



TUGAS AKHIR - TM141585

ANALISA FORK SEPEDA JENIS CARBON FIBER ROAD BIKE MENGGUNAKAN SOFTWARE BERBASIS ELEMEN HINGGA BERDASARKAN STANDAR PENGUJIAN CEN 14781

Filipi Cahya Adi Nugraha
NRP. 2113105002

Dosen Pembimbing,
Alief Wikarta, ST, MSc.Eng, PhD.

PROGRAM SARJANA
LABORATORIUM MEKANIKA BENDA PADAT
JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember



TUGAS AKHIR - TM141585

**ANALISA FORK SEPEDA JENIS CARBON FIBER
ROAD BIKE MENGGUNAKAN SOFTWARE BERBASIS
ELEMEN HINGGA BERDASARKAN STANDAR
PENGUJIAN CEN 14781**

Filipi Cahya Adi Nugraha
NRP. 2113105002

Dosen Pembimbing,
Alief Wikarta, ST, MSc.Eng, PhD.

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



FINAL PROJECT - TM141585

**ANALYSIS OF CARBON FIBER FORK ROAD BIKE
USING FINITE ELEMENT SOFTWARE
BASED ON TESTING STANDARD CEN 14781**

Filipi Cahya Adi Nugraha
NRP. 2113105002

Academic Supervisor,
Alief Wikarta, ST, MSc.Eng, PhD.

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016

**ANALISA FORK SEPEDA JENIS CARBON FIBER
ROAD BIKE MENGGUNAKAN SOFTWARE
BERBASIS ELEMEN HINGGA BERDASARKAN
STANDAR PENGUJIAN CEN 14781**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Mekanika Benda Padat
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Filipi Cahya Adi Nugraha
NRP. 2113 105 002

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Alief Wikarta, ST, MSc.Eng.PhD..... (Pembimbing)
(NIP. 198202102006041002)
2. Ir. Yusuf Kaelani, MSc.E..... (Penguji I)
(NIP. 196511031990021001)
3. Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, MSc.PhD..... (Penguji II)
(NIP. 195106051978031002)
4. Ari Kurniawan Saputra, ST, MT..... (Penguji III)
(NIP. 198604012015041001)

**SURABAYA
JANUARI, 2016**

ANALISA FORK SEPEDA JENIS CARBON FIBER ROAD BIKE MENGGUNAKAN SOFTWARE BERBASIS ELEMEN HINGGA BERDASARKAN STANDAR PENGUJIAN CEN 14781

Nama Mahasiswa : Filipi Cahya Adi Nugraha
NRP : 2113 105 002
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
**Dosen Pembimbing : Alief Wikarta, ST, MSc.Eng,
PhD.**

Abstrak

Di dalam dunia sepeda, carbon fiber merupakan material baru dalam pembuatan frame maupun fork sepeda. Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan analisa terhadap material carbon fiber sebagai material fork road bike. Analisa dilakukan berdasarkan defleksi, faktor keamanan, dan interlaminar shear stress yang terjadi oleh pembebanan yang mengacu pada standar pengujian CEN 14781.

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini yaitu struktur fork dalam kondisi tidak aman berdasarkan standar pengujian CEN 14781, dimana defleksi yang terjadi sebesar 5,24 mm untuk pengujian static bending. Dari hasil analisa diperoleh pula susunan kombinasi sudut ply yang terbaik untuk fork sepeda, yaitu [0/90/45/-45/0]_s dengan steel sebagai material steerer tube dan drop out. Penambahan jumlah ply dan penggantian material pada bagian steerer tube dan drop out fork sepeda memberikan pengaruh yang semakin baik terhadap struktur fork, ditunjukkan dengan nilai defleksi terbesar yang menurun dari 10,237 mm menjadi 5,82 mm dan interlaminar shear stress terbesar yang menurun dari 358,4 MPa menjadi 168,5 MPa.

Kata kunci : Carbon fiber, CEN 14781, fork, interlaminar shear stress, metode elemen hingga, teori Tsai-Wu.

ANALYSIS OF CARBON FIBER FORK ROAD BIKE USING FINITE ELEMENT SOFTWARE BASED ON TESTING STANDARD CEN 14781

Name : Filipi Cahya Adi Nugraha
NRP : 2113 105 002
Department : Mechanical Engineering-ITS
**Academic Supervisor : Alief Wikarta, ST, MSc.Eng,
PhD.**

Abstract

In bicycle world, carbon fiber is new material for making of bicycle frame or fork. The purpose of this observation is to analyze carbon fiber as road bike fork material. Analysis is done by deflection, safety factor and interlaminar shear stress that happened by loading which refers to testing standard CEN 14781.

The results of this study are fork structure is in not safe condition based on testing standard CEN 14781, which the deflection that happened as big as 5,24 mm for static bending test. It is also known the best stacking combination as bicycle fork is [0/90/45/-45/0]s and steel as steerer tube and drop out material. Ply addition and material changing give a boost to strength of fork structure, and is showed by reduction of the maximum deflection from 10,237 mm to 5,82 mm and reduction of the maximum interlaminar shear stress from 358,4 MPa to 168,5 MPa.

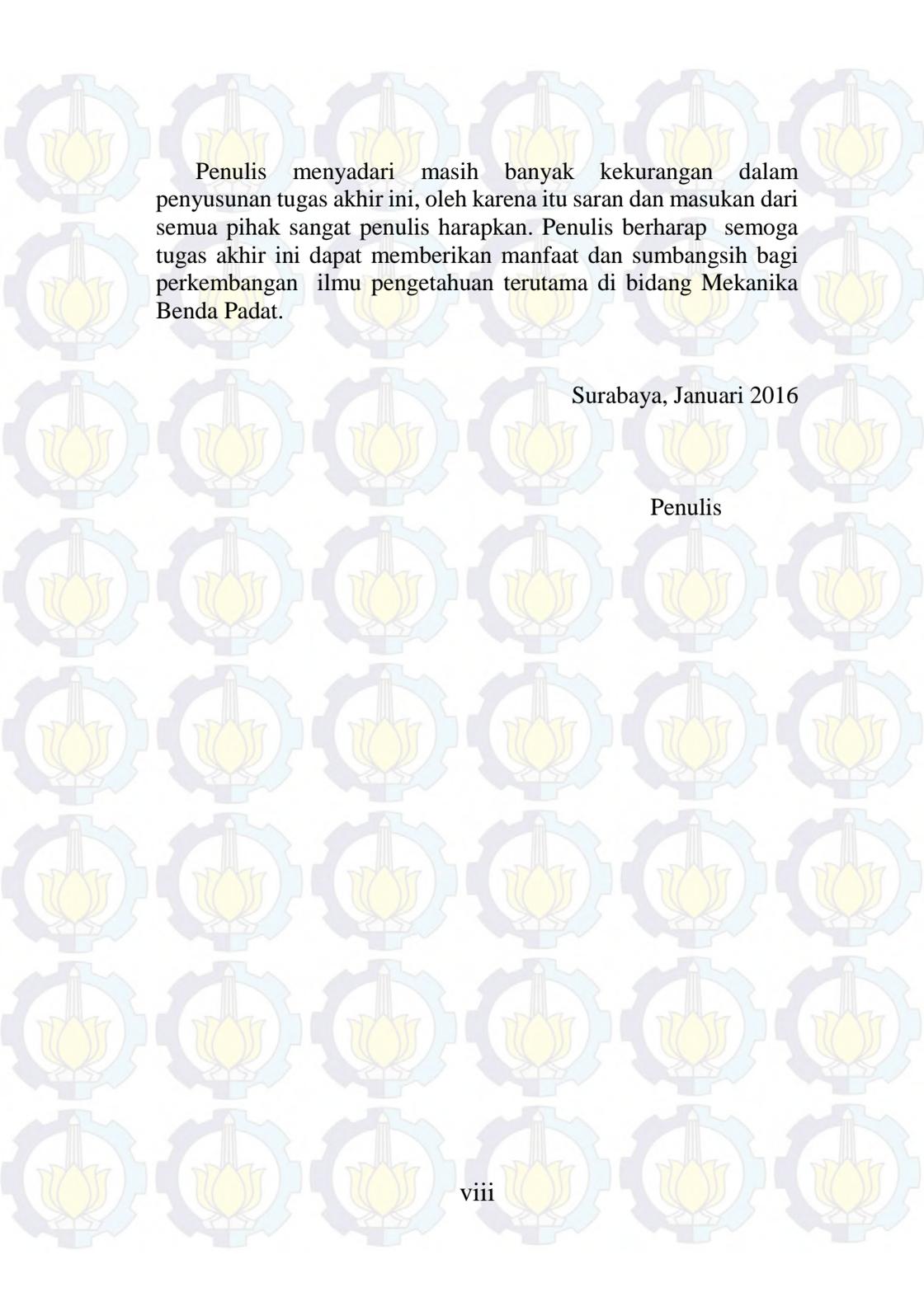
Kata kunci : Carbon fiber, CEN 14781, finite element method, fork, interlaminar shear stress, Tsai-Wu theory.

KATA PENGANTAR

Segala Puji Syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yesus Kristus atas segala berkat karunia yang telah dilimpahkan, sehingga penyusunan tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.

Penulis menyadari bahwa keberhasilan penyelesaian tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak baik langsung maupun tidak langsung. Untuk itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu penyelesaian tugas akhir ini, antara lain:

1. Papah, dan Mamah di Surga, yang selalu mendukung dengan setia melalui doa dan materi sehingga penulis bisa menjalani semua ini dengan baik dan lancar, “*questo è per te, madre*”.
2. Bapak Alief Wikarta, ST, MSc.Eng, PhD. selaku dosen pembimbing yang telah senantiasa membantu dan membimbing di dalam proses pembuatan dan penyusunan tugas akhir ini.
3. Para dosen penguji yang telah bersedia untuk menguji dan menelaah tugas akhir ini, Ir. Yusuf Kaelani, MSc.E., Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, MSc.PhD dan Ari Kurniawan Saputra, ST, MT.
4. Segenap teman-teman GH yang tak henti-hentinya menyebarkan keceriaan kepada penulis selama penyusunan tugas akhir ini, Jasip, Elep, Menyok, Gandi, Icut, Emon, Dono dan Azis.
5. Teman seperjuangan di bawah bimbingan Bapak Alief Wikarta, Edwin, Juli, Gamei dan Heda.
6. Teman-teman pejuang tugas akhir di laboratorium MBP, Surya, Joko, Robin, Gigieh, Alif Malang, Ina, Kotrek Hendri dan teman-teman lain satu angkatan Lintas Jalur Gasal 2013.
7. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, *Grazie di tutto*.



Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini, oleh karena itu saran dan masukan dari semua pihak sangat penulis harapkan. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan sumbangsih bagi perkembangan ilmu pengetahuan terutama di bidang Mekanika Benda Padat.

Surabaya, Januari 2016

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
LEMBAR PENGESAHAN	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Batasan Masalah	3
1.4. Tujuan Penelitian	4
1.5. Manfaat Penelitian	4
1.6. Sistematika Penulisan	5
BAB II DASAR TEORI	7
2.1. Fork Sepeda	7
2.2. Standar Pengujian	8
2.2.1. <i>Front Fork – Static Bending Test</i>	9
2.2.2. <i>Fork for Hub/Disc Brake – Static Brake – Torque Test</i>	9
2.3. Teori Kegagalan	10
2.3.1. Teori Tegangan Maksimum	11
2.3.2. Teori Tsai – Wu	13
2.3.3. Teori Tsai – Hill	14
2.4. Komposit	15
2.5. Metode Elemen Hingga	18
2.6. Studi Pustaka	20
2.6.1. <i>Fatigue Analysis of a Bicycle Fork</i>	20
2.6.2. <i>Penelitian Kombinasi Sudut Lapisan Material Komposit pada Frame Sepeda</i>	23
2.6.3. <i>Perbandingan Hasil Perhitungan Interlaminar Shear Stress Berdasarkan Analisa dan FEM</i>	27

BAB III METODOLOGI	31
3.1 Diagram Alir Penelitian	31
3.1.1 Studi Literatur dan Data Penelitian	32
3.1.2 Standar Pengujian	32
3.1.3 Perancangan	34
3.1.4 Simulasi	38
3.1.5 Analisa Hasil dan Kesimpulan	49
3.2 Modifikasi Desain	51
3.3 Evaluasi Hasil Modifikasi dan Kesimpulan	54
BAB IV HASIL DAN ANALISA	55
4.1 Hasil Analisa Awal	55
4.2 Hasil Modifikasi	70
4.2.1 Hasil Modifikasi Pertama	70
4.2.2 Hasil Modifikasi Kedua	73
4.2.3 Hasil Modifikasi Ketiga	76
4.3 Pembahasan Hasil Simulasi	79
4.3.1 Analisa Perbandingan Pengujian <i>Static Bending</i>	79
4.3.2 Analisa Perbandingan Pengujian <i>Static Torque</i>	85
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	91
5.1 Kesimpulan	91
5.2 Saran	92
DAFTAR PUSTAKA	93
LAMPIRAN A	95
LAMPIRAN B	97
LAMPIRAN C	101
BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Bagian-Bagian Sepeda	7
Gambar 2.2	Bagian-Bagian dari <i>Rigid Fork</i>	8
Gambar 2.3	<i>Front Fork – Static Bending Test</i>	10
Gambar 2.4	<i>Fork for Hub/Disc Brake – Static Brake-Torque Test</i>	11
Gambar 2.5	Ilustrasi Tegangan Normal dalam 3 Dimensi.....	13
Gambar 2.6	Ilustrasi Tegangan yang Terjadi pada Material Komposit	16
Gambar 2.7	Efek Kemiringan Sudut terhadap Nilai Sifat Material Komposit	16
Gambar 2.8	<i>Stress</i> pada Bagian HAZ	21
Gambar 2.9	Umur kelelahan pada Bagian HAZ	21
Gambar 2.10	Perbandingan antara <i>Fork</i> Semula dan <i>Fork</i> yang Telah Dimodifikasi.....	22
Gambar 2.11	Umur Kelelahan <i>fork</i> yang Telah Dimodifikasi ...	23
Gambar 2.12	Dimensi Utama <i>Frame</i>	24
Gambar 2.13	Tabung dengan 8 <i>Ply</i>	25
Gambar 2.14	Pembebanan Torsi	26
Gambar 2.15	Pembebanan <i>Frontal</i>	26
Gambar 2.16	Pembebanan Vertikal	26
Gambar 2.17	Hasil Simulasi Pembebanan	27
Gambar 2.18	Geometri, Ukuran dan Pembebanan untuk <i>Singly Curved</i>	28
Gambar 2.19	Geometri, Ukuran dan Pembebanan untuk <i>Reduced Doubly Curved</i>	28
Gambar 2.20	Geometri dan Meshing untuk <i>Extended Doubly Curved</i>	29
Gambar 2.21	Penyusunan <i>Ply Extended Doubly Curved</i>	29
Gambar 3.1	Diagram Alir Tugas Akhir	31
Gambar 3.2	Spesifikasi <i>Fork Road Bike</i>	33
Gambar 3.3	Sketsa Geometri Utama <i>Fork</i> Tampak Samping dan Tampak Depan	34
Gambar 3.4	Model Sisi Kanan <i>Fork Blade</i>	35

Gambar 3.5	Kedua Sisi <i>Fork Blade</i> Beserta <i>Drop Out</i>	36
Gambar 3.6	Model <i>Surface</i> Awal dan Model <i>Surface</i> Setelah Diubah.....	36
Gambar 3.7	Sketsa Penggambaran <i>Drop Out</i>	37
Gambar 3.8	Model <i>Fork</i> Selesai	37
Gambar 3.9	Diagram Alir Simulasi <i>Front-Fork Static Bending Test</i>	39
Gambar 3.10	Diagram Alir Simulasi <i>Fork for Hub/Disc- Brake–Static Brake-Torque Test</i>	40
Gambar 3.11	Permodelan <i>Solid</i> dan <i>Surface</i>	41
Gambar 3.12	Jendela Pengaturan <i>Surface</i> sebagai Komposit dan Jendela Pengaturan <i>Material</i>	42
Gambar 3.13	<i>Curvature Mesh</i> dan <i>Blended-Curvature Mesh</i> dengan Elemen 24 mm.....	43
Gambar 3.14	Lokasi Tegangan Maksimum Ukuran 24 mm dan Ukuran 12 mm.....	44
Gambar 3.15	<i>Control Mesh</i> untuk Pengujian <i>Static Bending</i> dan Pengujian <i>Static Torque</i>	45
Gambar 3.16	Lokasi Tegangan Maksimum untuk Ukuran 12 mm dan 6 mm.....	46
Gambar 3.17	Grafik Hasil Tegangan Maksimum dan Angka Keamanan untuk <i>Blended Curvature Mesh</i>	47
Gambar 3.18	Penerapan <i>Fixed Constrain</i> pada Model	48
Gambar 3.19	Pemberian Beban pada Model.....	48
Gambar 3.20	Diagram Alir Modifikasi Pertama.....	52
Gambar 3.21	Diagram Alir Modifikasi Kedua	53
Gambar 4.1	Skema Tiap Analisa dan Modifikasi	55
Gambar 4.2	Grafik Defleksi Analisa Awal.....	57
Gambar 4.3	Grafik Angka Keamanan Analisa Awal.....	57
Gambar 4.4	Grafik <i>Interlaminar Shear Stress XZ</i> Analisa Awal	58
Gambar 4.5	Grafik <i>Interlaminar Shear Stress YZ</i> Analisa Awal.....	58
Gambar 4.6	Defleksi Varian 14	60
Gambar 4.7	Angka Keamanan Varian 14	60

Gambar 4.8	<i>Interlaminar Shear Stress XZ</i> Varian 14	61
Gambar 4.9	<i>Interlaminar Shear Stress YZ</i> Varian 14	61
Gambar 4.10	Ilustrasi <i>Interlaminar Shear Stress XZ</i> Varian 14.....	62
Gambar 4.11	Defleksi Varian 15	62
Gambar 4.12	Angka Keamanan Varian 15	63
Gambar 4.13	<i>Interlaminar Shear Stress XZ</i> Varian 15	63
Gambar 4.14	<i>Interlaminar Shear Stress YZ</i> Varian 15	64
Gambar 4.15	Ilustrasi <i>Interlaminar Shear Stress XZ</i> Varian 15.....	64
Gambar 4.16	Defleksi Varian 4	65
Gambar 4.17	Angka Keamanan Varian 4	66
Gambar 4.18	<i>Interlaminar Shear Stress XZ</i> Varian 4	66
Gambar 4.19	<i>Interlaminar Shear Stress YZ</i> Varian 4	67
Gambar 4.20	Ilustrasi <i>Interlaminar Shear Stress XZ</i> Varian 4.....	67
Gambar 4.21	Defleksi Varian 7	68
Gambar 4.22	Angka Keamanan Varian 7	68
Gambar 4.23	<i>Interlaminar Shear Stress XZ</i> Varian 7	69
Gambar 4.24	<i>Interlaminar Shear Stress YZ</i> Varian 7	69
Gambar 4.25	Ilustrasi <i>Interlaminar Shear Stress XZ</i> Varian 7.....	70
Gambar 4.26	Grafik Defleksi Modifikasi Pertama	71
Gambar 4.27	Grafik Angka Keamanan Modifikasi Pertama	71
Gambar 4.28	Grafik <i>Interlaminar Shear Stress XZ</i> Modifikasi Pertama	72
Gambar 4.29	Grafik <i>Interlaminar Shear Stress YZ</i> Modifikasi Pertama	72
Gambar 4.30	Grafik Defleksi Modifikasi Kedua	74
Gambar 4.31	Grafik Angka Keamanan Modifikasi Kedua.....	74
Gambar 4.32	Grafik <i>Interlaminar Shear Stress XZ</i> Modifikasi Kedua.....	75
Gambar 4.33	Grafik <i>Interlaminar Shear Stress YZ</i> Modifikasi Kedua.....	75
Gambar 4.34	Grafik Defleksi Modifikasi Ketiga.....	77

Gambar 4.35	Grafik Angka Keamanan Modifikasi Ketiga.....	77
Gambar 4.36	Grafik <i>Interlaminar Shear Stress XZ</i> Modifikasi Ketiga.....	78
Gambar 4.37	Grafik <i>Interlaminar Shear Stress YZ</i> Modifikasi Ketiga.....	78
Gambar 4.38	Grafik Perbandingan Hasil Defleksi <i>Static Bending</i>	81
Gambar 4.39	Grafik Perbandingan Hasil Angka Keamanan <i>Static Bending</i>	81
Gambar 4.40	Grafik Perbandingan Hasil <i>Interlaminar Shear Stress XZ Static Bending</i>	82
Gambar 4.41	Grafik Perbandingan Hasil <i>Interlaminar Shear Stress YZ Static Bending</i>	82
Gambar 4.42	Grafik Perbandingan Hasil Defleksi <i>Static Torque</i>	86
Gambar 4.43	Grafik Perbandingan Hasil Angka Keamanan <i>Static Torque</i>	86
Gambar 4.44	Grafik Perbandingan Hasil <i>Interlaminar Shear Stress XZ Static Torque</i>	87
Gambar 4.45	Grafik Perbandingan Hasil <i>Interlaminar Shear Stress YZ Static Torque</i>	87

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Sifat-Sifat Dasar Serat dengan Material Lain.....	17
Tabel 2.2	Jenis-Jenis <i>Carbon Fiber</i> Berdasarkan <i>Tensile Modulus</i>	19
Tabel 2.3	Hasil Analisa dengan menggunakan ANSYS	20
Tabel 2.4	Perbandingan Umur Kelelahan <i>Fork</i>	22
Tabel 2.5	Kombinasi Susunan <i>Ply</i>	25
Tabel 3.1	Dimensi Umum <i>Fork</i> Sepeda	33
Tabel 3.2	Variasi Kemiringan Sudut Tiap <i>Ply</i>	38
Tabel 3.3	Perbandingan Jumlah Nodal dan Elemen.....	43
Tabel 3.4	Draft Hasil Simulasi <i>Front-Fork Static Bending Test</i>	50
Tabel 3.5	Draft Hasil Simulasi <i>Fork For Hub/Disc-Brake-Static Brake-Torque Test</i>	50
Tabel 4.1	Hasil Simulasi Analisa Awal.....	56
Tabel 4.2	Perbandingan Hasil <i>Static Bending</i>	80
Tabel 4.3	Perbandingan Hasil <i>Static Torque</i>	85



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengguna sepeda di Indonesia belakangan ini menunjukkan pertumbuhan yang pesat. Mulai dari kalangan atas hingga kalangan bawah mulai memilih sepeda sebagai alat transportasi untuk bekerja, bersekolah ataupun hanya sekedar jalan-jalan. Sejak diciptakannya sepeda pada abad ke 18 hingga saat ini, sepeda terus berkembang pada bentuk dan penggunaanya.

Saat ini, beberapa material telah menjadi pilihan utama dalam hal perancangan dan pembuatan *fork* sepeda. Material-material yang sering digunakan dalam pembuatan *fork* adalah baja, aluminium, titanium dan *carbon fiber*. Beberapa dari material-material tersebut memiliki kelebihan dan kelemahan masing-masing. Sebagai *fork*, kelebihan dari baja adalah memiliki kekuatan yang baik dan dapat menyerap getaran dengan baik, akan tetapi baja memiliki kekurangan dalam hal berat dan sifat berkaratnya. Aluminium merupakan bahan yang ringan sebagai *fork* sepeda dan juga kaku, tetapi aluminium kurang mampu menahan getaran dan umur kelelahan dari aluminium relatif rendah. Titanium terkenal sebagai bahan yang paling kuat dan memiliki umur pakai yang panjang, akan tetapi biaya yang mahal dan proses yang sulit dalam pembuatan merupakan kelemahan dari material ini.

Di dalam dunia sepeda, *carbon fiber* merupakan material baru dalam pembuatan *frame* maupun *fork* sepeda. *Carbon fiber* merupakan material yang bukan logam seperti material yang lain. Sifat dari *carbon fiber* sendiri adalah ringan, kaku, kuat, dan memiliki umur pakai yang panjang. *Carbon fiber* mulai menjadi pilihan utama sebagai material sepeda, karena perkembangan teknologi sekarang ini memungkinkan *carbon fiber* untuk dapat diaplikasikan dan digunakan sebagai *frame* dan *fork* sepeda yang lebih baik daripada material lainnya.

Sepeda terdiri dari beberapa bagian utama, yaitu *frame*, *fork*, *handle bar*, roda dan pedal. Roda depan, *steerer tube* dan *handle bar* melekat pada bagian *fork* dari sepeda. Bagian utama daripada *fork* adalah *crown race*, *steerer tube*, *fork blade*, *disk brake mount*, dan *dropout*. *Fork* pada sepeda memiliki fungsi sebagai penahan dari roda depan dan juga sebagai komponen utama dalam hal mengemudikan arah kemudi sepeda. Oleh karena itu, perancangan dari geometri dan material dari *fork* sepeda sangat perlu untuk diperhatikan, agar dapat memberikan keamanan dan kenyamanan dalam mengendarai sepeda. Pada penelitian ini material *fork* yang digunakan adalah *carbon fiber*. *Carbon fiber* dipilih agar sepeda lebih ringan untuk dikemudikan, dan juga aman dari segi kekuatannya.

Beberapa penelitian mengenai *fork* sepeda sudah pernah dilakukan, seperti *Fatigue Analysis of a Bicycle Fork* oleh Nathaniel A. Jannetti dan Bradford L. Lynch dari Worcester Polytechnic Institute [1]. Penelitian tersebut dilakukan untuk memperbaiki *crack* yang sering terjadi pada bagian pengelasan pada *fork* sepeda. Perbaikan dilakukan dengan cara memilih material yang lebih baik ataupun dengan mengubah geometri dari *fork*. Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini adalah ASTM F2273-03 *bending fatigue testing*. Thomas Jin-Chee Liu dan Huang-Chieh Wu dari Ming Chi University of Technology melakukan penelitian tentang *Fiber direction and stacking sequence design for bicycle frame made of carbon/epoxy composite laminate* [2]. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisa struktural dari *frame* sepeda dengan *carbon fiber* sebagai material. Beberapa kombinasi sudut tiap ply dianalisa hingga ditemukan kombinasi yang terbaik. Pengujian yang menjadi acuan dalam analisa ini adalah JIS D9401:1997. Adapula penelitian mengenai prediksi *interlaminar stress* yang terjadi untuk material komposit yang dilakukan oleh Jermaine Most, Daniel Stegmair dan Dirk Petry yang berjudul *Error estimation between simple, closed-form analytical formulae and full-scale FEM for interlaminar stress prediction in curved laminates* [3]. Penelitian ini dilakukan

untuk menganalisa atau mengamati perbedaan hasil perhitungan *interlaminar stress* pada struktur secara analisis dan *finite element*. Beberapa metode *finite element* dianalisa hingga diperoleh perbedaan perhitungan, dan juga diperoleh cara atau metode yang bisa digunakan di dalam memprediksi kegagalan struktur akan *interlaminar stress* yang terjadi secara efektif dan efisien.

Maka dari itu, penulis juga terdorong untuk mengambil judul tugas akhir mengenai penelitian akan *fork* sepeda dengan *carbon fiber* sebagai material dari *fork*, yaitu : “ANALISA FORK SEPEDA JENIS CARBON FIBER ROAD BIKE MENGGUNAKAN SOFTWARE BERBASIS ELEMEN HINGGA BERDASARKAN STANDAR PENGUJIAN CEN 14781”.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah untuk mengetahui kekuatan dan ketangguhan dari *fork* sepeda adalah :

1. Bagaimana cara menganalisa kerusakan yang terjadi pada *fork* sepeda dengan material *carbon fiber* berdasarkan standar pengujian CEN 14781 melalui pengamatan akan defeksi, angka faktor keamanan dan *interlaminar shear stress* yang terjadi menggunakan *software* berbasis metode elemen hingga?
2. Bagaimana cara menentukan susunan kombinasi sudut *ply* yang terbaik untuk *fork* sepeda dengan material *carbon fiber*?
3. Bagaimana cara melakukan modifikasi pada desain *fork* sepeda dengan merubah ukuran tebal dari *tube fork* sepeda dan mengganti material pada bagian *fork* sepeda?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dari tugas akhir ini diantaranya:

- Jenis sepeda yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis *road bike*
- Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah *carbon fiber*

- *Fork* sepeda yang hendak dianalisa adalah jenis *rigid fork*
- Sambungan pada bagian-bagian pada *fork* dianggap baik
- Pembebanan yang dilakukan mengacu pada CEN-14781 dan hanya dilakukan dengan dua jenis pembebanan statis, yaitu *front fork-static bending test* dan *fork for hub/disc-brake-static brake-torque test*
- Pengujian diasumsikan pada temperatur ruang
- Analisa yang dilakukan dengan cara simulasi menggunakan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga
- Hasil dari simulasi yang hendak dianalisa adalah defleksi, angka faktor keamanan dan *interlaminar shear stress* yang terjadi pada struktur *fork* sepeda
- Modifikasi *fork* sepeda dilakukan dengan merubah ketebalan *tube fork*, yaitu dengan cara merubah jumlah *ply* pada *tube fork*, dan juga mengganti material pada beberapa bagian *fork* sepeda dengan material *steel*.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui cara menganalisa kerusakan yang terjadi pada *fork* sepeda dengan material *carbon fiber* berdasarkan standar pengujian *CEN 14781* melalui pengamatan akan defeksi, angka faktor keamanan dan *interlaminar shear stress* yang terjadi menggunakan *software* berbasis metode elemen hingga.
2. Mengetahui cara menentukan susunan kombinasi sudut *ply* yang terbaik untuk *fork* sepeda dengan material *carbon fiber*.
3. Mengetahui cara melakukan modifikasi pada desain *fork* sepeda dengan merubah ukuran tebal dari *tube fork* sepeda dan mengganti material pada bagian *fork* sepeda.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Membantu mahasiswa dalam mengetahui dan memahami tentang perancangan dan pengembangan konsep sepeda.

2. Sebagai sarana dari penelitian dan pengembangan ilmu di bidang transportasi yang ramah lingkungan.
3. Data hasil pengujian dapat digunakan dan dijadikan sebagai referensi untuk penelitian selanjutnya.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan terdiri dari 5 bab di mana masing-masing bab berisi sebagai berikut :

Bab 1 Pendahuluan

Bab ini berisi tentang latar belakang perancangan, rumusan masalah, batasan masalah, manfaat penelitian dan sistematika penulisan laporan.

Bab 2 Dasar Teori dan Kajian Pustaka

Bab ini berisi tentang dasar-dasar ilmu yang mendukung pengerjaan tugas akhir.

Bab 3 Metodologi

Bab ini berisi tentang langkah-langkah yang dilakukan untuk memperoleh hasil yang diinginkan dalam penelitian ini, baik langkah-langkah permodelan dan langkah-langkah simulasi.

Bab 4 Hasil dan Analisa

Berisi tentang analisa data hasil eksperimen yang telah dilakukan untuk mendapatkan suatu kesimpulan.

Bab 5 Kesimpulan dan Saran

Pada bagian ini berisi kesimpulan hasil dan saran untuk penelitian lebih lanjut.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II DASAR TEORI

2.1 *Fork Sepeda*

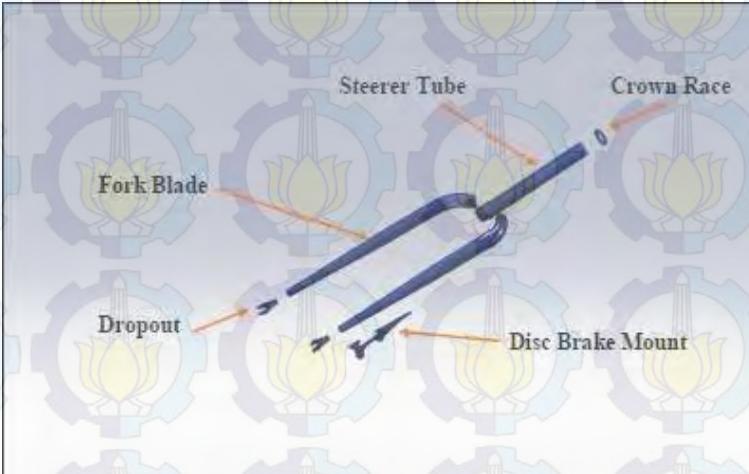
Sepeda merupakan alat transportasi yang digerakkan oleh tenaga manusia melalui pedal dan menggunakan dua roda. Sepeda pertama kali diciptakan pada tahun 1817 oleh Baron Karl von Drais. Seiring perkembangan teknologi dan jaman, sepeda telah mengalami banyak kemajuan dan perkembangan, baik dari segi performa, kenyamanan maupun keamanan. Jenis-jenis dari sepeda ada berbagai macam, antara lain sepeda balap, sepeda kota, sepeda BMX dan sepeda gunung. Sepeda memiliki beberapa bagian utama, yaitu roda, *saddle*, *frame*, pedal, *handle bar*, dan *fork*. Bagian-bagian dari sepeda secara umum ditunjukkan pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Bagian-Bagian Sepeda

Fork adalah bagian dari sepeda yang berfungsi sebagai tumpuan roda depan dan untuk mengemudikan arah sepeda. Jenis dari *fork* sepeda ada 2 macam, yaitu *rigid fork* dan *suspension fork*. *Fork* terdiri dari 2 buah *fork blade* yang tersambung dengan *steerer tube*. Bagian-bagian dari *rigid fork* adalah *crown race*, *steerer tube*, *fork blade*, *disk brake mount*, dan *dropout*, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2. *Crown race* dan *steerer tube*

berfungsi untuk menyambungkan *handle bar* dengan *fork* sepeda, *disk brake mount* berfungsi sebagai tempat untuk meletakkan *disk brake*, dan *drop out* berfungsi sebagai tumpuan sekaligus tempat untuk meletakkan poros roda depan.



Gambar 2.2 Bagian-Bagian dari *Rigid Fork*

2.2 Standar Pengujian

Standar pengujian untuk penelitian ini menggunakan *European Committee for Standardization (CEN)*. Standar pengujian yang digunakan adalah CEN 14781 untuk kategori *Racing Bicycles* [4]. Tujuan dari penggunaan standar pengujian ini adalah untuk memastikan agar sepeda yang telah dirancang sesuai dengan spesifikasi yang telah disepakati bersama, baik dari segi performa maupun keamanan. Rincian dari standar pengujian ini adalah meliputi performa dan keamanan sepeda dari segi desain, pemasangan, dan pengujian, sehingga standar pengujian ini diharapkan dapat menjadi acuan bagi para produsen sepeda dalam merancang sepeda. Pada penelitian ini jenis pengujian yang hendak digunakan adalah jenis pengujian statis dan bukan jenis pengujian dinamis. Hal ini dikarenakan hingga saat ini belum ada teori

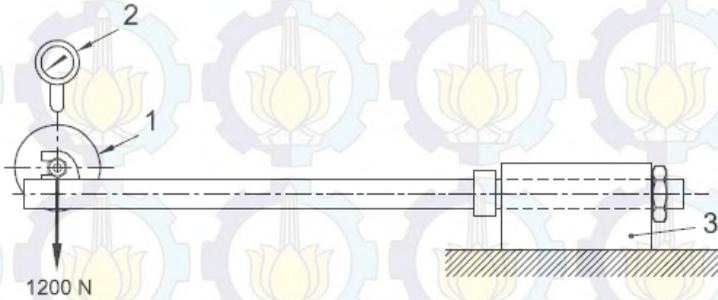
kelelahan yang mampu menganalisa fenomena yang terjadi selama pembebanan terjadi secara pasti terhadap material komposit, dan hingga saat ini pula belum ada *software* berbasis metode elemen hingga yang mampu menganalisa hal ini. Jenis pengujian statis yang hendak diaplikasikan adalah *front fork – static bending test* dan *fork for hub/disc brake – static brake – torque test*.

2.2.1 Front Fork – Static Bending Test

Hasil yang hendak diamati melalui pengujian ini adalah diharapkan tidak ditemukan cacat atau retakan pada bagian manapun dari *fork*. Pada pengujian ini, *fork* diletakkan pada sebuah *fixture* secara horizontal dengan *bearing* di dalamnya, dan ditahan oleh baut di *steerer tube*. Pada bagian ujung *fork*, yaitu *dropout*, dipasang sebuah poros yang berfungsi sebagai lengan transmisi gaya. Pembebanan awal dilakukan dengan memberikan gaya awalan sebesar 100 N tegak lurus terhadap sumbu *fork* pada poros yang telah dipasang pada *dropout* sehingga akan didapatkan defleksi awal yang terjadi. Defleksi awal yang diperoleh kemudian dijadikan referensi titik nol. Pengujian dilanjutkan dengan memberikan gaya dengan letak dan arah yang sama sebesar 1200 N, dan kemudian diamati defleksi yang terjadi. Defleksi yang terjadi dikatakan masih di batas aman jika di bawah 5 mm untuk *rigid fork*, dan di bawah 10 mm untuk *suspension fork* terhadap sumbu *fork*. Skema peralatan pengujian ditunjukkan pada gambar 2.3.

2.2.2 Fork for Hub/Disc Brake – Static Brake-Torque Test

Hasil yang hendak diamati melalui pengujian ini adalah diharapkan tidak ditemukan cacat atau retakan pada bagian manapun dari *fork*. Pada pengujian ini, *fork* diletakkan pada sebuah *fixture* secara horizontal dengan *bearing* di dalamnya, dan ditahan oleh baut di *steerer tube*. Pada bagian ujung *fork*, yaitu *dropout*, dipasang sebuah poros dan kemudian pada poros tersebut dipasang sebuah *adaptor* berbentuk L yang berfungsi sebagai lengan transmisi gaya dengan ukuran panjang 355 mm. Pembebanan awal dilakukan dengan memberikan gaya awalan sebesar 100 N tegak lurus sumbu *fork* ke arah bawah pada ujung *adaptor* sehingga akan



Gambar 2.3 *Front Fork – Static Bending Test*

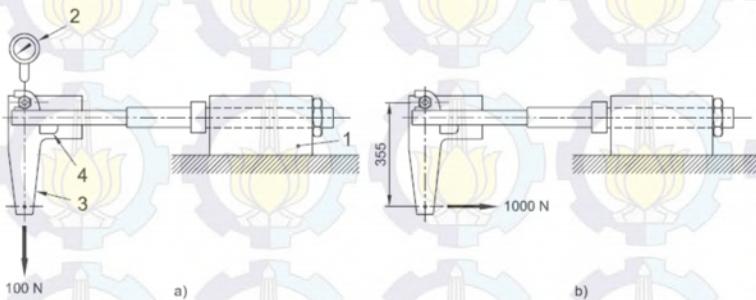
Keterangan :

1. Beban tambahan yang diletakkan pada poros
2. Alat pengukur defleksi
3. *Fixture* tempat bertumpu *fork*

didapat defleksi awal yang terjadi. Defleksi awal yang diperoleh kemudian dijadikan referensi titik nol. Pengujian dilanjutkan dengan memberikan gaya pada ujung *adaptor* secara vertikal ke arah *fixture* sebesar 1000 N, dan kemudian diamati defleksi yang terjadi. Defleksi yang terjadi dikatakan masih di batas aman jika di bawah 5 mm terhadap sumbu *fork*. Skema peralatan pengujian ditunjukkan pada gambar 2.4.

2.3 Teori Kegagalan

Banyak teori yang tersedia untuk memprediksi kegagalan komposit. Teori-teori ini memprediksi kegagalan lapisan-lapisan. Oleh karena itu, teori ini disebut teori kegagalan lapisan-lapisan. Selanjutnya, teori ini juga memprediksi kegagalan yang terjadi dalam suatu lapisan. Oleh karena itu, teori ini dikenal sebagai teori *first-ply failure*. Teori-teori kegagalan yang sering digunakan dalam memprediksi kegagalan komposit saat ini adalah teori tegangan maksimum (*Maximum Stress Theory*), teori Tsai-Wu, dan teori Tsai-Hill [5].



Gambar 2.4 Fork for Hub/Disc Brake – Static Brake-Torque Test

Keterangan :

- a) Menentukan titik nol defleksi awal
 - b) Pemberian gaya pengujian
1. Fixture tempat bertumpu fork
 2. Alat pengukur defleksi
 3. Adaptor bentuk L
 4. Tempat disc brake

2.3.1 Teori Tegangan Maksimum

Teori ini merupakan kelanjutan dari teori tegangan normal maksimum yang ditemukan oleh Rankine dan teori tegangan maksimum yang ditemukan oleh Tresca untuk material yang bersifat homogen dan isotropik. Dalam teori ini, tiga tegangan normal dan tiga tegangan geser dibandingkan dengan tekanan maksimumnya. Tegangan normal yang diberikan dibandingkan dengan tegangan tekan atau tegangan tarik maksimum, tergantung arah tegangannya. Besarnya tegangan geser dibandingkan dengan tegangan geser maksimum.

Untuk tegangan normal,

$$X_c < \sigma_1 < X_t$$

$$Y_c < \sigma_2 < Y_t$$

$$Z_c < \sigma_3 < Z_t$$

Dimana :

X_c : Tegangan tekan arah 1

X_t : Tegangan tarik arah 1

Y_c : Tegangan tekan arah 2

Y_t : Tegangan tarik arah 2

12

Z_c : Tegangan tekan arah 3

σ_1 : Tegangan normal maksimum 1

σ_3 : Tegangan normal maksimum 3

Untuk tegangan geser,

$$|\tau_{23}| < Q$$

$$|\tau_{13}| < R$$

$$|\tau_{12}| < S$$

Dimana :

τ_{23} : Tegangan geser arah 2 dan 3

τ_{13} : Tegangan geser arah 1 dan 3

τ_{12} : Tegangan geser arah 1 dan 2

Z_t : Tegangan tarik arah 3

σ_2 : Tegangan normal maksimum 2

Q : Tegangan geser maksimum arah 2 dan 3

R : Tegangan geser maksimum arah 1 dan 3

S : Tegangan geser maksimum arah 1 dan 2

Ilustrasi tegangan yang terjadi dalam bentuk ruang 3 dimensi ditunjukkan pada gambar 2.5. Ruang kubus bagian dalam merupakan batas aman dari tegangan normal, sedangkan setiap titik di bagian luar merupakan bagian yang tidak aman. Pada bidang sumbu x dan y, tegangan normal maksimum pada sumbu x (aksial) adalah σ_{xx} . Karena nilai tegangan dipengaruhi oleh sudut kemiringan θ , maka persamaan tegangan normal maksimum dapat ditulis sebagai berikut

$$\sigma_1 = \sigma_{xx} \cos^2 \theta$$

$$\sigma_2 = \sigma_{xx} \sin^2 \theta$$

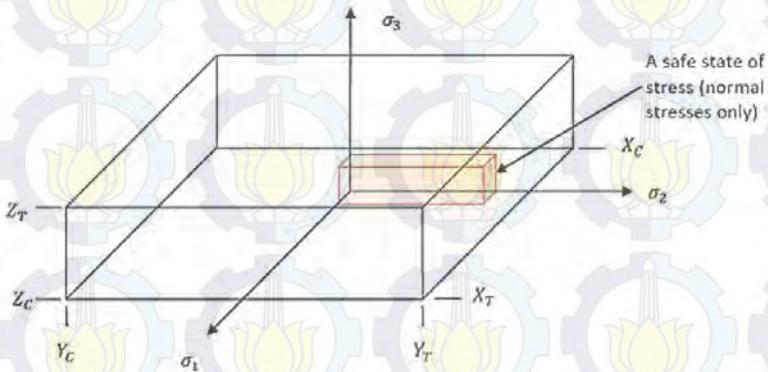
$$\tau_{12} = -\sigma_{xx} \sin \theta \cos \theta$$

Sehingga, persamaan teori tegangan maksimum dapat dituliskan sebagai berikut

$$X_c < \sigma_{xx} \cos^2 \theta < X_t$$

$$Y_c < \sigma_{xx} \sin^2 \theta < Y_t$$

$$|-\sigma_{xx} \sin \theta \cos \theta| < S$$



Gambar 2.5 Ilustrasi Tegangan Normal dalam 3 Dimensi

2.3.2 Teori Tsai-Wu

Teori kegagalan Tsai-Wu merupakan pengembangan dari *the general quadratic failure* yang ditemukan oleh Gol'denblat dan Kopnov. Teori ini menggunakan total energi regangan (energy distorsi dan energy dilatasi) sebagai dasar dalam memperkirakan terjadinya kegagalan. Teori ini lebih menjelaskan kegagalan komposit secara umum dibandingkan teori Tsai-Hill, karena teori ini membedakan kegagalan yang disebabkan oleh tekanan dan kegagalan yang disebabkan oleh tarikan.

Secara garis besar, teori ini dijelaskan dalam persamaan sebagai berikut

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j \leq 1$$

dimana nilai dari F_{ij} berhubungan dengan parameter kekuatan material pada lapisan dan didapatkan dari hasil eksperimen. Jika diasumsikan $F_{ij} = F_{ji}$ dan tidak ada hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser, maka persamaan Tsai-Wu untuk material *orthotropic* dapat dituliskan sebagai berikut

$$F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_3 \sigma_3 + F_4 \sigma_4 + F_5 \sigma_5 + F_6 \sigma_6 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{33} \sigma_3^2 + F_{44} \sigma_4^2 + F_{55} \sigma_5^2 + F_{66} \sigma_6^2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 + 2F_{13} \sigma_1 \sigma_3 + 2F_{23} \sigma_2 \sigma_3 \leq 1$$

Jika diasumsikan nilai tegangan tekan dan tarik maksimum pada 3 arah menjadi $\sigma_{1t}, \sigma_{1c}, \sigma_{2t}, \sigma_{2c}, \sigma_{3t}, \sigma_{3c}$; dan nilai tegangan geser maksimum adalah $\tau_{23}, \tau_{12}, \tau_{31}$; maka nilai-nilai di dalam persamaan Tsai-Wu dapat dicari dengan persamaan berikut

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{1}{\sigma_{1t}} - \frac{1}{\sigma_{1c}}; F_2 = \frac{1}{\sigma_{2t}} - \frac{1}{\sigma_{2c}}; F_3 = \frac{1}{\sigma_{3t}} - \frac{1}{\sigma_{3c}}; \\ F_4 &= F_5 = F_6 = 0 \\ F_{11} &= \frac{1}{\sigma_{1c}\sigma_{1t}}; F_{22} = \frac{1}{\sigma_{2c}\sigma_{2t}}; F_{33} = \frac{1}{\sigma_{3c}\sigma_{3t}}; F_{44} = \frac{1}{\tau_{23}^2}; \\ F_{55} &= \frac{1}{\tau_{31}^2}; F_{66} = \frac{1}{\tau_{12}^2} \end{aligned}$$

Nilai F_{12}, F_{13}, F_{23} ditentukan melalui pengujian *equibiaxial*. Jika nilai tegangan *equibiaxial* adalah $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_{b12}$, $\sigma_1 = \sigma_3 = \sigma_{b13}$, $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{b23}$; maka

$$\begin{aligned} F_{12} &= \frac{1}{2\sigma_{b12}^2} [1 - \sigma_{b12}(F_1 + F_2) - \sigma_{b12}^2(F_{11} + F_{22})] \\ F_{13} &= \frac{1}{2\sigma_{b13}^2} [1 - \sigma_{b13}(F_1 + F_3) - \sigma_{b13}^2(F_{11} + F_{33})] \\ F_{23} &= \frac{1}{2\sigma_{b23}^2} [1 - \sigma_{b23}(F_2 + F_3) - \sigma_{b23}^2(F_{22} + F_{33})] \end{aligned}$$

2.3.3 Teori Tsai-Hill

Teori Tsai-Hill merupakan pengembangan dari teori Von-Mises.. Pada mulanya, Hill mengembangkan teori Von-Mises yang semula untuk material *isotropic* kemudian untuk material *anisotropic*. Kemudian, Tsai mengembangkan apa yang telah dilakukan oleh Hill untuk material dengan lapisan yang searah. Oleh karena itu, teori ini dinamakan teori Tsai-Hill. Menurut teori ini, kegagalan terjadi ketika

$$\begin{aligned} (G + H)\sigma_1^2 + (F + H)\sigma_2^2 + (F + G)\sigma_3^2 - 2H\sigma_1\sigma_2 \\ - 2G\sigma_1\sigma_3 - 2F\sigma_2\sigma_3 + 2L\sigma_4^2 + 2M\sigma_5^2 + 2N\sigma_6^2 = 1 \end{aligned}$$

dimana F, G, H, L, M, dan N adalah parameter kekuatan material dan nilai-nilai ini diperoleh dari hasil eksperimen. Dengan melakukan berbagai penurunan rumus dan menerapkan berbagai asumsi, maka persamaan di atas menjadi

$$\frac{\sigma_1^2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\sigma_3^2}{Z^2} - \sigma_1\sigma_2 \left(\frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2} \right) - \sigma_1\sigma_3 \left(\frac{1}{X^2} - \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} \right) - \sigma_2\sigma_3 \left(-\frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} \right) + \frac{\sigma_4^2}{Q^2} + \frac{\sigma_5^2}{R^2} + \frac{\sigma_6^2}{S^2} = 1$$

Persamaan di atas merupakan persamaan teori Tsai-Hill untuk ruang 3 dimensi.

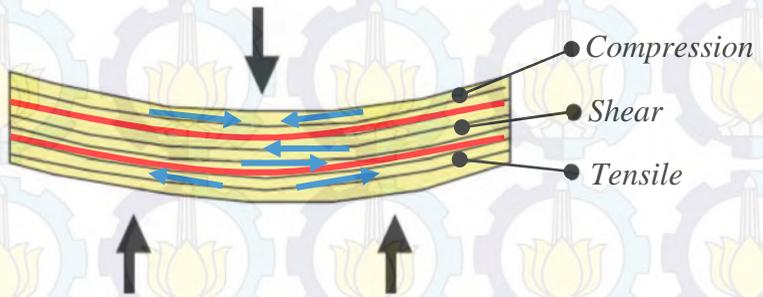
Dari persamaan tersebut diketahui bahwa teori ini tidak membedakan tegangan normal tekan dan tegangan normal tarik. Dengan demikian, nilai dan tanda tegangan normal harus diketahui secara pasti pada teori ini. Tidak seperti teori tegangan maksimum, teori Tsai-Hill menganggap adanya hubungan antara tiap-tiap komponen tegangan. Selain itu, teori ini merupakan teori terpadu dan tidak dapat digunakan untuk mengetahui tipe kegagalan yang terjadi secara pasti.

2.4 Komposit

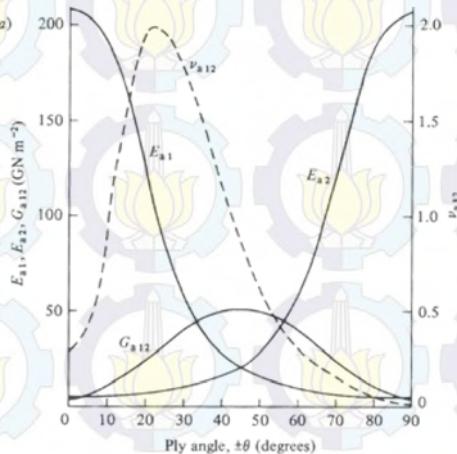
Komposit merupakan material yang terdiri dari gabungan antara serat (*fiber*) dan matriks. Material ini menggabungkan kekuatan dan kekakuan yang dimiliki oleh serat dan massa jenis matriks yang ringan. Hasil dari penggabungan ini adalah material yang ringan dan memiliki kekuatan dan kekakuan yang baik. Material komposit memiliki harga *specific modulus* dan *specific strength* yang besar.

Material komposit memiliki sifat-sifat yang berbeda dengan material konvensional. Material konvensional pada umumnya bersifat homogen dan isotropik. Pengertian dari material bersifat homogen adalah sifat-sifat dari suatu material sama di semua tempat dan posisi, sedangkan pengertian dari material bersifat isotropik adalah sifat-sifat dari suatu material sama untuk berbagai arah. Material komposit adalah material yang bersifat tidak homogen dan orthotropik. Sifat-sifat dari material komposit tidak selalu sama di setiap tempat maupun posisi, dan juga dipengaruhi oleh arah terjadinya tegangan dan regangan [6-7]. Jika struktur yang terdiri dari material komposit diberikan gaya *flexural*, bagian luar dari struktur akan mengalami tegangan tekan atau tarik, sedangkan bagian tengah akan mengalami tegangan geser. Sifat-

sifat yang bekerja pada struktur dengan material komposit akan berbeda seiring dengan perbedaan tegangan yang terjadi pada struktur. Gambar 2.6 menunjukkan ilustrasi tegangan yang terjadi pada struktur yang diberikan gaya *flexural*, dan gambar 2.7 menunjukkan efek kemiringan sudut terhadap nilai sifat material *carbon fiber*.



Gambar 2.6 Ilustrasi Tegangan yang Terjadi pada Material Komposit



Gambar 2.7 Efek Kemiringan Sudut terhadap Nilai Sifat Material Komposit

Salah satu keunggulan yang dimiliki material komposit adalah adanya kemungkinan untuk dapat diarahkan memiliki sifat-sifat tertentu (*tailoring*). Material komposit dapat dirancang untuk dapat memiliki kekuatan dan kekakuan baik pada satu arah, tetapi memiliki kelemahan pada arah yang lain. Berbagai macam jenis material komposit yang ada saat ini adalah *carbon fiber*, *glass fiber*, kayu, *hardmetal*, *cermet* (keramik dan logam), dll [8]. Tabel 2.1 menunjukkan perbandingan sifat-sifat dari serat dengan material lain.

Tabel 2.1 Sifat-Sifat Dasar Serat dengan Material Lain

Type Material	Tensile Strength (GPa)	Tensile Modulus (g/cc)	Typical Density Modulus	Specific
Carbon HS	3500	160-270	1.8	90–150
Carbon IM	5300	270-325	1.8	150– 80
Carbon HM	3500	325-440	1.8	180-240
Carbon UHM	2000	440+	2.0	200+
Aramid LM	3600	60	1.45	40
Aramid HM	3100	120	1.45	80
Aramid UHM	3400	180	1.47	120
Glass–E glass	2400	69	2.5	27
Glass–S2 glass	3450	86	2.5	34
Glass–quartz	3700	69	2.2	31
Aluminium Alloy (7020)	400	1069	2.7	26
Titanium	950	110	4.5	24
Mild Steel (55 Grade)	450	205	7.8	26
Stainless Steel (A5-80)	800	196	7.8	25
HS Steel (17/4 H900)	1241	197	7.8	25

Carbon fiber adalah suatu material yang terdiri dari serat-serat yang memiliki diameter sekitar 5-10 mikrometer dan terdapat sebagian besar atom-atom karbon di dalamnya. *Carbon fiber* memiliki beberapa sifat mekanis yang baik, di antaranya adalah kekakuan yang tinggi, kekuatan tarik yang tinggi, ringan, dan memiliki ketahanan thermal dan kimia yang baik. Ketika *carbon fiber* dihubungkan dengan *plastic resin* (*thermoset* atau *thermoplast*) melalui proses *molding*, maka terbentuklah *carbon-fiber-reinforced polymer* (CFRP), atau sering juga disebut *carbon fiber* saja.

Carbon-fiber-reinforced polymer merupakan material komposit. Dalam CFRP yang berperan sebagai penguat adalah *carbon fiber*, sedangkan yang berperan sebagai matriks adalah *polymer resin*. Tidak seperti material isotropik lainnya, CFRP memiliki sifat mekanis tergantung oleh arahnya, susunan *carbon fiber*, dan juga perbandingan antara *carbon fiber* dengan *plastic resin*. Sifat mekanis dari CFRP memiliki peningkatan yang signifikan dibandingkan dengan *carbon fiber*, yaitu kekuatan yang sangat tinggi dibanding beratnya yang ringan, dan sangat kaku. Akan tetapi, CFRP memiliki kelemahan, yaitu kegetasan dan batas kelelahan yang sulit ditentukan. Hal ini berarti batas kegagalan CFRP terhadap tegangan tidak bisa ditentukan. Berdasarkan nilai *tensile modulus* CFRP dibedakan menjadi empat kelompok [8], yaitu *standard modulus* (265 GPa), *intermediate modulus* (265-320 GPa), *high modulus* (320-440 GPa), dan *ultra high modulus* (440 GPa). Tabel 2.2 menunjukkan berbagai macam tipe CFRP.

2.5 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga adalah metode numerik untuk memperkirakan solusi dari permasalahan matematis sehingga diperoleh hasil yang mendekati dengan kondisi riil. Secara garis besar, metode elemen hingga dilakukan dengan cara membagi-bagi suatu struktur menjadi beberapa elemen, dan elemen-elemen tersebut terhubung melalui nodal-nodal. Jenis-jenis elemen yang digunakan dalam metode elemen hingga adalah elemen 1 dimensi

Tabel 2.2 Jenis-Jenis *Carbon Fiber* Berdasarkan *Tensile Modulus*

<i>Grade</i>	<i>Tensile Modulus (GPa)</i>	<i>Tensile Strength (GPa)</i>
<i>Standard Modulus (<265 GPa)</i>		
T300	230	3.53
T700	235	5.3
AS4	241	3.95
<i>Intermediate Modulus (265 – 320 GPa)</i>		
T800	294	5.94
M30S	294	5.49
T650-42	290	4.82
<i>High Modulus (320 – 440 GPa)</i>		
M40	392	2.74
HMA	358	3.0
UMS2526	395	4.56
<i>Ultra High Modulus (~440 GPa)</i>		
M46J	436	4.21
UMS3536	435	4.5
UHMS	441	3.45

(*Truss* elemen, *Bar* element, dsb), elemen 2 dimensi (*Plane* elemen, *plate* elemen, dsb) dan elemen 3 dimensi (*Solid* elemen).

Pada metode elemen hingga setiap elemen yang digunakan harus memiliki matriks kekakuan tertentu, yaitu [K]. Matriks kekakuan tersebut digunakan dalam persamaan berikut : $[K] \times [X] = [F]$; dimana [K] adalah matriks kekakuan, [X] adalah deformasi, dan [F] adalah gaya. Matriks kekakuan tiap elemen ditentukan lewat persamaan-persamaan tertentu. Langkah-langkah dalam metode elemen hingga dalam menganalisa suatu struktur adalah sebagai berikut :

1. Menentukan tipe analisa (Statik, dinamik, modal, *buckling*, *contact*, atau thermal)
2. Menentukan tipe elemen (2-D atau 3-D)
3. Menentukan *properties* material (E, ν, ρ, α , dsb.)
4. Menentukan nodal-nodal pada struktur
5. Membentuk elemn-elemen dengan menyambungkan nodal-nodal

6. Menentukan *boundary conditions* dan pemberian beban
7. Melakukan eksekusi agar memperoleh hasil
8. Menganalisa hasil yang diperoleh (*Displacement, Stress, Strain, Natural Frequency, Temperature, atau Time History*)

Penyelesaian metode elemen hingga menggunakan metode matriks. Sarana komputer diperlukan untuk menghitung persamaan ini, hal ini dikarenakan perhitungan dalam metode ini sangatlah banyak dan kompleks. Perhitungan dari seluruh sistem merupakan penyelesaian persamaan serentak yang dinyatakan dalam bentuk matriks.

2.6 Studi Pustaka

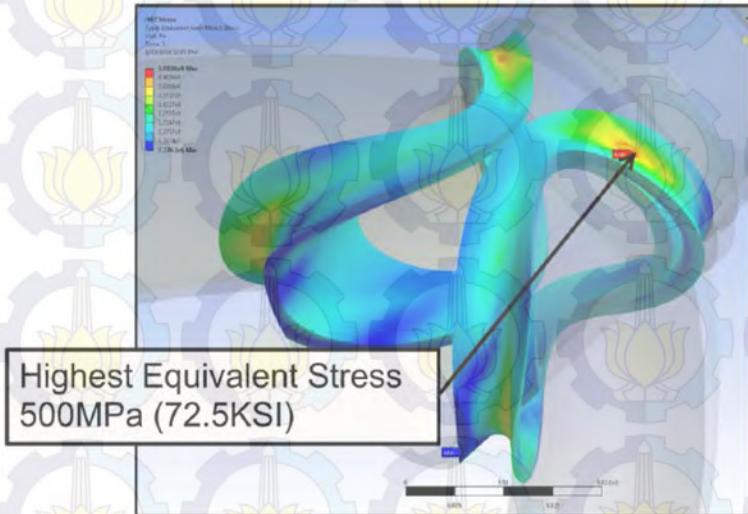
2.6.1 *Fatigue Analysis of a Bicycle Fork*

Pada tahun 2010, **Nathaniel A. Jannetti** dan **Bradford L. Lynch** melakukan penelitian tentang *fork* sepeda yang berjudul "*Fatigue Analysis of a Bicycle Fork*" [1]. Penelitian ini menggunakan standar pengujian ASTM F2273-03 di dalam pengujiannya, dan untuk meneliti kelelahan yang terjadi digunakan analisa elemen hingga (FEA). Tujuan dari penelitian adalah untuk menganalisa adanya kerusakan yang terjadi di bagian *fork* selama pengujian, dan melakukan optimasi terhadap *fork* tersebut.

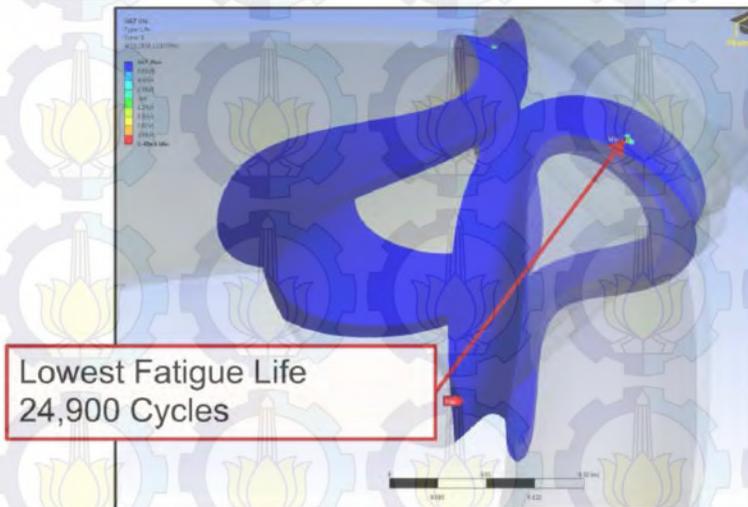
Setelah dilakukan simulasi, ditemukan adanya retak pada sambungan las antara *steerer tube* dan *fork blades*, atau disebut sebagai *Heat Affected Zone (HAZ)*. Hasil analisa secara FEA ditunjukkan pada tabel 2.3. Tampak visual dari hasil simulasi FEA ditunjukkan pada gambar 2.8 dan 2.9.

Tabel 2.3 Hasil Analisa dengan menggunakan ANSYS

Arah Pembebanan	<i>Stress Minimal</i> (Mpa)	<i>Stress Maksimal</i> (MPa)	Umur Kelelahan (Siklus)
+Y	7.78×10^6	5.02×10^8	24.900
-Y	7.76×10^6	4.96×10^8	25.200

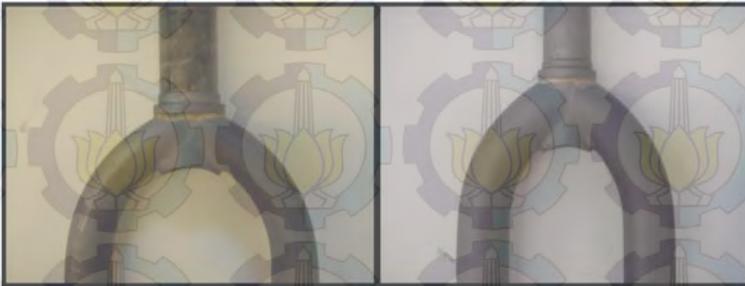


Gambar 2.8 Stress pada Bagian HAZ



Gambar 2.9 Umur kelelahan pada Bagian HAZ

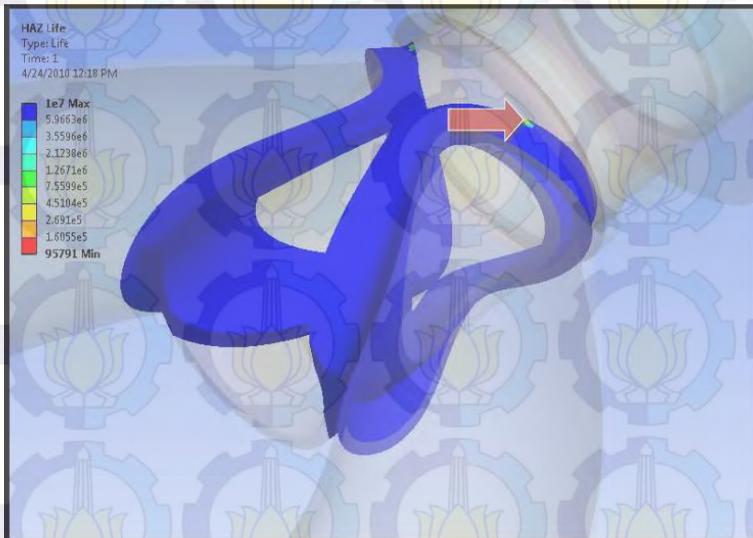
Optimasi dilakukan terhadap geometri *fork* pada bagian radius *bending fork blades* dan diameter luar *fork blades*. Perbandingan geometri antara *fork* semula dengan *fork* yang telah dioptimasi ditunjukkan pada gambar 2.10. Simulasi yang sama juga dilakukan terhadap *fork* yang telah dioptimasi. Hasil yang diperoleh menunjukkan perkembangan yang signifikan dari segi umur kelelahan. Perbandingan umur kelelahan antara *fork* semula dengan *fork* yang telah dioptimasi ditunjukkan pada tabel 2.4. Tampak visual dari hasil simulasi FEA *fork* yang telah dioptimasi ditunjukkan pada gambar 2.11.



Gambar 2.10 Perbandingan antara *Fork* Semula dan *Fork* yang Telah Dioptimasi

Tabel 2.4 Perbandingan Umur Kelelahan *Fork*

	<i>Fork</i> Semula (Siklus ke-)	<i>Fork</i> yang telah dioptimasi (Siklus ke-)
Timbul retak berdasarkan FEA	24.900	95.800
Timbul retak disebabkan goresan	28.800	N/A
Muncul retak	47.400	136.000 (pada HAZ)
Kegagalan	62.800	154.000 (<i>Steerer Tube</i>)



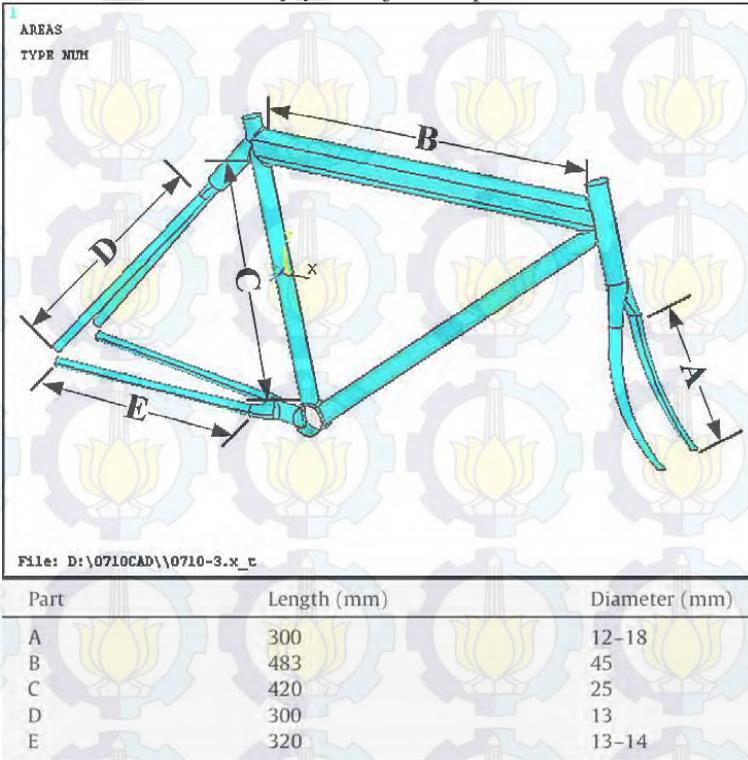
Gambar 2.11 Umur Kelelahan *fork* yang Telah Dioptimasi

2.6.2 Penelitian Kombinasi Sudut Lapisan Material Komposit pada *Frame* Sepeda

Penelitian berjudul "Fiber direction and stacking sequence design for bicycle frame made of carbon/epoxy composite laminate" oleh Thomas Jin-Chee Liu dan Huang-Chieh Wu dari Ming Chi University of Technology dilakukan pada tahun 2009 [2]. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisa terhadap pengaruh kombinasi dari arah *fiber* di tiap *ply* dalam mendesain *frame* sepeda. Standar pengujian yang menjadi acuan dalam analisa ini adalah standar JIS D9401:1997, dan menggunakan analisa elemen hingga (FEA) dalam meneliti kegagalan yang terjadi.

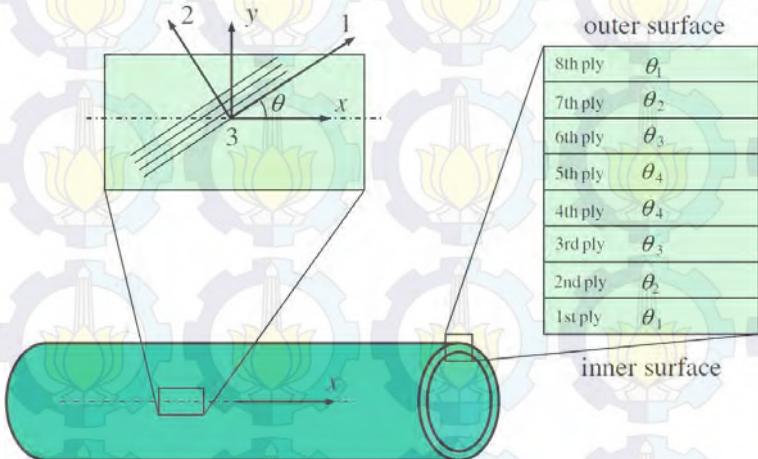
33 kombinasi susunan *ply* ditentukan untuk mencari susunan yang terbaik. *Frame* sepeda terdiri dari beberapa tabung, dan tiap-tiap tabung terdiri dari 8 *ply* disusun secara simetri dengan arah yang berbeda di tiap *ply* dan tiap *ply* memiliki ketebalan 0.3 mm. Pada gambar 2.12 ditunjukkan dimensi utama dari *frame* dan

gambar 2.13 menjelaskan tentang susunan *ply* pada tabung. Kombinasi dari susunan *ply* ditunjukkan pada tabel 2.5.



Gambar 2.12 Dimensi Utama *Frame*

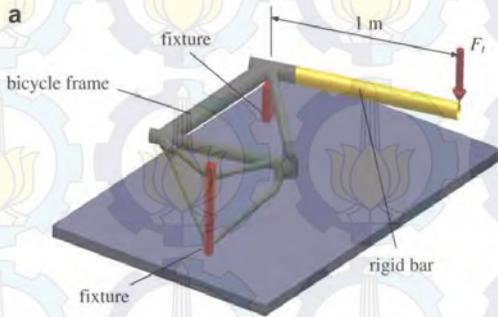
Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini terdiri dari 3 jenis pembebanan, yaitu pembebanan torsi, pembebanan secara *frontal*, dan pembebanan secara vertikal. Gambar 2.14 menunjukkan pembebanan torsi, gambar 2.15 menunjukkan pembebanan *frontal*, dan gambar 2.16 menunjukkan pembebanan vertikal. Hasil dari simulasi menunjukkan bahwa beberapa dari kombinasi *ply* memiliki hasil yang lebih baik daripada kombinasi yang lain. Hasil dari simulasi ditunjukkan pada gambar 2.17.



Gambar 2.13 Tabung dengan 8 Ply

Tabel 2.5 Kombinasi Susunan Ply

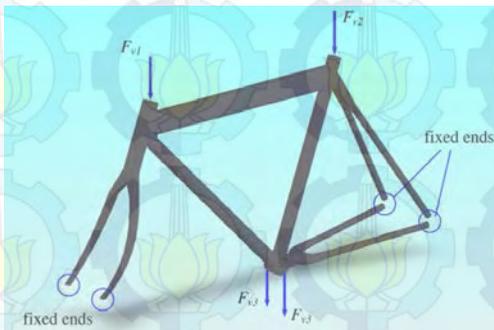
Kombinasi	Susunan	Kombinasi	Susunan
1	[0/90/45/-45]s	18	[-45/45/90/0]s
2	[0/45/90/-45]s	19	[45/0/90/-45]s
3	[0/-45/90/45]s	20	[45/90/0/-45]s
4	[0/90/-45/45]s	21	[45/-45/0/90]s
5	[0/45/-45/90]s	22	[45/0/-45/90]s
6	[0/-45/45/90]s	23	[45/90/-45/0]s
7	[90/45/-45/0]s	24	[45/-45/90/0]s
8	[90/-45/45/0]s	A	[0/90/0/0]s
9	[90/0/45/-45]s	B	[0/0/90/0]s
10	[90/45/0/-45]s	C	[0/90/90/0]s
11	[90/-45/0/45]s	D	[90/0/0/90]s
12	[90/0/-45/45]s	E	[0/45/-45/0]s
13	[-45/0/90/45]s	F	[0/0/0/0]s
14	[-45/90/0/45]s	G	[90/90/90/90]s
15	[-45/45/0/90]s	H	[45/45/45/45]s
16	[-45/0/45/90]s	I	[-45/-45/-45/-45]s
17	[-45/90/45/0]s		



Gambar 2.14 Pembebanan Torsi



Gambar 2.15 Pembebanan *Frontal*



Gambar 2.16 Pembebanan Vertikal

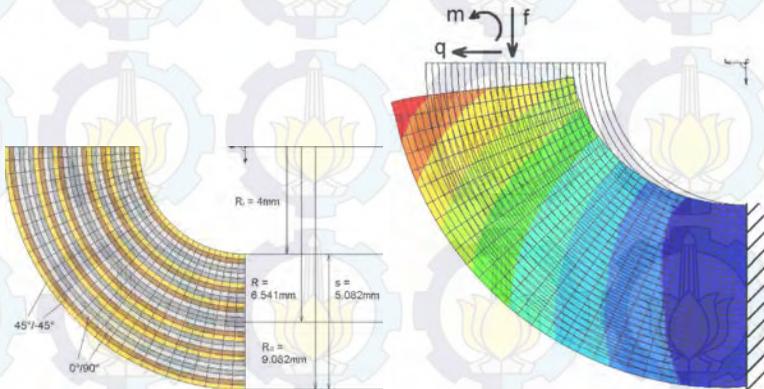
Test method	Better designs			Bad designs		
	Case	R_{max}	Stacking	Case	R_{max}	Stacking
Torsional loading test	C	1.78	[0/90/0/0]	H	0.42	[-45/45/45/45]
	I	1.60	[0/90/45/-45]	I	0.48	[-45/-45/-45/-45]
	4	1.60	[0/90/-45/45]	7	0.48	[80/45/-45/0]
				20	0.48	[45/90/0/-45]
Frontal loading test				23	0.59	[45/90/-45/0]
				10	0.50	[90/45/0/-45]
				19	0.50	[45/0/90/-45]
	I2	0.86	[90/0/-45/45]	I	0.16	[-45/-45/-45/-45]
	24	0.85	[45/-45/90/0]	H	0.17	[45/45/45/45]
	23	0.84	[45/-45/0/90]	G	0.18	[80/90/90/90]
	18	0.83	[-45/45/90/0]	F	0.23	[0/0/0/0]
Vertical loading test	C	0.83	[0/90/0/0]			
	D	0.81	[90/0/0/0]			
	9	0.77	[90/0/45/-45]			
	I	0.76	[0/90/45/-45]			
	15	0.75	[-45/45/0/90]			
Vertical loading test	C	20.1	[0/90/0/0]	I	3.33	[-45/-45/-45/-45]
	I	20.1	[0/90/45/-45]	G	3.84	[90/90/90/90]
	4	19.1	[0/90/-45/45]	F	3.86	[0/0/0/0]
			H	4.44	[45/45/45/45]	

Gambar 2.17 Hasil Simulasi Pembebanan

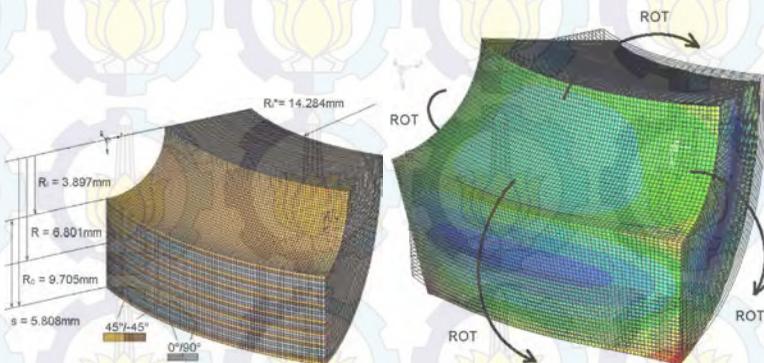
2.6.3 Perbandingan Hasil Perhitungan *Interlaminar Shear Stress* Berdasarkan Analisa dan FEM

Penelitian berjudul "Error estimation between simple, closed-form analytical formulae and full-scale FEM for interlaminar stress prediction in curved laminates" oleh Jermaine Most, Daniel Stegmair dan Dirk Petry dari Airbus Helicopters-Jerman, dilakukan pada tahun 2015 [3]. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa atau mengamati perbedaan hasil perhitungan *interlaminar stress* pada struktur secara analisis dan *finite element*. Perhitungan secara analisis dilakukan dengan menentukan diagram *free body* pada struktur dan menghitung dengan beberapa persamaan, sedangkan perhitungan secara *finite element* dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Nastran dengan memilih dua jenis pengaturan simulasi yang berbeda, yaitu *solid element* dan *shell element*.

Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini terdiri dari 3 jenis, yaitu struktur komposit *singly curved* dikenai beban momen, torsional dan longitudinal; struktur komposit *reduced doubly curved* dikenani dua beban bending; dan struktur komposit *extended doubly curved* dikenai beban *pressure*. Gambar 2.18 menunjukkan geometri, ukuran, dan pembebanan untuk *singly curved*; gambar 2.19 menunjukkan geometri, ukuran dan pembebanan untuk *reduced doubly curved*; dan gambar 2.20 menunjukkan geometri dan *meshing* untuk *extended doubly curved*.

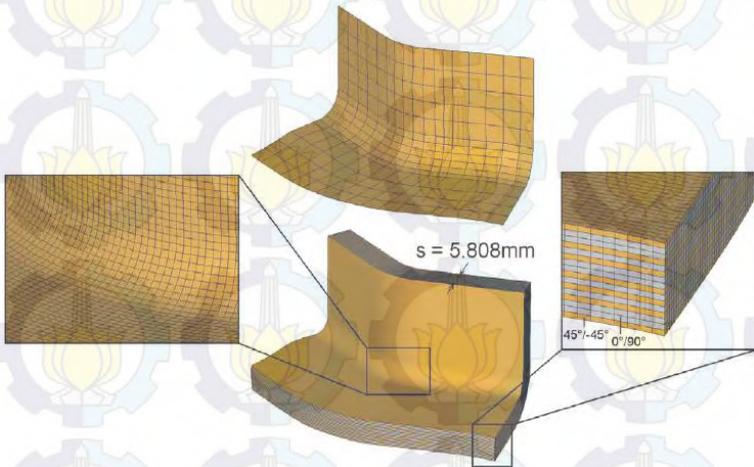


Gambar 2.18 Geometri, Ukuran dan Pembebanan untuk *Singly Curved*



Gambar 2.19 Geometri, Ukuran dan Pembebanan untuk *Reduced Doubly Curved*

Untuk mengevaluasi mengenai efek dari penyusunan *ply*, maka pada pengujian *extended doubly curve* diberlakukan pula penyusunan *ply* yang berbeda. Terdapat 3 tata cara penyusunan *ply*, yaitu *quasi-isotropic*, *shear stiff* dan *bending stiff*. Gambar 2.21 menunjukkan penyusunan *ply* tersebut.



Gambar 2.20 Geometri dan Meshing untuk *Extended Doubly Curved*

Fabric-ply	Quasi-isotropic	Shear stiff	Bending stiff
1/2	$\pm 45^\circ$	$\pm 45^\circ$	$0^\circ/90^\circ$
3/4	$0^\circ/90^\circ$	$\pm 45^\circ$	$0^\circ/90^\circ$
5/6	$0^\circ/90^\circ$	$\pm 45^\circ$	$0^\circ/90^\circ$
7/8	$\pm 45^\circ$	$\pm 45^\circ$	$0^\circ/90^\circ$
9/10	$0^\circ/90^\circ$	$\pm 45^\circ$	$0^\circ/90^\circ$
11/12	$\pm 45^\circ$	$\pm 45^\circ$	$0^\circ/90^\circ$
13/14	$0^\circ/90^\circ$	$\pm 45^\circ$	$0^\circ/90^\circ$
15/16	$0^\circ/90^\circ$	$\pm 45^\circ$	$0^\circ/90^\circ$
17/18	$\pm 45^\circ$	$\pm 45^\circ$	$0^\circ/90^\circ$
19/20	$0^\circ/90^\circ$	$\pm 45^\circ$	$0^\circ/90^\circ$
21/22	$\pm 45^\circ$	$\pm 45^\circ$	$0^\circ/90^\circ$
23/24	$0^\circ/90^\circ$	$\pm 45^\circ$	$0^\circ/90^\circ$
25/26	$\pm 45^\circ$	$\pm 45^\circ$	$0^\circ/90^\circ$
27/28	$0^\circ/90^\circ$	$\pm 45^\circ$	$0^\circ/90^\circ$
29/30	$0^\circ/90^\circ$	$\pm 45^\circ$	$0^\circ/90^\circ$
31/32	$\pm 45^\circ$	$\pm 45^\circ$	$0^\circ/90^\circ$

Gambar 2.21 Penyusunan *Ply Extended Doubly Curved*

Setelah dilakukan berbagai perhitungan, simulasi dan analisa, maka dapat diperoleh kesimpulan dari penelitian ini.

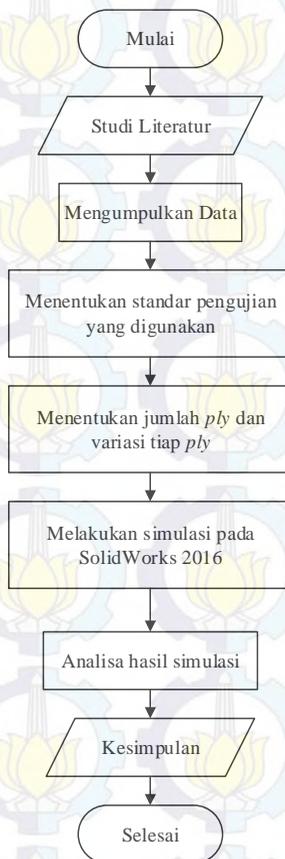
Kesimpulan yang didapat oleh penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Penyebab utama di dalam perbedaan hasil antara metode analisis dengan metode *finite element* adalah pengabaian kaidah St. Venant pada metode analisis
2. Tantangan utama di dalam memprediksi nilai *interlaminar shear stress* adalah memodelkan struktur di dalam perangkat lunak dan memastikan agar hasil yang terjadi tidak singular.
3. Setelah diberlakukan beberapa asumsi dan syarat, metode analisa diketahui menunjukkan hasil yang bisa diterima di dalam memprediksi nilai *interlaminar shear stress* untuk *singly curved* dan cukup konservatif untuk *doubly curved*.
4. Metode *solid-element* di dalam memprediksi nilai *interlaminar shear stress* menunjukkan hasil yang detail dan dapat diterima. Akan tetapi, metode ini kurang efisien dikarenakan permodelan yang dilakukan membutuhkan banyak waktu dan data untuk diproses.
5. Metode *shell-element* menunjukkan hasil yang bisa diterima, dengan catatan bahwa pengaturan pada metode ini perlu dilakukan secara cermat. Metode *shell element* bisa dikembangkan agar lebih efektif dengan cara menambahkan elemen pada *shell*, dan bisa dengan menambahkan *delamination interface* di antara tumpukan *ply*.

BAB III METODOLOGI

3.1 Diagram Alir Penelitian

Sejumlah tahapan-tahapan disusun agar di dalam penyelesaian tugas akhir ini diperoleh tujuan yang diharapkan. Tahapan-tahapan tersebut ditunjukkan dalam bentuk diagram alir (*flowchart*) seperti pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Tugas Akhir

Metodologi penyusunan tugas akhir ini dimulai dengan studi literatur mengenai *fork* sepeda, menentukan standar pengujian yang hendak digunakan dalam analisa, menentukan jumlah *ply* dan variasi kemiringan sudut tiap *ply*, dan melakukan simulasi pengujian pada perangkat lunak *SolidWorks* 2016 [9]. Tahap terakhir yaitu analisa hasil simulasi dan membuat kesimpulan.

3.1.1 Studi Literatur dan Data Penelitian

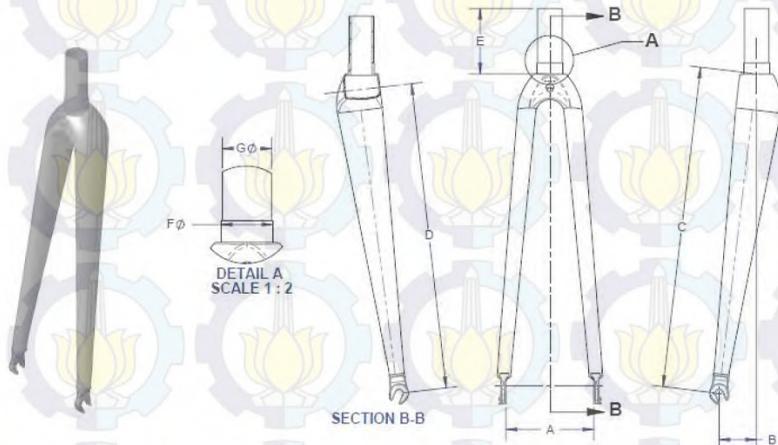
Tahap pertama yang dilakukan adalah studi literatur. Studi literatur dilakukan untuk mengetahui landasan teori yang berhubungan dengan tugas akhir ini. Tahap selanjutnya adalah mengumpulkan data-data yang bertujuan untuk menunjang tugas akhir ini. Pengumpulan data dilakukan dengan mencari data-data melalui media cetak atau *soft file*, dan juga melalui media elektronik (internet). Topik-topik yang dibutuhkan dalam tugas akhir ini yaitu meliputi sepeda dan bagian-bagiannya, dan sistem pengujian *failure* dan *fatigue* untuk material komposit. Data-data yang valid, seperti sifat-sifat material dan geometri *fork* sepeda, sangat dibutuhkan. Oleh karena itu, referensi-referensi dalam bentuk jurnal ilmiah juga sangat diperlukan.

Spesifikasi dan dimensi umum dari *fork road bike* ditunjukkan pada gambar 3.2 dan tabel 3.1. Spesifikasi dan dimensi ini merupakan desain yang secara umum digunakan di dalam perancangan *fork* untuk *road bike*.

Data material yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah data material *carbon fiber* T300 [10]. Data tersebut merupakan sifat mekanis pada tiap arah dari material tersebut dan dibutuhkan untuk melakukan analisa. Data ini diambil dari referensi yang ada pada internet. Sifat-sifat material T300 ditunjukkan pada lampiran.

3.1.2 Standar Pengujian

Pada penelitian ini terdapat dua jenis pengujian yang digunakan, yaitu *front fork – static bending test* dan *fork for hub/disc brake – static brake-torque test*. Kedua pengujian *static* ini dilakukan berdasarkan standar CEN 14781 [4] untuk *road bike*.



Gambar 3.2 Spesifikasi *Fork Road Bike*

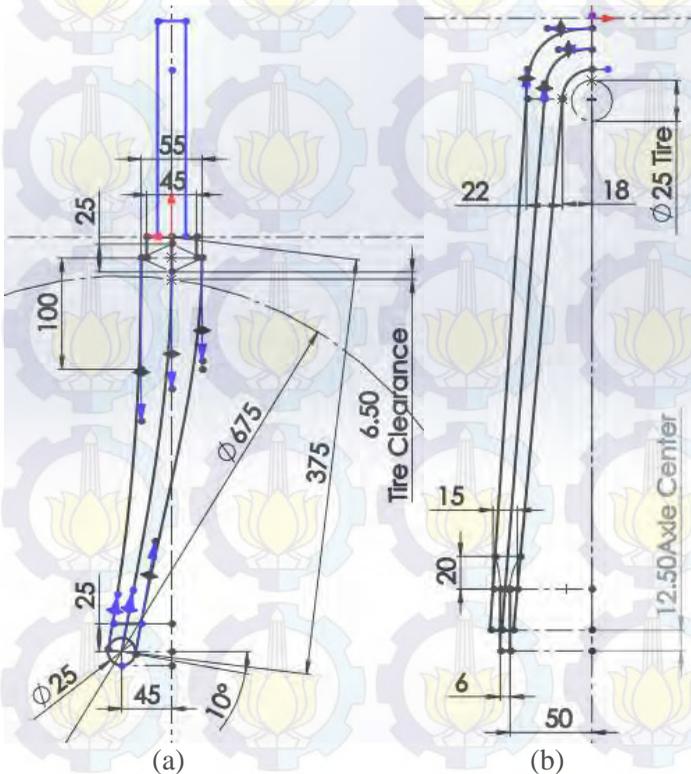
Tabel 3.1 Dimensi Umum *Fork Road Bike*

Huruf	Keterangan	Ukuran (mm)
A	<i>Drop Out Spacing</i>	100.5 ± 0.5
B	<i>Rake Distance</i>	44 ± 1.0
C	<i>Axle To Crown</i>	374 ± 1.0
D	<i>Brake Hole Distance</i>	356 ± 1
E	<i>Steer Tube Length</i>	300 ± 3
F	<i>Crown Race Diameter</i>	30.05 ± 0.13
G	<i>Steer Tube Diameter</i>	28.6 ± 0.05

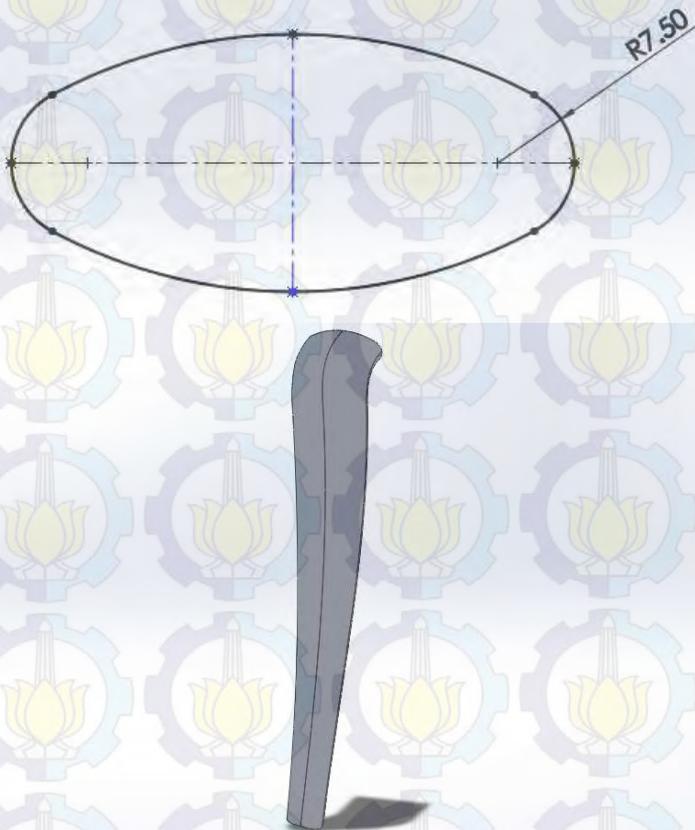
Pada *front fork – static bending test* mula-mula *fork* sepeda diberikan pembebanan awal sebesar 100 N dan diukur defleksi awal yang terjadi. Kemudian pembebanan statik diberikan sebesar 1200 N dan diukur kembali defleksi yang terjadi. Pada *fork for hub/disc brake – static brake-torque test* mula-mula *fork* sepeda diberikan pembebanan awal sebesar 100 N dan diukur defleksi awal yang terjadi. Kemudian pembebanan statik diberikan sebesar 1000 N dan diukur kembali defleksi yang terjadi.

3.1.3 Perancangan

Perancangan awal yang tepat akan menjadikan penelitian ini efektif dan efisien. Maka dari itu, penggambaran model, penentuan jumlah *ply* dan variasi kemiringan sudut tiap *ply* diperlukan. Langkah pertama yang dilakukan dalam penggambaran model *fork* pada SolidWorks adalah menggambar sketsa awal geometri utama pada *fork*. Sketsa geometri utama pada *fork* ditunjukkan pada gambar 3.3. Setelah membuat sketsa geometri utama, langkah kemudian ialah membuat salah satu sisi dari *fork blade*. Gambar 3.4 menunjukkan sisi kanan dari *fork blade*.



Gambar 3.3 Sketsa Geometri Utama *Fork* Tampak Samping (a) dan Tampak Depan (b)



Gambar 3.4 Model Sisi Kanan *Fork Blade*

Pada bagian bawah *fork blade* tersebut ditambahkan model *drop out* dan kemudian dilakukan proses *mirror* pada *fork blade* dan *drop out* tersebut. Hasil proses penambahan model *drop out* dan *mirror* ditunjukkan pada gambar 3.5. Agar memudahkan proses pendefinisian model sebagai *composite*, maka pengaturan *face* dari model diperlukan. *Face* dari model *fork* tersebut disalin sebagai *surface* baru, dan kemudian beberapa bagian *face* dihapus dan disambung kembali menjadi satu *face*. Gambar 3.6 menunjukkan hasil *surface* sebelum dihapus dan sesudah dihapus.



Gambar 3.5 Kedua Sisi *Fork Blade* Beserta *Drop Out*



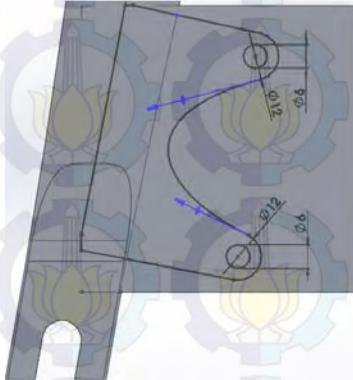
(a)



(b)

Gambar 3.6 Model *Surface* Awal (a) dan Model *Surface* Setelah Diubah (b)

Langkah selanjutnya adalah menambahkan model *disc brake mount* di sebelah belakang *fork blade* kanan dan di dekat *drop out*. Sketsa penggambaran *drop out* ditunjukkan pada gambar 3.7. Setelah itu, model *steerer tube* ditambahkan pada bagian lubang *fork blade*. Gambar 3.8 menunjukkan model *fork* utuh yang telah selesai.



Gambar 3.7 Sketsa Penggambaran *Drop Out*



Gambar 3.8 Model *Fork* Selesai

Pada penelitian ini, jumlah *ply* yang ditentukan adalah 8 *ply*. Dengan ketebalan tiap *ply* 0,3 mm, maka ketebalan dari *tube fork* sepeda adalah 2,4 mm. Variasi kemiringan sudut tiap *ply*

ditentukan secara simetris. Variasi-variasi yang ditentukan dalam penelitian ini ditunjukkan pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 Variasi Kemiringan Sudut Tiap Ply

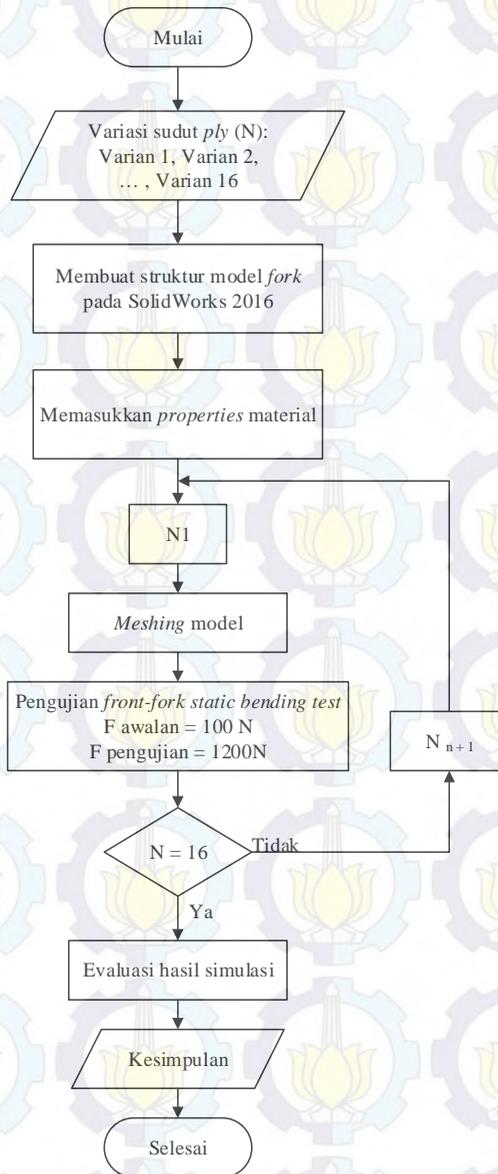
Varian	Kombinasi	Varian	Kombinasi
1	[0/0/0/0]s	9	[0/45/0/0]s
2	[0/0/-45/0]s	10	[0/45/-45/0]s
3	[0/0/45/0]s	11	[0/45/45/0]s
4	[0/0/90/0]s	12	[0/45/90/0]s
5	[0/-45/0/0]s	13	[0/90/0/0]s
6	[0/-45/-45/0]s	14	[0/90/-45/0]s
7	[0/-45/45/0]s	15	[0/90/45/0]s
8	[0/-45/90/0]s	16	[0/90/90/0]s

3.1.4 Simulasi

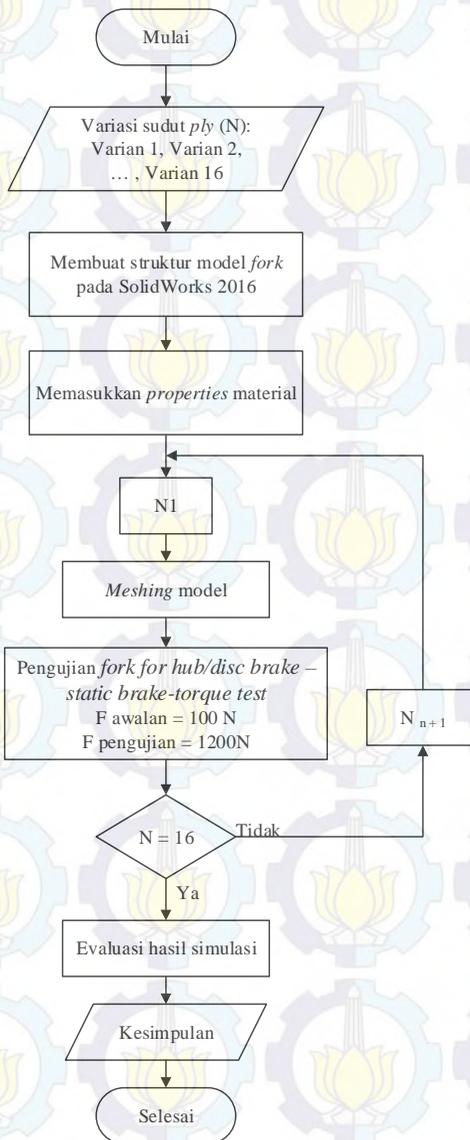
Pada penelitian ini terdapat 2 jenis simulasi pengujian yang hendak dilakukan, yaitu simulasi pengujian *front-fork static bending test* dan *fork for hub/disc brake – static brake-torque test*. Gambar 3.9 menunjukkan diagram alir untuk simulasi *front-fork static bending test* dan gambar 3.10 menunjukkan diagram alir untuk simulasi *fork for hub/disc brake – static brake-torque test*. Pada tahapan ini untuk menyelesaikan persoalan dengan metode elemen hingga dibagi kedalam beberapa langkah penyelesaian sebagai berikut.

1. *Preprocessing: defining the problem*

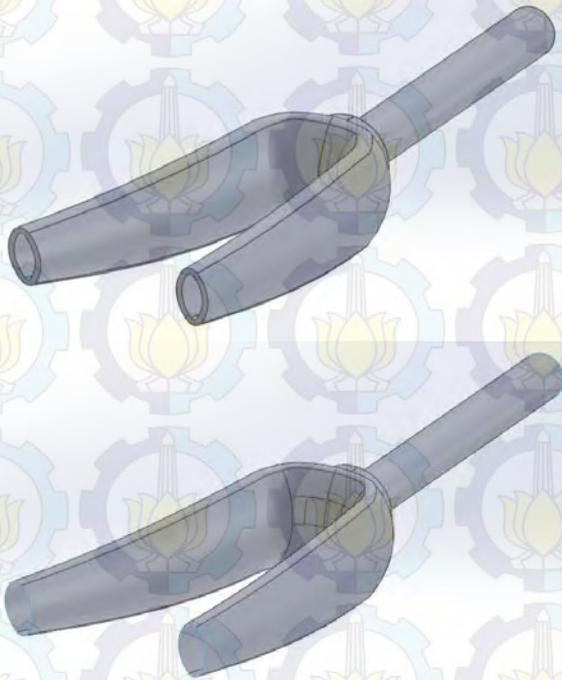
Sebelum mendefinisikan persoalan, mula-mula struktur *fork* perlu disimulasikan ke dalam permodelan pada perangkat lunak *SolidWorks*. Untuk melakukan permodelan struktur dengan material komposit, pertama-tama struktur dimodelkan ke dalam bentuk *solid*. Setelah itu, bentuk *solid* tersebut diubah ke dalam bentuk *surface*. Gambar 3.11 menunjukkan permodelan dalam bentuk *solid* dan *surface*. Langkah selanjutnya adalah mendefinisikan *surface* sebagai komposit dan mendefinisikan tipe elemen dan properti material/geometri. Gambar 3.12 menunjukkan pengaturan



Gambar 3.9 Diagram Alir *Front-Fork Static Bending Test*

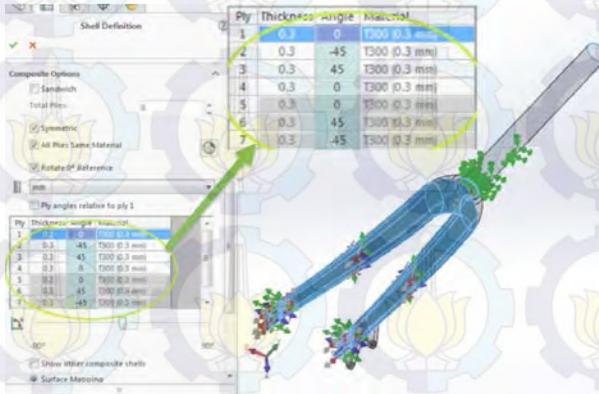


Gambar 3.10 Diagram Alir Simulasi Fork for Hub/Disc-Brake – Static Brake-Torque Test

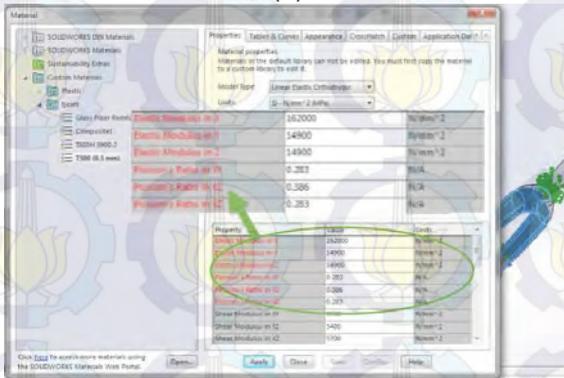


Gambar 3.11 Permodelan *Solid* dan *Surface*

surface sebagai komposit dan pengaturan material yang digunakan. Dikarenakan bentuk geometri fork yang kompleks, maka pendefinisian *surface* sebagai komposit harus dilakukan pada setiap *face* agar arah serat dari keseluruhan *surface* memiliki orientasi yang sama. Langkah berikutnya adalah menentukan *meshing lines/areas/volumes* pada model. Ada 3 cara *meshing* yang bisa dilakukan pada *SolidWorks* 2016, yaitu *Standard Mesh*, *Curvature Mesh* dan *Blended-Curvature Mesh*. Perbedaan ketiga cara *meshing* tersebut terletak pada orientasi penerapan *mesh*, *standard mesh* lebih berorientasi pada *face* dari model, *curvature mesh* berorientasi pada *volume* dari model, dan *blended-curvature mesh* memadukan cara *meshing* berdasarkan *standard* dan



(a)

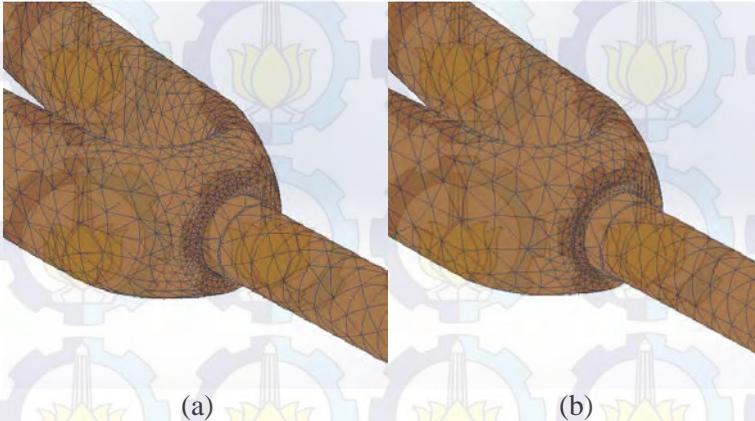


(b)

Gambar 3.12 Jendela Pengaturan *Surface* sebagai komposit (a) dan Jendela Pengaturan *Material* (b)

curvature mesh. Untuk menentukan cara mana yang sebaiknya digunakan, maka perlu dilakukan dahulu hasil simulasi dengan menggunakan cara *meshing* yang berbeda dan menentukan besar elemen yang berbeda pula. Besar elemen yang ditentukan adalah sebesar 24 mm, 12mm, 6 mm dan 3 mm. Gambar 3.13 menunjukkan perbandingan visual antara *curvature mesh* dan *blended-curvature mesh*.

Perbandingan jumlah nodal dan elemen dari tiap ukuran elemen ditunjukkan pada tabel 3.3.



Gambar 3.13 *Curvature Mesh* (a) dan *Blended-Curvature Mesh* (b) dengan Elemen 24 mm

Tabel 3.3 Perbandingan Jumlah Nodal dan Jumlah Elemen

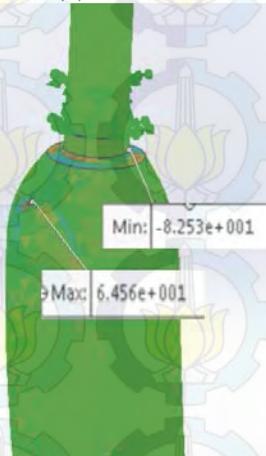
Ukuran Elemen	<i>Curvature Mesh</i>		<i>Blended-Curvature Mesh</i>	
	Jumlah Nodal	Jumlah Elemen	Jumlah Nodal	Jumlah Elemen
24 mm	11783	5851	9457	4689
12 mm	11319	5619	9577	4749
6 mm	17670	8788	16040	7968
3 mm	62761	31305	55984	27914

Setelah dilakukan simulasi, barulah dapat diketahui daerah terjadinya tegangan (*stress*) yang paling besar nilainya. Akan tetapi, ketika ukuran elemen diperkecil menjadi 12 mm, lokasi terjadinya tegangan berpindah. Perbandingan lokasi terjadinya tegangan maksimum antara ukuran elemen 24 mm dengan 12 mm ditunjukkan pada gambar 3.14. Dengan mengetahui lokasi tegangan maksimum pada model, maka perlu diterapkan *control mesh* pada bagian tersebut agar

simulasi menjadi efisien dan keakuratan hasil simulasi tercapai. *Control mesh* dilakukan dengan menetapkan ukuran



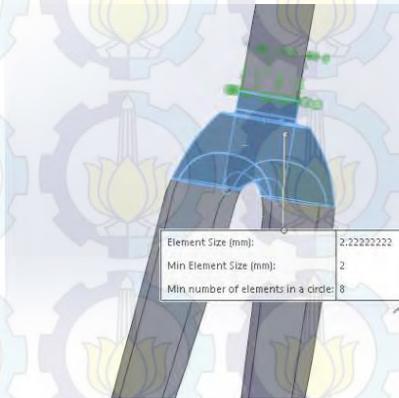
(a)



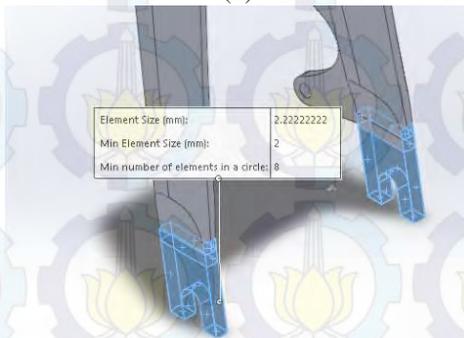
(b)

Gambar 3.14 Lokasi Tegangan Maksimum Ukuran 24 mm (a) dan Ukuran 12 mm (b)

elemen terkecil dari keseluruhan model (2 mm) pada bagian yang sekiranya terjadi tegangan maksimum. *Control mesh* untuk pengujian *static bending* dan pengujian *static torque* ditunjukkan pada gambar 3.15



(a)

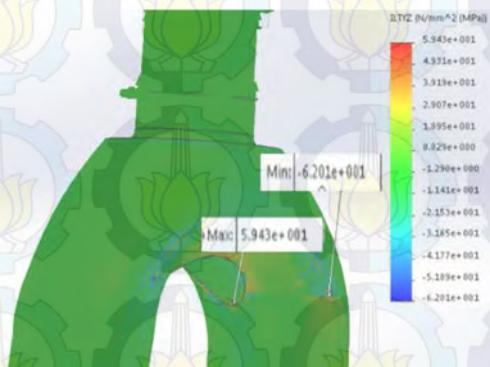


(b)

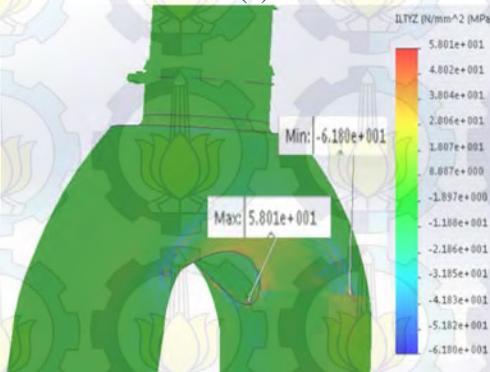
Gambar 3.15 *Control Mesh* untuk Pengujian *Static Bending* (a) dan Pengujian *Static Torque* (b)

Setelah melakukan serangkaian simulasi, maka diketahui bahwa cara *blended-curvature mesh* menunjukkan hasil lokasi

terjadinya tegangan maksimum tetap atau konsisten di setiap ukuran elemen, sedangkan cara *curvature mesh* masih menunjukkan lokasi tegangan maksimum yang berbeda-beda di setiap ukuran elemen. Lokasi terjadinya tegangan maksimum dengan ukuran elemen 12 mm dan 6 mm ditunjukkan pada gambar 3.16, dan grafik perbandingan hasil tegangan maksimum dan angka keamanan pada tiap ukuran elemen untuk *blended-curvature mesh* ditunjukkan pada gambar 3.17.

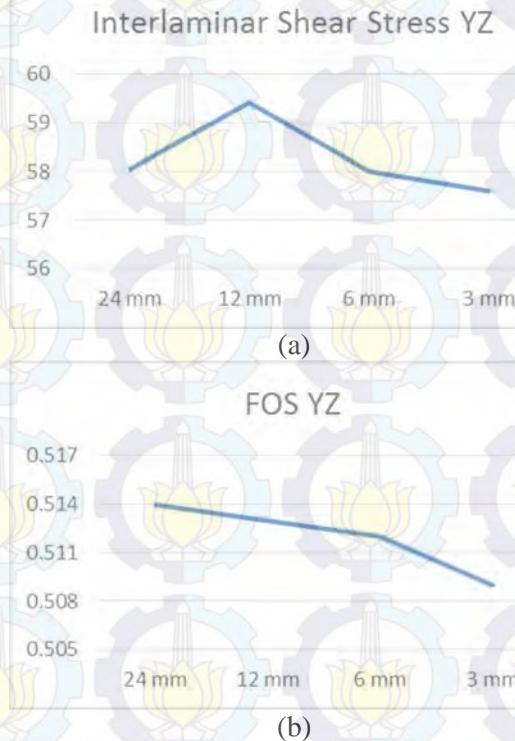


(a)



(b)

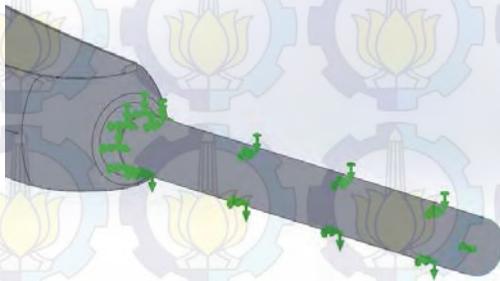
Gambar 3.16 Lokasi Tegangan Maksimum untuk ukuran 12 mm (a) dan 6 mm (b)



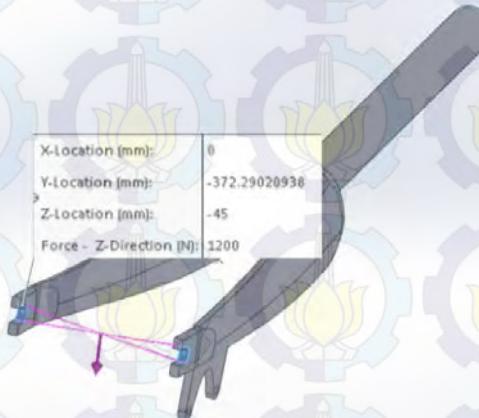
Gambar 3.17 Grafik Hasil Tegangan Maksimum (a) dan Angka Keamanan (b) untuk *Blended-Curvature Mesh*

Pada grafik hasil tegangan maksimum, kurva yang terjadi nampak meningkat pada ukuran mesh 12 mm, menurun kembali pada ukuran 6 mm, dan menurun lagi pada ukuran 3 mm tetapi lebih datar. Sedangkan pada grafik hasil angka keamanan, kurva terlihat menurun secara konstan hingga ukuran 6 mm, dan menurun lebih curam pada ukuran 3 mm. Dengan melihat hasil kedua kurva di atas, maka cara *meshing* yang akurat dan efisien untuk penelitian ini adalah cara *blended-curvature mesh* dengan ukuran elemen 6 mm.

2. *Solution: assigning loads, constraints, and solving*
Pada langkah ini, model diberikan pembebanan sesuai dengan tata cara pengujian. Selain itu, beberapa *boundary condition* juga diterapkan, yaitu *constraint* pada bagian-bagian tertentu pada model. Gambar 3.18 menunjukkan penerapan *fixed constraint* pada model, dan gambar 3.19 menunjukkan pemberian beban pada model.



Gambar 3.18 Penerapan *Fixed Constraint* pada Model



Gambar 3.19 Pemberian Beban pada Model

3. *Postprocessing: further processing and viewing of the results*
Tahap ini terdiri dari meninjau ulang dan melakukan evaluasi terhadap hasil simulasi. Hasil-hasil tersebut ditinjau hingga diperoleh kesimpulan dari simulasi.

3.1.5 Analisa Hasil dan Kesimpulan

Hasil-hasil dari simulasi yang telah dilakukan kemudian dianalisa. Hasil dari simulasi-simulasi yang hendak dianalisa adalah berupa defleksi maksimal yang terjadi, faktor keamanan, dan *interlaminar shear stress* yang terjadi pada *fork*. Hasil dari simulasi-simulasi dituliskan ke dalam bentuk tabel seperti pada tabel 3.4 dan tabel 3.5 dan selanjutnya ditampilkan ke dalam bentuk grafik.

Defleksi yang terjadi merupakan perubahan bentuk pada suatu struktur. Defleksi maksimum yang terjadi mengacu pada syarat yang telah ditentukan berdasarkan standar pengujian CEN 14781. Suatu struktur dikatakan aman jika defleksi maksimum yang terjadi pada *fork* tidak melebihi 5mm, dan dikatakan gagal jika defleksi maksimum yang terjadi pada *fork* melebihi 5mm.

Faktor keamanan merupakan angka keamanan yang diperoleh dari perhitungan persamaan berdasarkan teori kegagalan untuk material komposit. Teori kegagalan yang sesuai untuk digunakan di dalam analisa simulasi ini adalah teori kegagalan Tsai-Wu. Hal ini dikarenakan nilai kekuatan tarik dan tekan material yang digunakan dalam simulasi berbeda. Sesuai dengan penjelasan pada teori kegagalan untuk material komposit, suatu struktur dikatakan aman jika memiliki angka faktor keamanan lebih dari 1; dan dikatakan gagal jika memiliki angka faktor keamanan kurang dari 1. Angka keamanan disini memiliki arti bahwa seberapa kuat struktur menahan tegangan yang terjadi berdasarkan besaran gaya yang diberikan. Angka keamanan sama dengan atau lebih dari 1 menerangkan bahwa struktur mampu menahan tegangan yang terjadi jika diberikan gaya yang sama atau lebih besar dari yang telah ditentukan. Misal, angka keamanan

sama dengan 0.5 menerangkan bahwa struktur hanya mampu menahan tegangan yang terjadi jika diberikan gaya setengah dari yang telah ditentukan.

Interlaminar shear stress merupakan nilai tegangan geser yang terjadi antar lapisan atau *ply* pada struktur. Nilai *interlaminar shear stress* yang terjadi akan dibandingkan dengan nilai *interlaminar shear strength* material tersebut, dimana dalam penelitian ini adalah nilai *interlaminar shear strength* dari T300. Suatu struktur dikatakan aman jika memiliki *interlaminar shear stress* yang terjadi tidak melebihi dari *interlaminar shear strength*, dan dikatakan gagal jika *interlaminar shear stress* yang terjadi melebihi dari *interlaminar shear strength*.

Tabel 3.4 Draft Hasil Simulasi *Front-Fork Static Bending Test*

Varian	Defleksi Maksimum (mm)	Angka Faktor Keamanan	Interlaminar Shear Stress XZ (MPa)	Interlaminar Shear Stress YZ (MPa)
1				
2				
3				
⋮				
16				

Tabel 3.5 Draft Hasil Simulasi *Front-Fork Static Torque Test*

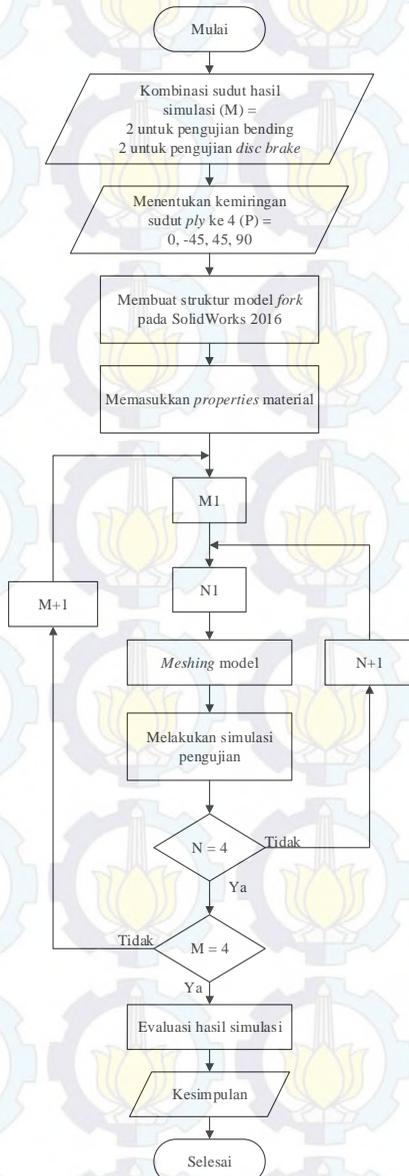
Varian	Defleksi Maksimum (mm)	Angka Faktor Keamanan	Interlaminar Shear Stress XZ (MPa)	Interlaminar Shear Stress YZ (MPa)
1				
2				
3				
⋮				
16				

3.2 Modifikasi Desain

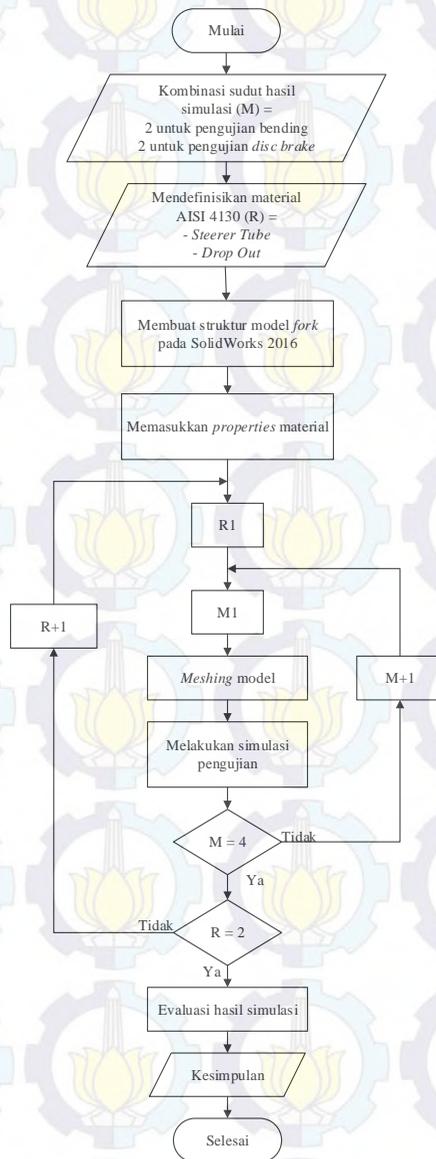
Modifikasi desain dilakukan untuk mencari rancangan yang optimal untuk *fork road bike*. Hal-hal yang perlu menjadi pertimbangan di dalam melakukan modifikasi adalah hasil dari analisa awal dan variasi pada analisa awal. Setelah dilakukan simulasi terhadap dua jenis pengujian, kemudian hasil simulasi tersebut dikaji agar dapat dipilih 2 variasi sudut terbaik untuk pengujian bending dan 2 variasi sudut terbaik untuk pengujian *disc brake*. Modifikasi pertama yang dilakukan pada penelitian ini adalah dengan merubah ukuran tebal *tube fork* sepeda, dimana dengan cara merubah jumlah *ply* pada tiap bagian-bagian *fork* sepeda, tetapi tidak merubah geometri maupun dimensi fungsi dari rancangan semula. Jumlah *ply* yang diterapkan pada modifikasi ini adalah 10 *ply* dan *ply* tetap disusun secara simetris. Tahapan-tahapan yang dilakukan di dalam melakukan modifikasi pertama ditunjukkan dalam bentuk diagram alir seperti pada gambar 3.20.

Modifikasi desain yang kedua adalah dengan merubah material dari bagian pada *fork* sepeda dan tidak merubah geometri atau dimensi luar *fork* sepeda. Pada penelitian ini material yang dirubah adalah material pada bagian *steerer tube* dan *drop out*. Material yang digunakan dalam modifikasi kedua ini adalah material steel AISI 4130. Sifat-sifat material AISI 4130 ditunjukkan di dalam lampiran. Tahapan-tahapan yang dilakukan di dalam melakukan modifikasi kedua ditunjukkan dalam bentuk diagram alir seperti pada gambar 3.21.

Modifikasi desain yang ketiga adalah dengan menggabungkan antara modifikasi desain yang pertama dan yang kedua. Pada modifikasi ketiga ini, jumlah *ply* dirubah menjadi 10 *ply* dan menggunakan material AISI 4130 pada *steerer tube* dan *drop out*. Hasil dari keseluruhan modifikasi tersebut dituliskan ke dalam bentuk tabel dan ditampilkan ke dalam bentuk grafik.



Gambar 3.20 Diagram Alir Modifikasi Pertama



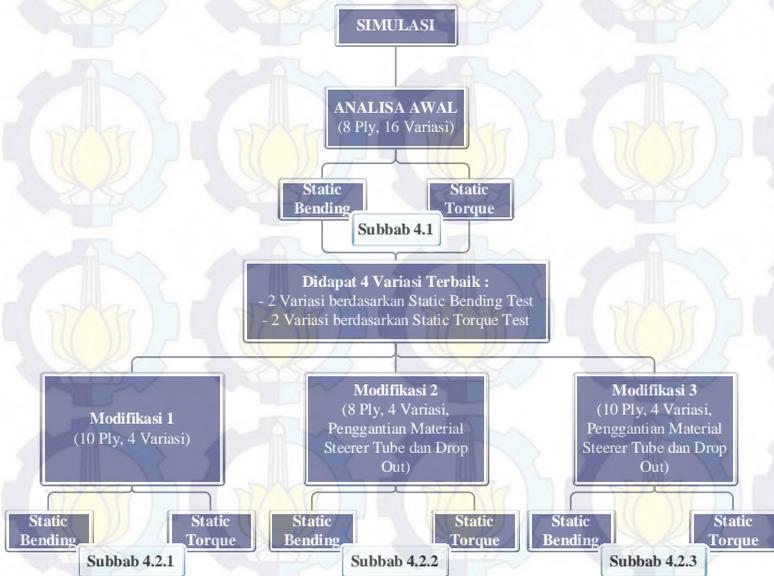
Gambar 3.21 Diagram Alir Modifikasi Desain Kedua

3.3 Evaluasi Hasil Modifikasi dan Kesimpulan

Hasil-hasil simulasi dari *fork* yang telah dimodifikasi kemudian dianalisa. Dari berbagai hasil simulasi yang ada kemudian dipilih varian kombinasi kemiringan sudut *ply* yang memiliki hasil simulasi paling baik. Kategori di dalam pemilihan varian tersebut adalah nilai defleksi maksimum terkecil yang terjadi, angka faktor keamanan terkecil, dan *interlaminar shear stress* terkecil. Setelah diperoleh hasil-hasil tersebut, barulah dapat diperoleh kesimpulan rancangan manakah yang memiliki desain paling optimal berdasarkan jumlah *ply*, ketebalan *tube* dan penggantian material pada beberapa bagian *fork* sepeda.

BAB IV HASIL DAN ANALISA

Setelah dilakukan simulasi terhadap *fork road bike* dengan *static bending* dan *static torque test* menggunakan standar pengujian CEN 14781, maka diperoleh hasil berupa distribusi maupun nilai maksimum dan minimum dari *interlaminar shear stress*, *factor of safety*, dan defleksi yang terjadi pada *fork road bike*. Gambar 4.1 menunjukkan skema mengenai simulasi yang dilakukan terhadap tiap analisa dan modifikasi.



Gambar 4.1 Skema Tiap Analisa dan Modifikasi

4.1 Hasil Analisa Awal

Perlakuan yang diberikan pada simulasi pengujian *static bending* adalah dengan memberikan gaya tegak lurus ke bawah terhadap sumbu *fork* di *dropout fork* dengan gaya sebesar 1200 N, sedangkan perlakuan yang diberikan pada simulasi pengujian *static*

torque adalah dengan memberikan gaya pada ujung *adaptor* secara horizontal ke arah *fixture* sebesar 1000 N Simulasi dilakukan dengan memvariasikan berbagai sudut kemiringan tiap *ply*. Hasil dari simulasi tiap varian ditunjukkan pada tabel 4.1 dan ditampilkan dalam bentuk grafik pada gambar 4.2 hingga gambar 4.5.

Tabel 4.1 Hasil Simulasi Analisa Awal

Varian	Defleksi (mm)		Angka Keamanan		ILSS XZ (MPa)		ILSS YZ (Mpa)	
	SB*)	ST*)	SB*)	ST*)	SB*)	ST*)	SB*)	ST*)
1	9.609	8.082	0.512	0.312	341.1	266.5	62.67	76.16
2	8.208	7.406	0.565	0.289	254	253.9	163.6	190.4
3	8.188	7.368	0.571	0.314	264.3	248	166	178
4	9.443	8.221	0.852	0.413	250.1	234.1	237.2	234.1
5	8.057	7.3	0.612	0.284	222.1	275	103.1	152
6	8.813	8.39	0.61	0.281	184.8	281.4	138.8	188.7
7	7.744	7.534	0.77	0.511	156.3	234	156.3	232.4
8	8.489	8.069	0.913	0.34	238.9	248.9	157	241.7
9	8.041	7.263	0.602	0.309	238.4	252.6	105.6	145.3
10	7.747	7.529	0.77	0.505	150.6	248	150.6	248
11	8.789	8.329	0.599	0.313	207.3	227.6	118.1	161.9
12	8.487	8.08	0.903	0.364	162.8	242.1	160.9	234.6
13	9.139	8.004	1.064	0.422	202.6	299.7	143.6	299.7
14	8.32	7.95	0.986	0.348	183.2	294.8	118.5	268.1
15	8.309	7.961	0.992	0.374	149.6	263.6	122.6	266.2
16	10.237	9.337	0.927	0.398	157.6	358.4	156.6	358.4

*) SB : *Static Bending*

ST : *Static Torque*



Gambar 4.2 Grafik Defleksi Analisa Awal



Gambar 4.3 Grafik Angka Keamanan Analisa Awal

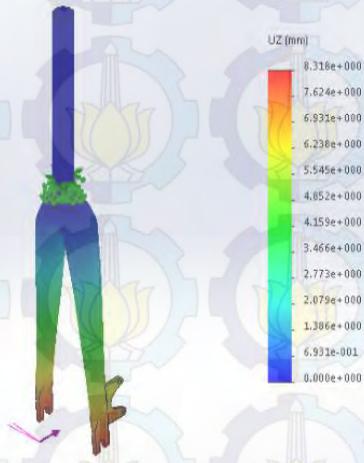


Gambar 4.4 Grafik Interlaminar Shear Stress XZ Analisa Awal

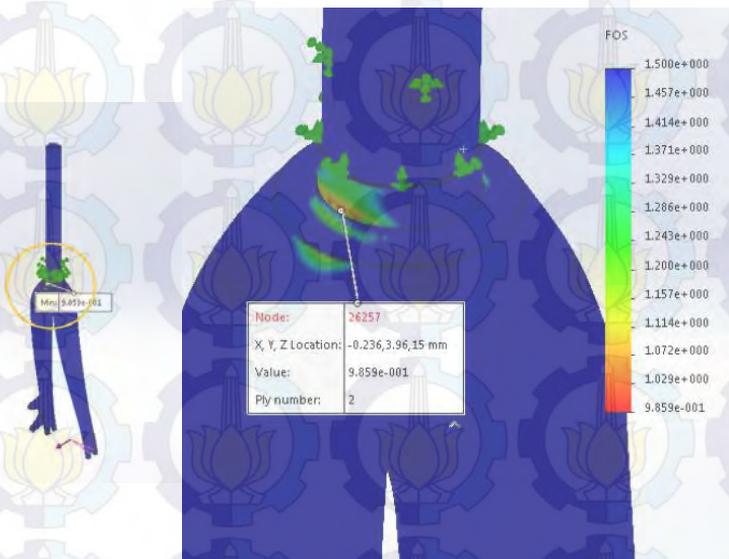


Gambar 4.5 Grafik Interlaminar Shear Stress YZ Analisa Awal

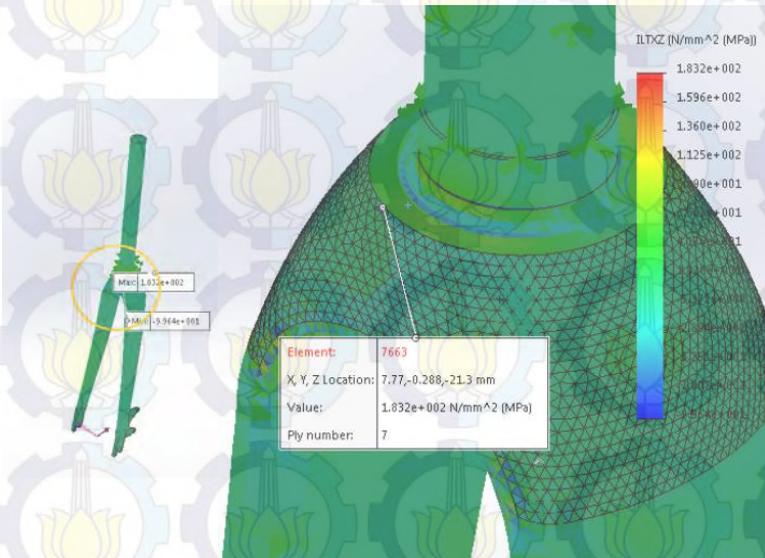
Setelah diperoleh hasil dari tiap-tiap varian, berikutnya adalah memilih 4 varian yang memiliki hasil paling baik dari antara varian lainnya. Berdasarkan pengujian *static bending*, maka diperolehlah 2 varian yang memiliki hasil yang lebih baik dibandingkan varian yang lainnya, yaitu varian 14 ([0/90/-45/0]_s) dan varian 15 ([0/90/45/0]_s). Hal ini ditunjukkan dengan hasil defleksi dan *interlaminar shear stress* kedua varian yang relative lebih rendah dibandingkan dengan varian lain, dan hasil angka keamanan varian yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan varian lainnya. Untuk varian 14 diperoleh defleksi yang terjadi sebesar 8.32 mm, angka keamanan minimum sebesar 0.986 yang terletak pada bagian *crown race*, *interlaminar shear stress* maksimum pada sumbu XZ sebesar 183.2 MPa yang terletak pada bagian ujung atas *fork blade* dan pada sumbu YZ sebesar 118.5 MPa yang terletak pada sambungan antara *crown race* dengan *fork blade*. Tampak visual dari hasil varian 14 ditunjukkan pada gambar 4.6 hingga 4.9. Gambar 4.10 menunjukkan ilustrasi terjadinya *interlaminar shear stress* XZ pada varian 14. Untuk varian 15 diperoleh defleksi yang terjadi sebesar 8.309 mm, angka keamanan minimum sebesar 0.992 yang terletak pada bagian *crown race*, *interlaminar shear stress* maksimum pada sumbu XZ sebesar 149.6 MPa yang terletak sambungan antara *crown race* dengan *fork blade* dan pada sumbu YZ sebesar 122.6 MPa yang terletak pada sambungan antara *crown race* dengan *fork blade*. Tampak visual dari hasil varian 15 ditunjukkan pada gambar 4.11 hingga 4.14. Gambar 4.15 menunjukkan ilustrasi terjadinya *interlaminar shear stress* XZ pada varian 15.



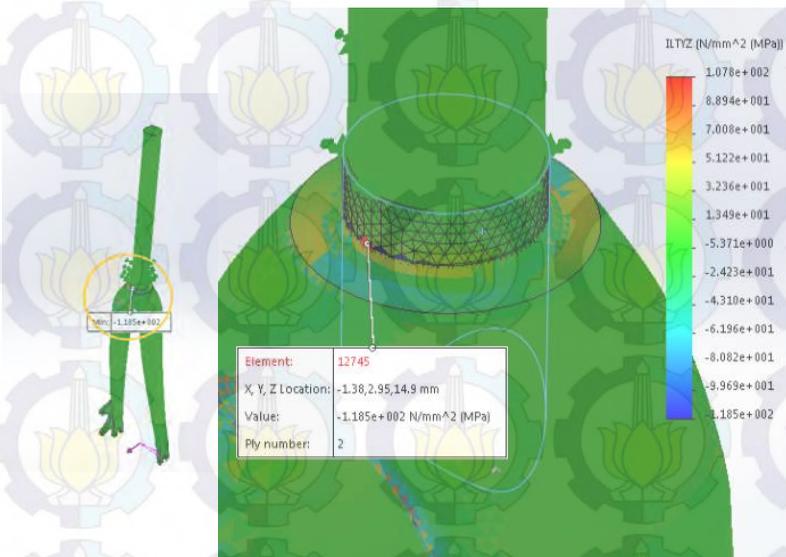
Gambar 4.6 Defleksi Varian 14



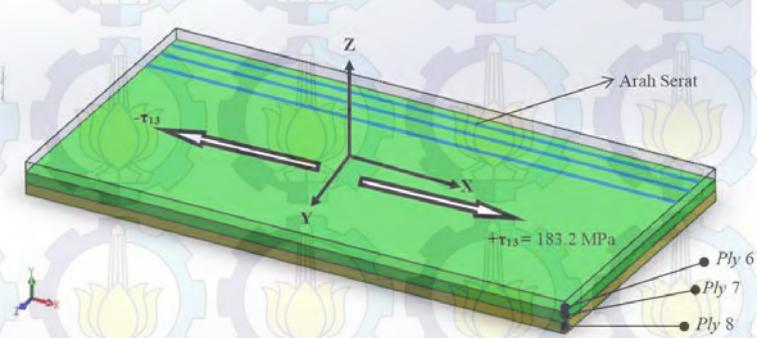
Gambar 4.7 Angka Keamanan Varian 14



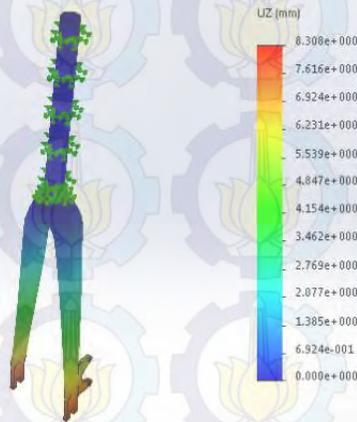
Gambar 4.8 Interlaminar Shear Stress XZ Varian 14



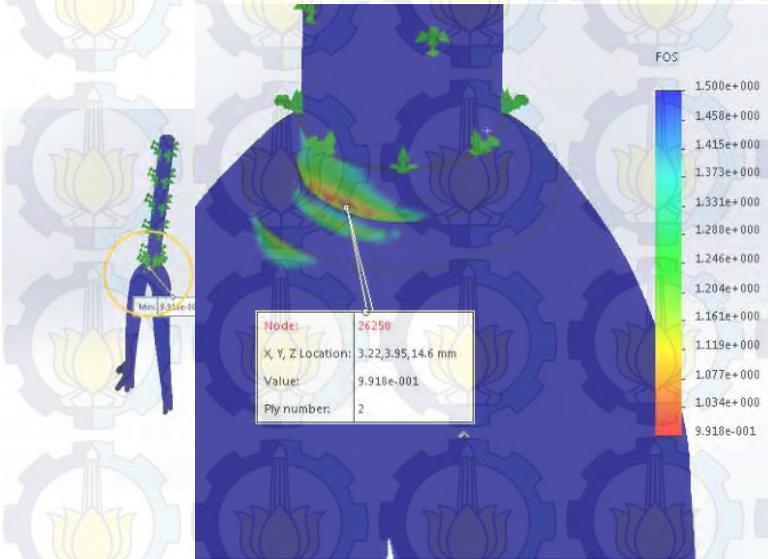
Gambar 4.9 Interlaminar Shear Stress YZ Varian 14



Gambar 4.10 Ilustrasi *Interlaminar Shear Stress XZ* Varian 14



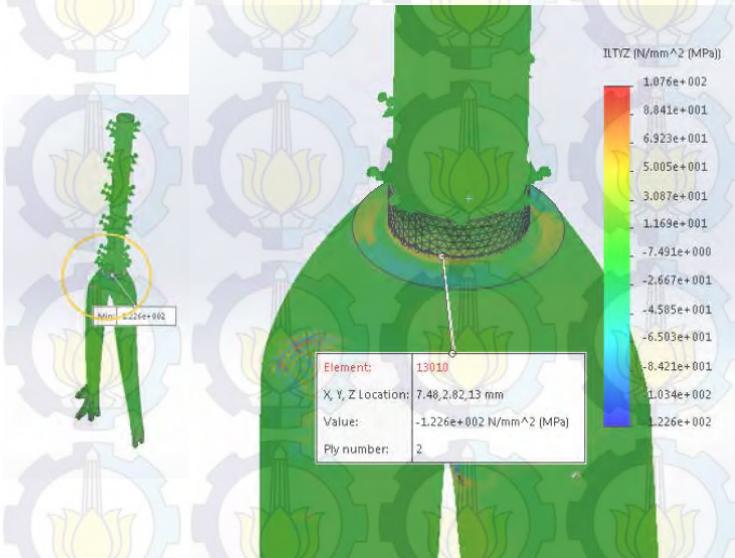
Gambar 4.11 Defleksi Varian 15



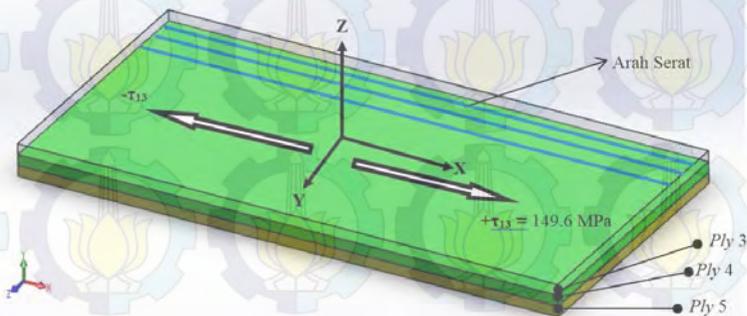
Gambar 4.12 Angka Keamanan Varian 15



Gambar 4.13 Interlaminar Shear Stress XZ Varian 15



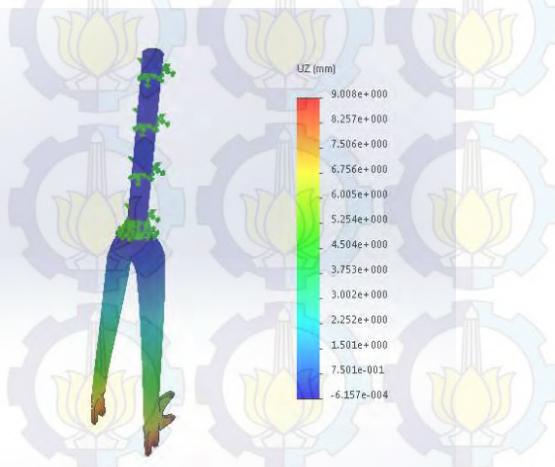
Gambar 4.14 Interlaminar Shear Stress YZ Varian 15



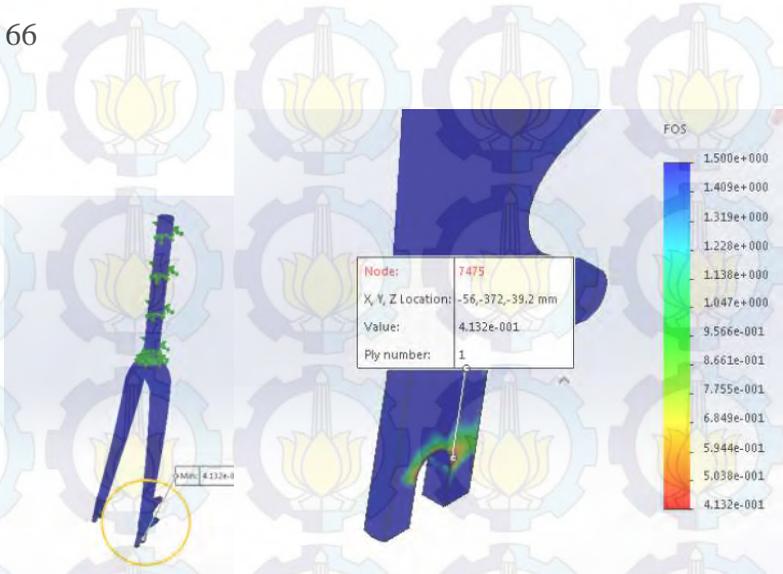
Gambar 4.15 Ilustrasi Interlaminar Shear Stress XZ Varian 15

Berdasarkan pengujian *static torque*, maka diperoleh 2 varian yang memiliki hasil yang lebih baik dibandingkan varian yang lainnya, yaitu varian 4 ([0/0/90/0]_s) dan varian 7 ([0/-45/45/0]_s). Hal ini ditunjukkan dengan hasil defleksi dan *interlaminar shear stress* kedua varian yang relatif lebih rendah

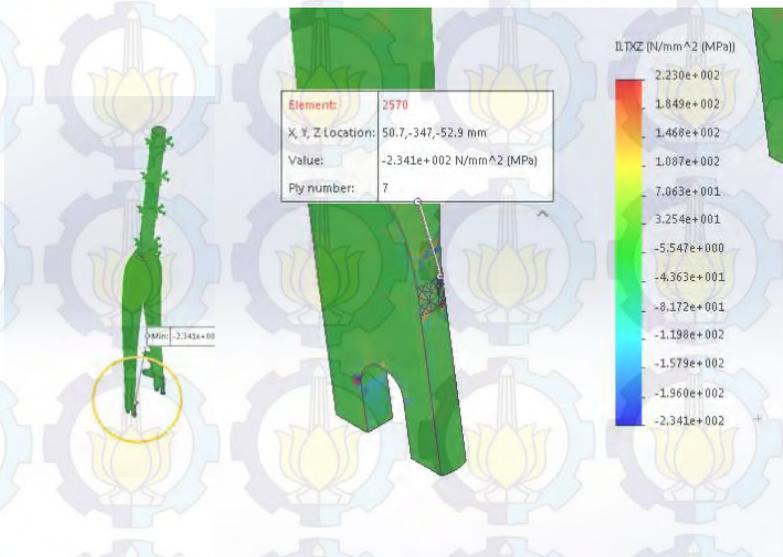
dibandingkan dengan varian lain, dan hasil angka keamanan varian yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan varian lainnya. Untuk varian 4 diperoleh defleksi yang terjadi sebesar 8.221 mm, angka keamanan minimum sebesar 0.413 yang terletak pada sisi samping peletakan poros pada *drop out*, *interlaminar shear stress* maksimum pada sumbu XZ sebesar 234.1 MPa yang terletak pada bagian atas *drop out* dan pada sumbu YZ sebesar 234.1 MPa yang terletak pada bagian atas *drop out*. Tampak visual dari hasil varian 4 ditunjukkan pada gambar 4.16 hingga 4.19. Gambar 4.20 menunjukkan ilustrasi terjadinya *interlaminar shear stress* XZ pada varian 4. Untuk varian 7 diperoleh defleksi yang terjadi sebesar 7.534 mm, angka keamanan minimum sebesar 0.511 yang terletak pada sisi samping peletakan poros pada *drop out*, *interlaminar shear stress* maksimum pada sumbu XZ sebesar 234 MPa yang terletak pada bagian atas *drop out* dan pada sumbu YZ sebesar 232.4 MPa yang terletak pada bagian atas *drop out*. Tampak visual dari hasil varian 7 ditunjukkan pada gambar 4.21 hingga 4.24. Gambar 4.25 menunjukkan ilustrasi terjadinya *interlaminar shear stress* XZ pada varian 7.



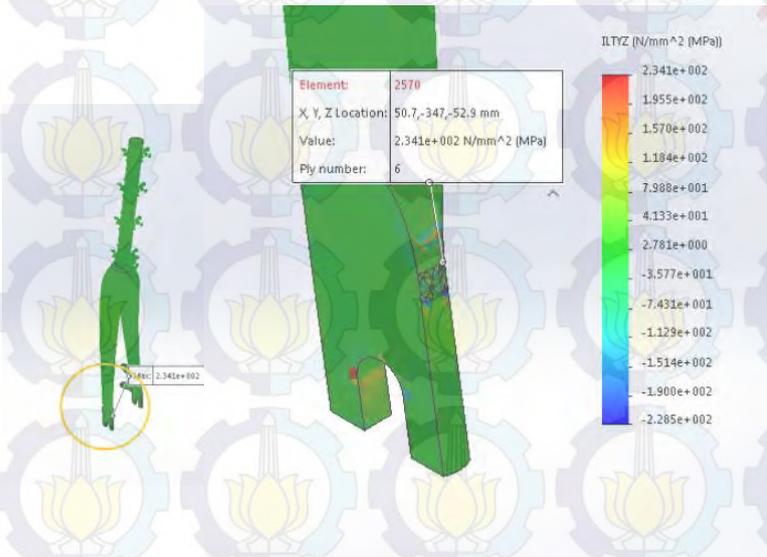
Gambar 4.16 Defleksi Varian 4



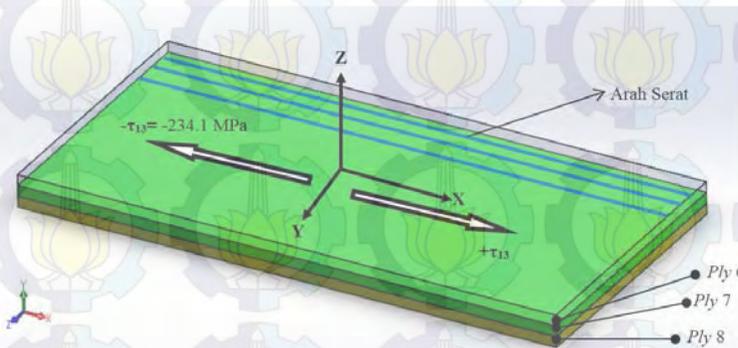
Gambar 4.17 Angka Keamanan Varian 4



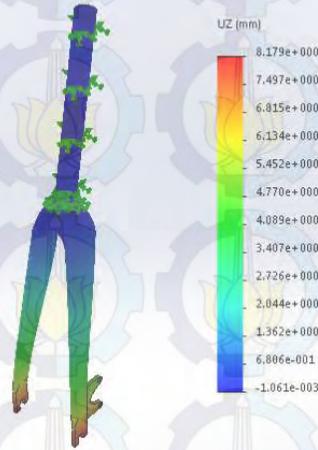
Gambar 4.18 Interlaminar Shear Stress XZ Varian 4



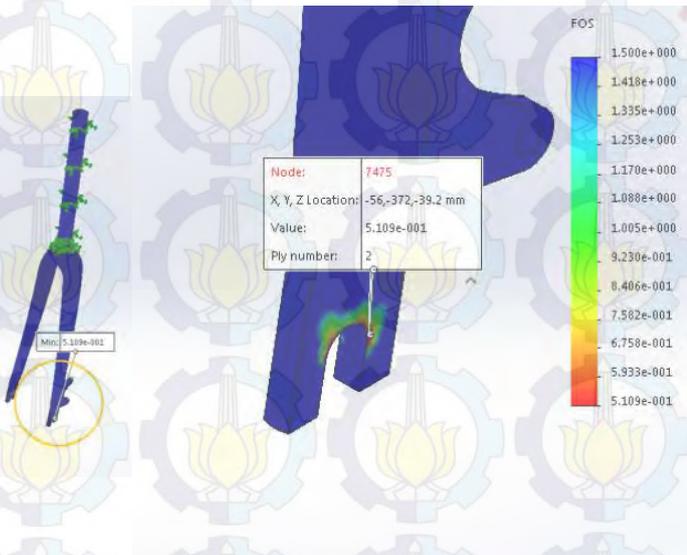
Gambar 4.19 Interlaminar Shear Stress YZ Varian 4



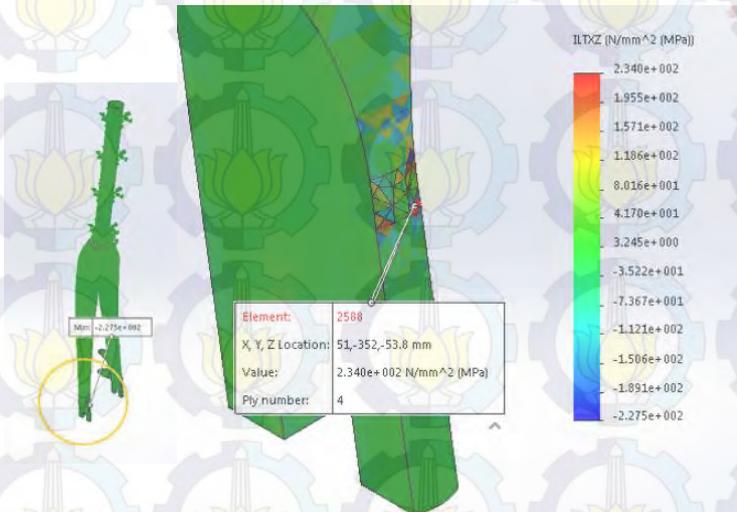
Gambar 4.20 Ilustrasi Interlaminar Shear Stress XZ Varian 4



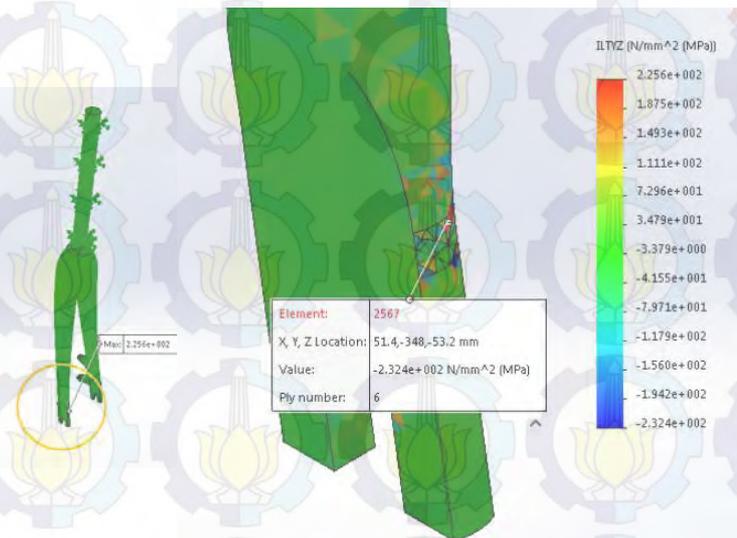
Gambar 4.21 Defleksi Varian 7



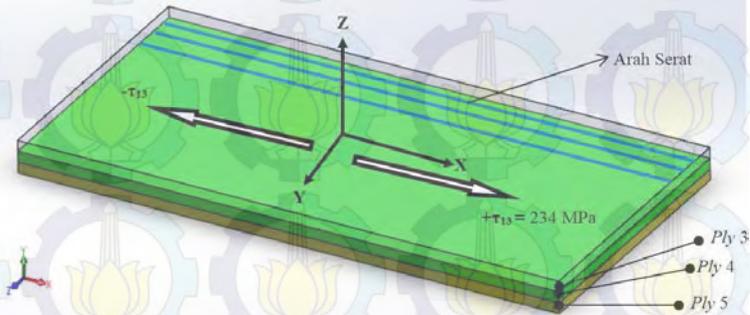
Gambar 4.22 Angka Keamanan Varian 7



Gambar 4.23 Interlaminar Shear Stress XZ Varian 7



Gambar 4.24 Interlaminar Shear Stress YZ Varian 7



Gambar 4.25 Ilustrasi *Interlaminar Shear Stress XZ* Varian 7

4.2 Hasil Modifikasi

Setelah diperoleh 4 varian yang terbaik menurut 2 jenis pengujian yang dilakukan, langkah selanjutnya adalah melakukan modifikasi terhadap 4 varian tersebut. Modifikasi pertama yang dilakukan adalah dengan menambah ukuran tebal *tube*, yaitu dengan cara menambah jumlah *ply* yang semula adalah 8 menjadi 10 *ply*. Konfigurasi pengaturan sudut pada modifikasi ini adalah *ply* pertama hingga *ply* ketiga mengikuti ukuran kemiringan hasil sebelumnya, dan pada *ply* keempat kemiringan sudut dari *ply* ditentukan yaitu 0, -45, 45, dan 90. Sehingga, di tiap 4 varian tersebut terdapat 4 variasi kemiringan sudut pada *ply* keempat. Modifikasi kedua dilakukan adalah dengan mengganti material pada bagian *steerer tube* atau *drop out* dengan material AISI 4130. Modifikasi ketiga dilakukan dengan memadukan modifikasi pertama dan modifikasi ketiga.

4.2.1 Hasil Modifikasi Pertama

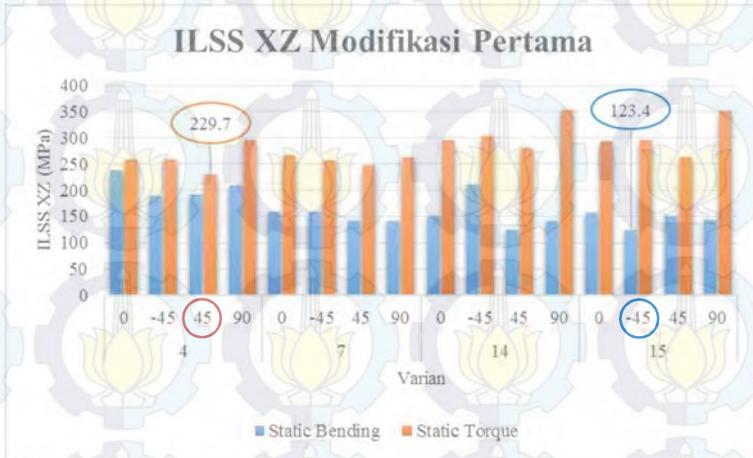
Modifikasi pertama ini dilakukan dengan menambah jumlah *ply* menjadi 10 *ply*. Simulasi dilakukan pada keempat varian terbaik dan dengan memvariasikan sudut kemiringan pada *ply* keempat. Hasil dari simulasi tiap varian ditampilkan dalam bentuk grafik pada gambar 4.26 hingga gambar 4.29 dan nilai hasil ditunjukkan pada lampiran.



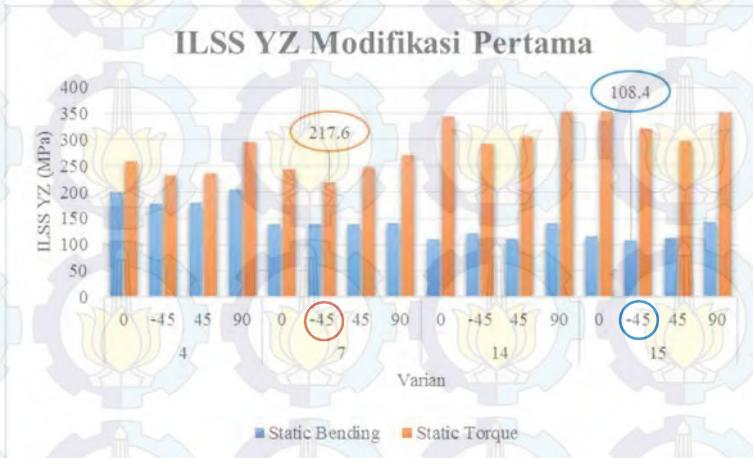
Gambar 4.26 Grafik Defleksi Modifikasi Pertama



Gambar 4.27 Grafik Angka Keamanan Modifikasi Pertama



Gambar 4.28 Grafik *Interlaminar Shear Stress XZ* Modifikasi Pertama



Gambar 4.29 Grafik *Interlaminar Shear Stress YZ* Modifikasi Pertama

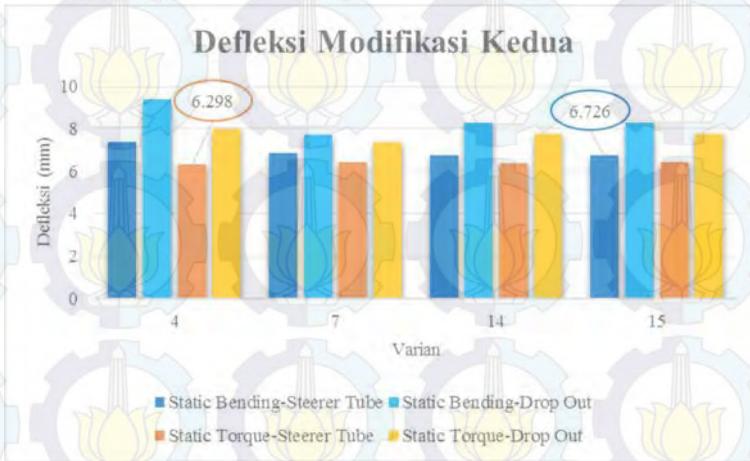
Setelah dilakukan pengujian *static bending*, maka diperoleh hasil modifikasi yang berupa defleksi, angka keamanan dan *interlaminar shear stress*. Berdasarkan nilai yang tercatat, kombinasi sudut modifikasi yang memiliki nilai defleksi paling kecil adalah [0/-45/45/0/0]s dengan nilai sebesar 5.684 mm, kombinasi sudut modifikasi yang memiliki nilai angka keamanan paling besar adalah [0/-45/45/-45/0]s dengan nilai sebesar 1.633, kombinasi sudut modifikasi yang memiliki nilai *interlaminar shear stress* XZ paling kecil adalah [0/90/45/-45/0]s dengan nilai sebesar 123.4 MPa, dan kombinasi sudut modifikasi yang memiliki nilai *interlaminar shear stress* YZ paling kecil adalah [0/90/45/-45/0]s dengan nilai sebesar 108.4 MPa.

Untuk pengujian *static torque*, kombinasi sudut modifikasi yang memiliki nilai defleksi paling kecil adalah [0/-45/45/0/0]s dengan nilai sebesar 5.588 mm, kombinasi sudut modifikasi yang memiliki nilai angka keamanan paling besar adalah [0/-45/45/45/0]s dengan nilai sebesar 0.682, kombinasi sudut modifikasi yang memiliki nilai *interlaminar shear stress* XZ paling kecil adalah [0/0/90/45/0]s dengan nilai sebesar 229.7 MPa, dan kombinasi sudut modifikasi yang memiliki nilai *interlaminar shear stress* YZ paling kecil adalah [0/-45/45/-45/0]s dengan nilai sebesar 217.6 MPa.

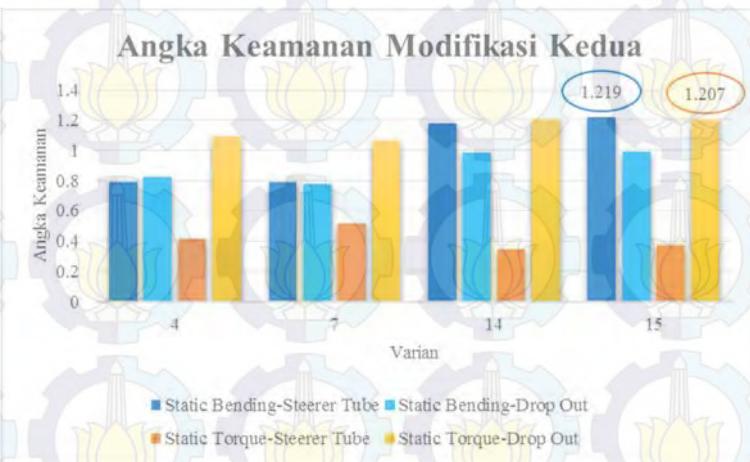
4.2.2 Hasil Modifikasi Kedua

Setelah dilakukan modifikasi pertama, maka berikutnya adalah melakukan modifikasi kedua. Modifikasi kedua yang dilakukan adalah dengan mengganti material pada beberapa bagian pada *fork* sepeda menjadi material *non-composite*. Pada modifikasi kedua ini material yang digunakan adalah *steel* AISI 4130. Penggantian material dilakukan pada bagian *steerer tube* dan *drop out*, dikarenakan pada bagian-bagian ini sering ditemukan adanya nilai tegangan yang tinggi dari masing-masing pengujian. Simulasi dilakukan pada keempat varian dengan jumlah dan kombinasi sudut *ply* yang sama dengan analisa awal dan dengan merubah material pada bagian *steerer tube* atau *drop out*. Hasil dari simulasi

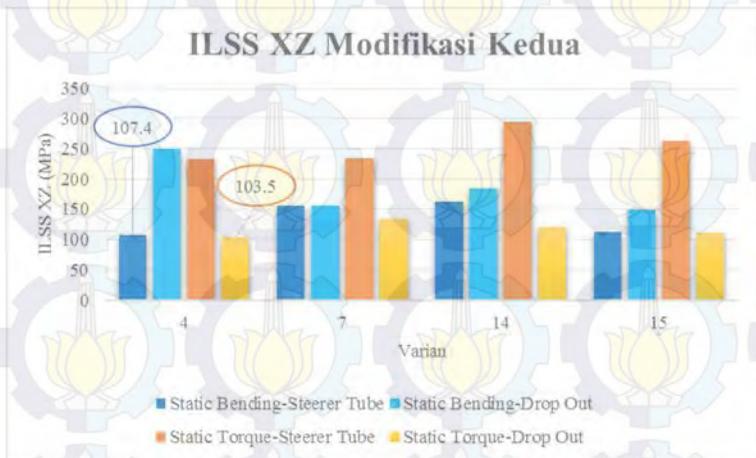
tiap varian ditampilkan dalam bentuk grafik pada gambar 4.30 hingga gambar 4.33 dan nilai hasil ditunjukkan pada lampiran.



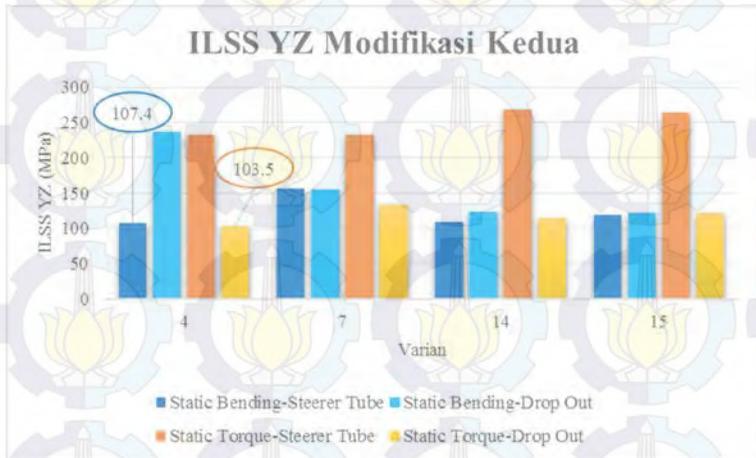
Gambar 4.30 Grafik Defleksi Modifikasi Kedua



Gambar 4.31 Grafik Angka Keamanan Modifikasi Kedua



Gambar 4.32 Grafik *Interlaminar Shear Stress XZ* Modifikasi Kedua



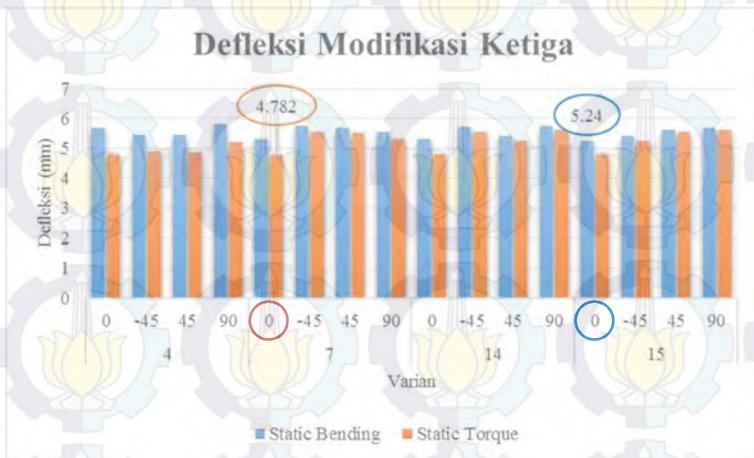
Gambar 4.33 Grafik *Interlaminar Shear Stress YZ* Modifikasi Kedua

Setelah dilakukan pengujian *static bending*, maka diperoleh hasil modifikasi yang berupa defleksi, angka keamanan dan *interlaminar shear stress*. Berdasarkan nilai yang tercatat pada tabel, kombinasi sudut dan material yang memiliki nilai defleksi paling kecil adalah *steerer tube* [0/90/45/0]s dengan nilai sebesar 6.726 mm, kombinasi sudut dan material yang memiliki nilai angka keamanan paling besar adalah *steerer tube* [0/90/45/0]s dengan nilai sebesar 1.219, kombinasi sudut dan material yang memiliki nilai *interlaminar shear stress* XZ paling kecil adalah *steerer tube* [0/0/90/0]s dengan nilai sebesar 107.4 MPa, dan kombinasi sudut dan material yang memiliki nilai *interlaminar shear stress* YZ paling kecil adalah *steerer tube* [0/0/90/0]s dengan nilai sebesar 107.4 MPa.

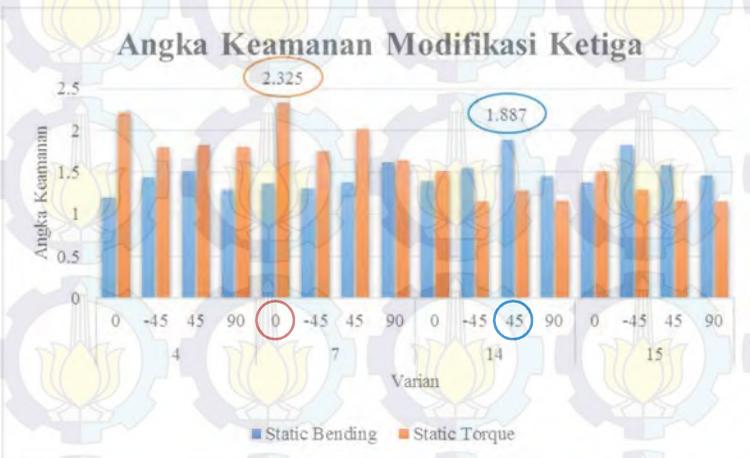
Untuk pengujian *static torque*, kombinasi sudut dan material yang memiliki nilai defleksi paling kecil adalah *steerer tube* [0/0/90/0]s dengan nilai sebesar 6.298 mm, kombinasi sudut dan material yang memiliki nilai angka keamanan paling besar adalah *drop out* [0/90/45/0]s dengan nilai sebesar 1.207, kombinasi sudut dan material yang memiliki nilai *interlaminar shear stress* XZ paling kecil adalah *drop out* [0/0/90/0]s dengan nilai sebesar 103.5 MPa, dan kombinasi sudut dan material yang memiliki nilai *interlaminar shear stress* YZ paling kecil adalah *drop out* [0/0/90/0]s dengan nilai sebesar 103.5 MPa.

4.2.3 Hasil Modifikasi Ketiga

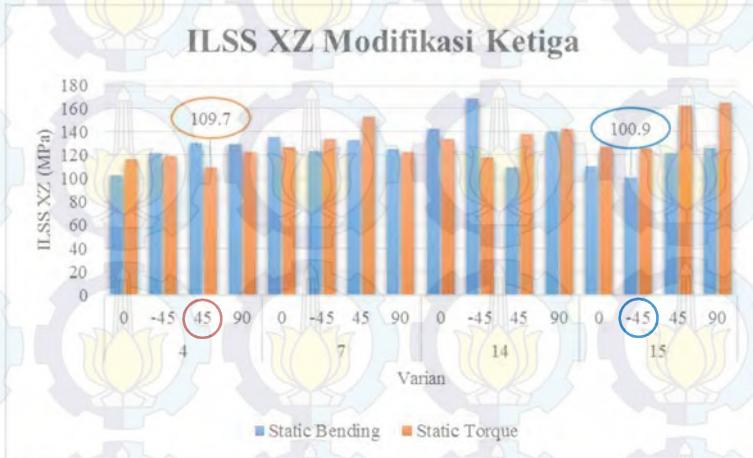
Modifikasi ketiga ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh akan jumlah *ply* dan penggantian material beberapa bagian *fork* sepeda terhadap nilai-nilai defleksi, angka keamanan dan *interlaminar shear stress*. Modifikasi ketiga yang dilakukan adalah dengan menggabungkan langkah modifikasi pertama dan kedua, yaitu merubah jumlah *ply* yang semula 8 menjadi 10 *ply* dan mengganti material pada bagian *steerer tube* dan *drop out* dengan material AISI 4130. Simulasi dilakukan pada keempat varian terbaik yang telah diperoleh dari analisa awal. Hasil dari simulasi tiap varian ditampilkan dalam bentuk grafik pada gambar 4.34 hingga gambar 4.37 dan nilai hasil ditunjukkan pada lampiran.



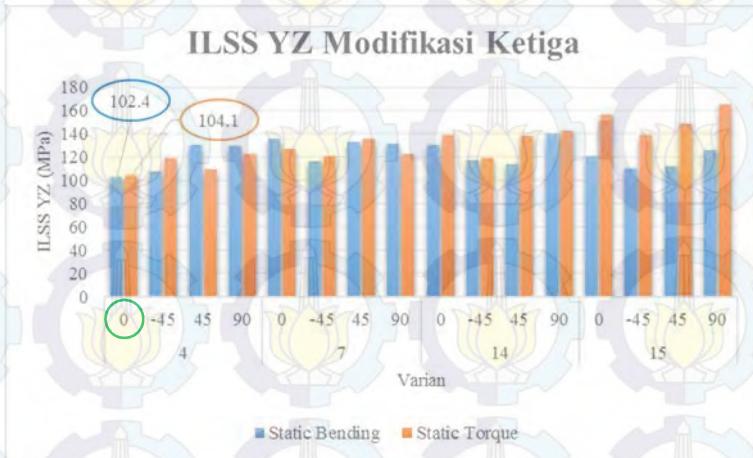
Gambar 4.34 Grafik Defleksi Modifikasi Ketiga



Gambar 4.35 Grafik Angka Keamanan Modifikasi Ketiga



Gambar 4.36 Grafik *Interlaminar Shear Stress XZ* Modifikasi Ketiga



Gambar 4.37 Grafik *Interlaminar Shear Stress YZ* Modifikasi Ketiga

Setelah dilakukan pengujian *static bending*, maka diperoleh hasil modifikasi yang berupa defleksi, angka keamanan dan *interlaminar shear stress*. Berdasarkan nilai yang tercatat pada tabel, kombinasi sudut modifikasi yang memiliki nilai defleksi paling kecil adalah [0/90/45/0/0]s dengan nilai sebesar 5.24 mm, kombinasi sudut modifikasi yang memiliki nilai angka keamanan paling besar adalah [0/90/-45/45/0]s dengan nilai sebesar 1.887, kombinasi sudut modifikasi yang memiliki nilai *interlaminar shear stress* XZ paling kecil adalah [0/90/45/-45/0]s dengan nilai sebesar 100.9 MPa, dan kombinasi sudut modifikasi yang memiliki nilai *interlaminar shear stress* YZ paling kecil adalah [0/0/90/0/0]s dengan nilai sebesar 102.4 MPa.

Untuk pengujian *static torque*, kombinasi sudut modifikasi yang memiliki nilai defleksi paling kecil adalah [0/-45/45/0/0]s dengan nilai sebesar 4.782 mm, kombinasi sudut modifikasi yang memiliki nilai angka keamanan paling besar adalah [0/-45/45/0/0]s dengan nilai sebesar 2.325, kombinasi sudut modifikasi yang memiliki nilai *interlaminar shear stress* XZ paling kecil adalah [0/0/90/45/0]s dengan nilai sebesar 109.7 MPa, dan kombinasi sudut modifikasi yang memiliki nilai *interlaminar shear stress* YZ paling kecil adalah [0/0/90/0/0]s dengan nilai sebesar 104.1 MPa.

4.3 Pembahasan Hasil Simulasi

4.3.1 Analisa Perbandingan Pengujian *Static Bending*

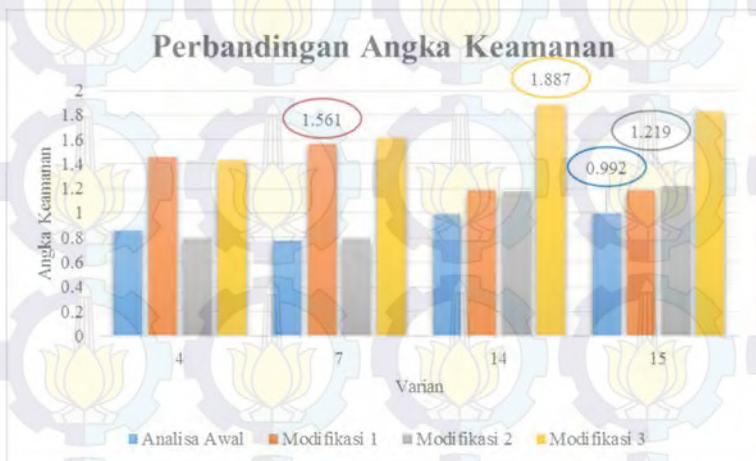
Berdasarkan analisa yang dilakukan terhadap *fork road bike* dengan menggunakan metode *static test* pada *SolidWorks* serta pengujian berdasarkan standar CEN 14781 didapatkan hasil perbandingan defleksi, angka keamanan dan *interlaminar shear stress* antara analisa awal dengan modifikasi. Berdasarkan hasil-hasil tersebut, langkah kemudian adalah memperoleh varian yang terbaik berdasarkan tiap varian, analisa atau modifikasi terhadap pengujian *static bending*. Hasil-hasil tersebut ditunjukkan pada tabel 4.2 dan digambarkan dalam bentuk grafik seperti pada gambar 4.38 hingga 4.41.

Tabel 4.2 Perbandingan Hasil *Static Bending*

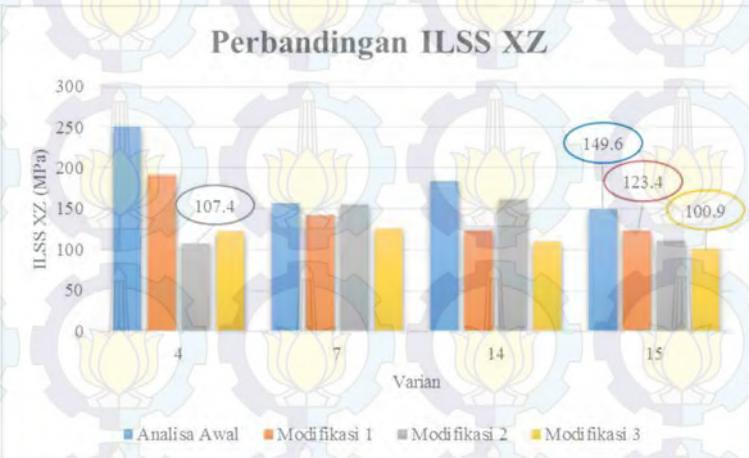
		Analisa Awal	Modifikasi 1	Modifikasi 2	Modifikasi 3
Defleksi (mm)	4	9.443	6.255	7.369	5.453
	7	7.744	6.397	6.859	5.528
	14	8.32	6.298	6.739	5.406
	15	8.309	6.299	6.726	5.407
Angka Keamanan	4	0.852	1.455	0.787	1.433
	7	0.77	1.561	0.792	1.615
	14	0.986	1.183	1.179	1.887
	15	0.992	1.182	1.219	1.824
ILSS XZ (MPa)	4	250.1	190.9	107.4	121.7
	7	156.3	141.2	155.7	125.5
	14	183.2	123.6	162.1	109.1
	15	149.6	123.4	111.4	100.9
ILSS YZ (MPa)	4	237.2	179.6	107.4	107.6
	7	156.3	138.9	155.7	131.3
	14	118.5	109.8	109.6	114
	15	122.6	108.4	118.7	110.8
Berat (gr)		384.55	466.08	827.76	993.52



Gambar 4.38 Grafik Perbandingan Hasil Defleksi *Static Bending*



Gambar 4.39 Grafik Perbandingan Hasil Angka Keamanan *Static Bending*



Gambar 4.40 Grafik Perbandingan Hasil *Interlaminar Shear Stress XZ Static Bending*



Gambar 4.41 Grafik Perbandingan Hasil *Interlaminar Shear Stress YZ Static Bending*

Tabel dan grafik di atas menunjukkan perbandingan hasil antara tiap analisa dan modifikasi. Dari simulasi yang telah dilakukan di tiap analisa dan modifikasi, maka diketahui bahwa total berat *fork* dari analisa awal meningkat hingga modifikasi ketiga. Berat dari *fork* pada analisa awal adalah 384.55 gram. Berat dari *fork* meningkat pada modifikasi pertama senilai 466.08 gram, pada modifikasi kedua senilai 827.76 gram, dan pada modifikasi ketiga senilai 993.52 gram. Berat *fork* dengan tebal 1.2 mm dengan material *steel* seutuhnya diketahui memiliki nilai sebesar 1654 gram. Peningkatan berat pada setiap modifikasi masih memiliki nilai lebih rendah jika dibandingkan dengan berat *fork* dengan material *steel* seutuhnya.

Jika dilihat pada grafik hasil defleksi pada gambar 4.38, nampak bahwa defleksi yang terjadi mengalami penurunan yang cukup signifikan di setiap modifikasinya, dimulai dari modifikasi kedua (*steerer tube*), modifikasi pertama dan grafik terendah adalah milik modifikasi ketiga dengan nilai terendah dari defleksi yang terjadi, yaitu 5.24 mm. Akan tetapi, dapat dilihat pula bahwa modifikasi kedua (*drop out*) tidak menunjukkan penurunan yang berarti pada defleksi yang terjadi. Hal-hal ini mengindikasikan bahwa penambahan jumlah *ply* beserta variasi kemiringan sudut dan penggantian material pada bagian *steerer tube* pada *fork* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap defleksi yang terjadi pada struktur *fork* sepeda, dan penggantian material pada bagian *drop out* tidak memberi pengaruh yang berarti pada jenis pembebanan *static bending*. Pernyataan tersebut diperkuat juga melalui hasil yang ditunjukkan oleh nilai angka keamanan pada gambar 4.39 yang meningkat di setiap modifikasi, dan ditunjukkan pula oleh nilai *interlaminar shear stress* pada gambar 4.40 dan 4.41 yang menurun di setiap modifikasi. Berdasarkan pertimbangan akan nilai defleksi, angka keamanan dan *interlaminar shear stress* yang telah disimulasikan dengan pengujian *static bending* seluruhnya, maka diperoleh kombinasi sudut yang terbaik yaitu [0/90/45/-45/0]s dengan mengganti material *steerer tube* dan *drop out* dengan material AISI 4130.

Pada pengujian *static bending*, struktur *fork* terkena beban *bending* yang mengakibatkan struktur tertekuk ke bawah. Pada bagian atas lapisan-lapisan terkena tegangan tarik paling besar, pada bagian bawah lapisan-lapisan terkena tegangan tekan paling besar, sedangkan pada bagian tengah lapisan-lapisan terkena tegangan geser paling besar. Di antara bagian atas dan tengah maupun bagian bawah dan tengah terkena tegangan gabungan tarik dan geser atau tekan dan geser. Hasil simulasi pengujian *bending* di atas menunjukkan bahwa sudut 90, sudut 45 dan sudut -45 pada *ply* kedua, ketiga dan keempat memiliki hasil yang lebih baik dibandingkan dengan sudut-sudut lainnya, dan hal ini ditunjukkan dengan nilai hasil defleksi dan *interlaminar shear stress* yang lebih rendah, dan angka keamanan yang lebih besar jika dibandingkan dengan nilai yang lainnya. Hal ini sesuai dengan penjelasan bahwa tegangan gabungan tarik dan geser atau tekan dan geser terjadi pada bagian tengah lapisan-lapisan, sehingga pemilihan sudut 90, sudut 45 dan sudut -45 pada *ply* kedua, ketiga dan keempat menyebabkan tegangan yang terjadi pada struktur menyebar merata pada keseluruhan bagian dari struktur.

Pada penelitian sebelumnya *Fiber direction and stacking sequence design for bicycle frame made of carbon/epoxy composite laminate*, diketahui bahwa pengujian *static bending* pada CEN 14781 serupa dengan pengujian *frontal* pada penelitian tersebut. Pada penelitian tersebut diketahui bahwa kombinasi sudut [0/90/45/-45]_s memiliki angka keamanan sebesar 0.76 dan kombinasi tersebut merupakan salah satu kombinasi yang memiliki hasil yang lebih baik dibandingkan kombinasi lainnya berdasarkan pengujian *frontal*. Hal ini serupa dengan hasil yang diperoleh pada penelitian ini, karena berdasarkan pengujian *static bending* nilai angka keamanan terbesar dimiliki oleh kombinasi [0/90/45/-45/0]_s yaitu sebesar 1.887. Adapun terdapat perbedaan besarnya nilai dari angka keamanan tersebut. Hal ini dikarenakan struktur model dan tata cara pengujian penelitian sebelumnya berbeda dengan penelitian kali ini.

4.3.2 Analisa Perbandingan Pengujian *Static Torque*

Berdasarkan analisa yang dilakukan terhadap *fork road bike* dengan menggunakan metode *static test* pada *SolidWorks* serta pengujian berdasarkan standar CEN 14781 didapatkan hasil perbandingan defleksi, angka keamanan dan *interlaminar shear stress* antara analisa awal dengan modifikasi. Dari hasil-hasil tersebut, maka diperolehlah varian yang terbaik berdasarkan tiap varian, analisa atau modifikasi terhadap pengujian *static torque*. Hasil-hasil tersebut ditunjukkan pada tabel 4.3 dan digambarkan dalam bentuk grafik seperti pada gambar 4.42 hingga 4.45.

Tabel 4.3 Perbandingan Hasil *Static Torque*

		Analisa Awal	Modifikasi 1	Modifikasi 2	Modifikasi 3
Defleksi (mm)	4	8.221	6,006	8,011	4.783
	7	7.534	5.588	7.35	4.782
	14	7.95	6.406	7.759	4.802
	15	7.961	6.406	7.752	5.234
Angka Keamanan	4	0.413	0.458	1.093	2.212
	7	0.511	0.592	1.068	2.325
	14	0.348	0.609	1.203	1.508
	15	0.374	0.621	1.207	1.29
ILSS XZ (MPa)	4	234.1	229.7	103.5	116.2
	7	234	267.3	133.2	127
	14	294.8	280.1	120	134
	15	263.6	295.6	110.5	126.3
ILSS YZ (MPa)	4	234.1	236	103.5	104.1
	7	232.4	243.4	133.2	127
	14	268.1	305.2	114.4	138.7
	15	266.2	319.8	122.4	138.8
Berat (gr)		384.55	466.08	504.53	993.52



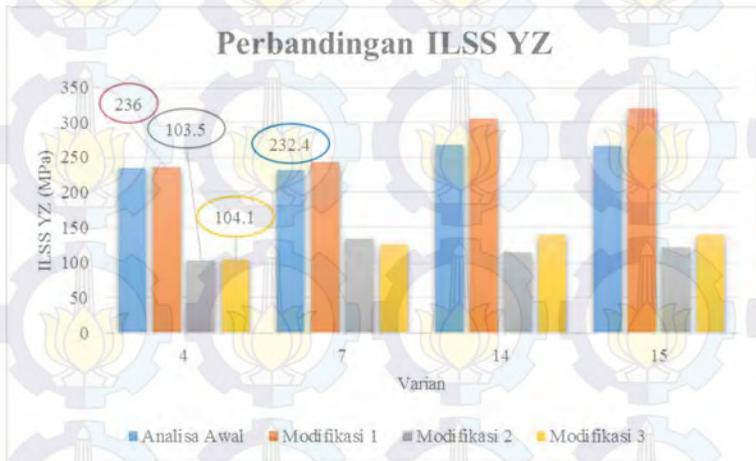
Gambar 4.42 Grafik Perbandingan Hasil Defleksi *Static Torque*



Gambar 4.43 Grafik Perbandingan Hasil Angka Keamanan *Static Torque*



Gambar 4.44 Grafik Perbandingan Hasil *Interlaminar Shear Stress XZ Static Torque*



Gambar 4.45 Grafik Perbandingan Hasil *Interlaminar Shear Stress YZ Static Torque*

Jika dilihat pada grafik hasil defleksi pada gambar 4.42, nampak bahwa defleksi yang terjadi mengalami penurunan yang cukup signifikan di setiap modifikasinya, dimulai dari modifikasi pertama, modifikasi kedua (*steerer tube*), dan grafik terendah adalah milik modifikasi ketiga dengan nilai terendah dari defleksi yang terjadi adalah 4.782 mm. Akan tetapi, dapat dilihat pula bahwa modifikasi kedua (*drop out*) tidak menunjukkan penurunan yang berarti pada defleksi yang terjadi. Modifikasi kedua (*drop out*) memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap menurunnya nilai *interlaminar shear stress* dan meningkatnya angka keamanan. Seperti yang terlihat pada grafik, grafik angka keamanan gambar 4.43 modifikasi kedua (*drop out*) meningkat drastis dibandingkan analisa semula, dan grafik *interlaminar shear stress* gambar 4.44 dan 4.45 modifikasi kedua (*drop out*) menurun drastis dibandingkan analisa semula. Hal-hal ini mengindikasikan bahwa penambahan jumlah *ply* beserta variasi kemiringan sudut dan penggantian material pada bagian *steerer tube* pada *fork* memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap defleksi yang terjadi pada struktur *fork* sepeda, tetapi penggantian material pada *steerer tube* tidak memberikan pengaruh yang berarti terhadap *interlaminar shear stress* yang terjadi. Penggantian material pada bagian *drop out* tidak memberikan pengaruh yang berarti terhadap defleksi yang terjadi, tetapi memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap *interlaminar shear stress* yang terjadi. Dengan memadukan modifikasi pertama dan modifikasi kedua, maka akan diperoleh struktur *fork* yang semakin kuat berdasarkan defleksi, angka keamanan dan *interlaminar shear stress* yang terjadi. Seperti yang telah ditunjukkan pada grafik di atas, grafik yang dimiliki oleh modifikasi ketiga lebih baik dibandingkan dengan analisa awal maupun dengan modifikasi lainnya di setiap nilai hasil simulasi. Berdasarkan pertimbangan akan nilai defleksi, angka keamanan dan *interlaminar shear stress* yang telah disimulasikan dengan pengujian *static torque* seluruhnya, maka diperoleh kombinasi sudut yang terbaik yaitu

[0/90/45/-45/0]s dengan mengganti material *steerer tube* dan *drop out* dengan material AISI 4130.

Pada pengujian *static torque*, struktur *fork* terkena beban *bending* sekaligus *compression* yang mengakibatkan struktur tertekuk ke bawah dan tertekan ke arah *fixture*. Pada bagian atas lapisan-lapisan terkena tegangan tarik paling besar, pada bagian bawah lapisan-lapisan terkena tegangan tekan paling besar, sedangkan pada bagian tengah lapisan-lapisan terkena tegangan geser paling besar. Di antara bagian atas dan tengah maupun bagian bawah dan tengah terkena tegangan gabungan tarik dan geser atau tekan dan geser. Hasil simulasi pengujian *bending* di atas menunjukkan bahwa sudut 90, sudut 45 dan sudut -45 pada *ply* kedua, ketiga dan keempat memiliki hasil yang lebih baik dibandingkan dengan sudut-sudut lainnya, dan hal ini ditunjukkan dengan nilai hasil defleksi dan *interlaminar shear stress* yang lebih rendah, dan angka keamanan yang lebih besar jika dibandingkan dengan nilai yang lainnya. Hal ini sesuai dengan penjelasan bahwa tegangan gabungan tarik dan geser atau tekan dan geser terjadi pada bagian tengah lapisan-lapisan, sehingga pemilihan sudut 0, sudut 90 dan sudut -45 pada *ply* kedua, ketiga dan keempat menyebabkan tegangan yang terjadi pada struktur menyebar merata pada keseluruhan bagian dari struktur.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari analisa yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan pengujian *static bending* yang telah dilakukan terhadap analisa awal dan seluruh modifikasi:

a. Defleksi dan *interlaminar shear stress* yang terjadi dari seluruh simulasi dan modifikasi menunjukkan struktur tidak dalam kondisi aman. Defleksi minimum yang diperoleh dari keseluruhan simulasi adalah sebesar 5.24 mm dan *interlaminar shear stress* minimum yang terjadi adalah sebesar 100.9 MPa.

b. Angka keamanan yang terjadi dari sebagian simulasi dan modifikasi menunjukkan struktur dalam kondisi aman. Angka keamanan maksimum yang diperoleh dari keseluruhan simulasi adalah sebesar 1.887

Berdasarkan pengujian *static torque* yang telah dilakukan terhadap analisa awal dan seluruh modifikasi:

a. *Interlaminar shear stress* yang terjadi dari seluruh simulasi dan modifikasi menunjukkan struktur tidak dalam kondisi aman. *Interlaminar shear stress* minimum yang diperoleh dari keseluruhan simulasi adalah sebesar 103.5 MPa.

b. Angka keamanan dan defleksi yang terjadi dari sebagian simulasi dan modifikasi menunjukkan struktur dalam kondisi aman. Angka keamanan maksimum yang diperoleh dari keseluruhan simulasi adalah sebesar 2.325 dan defleksi minimum yang terjadi adalah sebesar 4.782 mm.

2. Setelah dilakukan simulasi terhadap terhadap analisa awal dan seluruh modifikasi pada kedua jenis pengujian, maka diperolehlah susunan kombinasi sudut *ply* yang terbaik untuk *fork* sepeda, yaitu [0/90/45/-45/0]s.

3. Pengaruh modifikasi terhadap hasil simulasi pengujian *static bending* adalah sebagai berikut:

- a. Penambahan jumlah *ply* dan penggantian material pada bagian *steerer tube fork* sepeda memberikan pengaruh yang semakin baik terhadap defleksi, angka keamanan dan *interlaminar shear stress* yang terjadi. Akan tetapi, penggantian material pada bagian *drop out fork* sepeda tidak memberikan pengaruh yang berarti.

Pengaruh modifikasi terhadap hasil simulasi pengujian *static torque* adalah sebagai berikut:

- a. Penambahan jumlah *ply* dan penggantian material pada bagian *steerer tube fork* sepeda memberikan pengaruh yang semakin baik terhadap defleksi, ditunjukkan dengan menurunnya defleksi terbesar dari 9.337 mm menjadi 5.61 mm.
- b. Penggantian material pada bagian *drop out* memberikan pengaruh yang semakin baik terhadap angka keamanan dan *interlaminar shear stress* yang terjadi, ditunjukkan dengan meningkatnya angka keamanan terkecil dari 0.281 menjadi 0.774; dan menurunnya *interlaminar shear stress* terbesar dari 358.4 MPa menjadi 133.2 MPa.

5.2 Saran

Hasil simulasi ini merupakan sebagai sarana pendukung untuk proses perancangan. Sehingga proses ini dapat dijadikan sebagai bahan pertimbangan dalam mengoptimalkan perancangan sehingga dapat mengoptimalkan perancangan desain *racing fork bicycle*. Proses pengujian secara riil tetap perlu dilakukan untuk mengetahui hasil secara sesungguhnya dari desain hasil simulasi. Agar mencapai hasil yang optimal dari segi keamanan, maka hal yang perlu dipertimbangkan adalah dengan mengganti jenis material *carbon fiber* dengan material yang memiliki nilai modulus yang lebih baik daripada material yang telah dipilih pada penelitian ini. Hal lain yang bisa digunakan sebagai pertimbangan adalah dengan mengubah bentuk geometri atau bentuk dari *fork* sepeda itu sendiri dan tanpa mengubah dimensi fungsi dari *fork road bike*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Jannetti, N.A., Lynch, L.B., April 2010. **Fatigue Analysis of a Bicycle Fork**. Worcester: Worcester Polytechnic Institute.
- [2] Thomas Jin-Chee Liu dan Huang-Chieh Wub., 2009. "Fiber Direction and Stacking Sequence Design for Bicycle Frame Made of Carbon/Epoxy Composite Laminate". **Materials & Design**. 31, 4:1971-1980.
- [3] Most J., Stegmair D. dan Petry D., 2015. "Error Estimation Between Simple, Closed-Form Analytical Formulae and Full-Scale FEM for Interlaminar Stress Prediction in Curved Laminates". **Composite Structure**. 131:72-81.
- [4] CEN European Committee for Standardization. **Racing Bicycles – Safety Requirements and Test Methods EN 14781:2005**. CEN European Committee for Standardization. 2005.
- [5] NPTEL. **Composite Material Failure Theories and Problems**, <URL:<http://nptel.ac.in/courses/101106038/mod04lec04.pdf>>.
- [6] Sandjay K. Mazumdar., 2001. **Composites Manufacturing : Materials, Products, and Process**. USA: CRC Press LLC.
- [8] Gurit. **Guide To Composite**, <URL:<http://www.gurit.com/files/documents/guide-to-compositesv5webpdf.pdf>>.
- [9] SolidWorks Corporation. **SolidWorks 2016**. USA: SolidWorks Corporation; 2016.
- [10] Toray Industries Inc. **Torayca T300 Technical data sheets N**, <URL:<http://www.toraycfa.com/pdfs/T300DataSheet.pdf>>.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN A

SIFAT-SIFAT MEKANIS MATERIAL

A.1. Sifat-Sifat Material T300

Young Modulus E_{11} (GPa)	162	Tensile Strength S_{1t} (MPa)	1760
Young Modulus $E_{22}=E_{33}$ (GPa)	14.9	Tensile Strength S_{1c} (MPa)	1570
Poisson Ratio $\nu_{12}=\nu_{13}$	0.283	Strength $S_{2t}=S_{2c}=S_{3t}=S_{3c}$ (MPa)	80
Poisson Ratio ν_{23}	0.386	Strength $S_{12}=S_{23}=S_{13}$ (MPa)	98
Shear Modulus $G_{12}=G_{13}$ (GPa)	5.7	Ply Thickness (mm)	0.3
Shear Modulus G_{23} (GPa)	5.4		

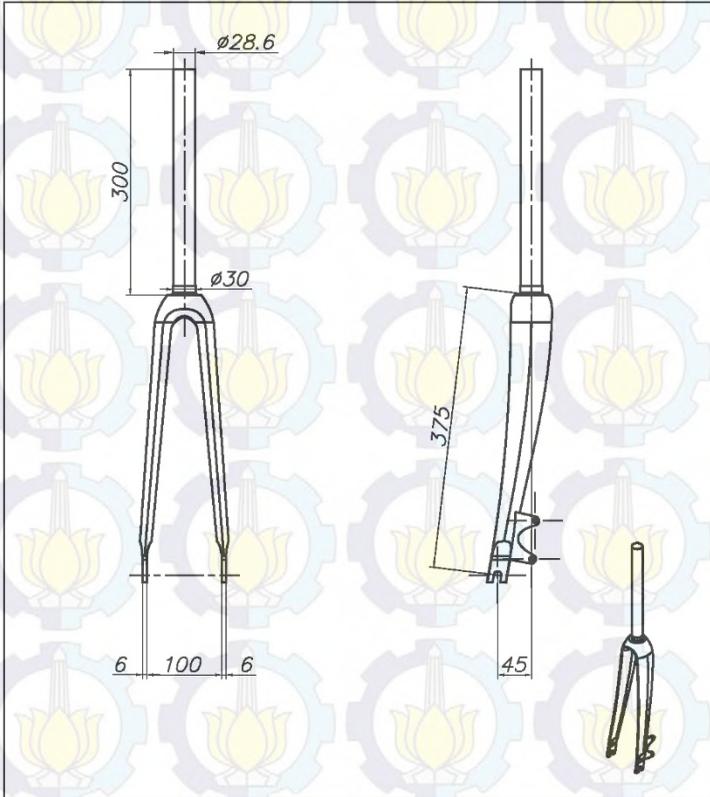
A.2. Sifat-Sifat Material AISI 4130

Young Modulus E (GPa)	250	Tensile Strength S (MPa)	731
Poisson Ratio ν	0.285	Density (kg/m³)	7850
Shear Modulus G (GPa)	80	Yield Strength (MPa)	460

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

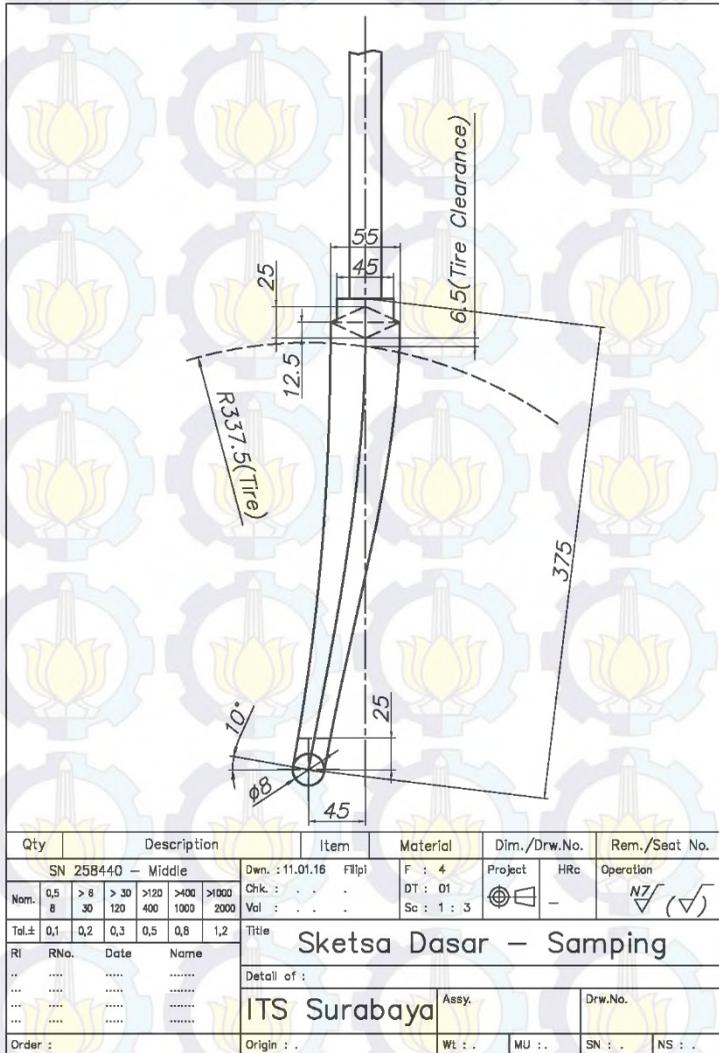
LAMPIRAN B GAMBAR DAN SKETSA DESAIN FORK

B.1. Fork Road Bike



1	Fork Road Bike	1	T300-CFRP			
Qty	Description	Item	Material	Dim./Drw.No.	Rem./Seat No.	
SN	25B440 – Middle	Dwn. : 11.01.16	Filipi	F : 4	Project	HRc
Nam.	0,5 > 8 > 30 >120 >400 >1000	Chk :		DT : 01	⊕ ⊖	-
Tal.±	0,1 0,2 0,3 0,5 0,8 1,2	Val :		Sp : 1 : 5	⊕ ⊖	N/Z (✓)
RI	RNo.	Date	Name	Fork Road Bike		
..	.....	.....	.....	Detail of :		
..	.....	.....	.....	ITS Surabaya		Assy.
..	.....	.....	.....	Drw.No.		
Order :	Origin :	Wt : .	MU : .	SN : .	NS : .	

B.3. Sketsa Dasar - Samping



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN C HASIL SIMULASI

C.1. Hasil Analisa Awal

Varian	Defleksi (mm)		Angka Keamanan		ILSS XZ (MPa)		ILSS YZ (Mpa)	
	Static Bending	Static Torque	Static Bending	Static Torque	Static Bending	Static Torque	Static Bending	Static Torque
1	9.609	8.082	0.512	0.312	341.1	266.5	62.67	76.16
2	8.208	7.406	0.565	0.289	254	253.9	163.6	190.4
3	8.188	7.368	0.571	0.314	264.3	248	166	178
4	9.443	8.221	0.852	0.413	250.1	234.1	237.2	234.1
5	8.057	7.3	0.612	0.284	222.1	275	103.1	152
6	8.813	8.39	0.61	0.281	184.8	281.4	138.8	188.7
7	7.744	7.534	0.77	0.511	156.3	234	156.3	232.4
8	8.489	8.069	0.913	0.34	238.9	248.9	157	241.7
9	8.041	7.263	0.602	0.309	238.4	252.6	105.6	145.3
10	7.747	7.529	0.77	0.505	150.6	248	150.6	248
11	8.789	8.329	0.599	0.313	207.3	227.6	118.1	161.9

Varian	Defleksi (mm)		Angka Keamanan		ILSS XZ (MPa)		ILSS YZ (Mpa)	
	Static Bending	Static Torque	Static Bending	Static Torque	Static Bending	Static Torque	Static Bending	Static Torque
12	8.487	8.08	0.903	0.364	162.8	242.1	160.9	234.6
13	9.139	8.004	1.064	0.422	202.6	299.7	143.6	299.7
14	8.32	7.95	0.986	0.348	183.2	294.8	118.5	268.1
15	8.309	7.961	0.992	0.374	149.6	263.6	122.6	266.2
16	10.237	9.337	0.927	0.398	157.6	358.4	156.6	358.4

C.2. Hasil Modifikasi Pertama

Varian	Ply ke-4	Defleksi (mm)		Angka Keamanan		ILSS XZ (MPa)		ILSS YZ (MPa)	
		Static Bending	Static Torque						
4	0	6.986	6.227	1.339	0.534	237.7	259.7	198.4	259.7
	-45	6.261	5.997	1.445	0.432	188.9	258.5	178.4	232.5
	45	6.255	6.006	1.455	0.458	190.9	229.7	179.6	236
	90	7.515	6.905	1.373	0.523	208	295.6	205.6	295.6

Varian	Ply ke-4	Defleksi (mm)		Angka Keamanan		ILSS XZ (MPa)		ILSS YZ (MPa)	
		Static Bending	Static Torque						
7	0	5.684	5.588	1.558	0.592	158.8	267.3	138.1	243.4
	-45	6.406	6.588	1.633	0.586	157.8	256	139	217.6
	45	6.397	6.571	1.561	0.682	141.2	246.5	138.9	246.5
	90	6.386	6.458	1.434	0.596	140.2	263.5	140.2	270.4
14	0	6.189	5.948	1.272	0.426	151.4	295.5	109.3	343.5
	-45	6.868	6.934	1.03	0.463	211	302.6	122.4	292.1
	45	6.298	6.406	1.183	0.609	123.6	280.1	109.8	305.2
	90	7.19	7.163	1.022	0.423	140.9	352.8	140.9	352.8
15	0	6.182	5.955	1.278	0.453	157.2	293.5	115.1	354.2
	-45	6.299	6.406	1.182	0.621	123.4	295.6	108.4	319.8
	45	6.855	6.938	1.036	0.498	150.1	262.6	112.3	298
	90	7.184	7.181	1.027	0.443	142.9	351.8	142.9	351.8

C.3. Hasil Modifikasi Kedua

Varian	Defleksi (mm)		Angka Keamanan		ILSS XZ (MPa)		ILLS YZ (MPa)		
	Static Bending	Static Torque							
Steerer Tube	4	7.369	6.298	0.787	0.415	107.4	232.9	107.4	232.9
	7	6.859	6.396	0.792	0.513	155.7	234	155.7	232.2
	14	6.739	6.365	1.179	0.349	162.1	294.1	109.6	268.1
	15	6.726	6.39	1.219	0.374	111.4	262.7	118.7	263.9
Drop Out	4	9.378	8.011	0.825	1.093	250.1	103.5	237.1	103.5
	7	7.695	7.35	0.774	1.068	155.4	133.2	154.3	133.2
	14	8.28	7.759	0.986	1.203	184.1	120	122.6	114.4
	15	8.273	7.752	0.992	1.207	149.4	110.5	122.4	122.4

C.4. Hasil Modifikasi Ketiga

Varian	Ply ke-4	Defleksi (mm)		Angka Keamanan		ILSS XZ (MPa)		ILLS YZ (MPa)	
		Static Bending	Static Torque						
4	0	5.671	4.783	1.199	2.212	102.4	116.2	102.4	104.1
	-45	5.453	4.89	1.4332	1.798	121.7	119.4	107.6	119.4
	45	5.444	4.873	1.512	1.817	130	109.7	130	109.5
	90	5.82	5.196	1.295	1.794	129.2	122.3	129.2	122.3
7	0	5.303	4.782	1.368	2.325	135.9	127	135.9	127
	-45	5.754	5.532	1.299	1.747	123	133.7	116.2	121.1
	45	5.682	5.505	1.37	2.012	133	153.3	133	135.9
	90	5.528	5.311	1.615	1.64	125.5	122.3	131.3	122.3
14	0	5.3	4.802	1.389	1.508	142.2	134	130.2	138.7
	-45	5.719	5.557	1.543	1.15	168.5	118.1	116.9	119
	45	5.406	5.233	1.887	1.28	109.1	137.9	114	137.9
	90	5.741	5.61	1.448	1.159	140.1	142.8	140.1	142.8

Varian	Ply ke-4	Defleksi (mm)		Angka Keamanan		ILSS XZ (MPa)		ILSS YZ (MPa)	
		Static Bending	Static Torque						
15	0	5.24	4.786	1.38	1.507	110.5	126.8	120.9	156.7
	-45	5.407	5.234	1.824	1.29	100.9	126.3	110.8	138.8
	45	5.6	5.534	1.587	1.158	121.7	162.2	112.4	148.8
	90	5.685	5.603	1.463	1.151	126.2	165.1	126.2	165.1

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Kudus, 22 Oktober 1991, merupakan anak keempat atau terakhir dari empat bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu TK Cahaya Nur pada tahun 1997, SD Cahaya Nur Kudus pada tahun 2003, SMP Masehi Kudus pada tahun 2006, dan SMA Negeri 1 Kudus pada tahun 2009. Pada tahun 2009, penulis diterima di Politeknik ATMI Surakarta Jurusan D3 Teknik Mesin Industri dan lulus pada tahun 2012. Selama 9 bulan setelah lulus dari perkuliahan, penulis bekerja di sebuah pabrik di kota Karawang yang bergerak di bidang *injection molding* sebagai *Project Engineering*. Pada tahun 2013, penulis tergerak untuk melanjutkan studi S1 Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Selama menuntut ilmu D3 maupun S1, penulis aktif mengikuti kegiatan perkuliahan. Selama di bangku kuliah penulis juga ikut aktif dalam berbagai perlombaan. Karena ketertarikan terhadap mekanika dan fenomena yang terjadi pada benda padat, khususnya pada kekuatan struktur *carbon fiber*, penulis mendedikasikan tugas akhir pada bidang tersebut dengan topik penelitian yang diambil berupa analisa terhadap kekuatan *fork* sepeda dengan material *carbon fiber*.