dari 3 poin kandidat, didapat bahwa variabel jumlah tumpukan lamina memiliki jumlah yang identik dengan perbedaan hanya di *ply group 1* sisi *suction*. Hasil terbaik dicapai oleh kandidat desain pertama dengan massa sebesar 1.946 ton, dimana nilai *safety factor* dan frekuensi natural mode I minimum lebih tinggi dan defleksi *flapwise* maksimum lebih rendah daripada kandidat lainnya. Hasil *output parameter* (*safety factor*, *safety factor*, dan *flapwise deformation*) yang didapat masih sedikit diatas *constraint* yang telah ditetapkan, yang mengindikasikan bahwa hasil optimasi bilah ini masih belum mencapai *global optimum*. Blade yang lebih ringan dapat diperoleh jika menjalankan proses MOGA dengan jumlah *design point* tiap iterasi yang lebih banyak. Namun dengan jarak yang relatif sedikit, pencarian *global optimum* pada proses optimasi tidak menguntungkan dibanding dengan biaya komputasi yang dibutuhkan. Biaya komputasi akan meningkat sejalan dan massa bilah diperkirakan tidak akan

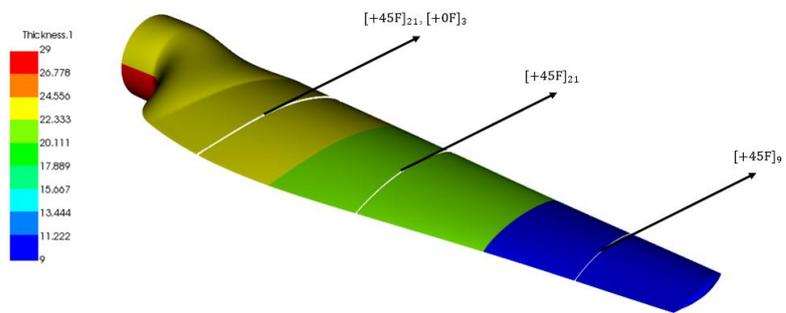
berkurang secara substansial. Dengan demikian, hasil yang ada dapat dikatakan sebagai solusi yang memuaskan.

ACP Model
07/20/22 21:14
Thickness
Element-Wise
Unit: mm
Max: 29
Min: 9



(a)

ACP Model
07/20/22 21:16
Thickness
Element-Wise
Unit: mm
Max: 29
Min: 9

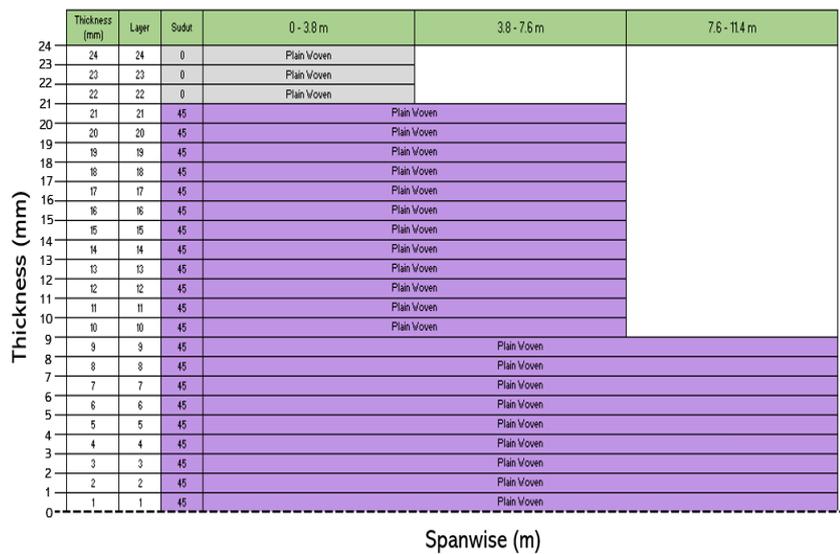


(b)

Gambar 4. 21 Kontur Ketebalan Pada Bilah Optimum Pada (a) Sisi *Pressure* dan (b) Sisi *Suction*

Thickness (mm)	Layer	Subl	Spanwise (m)		
			0 - 39 m	39 - 7.6 m	7.6 - 114 m
29	19	40	35		
28.5	28.5	39	-35		
28	28	38	35		
27.5	27.5	37	-35		
27	27	36	35		
26.5	26.5	35	-35		
26	26	34	35		
25.5	25.5	33	-35		
25	25	32	35		
24.5	24.5	31	-35		
24	24	30	35		
23.5	23.5	29	-35		
23	23	28	35		
22.5	22.5	27	-35		
22	22	26	35		
21.5	21.5	25	-35		
21	21	24	35		
20.5	20.5	23	-35		
20	20	22	35		
19.5	19.5	21	-35		
19	19	20	35		
18.5	18.5	19	-35		
18	18	18	0	Plan View	
17	17	17	0	Plan View	
16	16	16	0	Plan View	
15	15	15	0	Plan View	
14	14	14	0	Plan View	
13	13	13	0	Plan View	
12	12	12	0	Plan View	
11	11	11	55	Plan View	
10	10	10	55	Plan View	
9	9	9	55	Plan View	
8	8	8	55	Plan View	
7	7	7	55	Plan View	
6	6	6	55	Plan View	
5	5	5	55	Plan View	
4	4	4	55	Plan View	
3	3	3	55	Plan View	
2	2	2	55	Plan View	
1	1	1	55	Plan View	
0	0	0	55	Plan View	

(a)



(b)

Gambar 4. 22 Distribusi Lamina Komposit Pada Struktur *Shell* (a) Sisi *Pressure* dan (b) Sisi *Suction* Pada Bilah Optimum

Kandidat desain yang terpilih memiliki total ketebalan yang dapat dilihat pada gambar 4.21 dengan rincian tipe RVE dan orientasi sudut komposit yang dapat dilihat pada gambar 4.22.

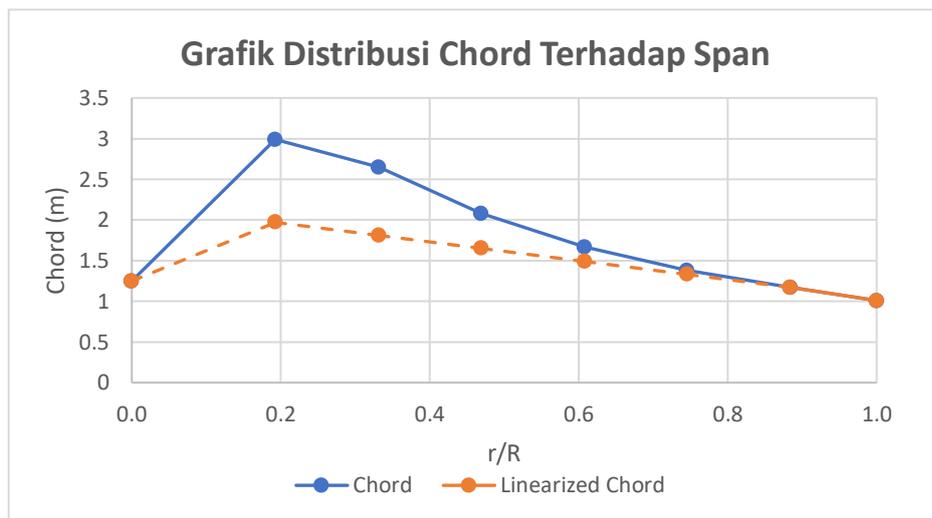
4.2.2 Hasil *Improvement* Bilah Optimum (*Linearized*)

Berdasarkan hasil analisa kegagalan yang telah dilakukan sebelumnya, salah satu faktor penentu kegagalan merupakan geometri dari bilah, dimana terdapat tekukan ekstrim pada transisi profil airfoil dengan pangkal yang disebabkan karena airfoil NACA 632415 memiliki *thickness-to-chord ratio* yang rendah. Hal ini tidak diinginkan pada struktur bilah turbin angin berskala besar karena daerah pangkal harus memiliki ketahanan yang tinggi terhadap beban struktural dan memiliki kompatibilitas geometri yang bagus terhadap diameter pangkal sehingga tidak terjadi tekukan ekstrim. Namun, pada penelitian ini tidak dilakukan pergantian jenis airfoil pada bilah karena dapat mengakibatkan perubahan performa aerodinamika dari bilah. Oleh karena itu, pendekatan yang dipakai untuk mengoptimasi geometri bilah adalah dengan melakukan linearisasi profil panjang *chord* dan sudut *twist* dari bilah sehingga dapat terjadi pengurangan beban aerodinamis, yang mempengaruhi pengurangan tegangan *bending* yang terjadi pada bilah.

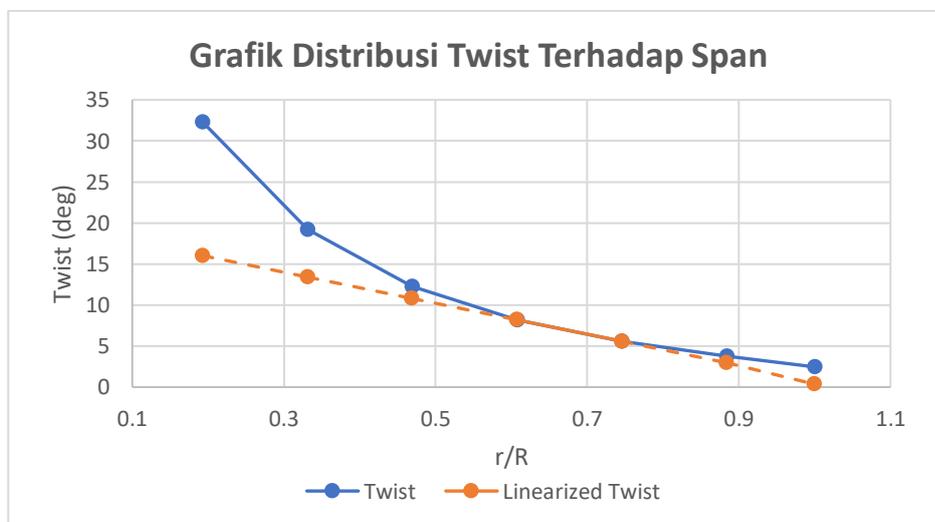
Untuk mendapatkan konfigurasi profil bilah dengan performa aerodinamis dan struktural yang terbaik, proses linearisasi sudut *twist* dilakukan pada elemen 4 dan 5 yang mewakili 75% dari total panjang span untuk meminimalisir *aerodynamic loss* yang terjadi. Lalu untuk menyesuaikan panjang *chord* airfoil dan diameter *root* agar tidak terjadi tekukan di *leading edge*, maka dilakukan linearisasi pada elemen 6 dan 7. Adapun proses linearisasi yang dilakukan menggunakan persamaan 3.2 dan 3.3 dengan hasil yang disajikan pada tabel 4.3 dibawah.

Tabel 4. 3 Perbandingan Distribusi Panjang *Chord* dan Sudut *Twist* Antara Ideal Dengan *Linearized*

Elemen	r	r/R	Twist Angle (deg)	Linearized Twist (deg)	Chord (m)	Linearized Chord (m)
0	0	0.000	-	-	1.25	1.25
1	2.2	0.193	32.28	16.01	2.99	1.97
2	3.78	0.332	19.20	13.40	2.65	1.81
3	5.35	0.469	12.24	10.79	2.08	1.65
4	6.93	0.608	8.18	8.18	1.67	1.49
5	8.5	0.746	5.57	5.57	1.38	1.33
6	10.08	0.884	3.77	2.96	1.17	1.17
7	11.4	1.000	2.46	0.35	1.01	1.01



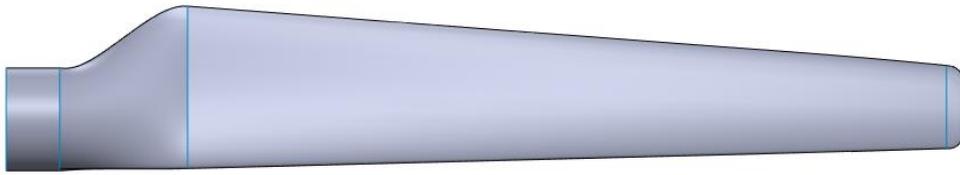
(a)



(b)

Gambar 4. 23 Grafik Distribusi Panjang *Chord* dan Sudut *Twist* Antara Ideal Dengan *Linearized*

Hasil distribusi panjang *chord* dan sudut *twist* ini kemudian digunakan sebagai profil airfoil bilah yang telah terlinearisasi dan digunakan dalam perancangan ulang 3D CAD bilah turbin angin dengan hasil yang dapat dilihat pada gambar 4.20.



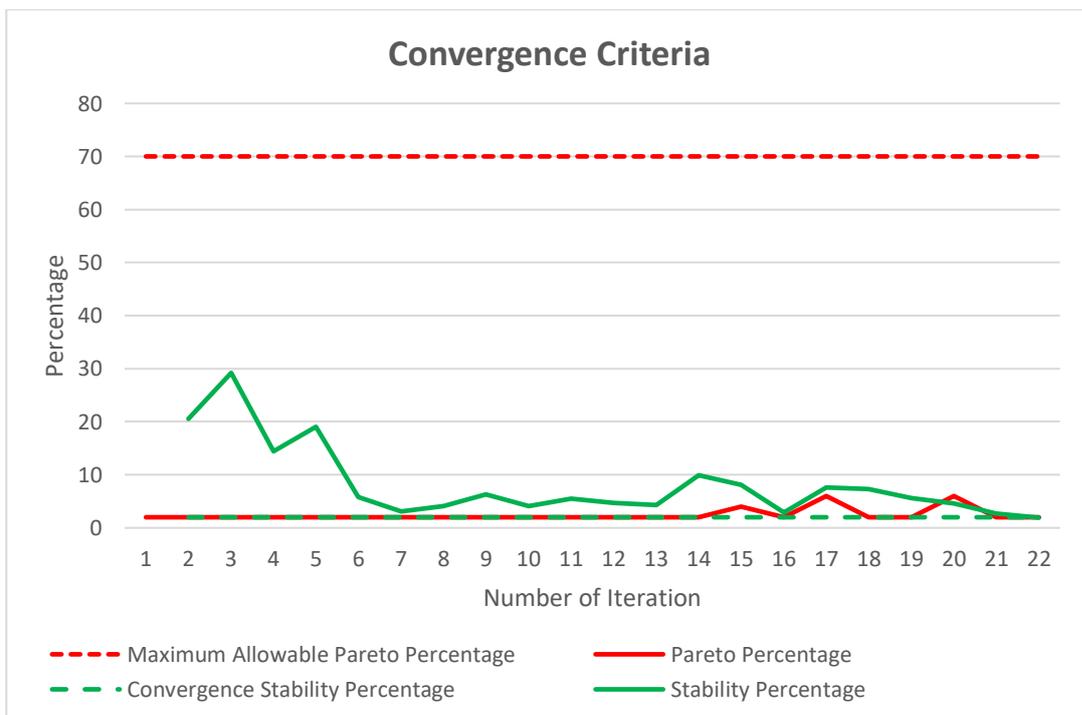
(a)



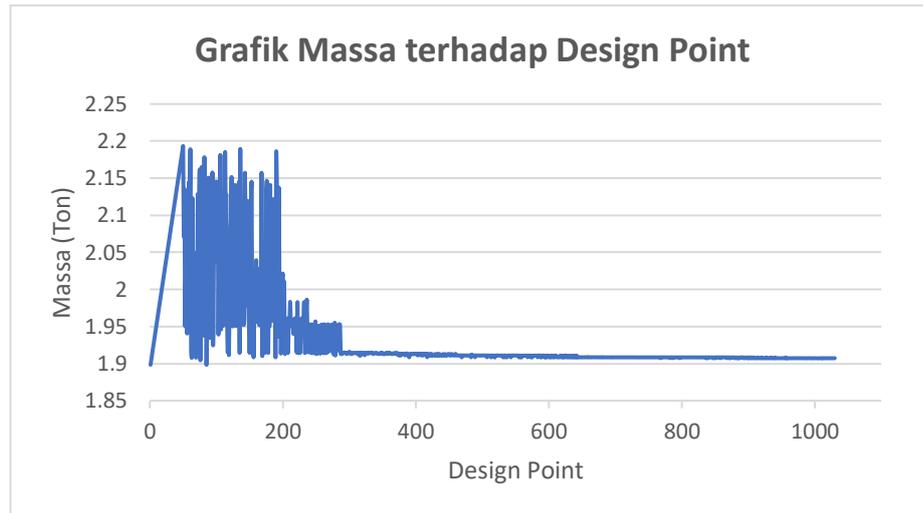
(b)

Gambar 4. 24 Hasil Geometri Bilah Yang Terlinearisasi (*Linearized*)

Hasil dari perancangan 3D CAD pada gambar 4.21 menunjukkan bahwa tekukan pada *leading edge* tereliminasi dan luas permukaan dari bilah juga berkurang. Setelah itu dengan dengan *boundary condition* (kecepatan angin, kecepatan putar, dan gaya gravitasi) yang sama dilakukan optimasi MOGA dengan grafik kriteria konvergensi dapat dilihat pada gambar dibawah.

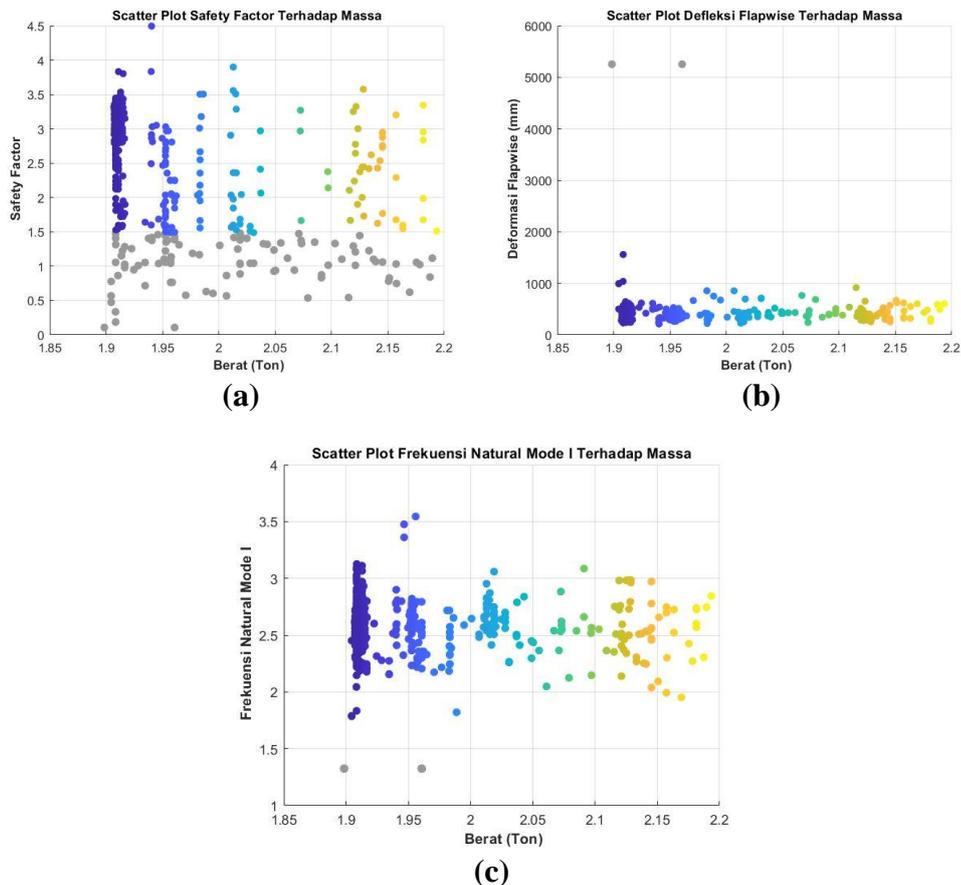


Gambar 4. 25 Grafik Kriteria Konvergensi *Multi-Objective Genetic Algorithm* (MOGA) Hasil *Candidate Point* Proses MOGA Pada Bilah Optimum (*Linearized*)



Gambar 4. 26 Grafik Massa Terhadap *Design Point* Pada Bilah Optimum (*Linearized*)

Gambar 4.25 menunjukkan prosedur konvergensi *objective function* untuk massa minimum dari bilah. Untuk bilah P3TKEBTKE yang teroptimasi, 1150 *design point* telah tersimulasikan dengan variabel yang telah ditentukan yang rinciannya dapat dilihat di lampiran. Persentase Pareto tidak melebihi batas maksimum yang diizinkan yaitu 70% dan persentase *stability* saat konvergen sebesar 1.92%. Rincian evolusi massa bilah terhadap *design point* dapat dilihat pada gambar 4.26.



Gambar 4. 27 Trade-off Scatter Plot Constraint Terhadap *Objective* Pada Bilah Optimum (*Linearized*)

Sama dengan sebelumnya, gambar 4.27 menunjukkan grafik *tradeoff* berupa *scatter plot* dari *constraint* (*safety factor*, defleksi *flapwise*, dan frekuensi natural mode 1 terhadap *objective* yaitu massa. *Constraint* dari *safety factor* minimum sebesar 1.485, defleksi *flapwise* sebesar 4 m, dan frekuensi natural mode 1 minimum sebesar 1.575 Hz. *Design point* yang tidak memenuhi kriteria atau *constraint* ditandai sebagai desain tidak layak dengan plot berwarna abu-abu dan sisanya adalah titik desain yang layak dengan warna kontur. Desain yang semakin mendekati *objective* ditandai dengan warna biru dan yang menjauhi *objective* ditandai dengan warna kuning.

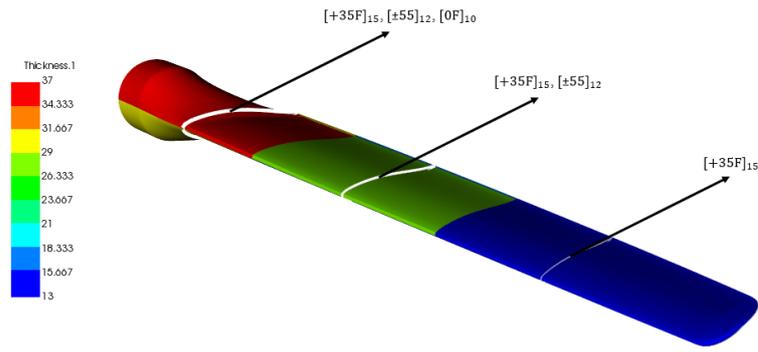
Hasil dari optimasi yang telah dilakukan pada struktur *shell* bilah juga menghasilkan 3 kandidat desain terbaik berdasarkan *objective* yang telah ditetapkan, dengan rincian parameter input dan output dapat dilihat pada tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Hasil Candidate Point Proses MOGA Pada Bilah Optimum (Linearized)

			Candidate Point 1	Candidate Point 2	Candidate Point 3
Input Parameter	Number of Ply	Ply Group 1 Sisi Pressure	15	15	15
		Ply Group 2 Sisi Pressure	12	12	12
		Ply Group 3 Sisi Pressure	10	10	10
		Ply Group 1 Sisi Suction	13	13	13
		Ply Group 2 Sisi Suction	5	5	5
		Ply Group 3 Sisi Suction	11	11	11
	Ply Material	Ply Group 1 Sisi Pressure	35°(Plain Woven)	35°(Plain Woven)	35°(Plain Woven)
		Ply Group 2 Sisi Pressure	±55°(UD)	±55°(UD)	±55°(UD)
		Ply Group 3 Sisi Pressure	0° (Plain Woven)	0° (Plain Woven)	0° (Plain Woven)
		Ply Group 1 Sisi Suction	±35°(UD)	0°(Plain Woven)	±35°(UD)
		Ply Group 2 Sisi Suction	0° (Plain Woven)	0° (Plain Woven)	35° (Plain Woven)
		Ply Group 3 Sisi Suction	0° (Plain Woven)	0° (Plain Woven)	0° (Plain Woven)
Output Parameter	Total Massa (Ton)		1.9068	1.9072	1.9072
	Frekuensi Natural Mode I (Hz)		2.61	2.63	2.56
	Safety Factor Minimum		3.32	3.30	3.30
	Maksimum Deformasi <i>Flapwise</i> (mm)		280.40	281.37	287.04

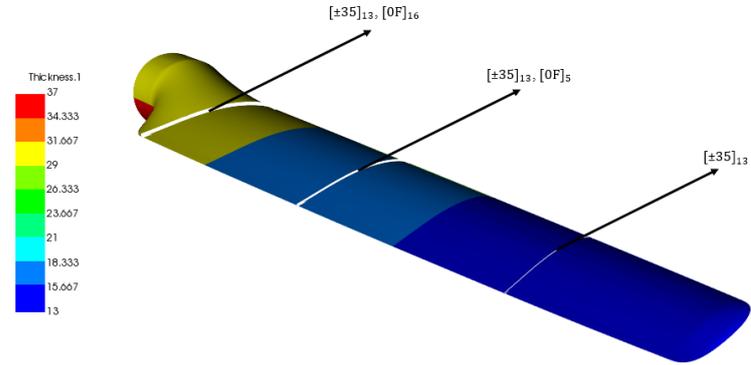
Dari 3 poin kandidat, didapat bahwa variabel jumlah tumpukan lamina memiliki jumlah yang persis satu sama lain. Perbedaan dari tiap kandidat hanya terdapat pada *ply material* yaitu perbedaan orientasi dan model RVE dari komposit. Hasil terbaik dicapai oleh kandidat desain pertama dengan massa sebesar 1.9068 ton, dimana nilai *safety factor* dan defleksi *flapwise* maksimum lebih rendah daripada kandidat lainnya, namun frekuensi natural mode I minimum lebih tinggi dari pada kandidat desain kedua dengan perbedaan yang sangat kecil. Pada bilah model ini, didapat bahwa *output parameter* (*safety factor*, *natural frequency*, dan *flapwise deflection*) yang didapat jauh diatas *constraint* yang telah ditetapkan, yang mengindikasikan bahwa hasil optimasi bilah ini hanya mencapai *local optimum*. Bilah yang jauh lebih ringan dapat dicapai apabila proses MOGA dapat menemukan *global optimum*.

ACP Model
07/20/22 16:59
Thickness
Element-Web
Unit: mm
Max: 37
Min: 13



(a)

ACP Model
07/20/22 17:20
Thickness
Element-Web
Unit: mm
Max: 37
Min: 13

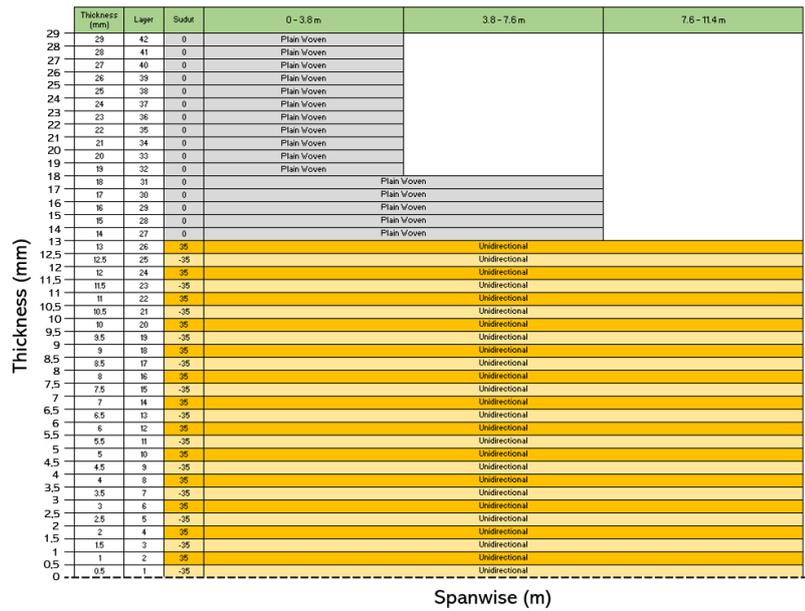


(b)

Gambar 4. 28 Kontur Ketebalan Pada Bilah Optimum (*Linearized*)

Thickness (mm)	Layer	Subst	Spanwise (m)		
			0 - 3.0 m	3.0 - 7.6 m	7.6 - 11.4 m
37	37	49	0		
36	36	49	0	Plain Weave	
35	35	49	0	Plain Weave	
34	34	49	0	Plain Weave	
33	34	49	0	Plain Weave	
32	33	49	0	Plain Weave	
31	32	49	0	Plain Weave	
30	31	49	0	Plain Weave	
29	29	49	0	Plain Weave	
28	29	49	0	Plain Weave	
27	27	39	95		
26.5	27	39	95	Unidirectional	
26	26.5	39	-95	Unidirectional	
25.5	26	39	-95	Unidirectional	
25	25.5	39	-95	Unidirectional	
24.5	25	39	-95	Unidirectional	
24	24.5	39	-95	Unidirectional	
23.5	24	39	95	Unidirectional	
23	23.5	39	95	Unidirectional	
22.5	23	39	95	Unidirectional	
22	22.5	39	95	Unidirectional	
21.5	22	39	95	Unidirectional	
21	21.5	39	95	Unidirectional	
20.5	21	39	95	Unidirectional	
20	20.5	39	95	Unidirectional	
19.5	20	39	95	Unidirectional	
19	19.5	39	95	Unidirectional	
18.5	19	39	95	Unidirectional	
18	18.5	39	95	Unidirectional	
17.5	18	39	95	Unidirectional	
17	17.5	39	95	Unidirectional	
16.5	17	39	95	Unidirectional	
16	16.5	39	95	Unidirectional	
15.5	16	39	95	Unidirectional	
15	15.5	39	95	Unidirectional	
14	15	39	95	Plain Weave	
13	14	39	95	Plain Weave	
12	13	39	95	Plain Weave	
11	12	39	95	Plain Weave	
10	11	39	95	Plain Weave	
9	10	39	95	Plain Weave	
8	9	39	95	Plain Weave	
7	8	39	95	Plain Weave	
6	7	39	95	Plain Weave	
5	6	39	95	Plain Weave	
4	5	39	95	Plain Weave	
3	4	39	95	Plain Weave	
2	3	39	95	Plain Weave	
1	2	39	95	Plain Weave	
0	1	39	95	Plain Weave	

(a)



(b)

Gambar 4. 29 Distribusi Lamina Komposit Pada Struktur *Shell* (a) Sisi *Pressure* dan (b) Sisi *Suction* Pada Bilah Optimum (*Linearized*)

Kandidat desain yang terpilih memiliki total ketebalan yang dapat dilihat pada gambar 4.28 dengan rincian tipe RVE dan orientasi sudut komposit yang dapat dilihat pada gambar 4.29.

4.2.3 Komparasi Properti Kekakuan Komposit Pada Bilah

Classical Laminate Theory (CLT) digunakan untuk mengevaluasi properti kekakuan dari bilah turbin angin untuk mengetahui kekakuan secara keseluruhan dari struktur komposit bilah melalui *stiffness matrix* atau matriks ABD. Kekuatan laminasi multidireksional dipengaruhi oleh banyak faktor selain dari kekuatan lamina secara fundamental. Berbagai orientasi lamina, kekakuan, kekuatan, dan koefisien ekspansi termal dan kelembaban mempengaruhi karakteristik arah dari kekuatan laminasi. Urutan penumpukan yang tepat mempengaruhi *bending stiffness* dan *coupling stiffness* (D dan B) dan karenanya berpengaruh ke tegangan dan kekuatan laminasi. Akhirnya, proses fabrikasi mempengaruhi *residual stress*, yang mempengaruhi kekuatan secara keseluruhan. Oleh karena itu, komparasi dari matriks ABD dilakukan untuk mengetahui hal tersebut. Adapun matriks ABD pada bilah *baseline* adalah sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} 517351.6 & 90440.6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 90440.6 & 517351.6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 100419.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 17245050 & 3014697 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3014687 & 17245050 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3347307 \end{bmatrix}$$

Pada komposit bilah *baseline* tidak terdapat *coupling stiffness* sehingga diprediksi tidak akan terjadi distorsi atau *warping*. Kemudian matriks ABD dari bilah *optimum* disajikan sesuai dengan gambar 4.21 dengan sisi *pressure* sebagai berikut.

➤ $r = 0-3.8$ m (*pressure*)

$$\begin{bmatrix} 695262.3 & 186036.3 & -19981 & 494088.8 & -494086.9 & 179829 \\ 186036.3 & 695262.1 & 19981.07 & -494076.9 & 494076 & -179829.6 \\ -19981 & 19981.07 & 200505.3 & 179829 & -179829.6 & -494086.9 \\ 494077.8 & -494076.9 & 179829 & 47573450 & 14190890 & -1819936 \\ -494076.9 & 494076 & -179829.6 & 14190890 & 47573440 & 1819942 \\ 179829 & -179829.6 & -494076.9 & 1819942 & 1819942 & 15204920 \end{bmatrix}$$

➤ $r = 3.8-7.6$ m (*pressure*)

$$\begin{bmatrix} 410718.9 & 136294 & -19981 & 192141.4 & -192141 & 69933.49 \\ 136294 & 410718.9 & 19981.07 & -192141 & 192140.7 & -69933.74 \\ -19981 & 19981.07 & 145274.7 & 69933.49 & -69933.7 & -192141 \\ 192141.4 & -192141 & 69933.49 & 11345600 & 3423749 & -446242.3 \\ -192141 & 192140.7 & -69933.7 & 3423749 & 11345600 & 446243.8 \\ 69933.49 & -69933.7 & -192141 & -446242 & 446243.8 & 3666229 \end{bmatrix}$$

➤ $r = 7.6-11.4$ m (*pressure*)

$$\begin{bmatrix} 229546.9 & 104639.8 & -19981 & 0 & 0 & 0 \\ 104639.8 & 229645.9 & 19981.07 & 0 & 0 & 0 \\ -19981 & 19981.07 & 110128 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2315596 & 1055118 & -201475.1 \\ 0 & 0 & 0 & 1055118 & 2315596 & 201475.8 \\ 0 & 0 & 0 & -201475.1 & 201475.8 & 1110457 \end{bmatrix}$$

Sedangkan ABD matriks pada sisi *suction* dari pangkal ke ujung bilah adalah berikut.

➤ $0-3.8$ m (*suction*)

$$\begin{bmatrix} 554478.1 & 250035.3 & 0.05 & 519748.2 & 43972.92 & 23163.26 \\ 250035.3 & 454333 & 0.05 & 43972.92 & -231339.6 & 11229.56 \\ 0.05 & 0.05 & 268850.4 & 23163.26 & 11229.56 & 95279.15 \\ 519738.2 & 43972.92 & 23163.26 & 27654440 & 12089640 & 347454.3 \\ 43972.92 & -231339.6 & 11229.56 & 12089640 & 21345310 & 168448.8 \\ 23163.26 & 11229.56 & 95279.15 & 347454.3 & 168448.8 & 13095380 \end{bmatrix}$$

➤ $3.8-7.6$ m (*suction*)

$$\begin{bmatrix} 493830.8 & 219513.7 & 0.04 & 415798.5 & 35178.34 & 23163.3 \\ 219513.7 & 393586.7 & 0.04 & 35178.34 & -185072 & 11229.61 \\ 0.04 & 0.04 & 236832.1 & 23163.3 & 11229.61 & 76223.32 \\ 415798.5 & 35178.34 & 23163.3 & 18564080 & 8102308 & 277963.1 \\ 35178.34 & -185072 & 11229.61 & 8102308 & 14282880 & 134758.8 \\ 23163.3 & 11229.61 & 76223.32 & 277963.1 & 134758.8 & 8779803 \end{bmatrix}$$

➤ $7.6-11.4$ m (*suction*)

$$\begin{bmatrix} 251241.6 & 97427.64 & 0 & 0 & 0 & 23163.49 \\ 97427.64 & 151096.6 & 0 & 0 & 0 & 11229.79 \\ 0 & 0 & 108758.8 & 23163.49 & 11229.79 & 0 \\ 0 & 0 & 23163.49 & 1695881 & 657636.5 & 0 \\ 0 & 0 & 11229.79 & 657636.5 & 1019902 & 0 \\ 23163.49 & 11229.79 & 0 & 0 & 0 & 734122.2 \end{bmatrix}$$

Kemudian matriks ABD dari bilah *optimum* yang terlinearisasi pada sisi *pressure* disajikan dari pangkal ke ujung bilah sebagai berikut.

➤ $r = 0-3.8$ m (*pressure*)

$$\begin{bmatrix} 773291.5 & 317814.4 & 27246.91 & 551090.1 & -634363.6 & -314689.1 \\ 31814.4 & 906818 & -27246.81 & -634363.6 & 884905.8 & 268830.3 \\ 27246.91 & -27246.81 & 345395.9 & -314689.1 & 268830.3 & -611560.9 \\ 551090.10 & -634363.6 & -314689.1 & 96739190 & 30929980 & 3732890 \\ -634363.6 & 884905.8 & 268830.3 & 30929980 & 9917610 & -3962166 \\ -314689.1 & 268830.3 & -611560.9 & 3732890 & -3962166 & 33202470 \end{bmatrix}$$

➤ $r = 3.8-7.6$ m (*pressure*)

$$\begin{bmatrix} 514615.6 & 272594.1 & 27246.91 & -367955.2 & 118132.8 & -178454.5 \\ 272594.1 & 648142.3 & -27246.81 & 118132.8 & 633495.5 & 132596.2 \\ 27246.91 & -27246.81 & 295186.3 & -178454.5 & 132596.2 & 186541.2 \\ -367955.2 & 118132.8 & -178454.5 & 30894940 & 16678220 & 1267173 \\ 118132.8 & 633495.5 & 132596.2 & 16678220 & 40008140 & -1955033 \\ -178454.5 & 132596.2 & 186541.2 & 1267173 & -1955033 & 18119110 \end{bmatrix}$$

➤ $r = 7.6-11.4$ m (*pressure*)

$$\begin{bmatrix} 313153.5 & 142690.6 & 27246.91 & 0 & 0 & 0 \\ 142690.6 & 313153.4 & -27246.81 & 0 & 0 & 0 \\ 27246.91 & -27246.81 & 150174.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5871628 & 2675448 & 510879.6 \\ 0 & 0 & 0 & 2675448 & 5871627 & -510877.8 \\ 0 & 0 & 0 & 510879.6 & -510877.8 & 2815773 \end{bmatrix}$$

Sedangkan matriks ABD pada sisi *suction* dari pangkal ke ujung bilah adalah sebagai berikut.

➤ $r = 0-3.8$ m (*suction*)

$$\begin{bmatrix} 776785.9 & 213081.3 & 0 & 213008 & 655539.4 & 33458.37 \\ 213081.3 & 632131.7 & 0 & 655539.4 & -944222.1 & 16220.81 \\ 0 & 0 & 237431.5 & 33458.37 & 16220.81 & 734589 \\ 213008 & 655539.4 & 33458.37 & 54652750 & 15588990 & 535333.9 \\ 655539.4 & -944222.1 & 16220.81 & 15588990 & 43357680 & 259532.9 \\ 33458.37 & 16220.81 & 734589 & 535333.9 & 259532.9 & 17374580 \end{bmatrix}$$

➤ $r = 3.8-7.6$ m (*suction*)

$$\begin{bmatrix} 492242.5 & 163339 & 0 & 66564.99 & 204856.1 & 33458.37 \\ 163339 & 347588.5 & 0 & 204856.1 & -295069.4 & 16220.81 \\ 0 & 0 & 182200.9 & 33458.37 & 16220.81 & 229559.1 \\ 66564.99 & 204856.1 & 33458.37 & 13113040 & 3863869 & 167291.8 \\ 204856.1 & -295069.4 & 16220.81 & 3863869 & 10171740 & 81104.03 \\ 33458.37 & 16220.81 & 229559.1 & 167291.8 & 81104.03 & 4307267 \end{bmatrix}$$

➤ $r = 7.6-11.4$ m (*suction*)

$$\begin{bmatrix} 362904.6 & 140728.80 & 0 & 0 & 0 & 33458.37 \\ 140728.8 & 218250.6 & 0 & 0 & 0 & 16220.81 \\ 0 & 0 & 157096.1 & 33458.37 & 16220.81 & 0 \\ 0 & 0 & 33458.37 & 5110906 & 1981931 & 0 \\ 0 & 0 & 16220.81 & 1981931 & 3073696 & 0 \\ 33458.37 & 16220.81 & 0 & 0 & 0 & 2212437 \end{bmatrix}$$

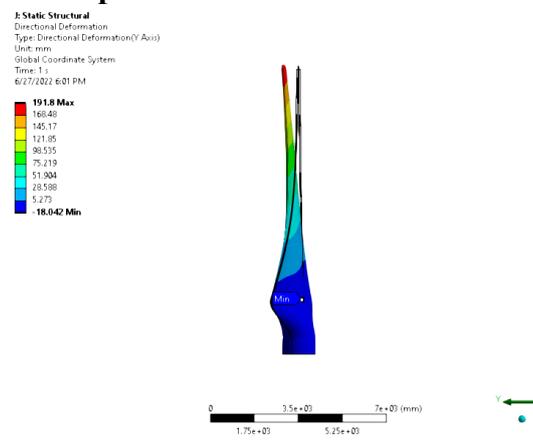
Berdasarkan matriks ABD pada bilah *optimum*, didapat bahwa *coupling stiffness* pada kedua bilah *optimum* cukup tinggi. Hal ini berpotensi menyebabkan distorsi geometrik atau *warpage* pada saat proses fabrikasi. *Warpage* atau distorsi geometrik dapat terjadi pada laminasi komposit setelah *curing* atau terpapar lingkungan *hygrothermal*. Hal ini terjadi akibat kombinasi induksi tegangan *hygrothermal* dan laminasi asimetrik. Faktor yang berkontribusi pada distorsi adalah penyusutan resin, yang *irreversible* secara kimia dan sebagian *reversible* secara termal. *Coupling* tersebut berpengaruh terhadap antara *in-plane loading* dan *out-of-plane deformation (curvature)* dan antara *bending*, momen *twist*, dan *in-plane deformation*. *Coupling stiffness* yang terdiri dari *coupling in-plane loading* dengan *out of plane deformation* bertanggung jawab atas distorsi atau *warpage* pada saat fabrikasi akibat pendinginan setelah proses *curing* dan terhadap lingkungan *hygrothermal* yang bervariasi.

Pada beberapa desain, *coupling* dapat dimanfaatkan, seperti laminasi *shell* yang terkena beban aerodinamik, atau biasa disebut sebagai *smart composites*. Pada beberapa kasus laminasi non-simetrik, *bending coupling* dapat diminimalisir dengan menggunakan *stacking sequence* yang sesuai. Namun akibat penggunaan komposit asimetrik, laminasi komposit yang digunakan dapat terjadi distorsi atau *warpage* setelah difabrikasi. Oleh karena itu, penggunaan konfigurasi laminasi komposit hasil *improvement* dari penelitian ini harus memperhatikan potensi terjadinya distorsi geometrik saat fabrikasi akibat dari konfigurasi komposit asimetrik. Siklus *curing* dapat dioptimasi untuk mendapatkan *curing* yang merata dan cepat dengan menyesuaikan model kinetik dari resin, dalam hal ini resin epoksi, untuk meminimalisir terjadinya distorsi, sehingga dapat mengurangi *interlaminar stress* pada laminasi.

4.3 Hasil Simulasi Bilah Setelah Proses *Improvement*

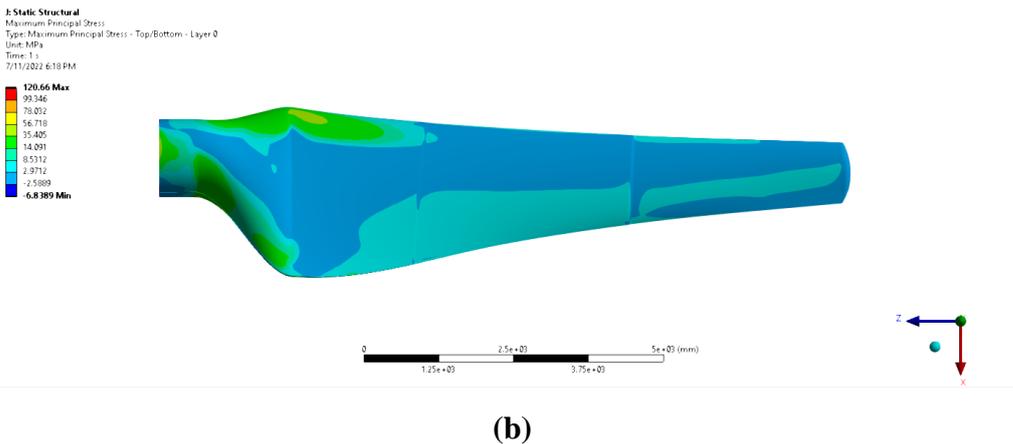
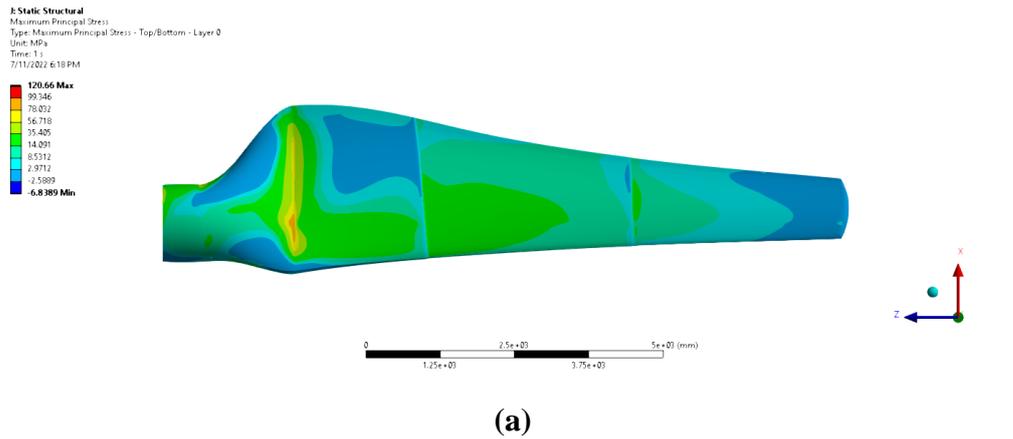
Pada sub-bab ini dilakukan simulasi bilah setelah dilakukan *improvement* (optimum) dengan pembebanan dan *boundary condition* yang sama dengan bilah sebelum dilakukan *improvement* (*baseline*) bersama dengan komparasinya.

4.3.1 Hasil Simulasi Bilah Optimum



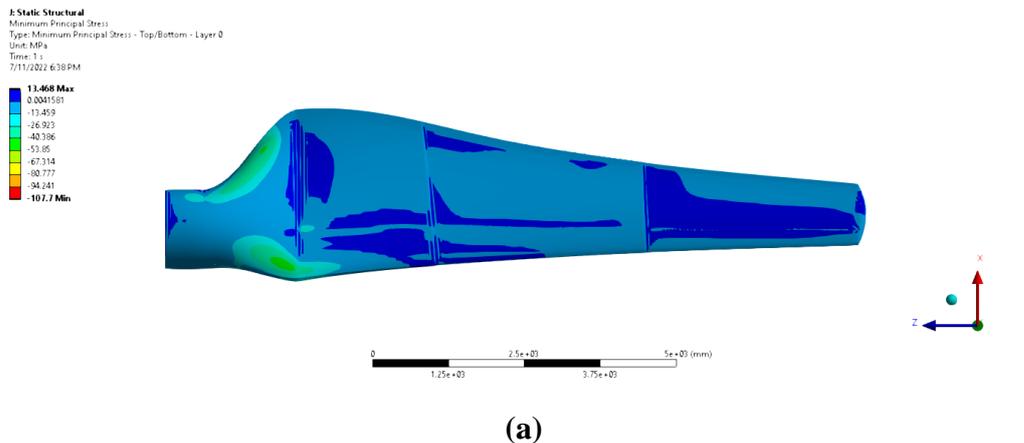
Gambar 4. 30 Deformasi *Flapwise* Pada Bilah Optimum

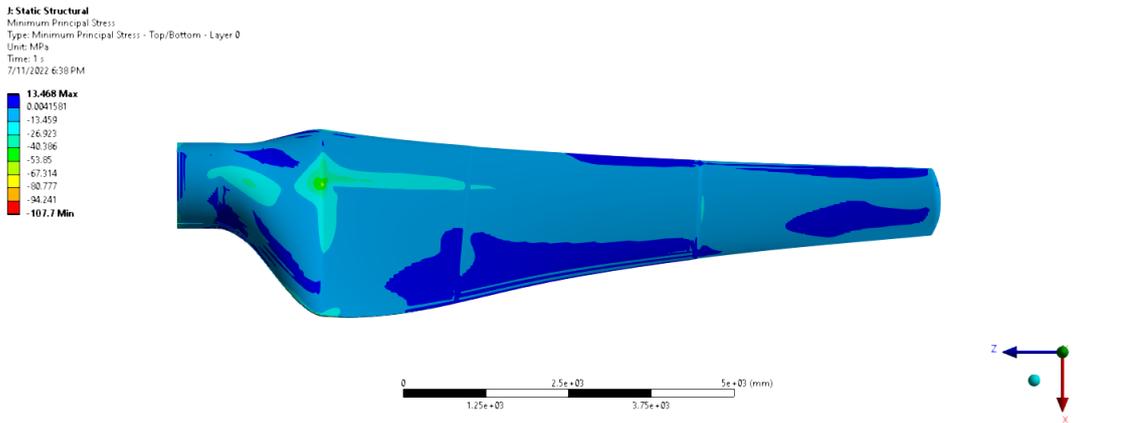
Defleksi bilah setelah *improvement* secara *flapwise* ditunjukkan pada Gambar 4.30. Berdasarkan gambar, defleksi bilah secara *flapwise* adalah sebesar 0.192 m. Dengan *overhang* atau *tower clearance* sebesar 4 m, nilai tersebut jauh lebih rendah dari jarak *overhang*, sehingga bilah setelah dilakukan *improvement* masih aman ketika beroperasi pada kondisi operasional maksimum.



Gambar 4.31 *Maximum Principal Stress* Bilah Optimum Pada (a) Sisi *Pressure* (b) Sisi *Suction*

Gambar 4.31 menunjukkan kontur *maximum principal stress* pada sisi *pressure* dari bilah turbin angin setelah dilakukan *improvement*. Tegangan terbesar terjadi pada bagian tekukan di daerah transisi antara profil airfoil dengan pangkal dengan nilai sebesar 120.66 MPa. Berdasarkan gambar, dapat dilihat bahwa *principal stress* cukup besar pada sepanjang tekukan transisi. Selain itu, jika ditinjau dari pangkal ke ujung *principal stress* akan meningkat setiap mengenai *drop-off*. Berdasarkan kontur, didapat bahwa *maximum principal stress* terdistribusi lebih merata dibanding bilah *baseline* seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.5.

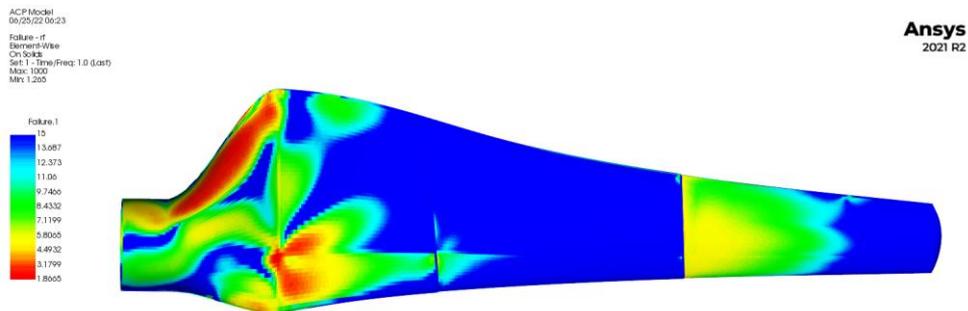




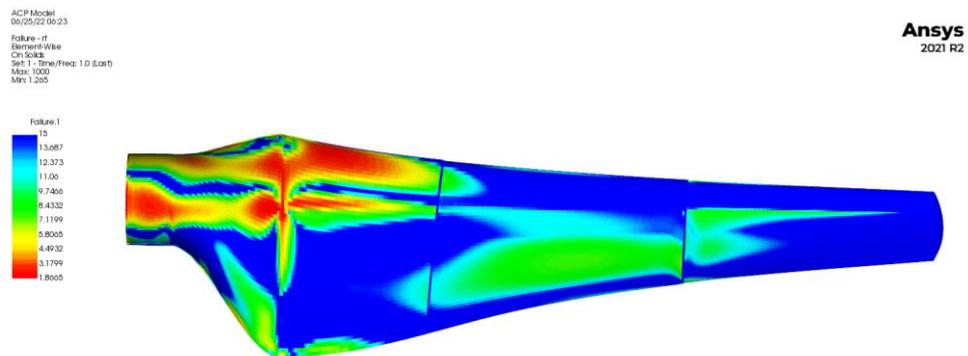
(b)

Gambar 4. 32 Minimum Principal Stress Bilah Optimum Pada (a) Sisi Pressure (b) Sisi Suction

Gambar 4.32 menunjukkan kontur *minimum principal stress* pada sisi *suction* dari bilah turbin angin. Tegangan terbesar terjadi pada bagian *leading edge* di daerah transisi antara profil airfoil dengan pangkal dengan nilai sebesar -107.7 MPa. Berdasarkan gambar, dapat dilihat bahwa *principal stress* cukup besar pada sepanjang tekukan transisi di daerah tengah dan *leading edge*, namun berkurang dibanding bilah *baseline*. Berdasarkan kontur, didapat bahwa *minimum principal stress* juga terdistribusi lebih merata dibanding bilah *baseline* seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.6.



(a)



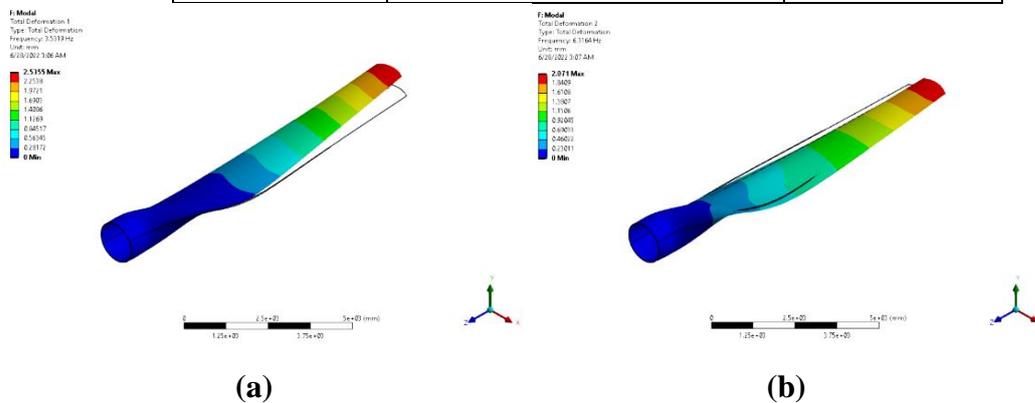
(b)

Gambar 4. 33 Kontur Safety Factor Bilah Optimum Pada (a) Sisi Pressure dan (b) Sisi Suction

Selanjutnya pada gambar 4.33 adalah kontur *safety factor* dengan kriteria kegagalan *Tsai-Wu* pada bilah. Hasil kontur menunjukkan bahwa nilai *safety factor* pada tiap bagian bilah terdistribusi lebih merata daripada bilah *baseline*, hal ini disebabkan karena ketebalan dari bilah yang semakin menipis akibat pengurangan massa dari bilah. Nilai *safety factor* terkecil dari bilah didapat sebesar 1.8665, yang artinya bilah ini aman dan berada diatas standar *International Electrotechnical Commission (IEC) 1400-1*, dimana *safety factor* yang diperbolehkan pada desain struktur bilah turbin angin komersial seminimal mungkin sebesar 1.485.

Tabel 4. 5 Hasil Frekuensi Natural Bilah Optimum Dengan Tipe Getaran

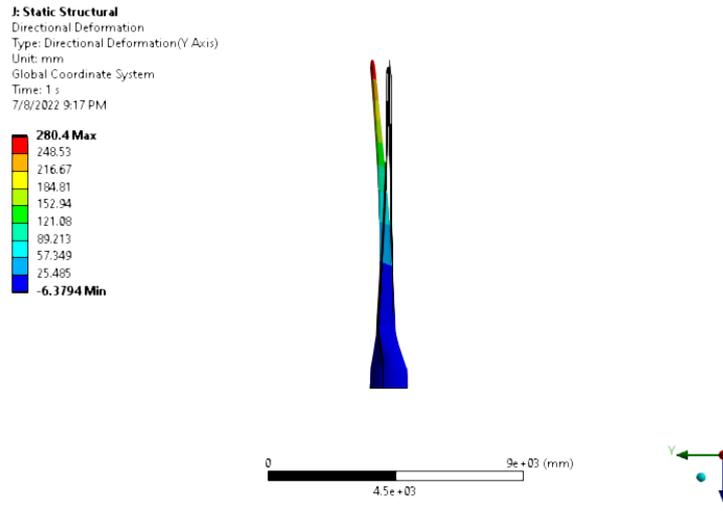
Mode	Natural Frequency (Hz)	Tipe Getaran
1	3.5319	Utama
2	6.3164	Utama
3	10.053	Lokal
4	17.188	Lokal
5	18.905	Lokal
6	25.579	Lokal
7	29.154	Lokal
8	31.424	Lokal



Gambar 4. 34 Mode Shape dan Frekuensi Natural Getaran Utama Bilah Optimum

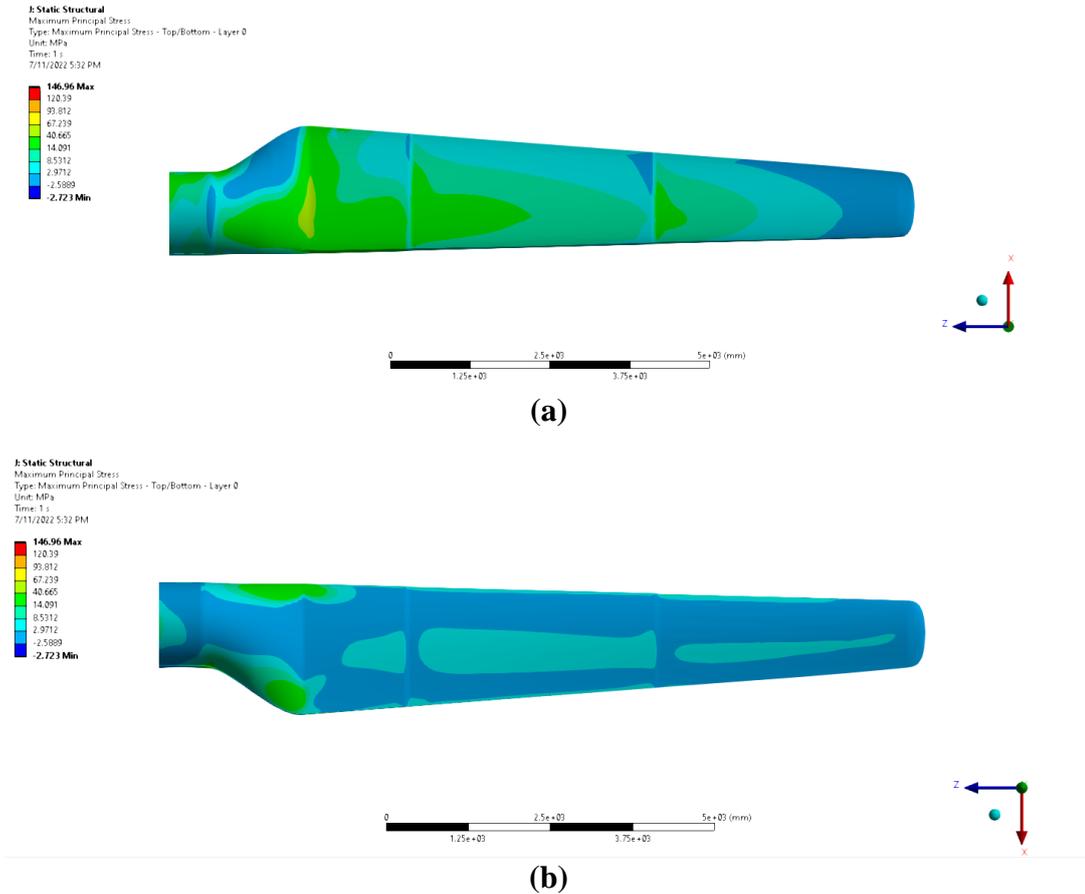
Gambar 4.34 dan tabel 4.5 menunjukkan hasil simulasi *modal* dengan total 8 *mode shape* beserta frekuensi naturalnya. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa tidak terjadi perubahan *mode shape* yang signifikan dari bilah setelah proses *improvement*. Nilai frekuensi natural utama (mode I dan II) pada bilah mengalami peningkatan yang besar, namun pada mode yang lain tidak mengalami perubahan yang signifikan. Seluruh frekuensi natural pada bilah yang ditemukan pada *modal analysis* berada pada batas aman resonansi akibat angin yaitu 1.575 Hz, sehingga bilah ini aman terhadap kondisi operasionalnya berdasarkan spesifikasi.

4.3.2 Hasil Simulasi Bilah Optimum (*Linearized*)



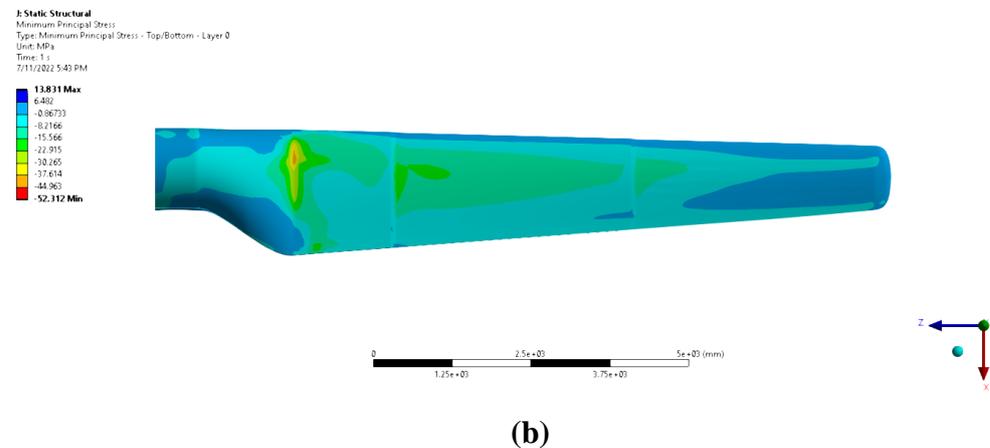
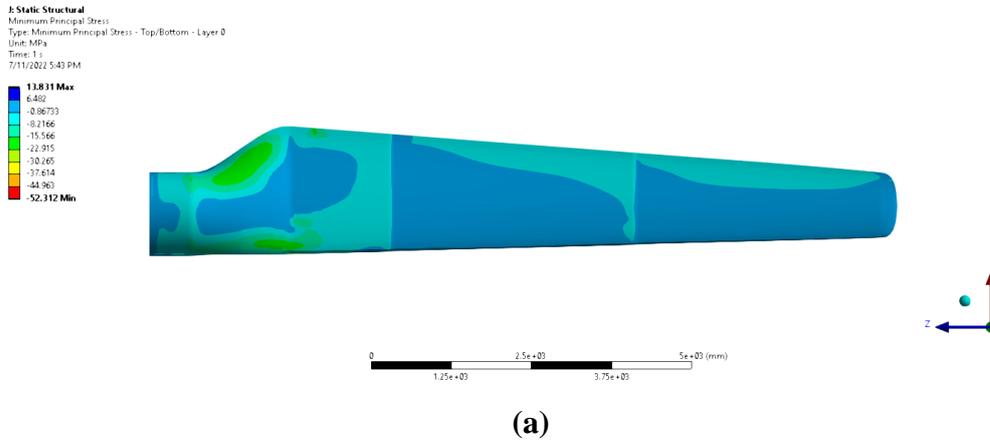
Gambar 4. 35 Deformasi *Flapwise* Pada Bilah Optimum (*Linearized*)

Defleksi bilah setelah *improvement* secara *flapwise* ditunjukkan pada Gambar 4.35. Berdasarkan gambar, defleksi bilah secara *flapwise* adalah sebesar 0.28 m. Dengan *overhang* atau *tower clearance* sebesar 4 m, Nilai tersebut jauh lebih rendah dari jarak *overhang*, sehingga bilah setelah dilakukan *improvement* masih aman ketika beroperasi pada kondisi operasional maksimum.



Gambar 4. 36 *Maximum Principal Stress* Bilah Optimum (*Linearized*) Pada (a) Sisi *Pressure* (b) Sisi *Suction*

Gambar 4.36 menunjukkan kontur *maximum principal stress* pada sisi *pressure* dari bilah turbin angin setelah dilakukan *improvement*. Tegangan terbesar terjadi pada bagian tekukan di daerah transisi antara profil airfoil dengan pangkal dengan nilai sebesar 146.96 MPa. Berdasarkan gambar, dapat dilihat bahwa *principal stress* cukup besar pada sepanjang tekukan transisi. Selain itu, jika ditinjau dari pangkal ke ujung *principal stress* akan meningkat setiap mengenai *drop-off*. Berdasarkan kontur, didapat bahwa *maximum principal stress* terdistribusi lebih merata dibanding bilah *baseline* seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.5.

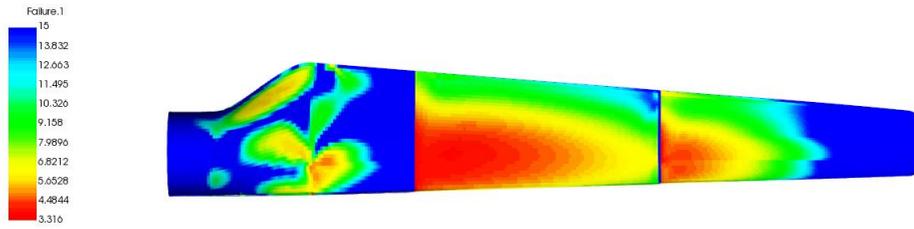


Gambar 4. 37 *Minimum Principal Stress* Bilah Optimum (*Linearized*) Pada (a) Sisi *Pressure* (b) Sisi *Suction*

Gambar 4.37 menunjukkan kontur *minimum principal stress* pada sisi *suction* dari bilah turbin angin. Tegangan terbesar terjadi pada bagian *leading edge* di daerah transisi antara profil airfoil dengan pangkal dengan nilai sebesar -52.312 MPa. Geometri dari bilah setelah melalui proses linearisasi ini tidak memiliki tekukan pada *leading edge* yang terdapat pada model bilah sebelumnya. Oleh karena itu, konsentrasi *stress* pada *leading edge* di daerah transisi seperti pada gambar 4.7 tidak terdapat pada bilah terlinearisasi. Selain itu, berdasarkan kontur, didapat bahwa *minimum principal stress* juga terdistribusi lebih merata dibanding bilah *baseline* seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.6.

ACP Model
07/11/22 18:00
Failure - rf
Element-Wise
On Solid
Set: 1 - Time/Freq: 1.0 (Last)
Max: 1000
Min: 2.3445

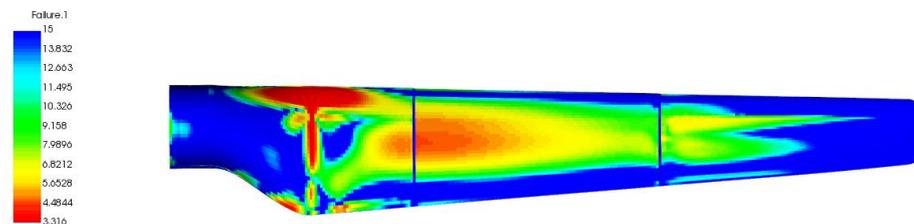
Ansys
2021 R2



(a)

ACP Model
07/07/22 22:47
Failure - rf
Element-Wise
On Solid
Set: 1 - Time/Freq: 1.0 (Last)
Max: 1000
Min: 1.4973

Ansys
2021 R2



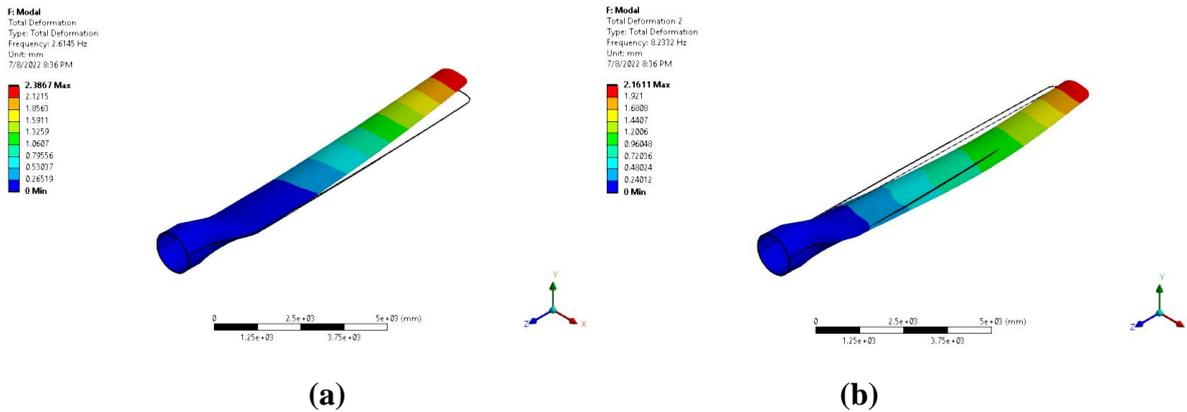
(b)

Gambar 4. 38 Kontur *Safety Factor* Bilah Optimum (*Linearized*) Pada (a) Sisi *Pressure* dan (b) Sisi *Suction*

Selanjutnya pada gambar 4.38 adalah kontur *safety factor* dengan kriteria kegagalan *Tsai-Wu* pada bilah. Hasil kontur menunjukkan bahwa nilai *safety factor* pada tiap bagian bilah terdistribusi lebih merata daripada bilah *baseline*, hal ini disebabkan karena ketebalan dari bilah yang semakin menipis akibat pengurangan massa dari bilah. Nilai *safety factor* terkecil dari bilah didapat sebesar 3.316, yang artinya bilah ini aman dan berada diatas standar *International Electrotechnical Commission* (IEC) 1400-1, dimana *safety factor* yang diperbolehkan pada desain struktur bilah turbin angin komersial seminimal mungkin sebesar 1.485. Namun, nilai *safety factor* jauh diatas yang diizinkan, yang menyimpulkan bahwa bilah ini dapat dilakukan optimasi topologi lebih lanjut.

Tabel 4. 6 Hasil Frekuensi Natural Bilah Optimum (*Linearized*) Dengan Tipe Getaran

Mode	Natural Frequency (Hz)	Tipe Getaran
1	2.6145	Utama
2	8.2332	Utama
3	10.316	Lokal
4	21.735	Lokal
5	24.134	Lokal
6	32.744	Lokal
7	33.677	Lokal
8	39.251	Lokal



Gambar 4. 39 *Mode Shape* dan Frekuensi Natural Getaran Utama Bilah Optimum (*Linearized*)

Gambar 4.39 dan tabel 4.6 menunjukkan hasil simulasi *modal* dengan total 8 *mode shape* beserta frekuensinya. Nilai frekuensi natural mode 1 pada bilah tidak mengalami perubahan yang signifikan, namun hal yang berbeda terjadi pada nilai frekuensi natural mode 2 dimana terjadi peningkatan nilai yang besar dari 4.4459 Hz menjadi 8.2332 Hz.

4.3.3 Komparasi Bilah *Baseline* Dengan Optimum

Tabel 4. 7 Komparasi Bilah Sebelum Dilakukan *Improvement (Baseline)* dan Setelah Dilakukan *Improvement (Optimum)*

	Baseline	Optimum	Change (%)	Optimum (Linearized)	Change (%)
Total Massa (Ton)	1.8327	1.9460	6.18%	1.9068	4.04%
Maximum Principal Stress (MPa)	182.16	120.66	-33.76%	146.96	-19.32%
Minimum Principal Stress (MPa)	-95.3820	-107.70	12.91%	-52.312	-45.16%
Frekuensi Natural Mode I (Hz)	2.471	3.5319	42.93%	2.61	5.63%
Frekuensi Natural Mode II (Hz)	4.4459	6.3164	42.07%	8.2332	85.19%
Safety Factor Minimum	0.90	1.84	104.15%	3.32	268.89%
Maksimum Deformasi <i>Flapwise</i> (mm)	274.97	191.80	-30.25%	280.4	1.97%
Rated Power (kW) @ 12 m/s 72 rpm	120.378	120.378	0%	109.760	-8.82%

Tabel 4.7 menunjukkan komparasi bilah sebelum dilakukan *improvement* (*baseline*) dan setelah dilakukan *improvement* (*optimum*). Berdasarkan tabel, maximum principal stress mengalami penurunan sebesar 50.97% namun dengan minimum principal stress yang lebih rendah sebesar 11.44%. Sedangkan pada bilah yang telah dilakukan linearisasi, maximum principal stress mengalami penurunan sebesar 19.32% dan minimum principal stress mengalami peningkatan sebesar 45.16%. Defleksi dari bilah optimum mengalami pengurangan sebesar 30.25%, sedangkan pada bilah optimum yang terlinearisasi mendapatkan penambahan sebesar 1.97%. Namun defleksi keduanya masih berada pada constraint yang ditetapkan.

Kekakuan struktural dan massa bilah berubah dengan berubahnya distribusi jumlah lapisan komposit. Efek distribusi tersebut mempengaruhi frekuensi natural dari bilah secara keseluruhan sehingga frekuensi natural dari kedua bilah hasil improvement mengalami peningkatan. Namun frekuensi natural dari kedua bilah berada diatas constraint yang ditetapkan, sehingga diprediksi tidak akan terjadi resonansi akibat angin pada kondisi operasional bilah. Safety factor pada bilah optimum mengalami peningkatan sebesar 104.15%, sedangkan pada bilah optimum yang terlinearisasi mengalami peningkatan sebesar 268.89%. Safety factor pada bilah optimum yang terlinearisasi memiliki safety factor yang jauh lebih besar daripada bilah optimum tanpa linearisasi karena minimnya tekukan yang terdapat pada bilah khususnya pada daerah transisi, sehingga konsentrasi tegangan juga dapat tereliminasi. Namun, daya yang dihasilkan pada bilah optimum di kecepatan angin sebesar 12 m/s dan 72 rpm yang terlinearisasi mengalami pengurangan sebesar 8.82% dibanding daya maksimal yang dihasilkan pada bilah baseline. Hal ini disebabkan akibat perubahan distribusi panjang chord dan sudut twist yang terdapat pada bilah yang terlinearisasi menyebabkan konfigurasi yang tidak optimal terhadap vektor kecepatan angin secara aksial dan tangensial, sehingga mempengaruhi rasio CL/CD pada elemen bilah.

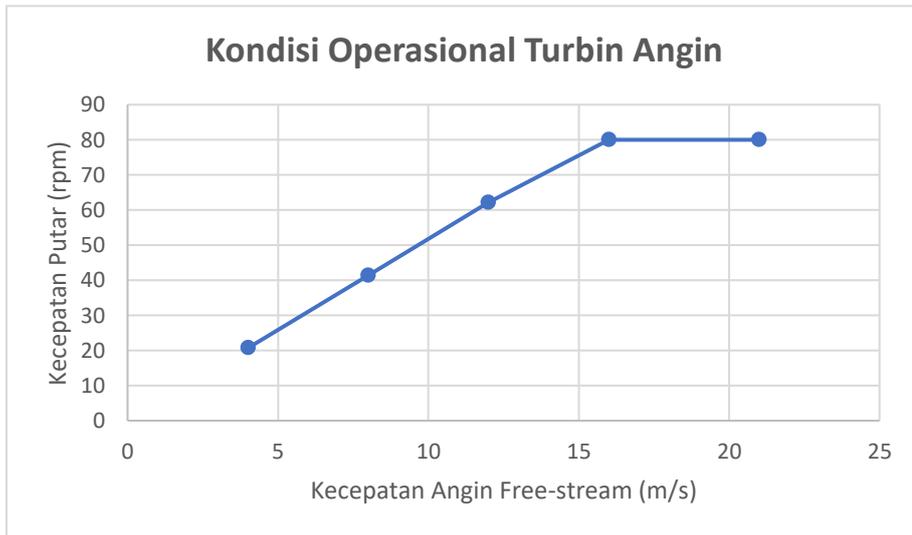
Berdasarkan komparasi yang telah dilakukan, desain bilah optimum yang melalui proses linearisasi menunjukkan performa struktural yang lebih baik daripada desain bilah optimum tanpa proses linearisasi. Bilah optimum yang terlinearisasi memiliki safety factor yang jauh lebih baik dengan penambahan massa yang lebih kecil daripada bilah tanpa linearisasi. Nilai safety factor masih yang jauh diatas batas aman menunjukkan bahwa bilah ini dapat mencapai massa yang lebih kecil melalui tahap optimasi topologi lanjutan. Walaupun frekuensi natural mode 1 dan defleksi flapwise bilah tanpa linearisasi lebih baik daripada yang terlinearisasi, namun angka keduanya masih sangat jauh dari batas aman yang ditetapkan. Disamping sisi, performa aerodinamis bilah mengalami penurunan sebesar 8.82%, namun masih diatas syarat kapasitas pada perancangan desain awal yaitu sebesar 100 KW. Selain itu, perbedaan performa aerodinamis tersebut tidak dapat menjustifikasi biaya manufaktur akibat bentuk yang kompleks dan struktur yang jauh lebih aman dari bilah tanpa linearisasi. Berdasarkan komparasi yang telah dilakukan, desain bilah optimum yang melalui proses linearisasi menunjukkan performa struktural yang lebih baik daripada desain bilah optimum tanpa proses linearisasi. Bilah optimum yang terlinearisasi memiliki *safety factor* yang jauh lebih baik dengan penambahan massa yang lebih kecil daripada bilah tanpa linearisasi. Nilai *safety factor* masih yang jauh diatas batas aman menunjukkan bahwa bilah ini dapat mencapai massa yang lebih kecil melalui tahap optimasi topologi lanjutan. Walaupun frekuensi natural mode 1 dan defleksi *flapwise* bilah tanpa linearisasi lebih baik daripada yang terlinearisasi, namun angka keduanya masih sangat jauh dari batas aman yang ditetapkan. Disamping sisi, performa aerodinamis bilah mengalami penurunan sebesar 8.82%, namun masih diatas syarat kapasitas pada perancangan desain awal yaitu sebesar 100 KW. Selain itu, perbedaan performa aerodinamis tersebut tidak dapat menjustifikasi biaya manufaktur akibat bentuk yang kompleks dan struktur yang jauh lebih aman dari bilah tanpa linearisasi.

4.4 Analisa Aeroelastisitas Statik

Kondisi operasional yang digunakan pada analisa aeroelastik menggunakan *tip speed ratio* (TSR) sebesar 6.5 yaitu kondisi desain parameter ideal dari bilah turbin angin, dimana bilah turbin angin mempunyai nilai *coefficient of power* (C_p) terbaik. Turbin angin akan cenderung mempertahankan untuk beroperasi pada TSR tersebut melalui *Maximum Power Point Tracking* (MPPT).

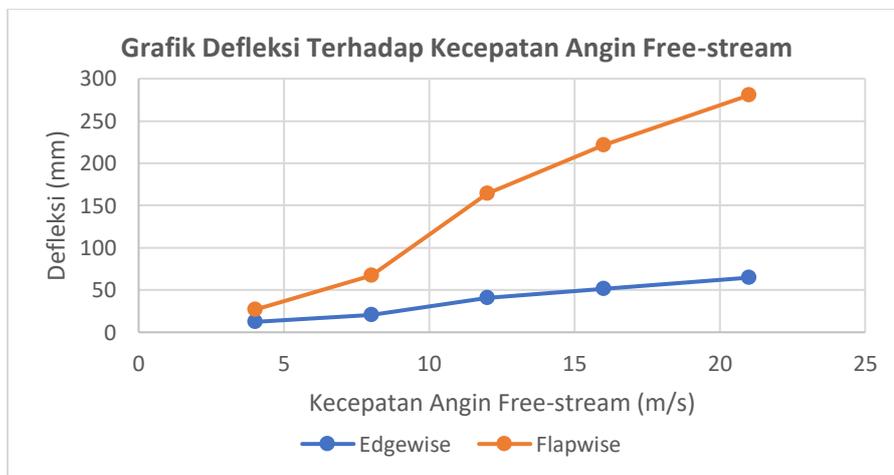
Tabel 4. 8 Kondisi Operasional Turbin Angin

Kondisi Operasional	TSR	Kecepatan Angin Free-stream (m/s)	Kecepatan Putar (rpm)
1	6.5	4	20.69
2	6.5	8	41.38
3	6.5	12	62.07
4	6.3	16	80
5	4.8	21	80

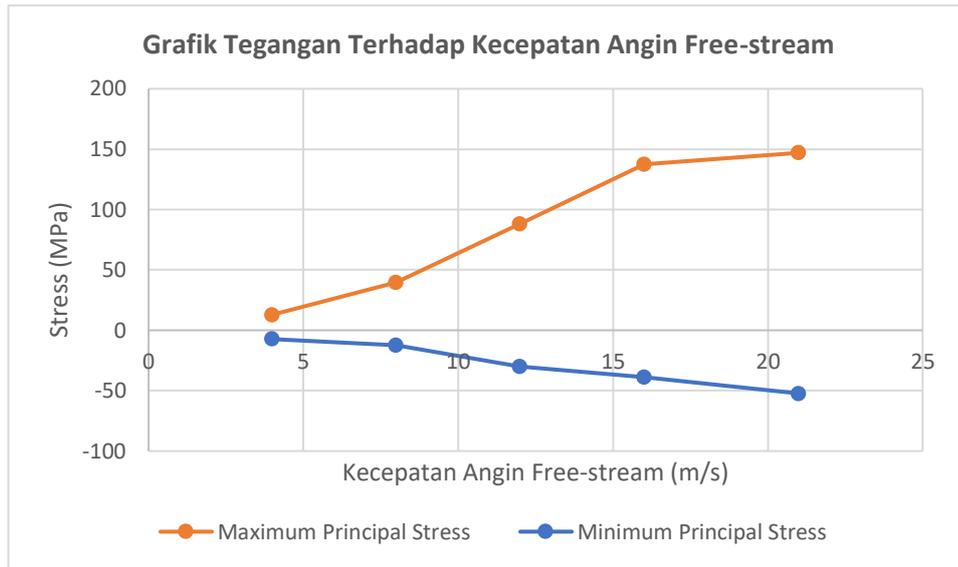


Gambar 4. 40 Kondisi Operasional Turbin Angin

Kondisi kecepatan angin yang digunakan pada simulasi ini adalah 4 m/s, 8 m/s, 12 m/s, 16 m/s, 21 m/s. Untuk menyesuaikan dengan TSR, maka digunakan kecepatan putar 20.69 rpm, 41.38 rpm, 62.07 rpm, 80 rpm, dan 80 rpm. Pada kecepatan angin 16 m/s dan 21 m/s kecepatan putar ditetapkan pada 80 rpm karena turbin angin akan melakukan pengereman untuk mencegah bilah berputar melebihi kecepatan putar maksimumnya dan mengalami penurunan TSR.



Gambar 4. 41 Grafik Defleksi Terhadap Kecepatan Angin *Free-stream*



Gambar 4. 42 Grafik Tegangan Terhadap Kecepatan Angin *Free-stream*

Berdasarkan gambar 4.41 pada kelima kondisi operasional, defleksi pada ujung bilah meningkat seiring pertambahan kecepatan angin baik secara *flapwise* maupun *edgewise*. Defleksi *flapwise* terjadi akibat angin secara tangensial dan defleksi *edgewise* terjadi akibat resultan dari gaya *lift* dan gaya *drag*. Dari lima kondisi operasional, defleksi dari bilah menunjukkan angka jauh dari jarak *overhang* sehingga diprediksi tidak akan menabrak *tower*. Lalu pada gambar 4.42 menunjukkan grafik nilai *maximum principal stress* dan *minimum principal stress* pada kelima kondisi operasional. Berdasarkan grafik, dapat dilihat bahwa nilai *maximum principal stress* dan *minimum principal stress* juga mengalami peningkatan seiring pertambahan kecepatan angin. Hal ini disebabkan akibat gaya normal dan tangensial yang bekerja pada bilah meningkat seiring bertambahnya kecepatan angin, menyebabkan momen *bending* yang terjadi pada bilah mengalami peningkatan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. Berdasarkan analisa kegagalan yang telah dilakukan, didapat bahwa penyebab kegagalan bilah turbin angin P3TKEBTKE apabila ditinjau secara mekanik disebabkan akibat kegagalan statik yang terjadi pada daerah transisi bilah dengan faktor kegagalan *Tsai-Wu* sebesar 1.2119 yang disebabkan pembebanan kritis berupa beban tarik kearah *span*. Letak ini sesuai dengan letak retakan aktual pada bilah turbin angin. Sebagai tambahan, analisa *modal* juga dilakukan untuk mencari mode getaran natural. Hasil analitis didapatkan bahwa bilah memiliki frekuensi resonansi rata-rata sebesar 3.458 Hz yang berdasarkan *Strouhal Number* memprediksi akan terjadi resonansi angin akibat fenomena *vortex shedding* pada kecepatan angin sebesar 46.16 m/s. Oleh karena itu, kegagalan harmonik tidak akan terjadi pada bilah karena kecepatan angin tersebut masih diluar rentang operasional dari bilah turbin angin.
2. *Improvement* pada bilah turbin angin telah dilakukan dengan melakukan perbandingan geometri awal dengan linearisasi distribusi panjang *chord* dan sudut *twist* serta melakukan optimasi sudut orientasi dan ketebalan komposit menggunakan metode *Multi-Objective Genetic Algorithm*. Hasil *improvement* menunjukkan bahwa desain terbaik dicapai pada bilah turbin angin yang terlinearisasi dengan susunan komposit *E-Glass/Epoxy* pada sisi *pressure* adalah 35° (*Plain Woven*) pada 0-11.4 m dengan jumlah 15 lamina, lalu tumpukan kedua adalah $\pm 55^\circ$ (*Unidirectional*) pada 0-7.6 m dengan jumlah 11 lamina, dan tumpukan terakhir 0° (*Plain Woven*) pada 0-3.8 m dengan jumlah 10 lamina. Sedangkan susunan komposit pada sisi *suction* adalah $\pm 35^\circ$ (*Unidirectional*) pada 0-11.4 m dengan jumlah 13 lamina, lalu tumpukan kedua adalah 0° (*Plain Woven*) pada 0-7.6 m dengan jumlah 4 lamina, dan tumpukan terakhir 0° (*Plain Woven*) pada 0-3.8 m dengan jumlah 11 lamina.
3. Hasil simulasi menunjukkan bahwa bilah turbin angin hasil *improvement* memiliki *maximum flapwise deflection* sebesar 280.4 mm, *maximum principal stress* sebesar 146.96 MPa, *minimum principal stress* sebesar -52.312 MPa, frekuensi natural pertama sebesar 2.61 Hz dengan peningkatan massa sebesar 4.04% menjadi 1.9068 ton, namun dengan pengurangan *rated power* sebesar 8.82% menjadi 109.76 kW. Hasil analisis aeroelastisitas statik pada kondisi *tip speed ratio* (TSR) sebesar 6.5 menunjukkan bahwa defleksi *flapwise* dan *edgewise* serta *maximum* dan *minimum principal stress* meningkat seiring pertambahan kecepatan angin.

5.2 Saran

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya antara lain adalah sebagai berikut.

1. Perancangan ulang bilah turbin angin menggunakan multi-airfoil dengan mempertimbangkan aspek struktural dan aerodinamis dari tiap elemen.
2. Optimasi topologi lanjutan dapat dilakukan untuk mendapatkan *global optimum* dengan jumlah segmentasi dan variabel yang lebih banyak.
3. Turbin angin dapat dirancang menggunakan material *laminated hybrid composite* yang terdiri dari komposit sintesis dan natural atau dengan komposit simetrik.
4. Struktur *shear web* dapat dilakukan perubahan desain dengan menambahkan *spar cap* atau mengubah geometri menjadi *box spar* untuk meningkatkan kekuatan dan kekakuan struktur bilah.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Ageze, M. B., Hu, Y., & Wu, H. (2017). Wind Turbine Aeroelastic Modeling: Basics and Cutting. *International Journal of Aerospace Engineering*.
- Alkhabbaz, A., Yang, H.-S., Weerakoon, A. S., & Lee, Y.-H. (2021). A novel linearization approach of chord and twist angle distribution. *Renewable Energy* 178, 1398-1420.
- Anderson Jr., J. D. (1988). *Fundamentals of Aerodynamics*. New York: McGraw-Hill.
- Aslam, S. (2018). An optimal home energy management scheme considering grid connected microgrids with day-ahead weather forecasting using artificial neural network. *Masters Thesis, COMSATS University Islamabad, Islamabad, Pakistan*.
- Avraham, T. (2020, Mei 4). *Turbulence Modeling – Near Wall Treatment*. Retrieved from CFDIsrael: <https://cfdisrael.blog/>
- Bangga, G. (2018). Comparison of Blade Element Method and CFD. *Fluids*, 3(4), 73.
- Benson, T. (2006, April 1). *Aerodynamic Center (ac)*. Retrieved from National Aeronautics and Space Administration (NASA): <https://www.grc.nasa.gov/>
- Branner, K., & Ghadirian, A. (2014). *Database about blade faults*. DTU Wind Energy E; No. 0067: DTU Wind Energy.
- CFD Online. (2011, Juni 13). *Y plus wall distance estimation*. Retrieved from CFD Online: <https://www.cfd-online.com/>
- Chou, J.-S., Chiu, C.-K., Huang, I.-K., & Chi, K.-N. (2013). Failure analysis of wind turbine blade under critical wind loads. *Engineering Failure Analysis*, 99-118.
- Daniel, I. M., & Ishai, O. (2006). *Engineering Mechanics of Composite Materials*. New York: Oxford University Press.
- Dewan Energi Nasional. (2016). *Outlook Energi Indonesia*. Jakarta: Sekretariat Jendral Energi Nasional.
- Ditjen EBTKE. (2021). *Potensi Energi Baru dan Energi Terbarukan dalam Indonesia Outlook Energy 2021*. Jakarta: Dewan Energi Nasional.
- Firmansyah, A. I., & Zulkarnain. (2012). Perancangan Bilah Turbin Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLT-Angin) Kapasitas 100 KW Menggunakan Studi Aerodinamika. *Ketenagalistrikan Dan Energi Terbarukan*, 151-158.
- Fox, & McDonald. (2011). *Introduction to Fluid Mechanics*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Halawa, M., & Al-Huniti, N. (2019). Optimum design of carbon/epoxy composite pressure vessels including moisture effects. *Journal of Composites Science*, 3(3).
- Hand, M. M., Simms, D. A., Fingersh, L. J., Jager, D. W., Cotrell, J. R., Schreck, S., & Larwood, S. M. (2001). *Unsteady Aerodynamics Experiment Phase VI: Wind Tunnel*

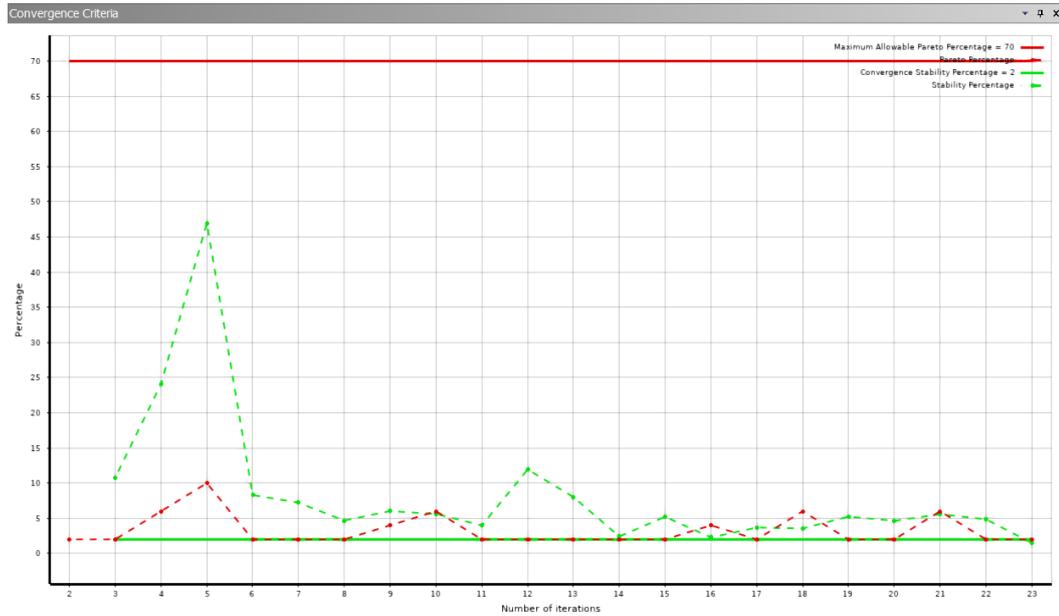
Test Configurations and Available Data Campaigns. United States: National Renewable Energy Lab.

- Hibbeler, R. C. (2011). *Mechanics of Materials*. New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- Jauhari, N., Mishra, R., & Thakur, H. (2017). Failure Analysis of Fibre-Reinforced Composite Laminates. *5th International Conference of Materials Processing and Characterization* (pp. 2851-2860). Materials Today: Proceedings.
- Jelita, I. N. (2021, Agustus 11). *Bauran Energi Terbarukan Ditargetkan Tercapai 23% pada 2025*. Retrieved from Media Indonesia: <http://mediaindonesia.com/>
- Lam, K. M., & Leung, M. Y. (2005). Asymmetric vortex shedding flow past an inclined flat plate. *European Journal of Mechanics B/Fluids*, 33-48.
- Lambora, A., Gupta, K., & Chopra, K. (2019). Genetic Algorithm- A Literature Review. *International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (Com-IT-Con)* (pp. 380-384). Noida: IEEE.
- Ledoux, J., Riffo, S., & Julien, S. (2021). Analysis of the Blade Element Momentum Theory. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 2596-2621.
- Logan, D. L. (2002). *A First Course in the Finite Element Method*. Pasific Groove: Thomson Learning Inc.
- Mamadaminov, U. M. (2013). Review of Airfoil Structures for Wind Turbine Blades. *Resource and Energy Economics*.
- McCormick, T. (1995). *Patterns and Implications of stasis in Trilobites*. Birmingham: Aston University.
- Menter, F. R. (1993). Zonal Two Equation $k-\omega$ Turbulence Models for Aerodynamic Flows. *23rd Fluid Dynamics, Plasmadynamics, and Lasers Conference*. Sunnyvale: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Meskill, C., & Alberto, P. (2013). Vortex shedding from a wind turbine blade section at high angles of attack. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 131-137.
- Mishnaevsky, L., Branner, K., Petersen, H. N., Beauson, J., McGugan, M., & Sørensen, B. F. (2017). Materials for Wind Turbine Blades: An Overview. *Materials*, 10(11), 1285.
- Mo, J. -O., & Lee, Y. H. (2012). CFD Investigation on the aerodynamic characteristics of a small-sized wind turbine of NREL PHASE VI operating with a stall-regulated method. *Journal of Mechanical Science and Technology Vol. 26*, 81-92.
- Musial, W. D., & Butterfield, C. (1997). *Using Partial Safety Factors in Wind Turbine Design and Testing*. Texas: National Renewable Energy Laboratory.
- Nithin, S., & Kovvuri, V. B. (2019). Review on Aeroelasticity. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 271-274.
- Pachpute, A. (2016). Optimum Design of Damped Dynamic Vibration Absorber A Simulation Approach. *Internal Journal of Recent Engineering Research and Development*.

- Piggott, H. (2011). *Windpower Workshop*. Powys: Centre for Alternative Technology Publications.
- Prasetyo, A. (2019). Studi Potensi Penerapan dan Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Angin di Indonesia. *Jurnal Online Mahasiswa (JOM) Bidang Teknik Elektro*.
- Probst, O., Martinez, J., Elizondo, J., & Monroy, O. (2011). Small Wind Turbine Technology. In I. H. Al-Bahadly, *Wind Turbines*. London: IntechOpen.
- Soares, F. S., Araújo, P. P., & Rezende, A. L. (2017). Numerical Simulation of Turbulent Flow Over a Backward-Facing Step. *24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering*. Curitiba: ABCM.
- Timmer, W. A. (2009). An Overview of NACA 6-Digit Airfoil Series Characteristics with Reference to Airfoils for Large Wind Turbine Blades. *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition*. Florida: AIAA.
- Voyiadjis, G. Z., & Kattan, P. I. (n.d.). *Mechanics of Composite Materials with MATLAB*. Springer.
- Wang, L., Quant, R., & Kolios, A. (2016). Fluid structure interaction modelling of horizontal-axis wind turbine blades based on CFD and FEA. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 11-25.
- Weck, O. (2004). *Design Optimization - Structural Design optimization*. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology. Retrieved from Weck, Olivier de. 2004. Design Optimization - Structural Design optimization. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.
- Wind Turbine Works. (2018, April 4). *The integration of wind turbines for generating sustainable energy in skyscrapers*. Retrieved from <http://www.windturbine-works.com>: 2018

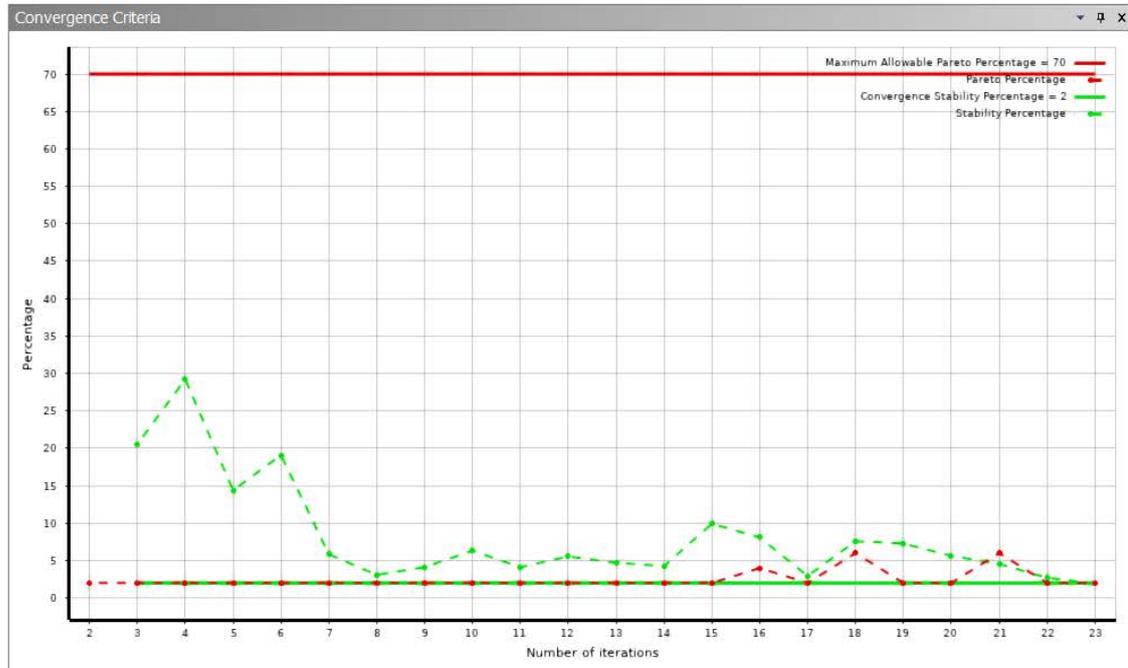
LAMPIRAN

A. Hasil Optimasi *Multi-Objective Genetic Algorithm* Pada Bilah Optimum



Candidate Points			
	Candidate Point 1	Candidate Point 2	Candidate Point 3
P28 - Sensor.1.weight	✖✖ 1.3625	✖✖ 1.3628	✖✖ 1.3628
P29 - Layer 1D.number_of_layers	11	11	11
P30 - Layer 2D.number_of_layers	7	7	7
P31 - Layer 3D.number_of_layers	11	11	11
P32 - Layer 1B.number_of_layers	9	9	9
P33 - Layer 2B.number_of_layers	12	12	9
P34 - Layer 3B.number_of_layers	3	3	3
P35 - Layer 1D.ply_material	4	4	4
P36 - Layer 2D.ply_material	1	2	2
P38 - Layer 1B.ply_material	5	6	6
P39 - Layer 2B.ply_material	3	3	3
P40 - Layer 3B.ply_material	3	2	3
P42 - Layer 3D.ply_material	1	1	1
P24 - Total Deformation Reported Frequency (Hz)	★★★ 3.5319	★★★ 3.4111	★★★ 3.2658
P25 - Safety Factor 2 Minimum	★★★ 1.8665	★★★ 1.7806	★★★ 1.5934
P26 - Safety Factor Minimum	★★★ 1.8373	★★★ 1.9119	★★★ 1.9828
P41 - Directional Deformation Maximum (mm)	★★★ 191.8	★★★ 203.2	★★★ 220.33

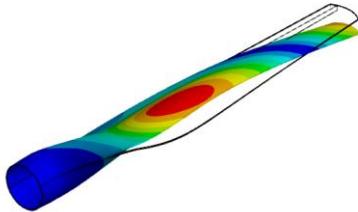
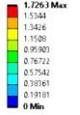
B. Hasil Optimasi *Multi-Objective Genetic Algorithm* Pada Bilah Optimum (*Linearized*)



Candidate Points					
	Candidate Point 1	DP 33	Candidate Point 2	Candidate Point 3	DP 44
P28 - Sensor.1.weight	✖✖	1.3656	✖✖	1.366	✖✖
P29 - Layer 1D.number_of_layers		15		15	
P30 - Layer 2D.number_of_layers		12		12	
P31 - Layer 3D.number_of_layers		10		10	
P32 - Layer 1B.number_of_layers		13		13	
P33 - Layer 2B.number_of_layers		5		5	
P34 - Layer 3B.number_of_layers		11		11	
P35 - Layer 1D.ply_material		2		2	
P36 - Layer 2D.ply_material		7		7	
P38 - Layer 1B.ply_material		5		1	5
P39 - Layer 2B.ply_material		1		1	2
P40 - Layer 3B.ply_material		1		1	1
P42 - Layer 3D.ply_material		1		1	1
P24 - Total Deformation Reported Frequency (Hz)	★★★	2.6145	★★★	2.6316	★★★
P25 - Safety Factor 2 Minimum	★★★	3.3185	★★★	2.8305	★★★
P26 - Safety Factor Minimum	★★★	3.316	★★★	3.3046	★★★
P41 - Directional Deformation Maximum (mm)	★★★	280.4	★★★	281.37	★★★

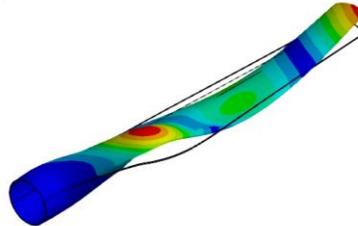
C. Hasil Simulasi *Modal* Pada Bilah Baseline

F: Modal
 Total Deformation 3
 Type: Total Deformation
 Frequency: 9.2302 Hz
 Unit: mm
 7/14/2022 11:58 PM



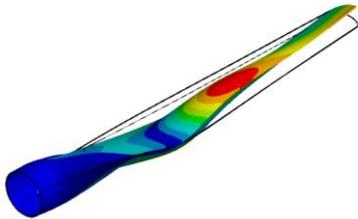
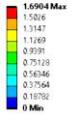
Mode 3

F: Modal
 Total Deformation 4
 Type: Total Deformation
 Frequency: 16.731 Hz
 Unit: mm
 7/14/2022 11:59 PM



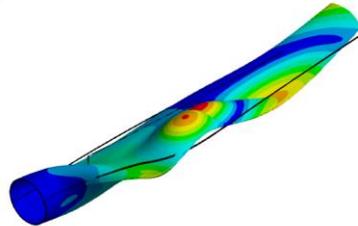
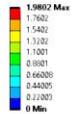
Mode 4

F: Modal
 Total Deformation 5
 Type: Total Deformation
 Frequency: 19.680 Hz
 Unit: mm
 7/15/2022 12:00 AM



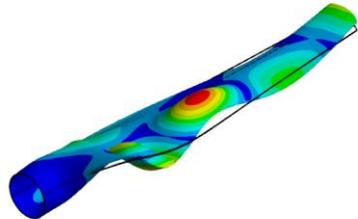
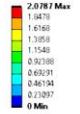
Mode 5

F: Modal
 Total Deformation 6
 Type: Total Deformation
 Frequency: 25.19 Hz
 Unit: mm
 7/15/2022 12:00 AM



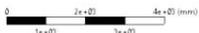
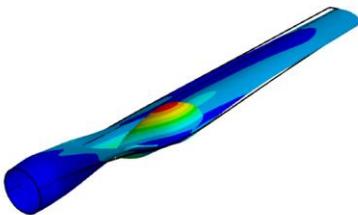
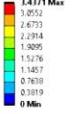
Mode 6

F: Modal
 Total Deformation 7
 Type: Total Deformation
 Frequency: 29.402 Hz
 Unit: mm
 7/15/2022 12:01 AM



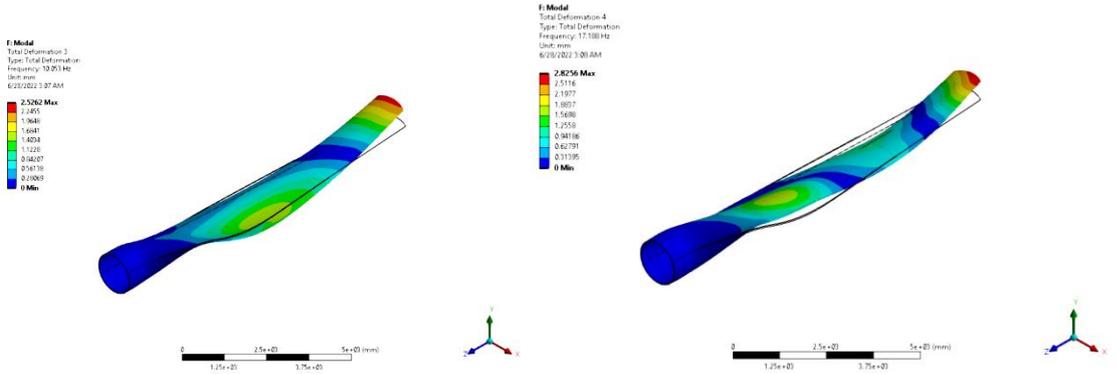
Mode 7

F: Modal
 Total Deformation 8
 Type: Total Deformation
 Frequency: 30.761 Hz
 Unit: mm
 7/15/2022 12:01 AM



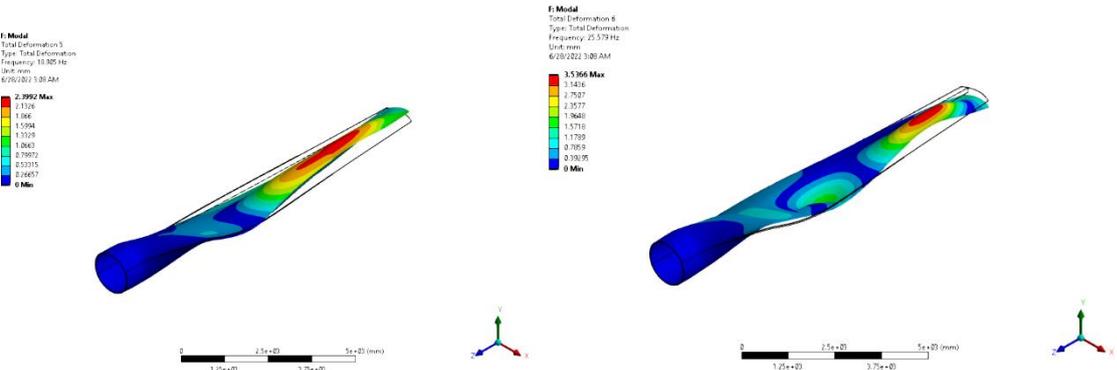
Mode 8

D. Hasil Simulasi *Modal* Pada Bilah Optimum



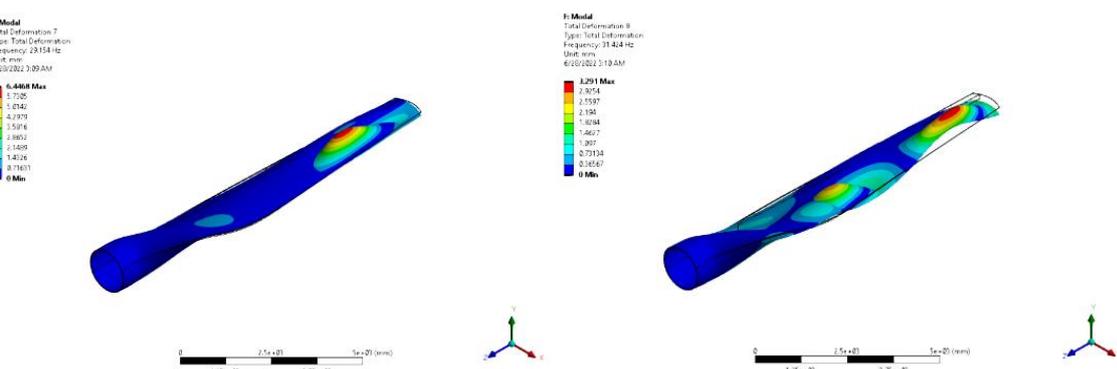
Mode 3

Mode 4



Mode 5

Mode 6

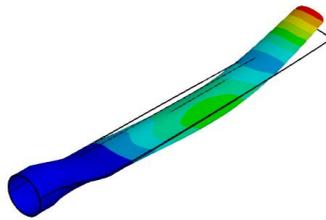


Mode 7

Mode 8

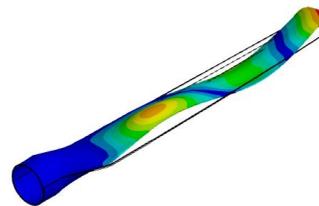
E. Hasil Simulasi *Modal* Pada Bilah Optimum

F: Modal
 Total Deformation 3
 Type: Total Deformation
 Frequency: 10.316 Hz
 Unit: mm
 7/8/2022 8:37 PM



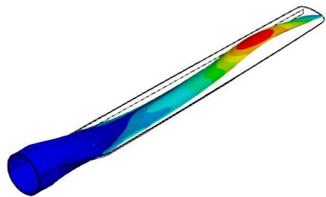
Mode 3

F: Modal
 Total Deformation 4
 Type: Total Deformation
 Frequency: 21.755 Hz
 Unit: mm
 7/8/2022 8:47 PM



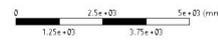
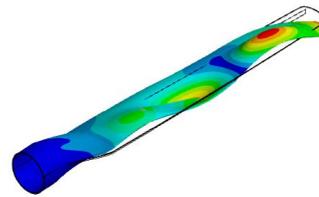
Mode 4

F: Modal
 Total Deformation 5
 Type: Total Deformation
 Frequency: 24.134 Hz
 Unit: mm
 7/8/2022 8:48 PM



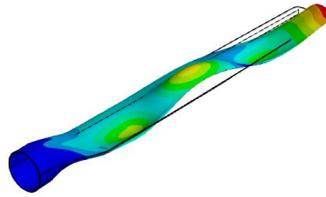
Mode 5

F: Modal
 Total Deformation 6
 Type: Total Deformation
 Frequency: 32.744 Hz
 Unit: mm
 7/8/2022 8:48 PM



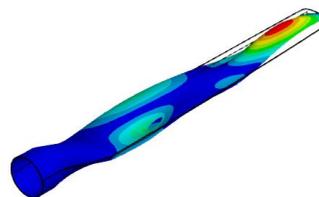
Mode 6

F: Modal
 Total Deformation 7
 Type: Total Deformation
 Frequency: 33.877 Hz
 Unit: mm
 7/8/2022 8:49 PM



Mode 7

F: Modal
 Total Deformation 8
 Type: Total Deformation
 Frequency: 39.251 Hz
 Unit: mm
 7/8/2022 8:49 PM



Mode 8

BIODATA PENULIS



Kelvin Pratama Indratmoko adalah anak pertama dari dua bersaudara pasangan Dhedik Indratmoko dan Eka Meutia yang lahir di Surabaya pada 4 September 2000. Penulis memulai Pendidikan di TK Al – Hikmah Surabaya selama 2 tahun, kemudian melanjutkan di SD Al – Hikmah Surabaya selama 6 tahun, SMP Al – Hikmah Surabaya selama 3 tahun, SMA Negeri 2 Surabaya selama 3 tahun dan mengambil gelar sarjana di Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Di masa perkuliahan, penulis aktif mengikuti kegiatan akademik dan non – akademik. Dalam keorganisasian, penulis pernah menjabat menjadi Ketua Departemen Umum Himpunan Mahasiswa Mesin (HMM) FTIRS – ITS pada tahun 2020 – 2021. Selain aktif berorganisasi, Penulis memiliki minat lebih pada teknologi energi baru terbarukan, oleh karena itu penulis melakukan penelitian terhadap kekuatan struktur pada sudu turbin angin. penulis juga pernah mengikuti Internship di PT. Lentera Bumi pada divisi bilah yang berfokus pada perancangan bilah turbin angin berskala mikro.

Untuk semua informasi dan masukan terkait tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email kelvin.indratmoko@gmail.com.