



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM184835

ANALISIS PENGARUH ORIENTASI SUDUT DAN KETEBALAN TERHADAP KEKUATAN PROSTETIK *RUNNING BLADE* KOMPOSIT KENAF/EPOKSI DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

Arighi Dhika Pratama

NRP. 0211184000088

Dosen Pembimbing

Ir. Julendra Ariatedja, M.T.

NIP. 196807061999031004

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2022



TUGAS AKHIR - TM184835

ANALISIS PENGARUH ORIENTASI SUDUT DAN KETEBALAN TERHADAP KEKUATAN PROSTETIK *RUNNING BLADE* KOMPOSIT KENAF/EPOKSI DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

Arighi Dhika Pratama

NRP. 0211184000088

Dosen Pembimbing

Ir. Julendra Ariatedja, M.T.

NIP. 196807061999031004

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2022



TUGAS AKHIR - TM184835

**ANALYSIS OF THE EFFECT OF ANGLE ORIENTATION
AND THICKNESS ON THE STRENGTH OF KENAF/ EPOXY
COMPOSITE RUNNING BLADE PROSTHETICS USING
FINITE ELEMENT METHOD**

Arighi Dhika Pratama

NRP. 0211184000088

Advisor

Ir. Julendra Ariatedja, M.T.

NIP. 196807061999031004

Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering

Departemen of Mechanical Engineering

Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering

Surabaya

2022

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS PENGARUH ORIENTASI SUDUT DAN KETEBALAN TERHADAP KEKUATAN PROSTETIK *RUNNING BLADE* KOMPOSIT KENAF/EPOKSI DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

TUGAS AKHIR

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



Oleh: **Arighi Dhika Pratama**
NRP. 0211184000088

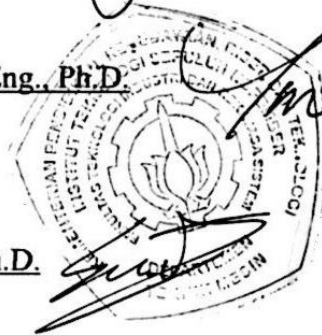
Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Ir. Julendra Ariatedja, M.T.
NIP. 196807061999031004



Ir. Julendra Ariatedja Pembimbing

2. Achmad Syaifudin, S.T., M.Eng., Ph.D.
NIP. 197909262005011001



Achmad Syaifudin Dosen Penguji I

3. Putu Suwarta, S.T., M.Sc., Ph.D.
NIP. 198203032009121007

Putu Suwarta Dosen Penguji II

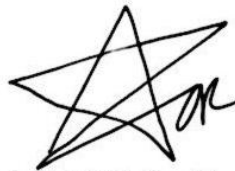
SURABAYA
Juli, 2022

APPROVAL SHEET

ANALYSIS OF THE EFFECT OF ANGLE ORIENTATION AND THICKNESS ON THE STRENGTH OF THE KENAF/ EPOXY COMPOSITE RUNNING BLADE PROSTHETIC USING FINITE ELEMENT METHOD

FINAL PROJECT

Submitted to fulfil one of the requirements
for obtaining a degree in Bachelor of Engineering
Undegraduate Study Program of Mechanical Engineering Department
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember



By: **Arighi Dhika Pratama**
NRP. 0211184000088

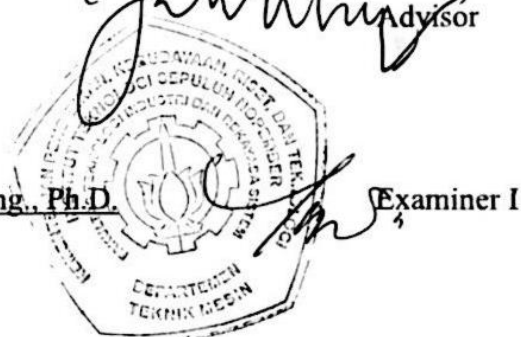
Approved by Final Project-Examiner Team:

1. Ir. Julendra Ariatedja, M.T.
NIP. 196807061999031004



Advisor

2. Achmad Syaifudin, S.T., M.Eng., Ph.D.
NIP. 197909262005011001



Examiner I

3. Putu Suwarta, S.T., M.Sc., Ph.D.
NIP. 198203032009121007



Examiner II

SURABAYA
July, 2022

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

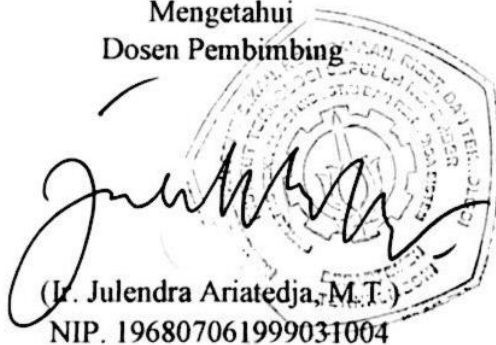
Nama mahasiswa / NRP : Arighi Dhika Pratama / 0211184000088
Departemen : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing / NIP : Ir. Julendra Ariatedja, M.T. / 196807061999031004

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Analisis Pengaruh Orientasi Sudut dan Ketebalan terhadap Kekuatan Prostetik *Running Blade* Komposit Kenaf/ Epoksi dengan Metode Elemen Hingga adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

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

Surabaya, 29 Juli 2022

Mengetahui
Dosen Pembimbing



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

Mahasiswa



(Arighi Dhika Pratama)
NRP. 0211184000088

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student : Arighi Dhika Pratama / 02111840000088
Department : Mechanical Engineering
Advisor / NIP : Ir. Julendra Ariatedja, M.T. / 196807061999031004

Hereby declare that the Final Project with the title of "Analysis of the Effect of Angle Orientation and Thickness on the Strength of Kenaf/Epoxy Composite Running Blade Prosthetics using Finite Element Method" is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then i am willing to accept sactions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

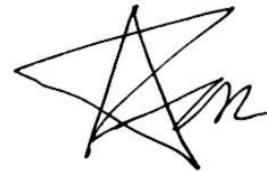
Surabaya, 29th July 2022

Acknowledge
Advisor



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

Student



(Arighi Dhika Pratama)
NRP. 02111840000088

ANALISIS PENGARUH ORIENTASI SUDUT DAN KETEBALAN TERHADAP KEKUATAN PROSTETIK *RUNNING BLADE* KOMPOSIT KENAF/EPOKSI DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

Nama Mahasiswa / NRP : Arighi Dhika Pratama / 0211184000088
Jurusan : Teknik Mesin FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Julendra Bambang Ariatedja, M.T.

ABSTRAK

Dewasa ini, perkembangan material bergerak kearah komposit alam karena dianggap memiliki banyak kelebihan dibandingkan dengan material sintetis dan logam. Kelebihannya ialah komposit alam merupakan material yang bisa diperbarui, melimpah, ringan dan dapat terurai secara alami. Komposit alam sendiri sudah mulai dikembangkan dan diaplikasikan pada industri manufaktur khususnya konstruksi dan otomotif.

Pertumbuhan kebutuhan prostetik yang meningkat menjadi alasan para insinyur dan peneliti mulai mengembangkan teknologi prostetik. Salah satu jenis prostetik alat gerak bagian bawah adalah prostetik tipe *running blade*. *Running blade* merupakan prostetik alat gerak bagian bawah yang dirancang khusus untuk kebutuhan olahraga. *Running blade* biasanya dimanufaktur dengan menggunakan material komposit sintetis seperti komposit carbon atau fiberglass

Dalam penelitian ini, dilakukan analisis pengaruh orientasi sudut dan ketebalan terhadap kekuatan prostetik *running blade* komposit kenaf/ epoksi dengan metode elemen hingga. Penelitian ini diawali dengan melakukan studi literatur, penentuan variasi dan simulasi pada perangkat lunak ANSYS Workbench. Pengujian yang dilakukan mengacu kepada standar ISO 10328 (2016): *Prosthetics – Structural Testing of Lower-limb Prostheses – Requirements and Test Methods*. Variasi orientasi sudut serat ada 6, yaitu: [0/0], [90/90], [0/90], [0/90]_s, [±45], [±45]_s. Kemudian dilanjutkan dengan memvariasikan ketebalan pada penelitian ini yaitu 2 cm, 3 cm, dan 4 cm.

Pada penelitian ini didapatkan bahwa orientasi sudut paling optimal untuk *running blade* ada pada orientasi sudut [90/90]. Hal ini disimpulkan karena orientasi sudut [90/90] memiliki nilai Tsai-Wu *safety factor* tertinggi, nilai *total deformation* tertinggi, nilai *stiffness* tertinggi, dan nilai *equivalent stress* terendah kedua setelah orientasi sudut [0/90]. Sementara untuk pengaruh ketebalan terhadap kekuatan *running blade* yaitu adanya peningkatan untuk nilai Tsai-Wu *safety factor* dan penurunan nilai *equivalent stress*. Namun dari segi kekakuan juga meningkat dilihat dari menurunnya nilai *total deformation* dan meningkatnya nilai *stiffness* dari *running blade*. Untuk dapat menyamai kekuatan *running blade* dari *epoxy carbon woven* (230 GPa) *wet, running blade* dari kenaf/ epoksi perlu dibuat 2,22 kali lebih tebal. Namun memiliki keterbatasan yaitu nilai kekakuan yang jauh lebih besar serta massa yang dihasilkan 1,86 kali lebih berat.

Kata kunci: *Kenaf, Komposit alam, Prostetik, Running blade, ISO 10328 (2016)*

ANALYSIS OF THE EFFECT OF ANGLE ORIENTATION AND THICKNESS ON THE STRENGTH OF THE KENAF/ EPOXY COMPOSITE RUNNING BLADE PROSTHETIC USING FINITE ELEMENT METHOD

Student Name / NRP : Arighi Dhika Pratama / 0211184000088
Department : Mechanical Engineering FTIRS-ITS
Advisor : Ir. Julendra Bambang Ariatedja, M.T.

ABSTRACT

Nowadays, the development of materials moves towards natural composites because it is considered to have many advantages compared to synthetic materials and metals. The advantage is that natural composites are materials that are renewable, abundant, lightweight and biodegradable. Natural composites themselves have begun to be developed and applied to the manufacturing industry, especially construction and automotive.

The growing need for prosthetics is the reason engineers and scientists have begun to accelerate the development of prosthetic technologies. One type of lower-limb prostheses is a running blade type prosthetic. Running blade is a prosthetic of the lower-limb designed specifically for sports needs. Running blades are usually manufactured using synthetic composite materials such as carbon and fiberglass composites.

In this study, an analysis of the effect of angle orientation and thickness on the strength of the kenaf / epoxy composite running blade using finite element method was carried out. This research began with conducting literature studies, determining variations and simulations on the ANSYS Workbench software. The tests carried out refer to the ISO 10328 (2016) standard: *Prosthetics – Structural Testing of Lower-limb Prostheses – Requirements and Test Methods*. The variations of the fiber angle orientation are 6, namely: [0/0], [90/90], [0/90], [0/90]_s, [±45], [±45]_s. Then continued by varying the thickness in this study, namely 2 cm, 3 cm, and 4 cm

In this study, it was found that the most optimal angle orientation for running blades was at the [90/90] angle orientation. This is concluded because the angular orientation [90/90] angle orientation has the highest Tsai-Wu safety factor value, the highest total deformation value, the highest stiffness value, and the second lowest equivalent stress value after [0/90] angle orientation. Meanwhile, the effect of thickness on the strength of the running blade is an increase in the value of the Tsai-Wu safety factor and a decrease in the equivalent stress value. However, in terms of stiffness, it also increases in terms of the decrease in the total deformation value and the increase in the stiffness value of the running blade. To be able to match the strength of the running blade from epoxy carbon woven (230 GPa) wet, the running blade from kenaf / epoxy needs to be made 2.22 times thicker. However, the running blade does have limitation, namely a much greater stiffness value and the resulting mass is 1.86 times heavier.

Keywords: *Kenaf fibre, Natural composite, Prosthetics, Running blade, ISO 10328 (2016)*

KATA PENGANTAR

JER BASUKI MAWA BEYA,

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, dengan izin dan berkah-Nya penulis dapat menyelesaikan penelitian tugas akhir ini dengan lancar dan sebaik-baiknya. Penelitian ini penulis dedikasikan kepada diri penulis sendiri dan juga kepada pihak-pihak lainnya yang telah membantu penulis dalam melewati perjalanan panjang hingga akhirnya penulis dapat menyampaikan rasa syukur dan ucapan terimakasih pada kata pengantar. Melalui kesempatan ini izinkan penulis menyampaikan ucapan terimakasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dan mendukung penulis baik secara langsung maupun tidak langsung dalam proses penyelesaian tugas akhir ini, antara lain:

1. Alm. Bapak Agus Soekmaniharto dan Ibu Lukmawati selaku orang tua penulis yang senantiasa mendukung dan mendoakan penulis agar menjadi pribadi yang bermanfaat dan menjadi kebanggaan keluarga.
2. Bapak Ir. Julendra Ariatedja, M.T. selaku dosen pembimbing yang senantiasa memberikan pembelajaran dan bimbingan kepada penulis baik selama kegiatan perkuliahan maupun dalam proses menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Bapak Alief Wikarta S.T., M.Sc.Eng., Ph.D., Bapak Achmad Syaifudin, S.T., M.Eng., dan Ph.D., Bapak Putu Suwarta, S.T., M.Sc., Ph.D., selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik serta saran yang bermanfaat dalam membantu penulis untuk menyempurnakan tugas akhir ini.
4. Bapak Dr. Eng. Yohanes, S.T., M.Sc., selaku dosen wali penulis yang telah membimbing dan memberikan ilmu kepada penulis selama masa perkuliahan.
5. Teman teman terdekat (Kevin Novrian, Nikolas Prayandi, Tareqh Al-Faqih, Ananda Ariwijaya, Kelvin Pratama, Aldi Ridho, Nandana Ghozy, Abdul Hakim, Rhyzalaita Adhi, Amanda Rosalina, Farrel Baihaqi) yang telah mewarnai kehidupan penulis dengan penuh suka duka selama menjadi mahasiswa di Departemen Teknik Mesin ITS.
6. Seluruh warga Lab Mekanika Benda Padat (Fazhli Chamidi, Vikrant, Rizaldy Aziz, Ridho Taqillah, Ganesha Vishnu) yang telah membantu dan menemani penulis dalam mengerjakan tugas akhir dengan penuh canda tawa, pujian, serta motivasi yang sangat berarti bagi penulis.
7. Seluruh keluarga besar M61 yang telah menemani penulis menempuh pendidikan di Departemen Teknik Mesin ITS.
8. Davita Fauziyyah Widodo selaku pribadi yang selalu menemani dan memotivasi penulis dalam segala sesuatunya.
9. Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember yang menjadi tempat penulis belajar dan berkembang menjadi pribadi yang lebih baik.
10. Departemen Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang telah memberikan saran dan bantuan kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
11. Seluruh rekan dan pihak pihak yang tidak dapat penulis tuliskan namanya satu persatu.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan laporan Tugas Akhir ini masih terdapat kekurangan maupun ketidaksempurnaan. Namun semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat dan kontribusi bagi perkembangan ilmu pengetahuan khususnya bagi keluarga besar Departemen Teknik Mesin ITS dan Civitas Akademika Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Selain itu, semoga dapat bermanfaat sebagai referensi laporan Tugas Akhir bagi adik adik ku selanjutnya.

Surabaya, Juli 2022
Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	VII
APPROVAL SHEET	IX
PERNYATAAN ORISINALITAS	XI
STATEMENT OF ORIGINALITY	XIII
ABSTRAK	XV
ABSTRACT	XVII
KATA PENGANTAR	XIX
DAFTAR ISI	XXI
DAFTAR GAMBAR	XXIII
DAFTAR TABEL	XXVII
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah atau Ruang Lingkup.....	3
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Dasar Teori	7
2.1.1 Prostetik	7
2.1.2 ISO 10328 (2016).....	8
2.1.2 Komposit	12
2.1.3 Natural Fibers.....	20
2.1.4 Resin Epoksi	22
2.1.5 <i>Rules of Mixtures</i>	23
2.1.6 Mekanika.....	26
2.1.7 Teori Kegagalan.....	28
2.1.8 Metode Elemen Hingga.....	29
2.2 Penelitian Terdahulu	31
2.2.1 “ <i>Utilization of Kenaf Fiber Waste as Reinforced Polymer Composites</i> ” (Fajrin et al., 2022)	31
2.2.2 “ <i>Optimization of Running Blade Prosthetics Utilizing Crow Search Algorithm Assisted by Artificial Neural Networks</i> ” (Solis et al., 2021).....	35
2.2.3 “ <i>Analysis of Prosthetic Running Blade of Limb Using Different Composite Materials</i> ” (Abood & Habeeb, 2019)	37
2.2.4 “ <i>Compressive Strength Characteristics of Kenaf Fibre Reinforced Cement Mortar</i> ” (Moses et al, 2015)	41
2.2.5 “ <i>Kenaf Fibre Composites Using Thermoset Epoxy and Polyester Polymer Resins: Energy Absorbed Versus Tensile Properties</i> ” (Bakar et al, 2014).....	42
BAB III METODE PENELITIAN	47
3.1 Diagram Alir Penelitian	47
3.2 Studi Literatur	49
3.3 Perumusan Masalah dan Tujuan Penelitian	49
3.4 <i>Preprocessing</i>	49
3.4.1 Pemodelan 3D	49
3.4.2 Standar Pengujian.....	50
3.4.3 Data Material.....	50
3.4.4 Variasi Penelitian	52

3.5 <i>Process</i>	53
3.5.1 Pemodelan <i>Surface</i>	53
3.5.2 <i>Meshing</i>	54
3.5.3 Pemodelan Mikrostruktur Komposit.....	54
3.5.4 Penyusunan Laminasi Komposit.....	55
3.5.5 Pengujian Statik.....	56
3.5.6 Uji Konvergensi.....	57
3.6 <i>Postprocessing</i>	59
3.7 Verifikasi Simulasi.....	59
3.7.1 Validasi Data Simulasi.....	59
3.7.2 Verifikasi Langkah Simulasi.....	63
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	69
4.1 Hasil Simulasi Penelitian dan Pembahasan.....	69
4.1.1 Pengaruh Orientasi Sudut Terhadap Kekuatan Prostetik <i>Running Blade</i> pada <i>Standing Stance</i>	69
4.1.2 Pengaruh Orientasi Sudut Terhadap Kekuatan Prostetik <i>Running Blade</i> pada <i>Running Stance</i>	76
4.1.3 Komparasi ABD Matriks.....	81
4.1.4 Orientasi Sudut Terbaik.....	83
4.1.5 Pengaruh Ketebalan Total Komposit Terhadap Kekuatan Prostetik <i>Running Blade</i>	84
4.1.6 Pengujian <i>Running Blade</i> Kenaf/ Epoksi dengan Standar ISO 10328.....	85
4.2 Perbandingan Kekuatan antara <i>Running Blade</i> Kenaf/ Epoksi dengan <i>Running Blade Epoxy Carbon Woven (230 GPa) Wet</i>	88
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	93
5.1 Kesimpulan.....	93
5.2 Saran.....	93
DAFTAR PUSTAKA.....	97
LAMPIRAN.....	103
BIODATA PENULIS.....	111

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Aplikasi Serat Alam dalam Dunia Manufaktur Eropa beserta Proyeksinya (Grand View Research Inc, 2018)	2
Gambar 1. 2 Pemanfaatan Serat Kenaf oleh PT Toyota Motors (Puslima, 2013).....	3
Gambar 2. 1 <i>Transfermoral</i> atau Prostetik Lutut Atas; (a) Tampak Depan, (b) Tampak Samping (Facoetti, et al., 2010).....	7
Gambar 2. 2 <i>Foot-Ankle System</i> ; (a) <i>Running Blade</i> dan Konvensional (Iraola, 2018).....	8
Gambar 2. 3 Referensi Pengujian untuk Bagian <i>Foot-ankle</i> (ISO 10328 : 2016).....	12
Gambar 2. 4 Fasa Pembentuk Komposit (Daniel & Ishai, 2006)	12
Gambar 2. 5 Klasifikasi Komposit (Daniel & Ishai, 2006).....	13
Gambar 2. 6 Komposit Partikel dan Komposit Serpih (Kumar, 2017)	13
Gambar 2. 7 <i>Laminated Composites and Sandwich Composites</i> (Kumar, 2017)	14
Gambar 2. 8 Laminasi <i>Multidirectional</i> (Daniel & Ishai, 2006).....	14
Gambar 2. 9 <i>Continuous Fiber Composite</i> (Daniel & Ishai, 2006).....	15
Gambar 2. 10 <i>Woven Fiber Composite</i> (Daniel & Ishai, 2006)	15
Gambar 2. 11 <i>Aligned Discontinuous Fiber</i> (Gibson, 1994).....	16
Gambar 2. 12 <i>Off-axis Discintinous Fiber</i> (Gibson, 1994)	16
Gambar 2. 13 <i>Randomly Oriented Discontinuous Fiber</i> (Gibson, 1994).....	16
Gambar 2. 14 <i>Hybrid Fiber Composite</i> (Gibson, 1994).....	16
Gambar 2. 15 Orientasi Letak Serat (Schwartz, 1984).....	17
Gambar 2. 16 Hubungan antara Kekuatan Tarik dengan Diameter dari Serat Karbon (Mikel, 2010).....	17
Gambar 2. 17 Sifat Serat, Matriks, dan Komposit (Groover, 2010).....	18
Gambar 2. 18 Lamina dengan Sistem Koordinat Material Utama (Voyiadjis & Kattan, 2005)	18
Gambar 2. 19 Klasifikasi Jenis Serat Alam (Loan, 2006)	20
Gambar 2. 20 Komparasi Sifat Mekanik dari Serat Alam (Ku et al., 2010)	21
Gambar 2. 21 Tumbuhan Kenaf (a) dan Serat Kenaf (b) (BALITTAS, 2020)	21
Gambar 2. 22 Model Geometri Serat Hexagonal (Daniel & Ishai, 2006).....	24
Gambar 2. 23 Ilustrasi dari Tegangan; (a) Distribusi Beban pada Penampang Benda, (b) Gaya yang Bekerja pada ΔA , (c) Arah Kerja Tegangan Geser (Hibbeler, 2011)	26
Gambar 2. 24 Pemetaan Umum dari Tsai-Wu <i>Failure Theorem</i> (Voyiadjis & Kattan, 2005)	29
Gambar 2. 25 Plat dengan Sebuah Lubang Diskritisasi Metode Elemen Hingga (Liu, 2014)	30
Gambar 2. 26 Proses Pemilahan Serat; (a) Perlakuan Kimia terhadap Serat, (b) Serat Limbah (Fajrin et al., 2022)	32
Gambar 2. 27 Fabrikasi Komposit; (a) <i>Unidirectional</i> , (b) <i>Random</i> , (c) <i>Woven</i> (Fajrin et al., 2022).....	32
Gambar 2. 28 Pengujian <i>Mechanical Properties</i> ; (a) <i>Flexural Test</i> , (b) <i>Tensile Test</i> (Fajrin et al., 2022).....	33
Gambar 2. 29 Grafik Hasil Pengujian Tarik Komposit; (a) <i>Tensile Strength vs Tensile Modulus</i> , (b) Kurva Tegangan-Regangan. (Fajrin et al., 2022)	33
Gambar 2. 30 Grafik Hasil <i>Flexural Test</i> ; (a) <i>Flexural Strength vs Flexural Modulus</i> , (b) Kurva Tegangan-Regangan. (Fajrin et al., 2022)	34

Gambar 2. 31 Hasil Observasi SEM; (a) <i>Unidirectional</i> , (b) <i>Random</i> , (c) <i>Woven</i> (Fajrin et al., 2022).....	34
Gambar 2. 32 Geometri Desain <i>Running Blade Prostheses</i> (Solis et al., 2021)	35
Gambar 2. 33 <i>Input Parameter Variasi</i> dari <i>Running Blade Prostheses</i> (Solis et al., 2021)	35
Gambar 2. 34 <i>Orthotropic Properties</i> dari <i>3k Woven Carbon Fibres</i> (Solis et al., 2021).....	36
Gambar 2. 35 <i>Static Structural Setup</i> ; (a) <i>Meshing</i> , (b) <i>Boundary Conditions</i> (Solis et al., 2021).....	36
Gambar 2. 36 Optimasi dari Parameter Geometri (Solis et al., 2021).....	36
Gambar 2. 37 <i>Displacement</i> dan <i>Safety Factor</i> dari Hasil Optimasi (Solis et al., 2021)	37
Gambar 2. 38 Kontur <i>Displacement</i> dari Optimasi; (a) C1, (b) C2, (c) C3 (Solis et al., 2021)	37
Gambar 2. 39 Geometri dari J-Blades (Abood & Habeeb,2019)	38
Gambar 2. 40 <i>Setup Static Structural</i> ; (a) <i>Boundary Conditions</i> , (b) <i>Meshing</i> (Abood & Habeeb, 2019).....	38
Gambar 2. 41 Pengujian FEM untuk <i>Strain Energy</i> ; (a) <i>Glass Fiber</i> , (b) <i>Carbon Fiber</i> (Abood & Habeeb, 2019)	39
Gambar 2. 42 Cetakan untuk Prostetik (Abood & Habeeb, 2019).....	39
Gambar 2. 43 Proses <i>Lay-up</i> ; (a) <i>Glass Fiber</i> , (b) <i>Carbon Fibier</i> (Abood & Habeeb, 2019)..	39
Gambar 2. 44 Uji Defleksi pada Spesimen; (a) <i>Glass Fiber</i> , (b) <i>Carbon Fiber</i> (Abood & Habeeb, 2019).....	40
Gambar 2. 45 Grafik Pembebanan vs Defleksi; (a) <i>Glass Fiber</i> , (b) <i>Carbon Fiber</i> (Abood & Habeeb, 2019).....	40
Gambar 2. 46 Hasil Pengujian Daya Serap Air dari Beton (Moses et al., 2015)	41
Gambar 2. 47 Grafik Perbandingan; (a) <i>Compressive Strength vs Curing</i> , (b) <i>Compressive Strength vs Fiber Volume and Length</i> (Moses et al., 2015).....	42
Gambar 2. 48 <i>Compressive Strength</i> dari Mortar Komposit.....	42
Gambar 2. 49 Grafik Kenaf/ Epoxy vs Kenaf/ Poliester, (a) <i>Energy Absorbed</i> dan (b) <i>Deflection at Maximum Load</i> (Bakar et al., 2014)	43
Gambar 2. 50 Grafik Kenaf/ Epoxy vs Kenaf/ Poliester, (a) Kurva Tegangan – Regangan dan (b) Modulus Young vs Fraksi Berat (Bakar et al., 2014)	43
Gambar 2. 51 <i>Mechanical Properties</i> dari Kenaf/ Epoksi dan Kenaf/ Poliester.....	44
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian.....	47
Gambar 3. 2 Diagram Alir Simulasi.....	48
Gambar 3. 3 Permodelan 3D dari <i>Running Blade</i> ; (a) <i>Isometric View</i> , (b) <i>Side View</i>	49
Gambar 3. 4 <i>Boundary Condition</i> untuk <i>Standing Stance</i>	50
Gambar 3. 5 <i>Boundary Condition</i> untuk <i>Running Stance</i>	50
Gambar 3. 6 <i>Stacking Sequence</i> Setiap Variasi Orientasi Sudut; (a) [0/0], (b) [90/90], (c) [0/90], (d) [0/90]s, (e) [\pm 45], (f) [\pm 45]s.....	53
Gambar 3. 7 Pemodelan <i>Surface</i> dari <i>Running Blade</i>	54
Gambar 3. 8 <i>Meshing Surface</i> pada <i>Running Blade Prostheses</i>	54
Gambar 3. 9 <i>Representative Volume Element (RVE)</i> dari Komposit.....	55
Gambar 3. 10 Hasil Komputasi <i>Orthotropic Elasticity</i> oleh ANSYS Material Designer	55
Gambar 3. 11 Penyusunan Orientasi Sudut; (a) 90°, (b) 0°, (c) -45°, (d) 45°.....	56
Gambar 3. 12 <i>Boundary Condition Standing Stance</i>	57
Gambar 3. 13 <i>Boundary Condition Running stance</i>	57

Gambar 3. 14 Hasil <i>Meshing</i> pada <i>Running Blade Prostheses</i>	58
Gambar 3. 15 Grafik Hasil Uji Konvergensi Simulasi	58
Gambar 3. 16 <i>Orthogonal Quality Mesh Spectrum</i>	59
Gambar 3. 17 Geometri dari <i>Running Blade Prostheses</i>	63
Gambar 3. 18 Pemodelan <i>Surface</i> dan <i>Meshing</i>	63
Gambar 3. 19 <i>Material Properties</i> Penelitian Terdahulu	64
Gambar 3. 20 Konfigurasi Penyusunan Komposit	64
Gambar 3. 21 Hasil <i>Set-up</i> ACP-Pre	64
Gambar 3. 22 <i>Boundary Condition</i> untuk RBP; (a) Jurnal Penelitian Terdahulu, (b) Simulasi yang Dilakukan.....	65
Gambar 3. 23 <i>Output</i> Deformasi ; (a) Simulasi yang Dilakukan, (b) Jurnal Penelitian Terdahulu.....	65
Gambar 4. 1 Ilustrasi Pengujian pada <i>Standing Stance</i>	69
Gambar 4. 2 <i>Equivalent Stress</i> dari Setiap Variasi Sudut pada Pengujian <i>Standing Stance</i> ; (a) [0/0], (b) [90/90], (c) [0/90], (d) [0/90]s, (e) [±45], (f) [±45] _s	70
Gambar 4. 3 Grafik Orientasi Sudut vs <i>Equivalent Stress</i> pada Kondisi <i>Standing Stance</i>	70
Gambar 4. 4 <i>Total Deformation</i> dari Setiap Variasi Sudut pada Pengujian <i>Standing Stance</i> ; (a) [0/0], (b) [90/90], (c) [0/90], (d) [0/90]s, (e) [±45], (f) [±45] _s	71
Gambar 4. 5 Grafik Orientasi Sudut vs <i>Total Deformation</i> pada Kondisi <i>Standing Stance</i>	72
Gambar 4. 6 Tsai – Wu <i>Safety Factor</i> dari Setiap Variasi Sudut pada Pengujian <i>Standing Stance</i> ; (a) [0/0], (b) [90/90], (c) [0/90], (d) [0/90]s, (e) [±45] _s , (f) [±45] _s	73
Gambar 4. 7 Grafik Orientasi Sudut vs Tsai – Wu <i>Safety Factor</i> pada Kondisi <i>Standing Stance</i>	73
Gambar 4. 8 Ilustrasi <i>Stiffness Running Blade</i>	74
Gambar 4. 9 Kontur <i>Displacement Running Blade</i> ; (a) Sebelum Pembebanan, (b) Setelah Pembebanan.....	75
Gambar 4. 10 Grafik Orientasi Sudut vs <i>Stiffness</i> pada Kondisi <i>Standing Stance</i>	75
Gambar 4. 11 Ilustrasi Pengujian pada <i>Running Stance</i>	76
Gambar 4. 12 <i>Equivalent Stress</i> dari Setiap Variasi Sudut pada Pengujian <i>Running Stance</i> ; (a) [0/0], (b) [90/90], (c) [0/90], (d) [0/90]s, (e) [±45], (f) [±45] _s	77
Gambar 4. 13 Grafik Orientasi Sudut vs <i>Equivalent Stress</i> pada Kondisi <i>Running Stance</i>	77
Gambar 4. 14 <i>Total Deformation</i> dari Setiap Variasi Sudut pada Pengujian <i>Running Stance</i> ; (a) [0/0], (b) [90/90], (c) [0/90], (d) [0/90]s, (e) [±45], (f) [±45] _s	78
Gambar 4. 15 Grafik Orientasi Sudut vs <i>Total Deformation</i> pada Kondisi <i>Running Stance</i> ...	78
Gambar 4. 16 Tsai – Wu <i>Safety Factor</i> dari Setiap Variasi Sudut pada Pengujian <i>Running Stance</i> ; (a) [0/0], (b) [90/90], (c) [0/90], (d) [0/90]s, (e) [±45], (f) [±45] _s	80
Gambar 4. 17 Grafik Orientasi Sudut vs Tsai – Wu <i>Safety Factor</i> pada Kondisi <i>Running Stance</i>	80
Gambar 4. 18 Grafik Orientasi Sudut vs <i>Stiffness</i> pada Kondisi <i>Standing Stance</i>	81
Gambar 4. 19 Ketebalan Total Komposit vs Kekuatan <i>Running Blade</i>	85
Gambar 4. 20 Hasil Pengujian Jenis <i>Standing Stance</i> dengan Standar ISO 10328 (2016); (a) <i>Total Deformation</i> , (b) <i>Equivalent Stress</i> , (c) Tsai – Wu <i>Safety Factor</i> , (d) <i>Displacement Y</i>	86
Gambar 4. 21 Hasil Pengujian Jenis <i>Running Stance</i> dengan Standar ISO 10328 (2016); (a) <i>Total Deformation</i> , (b) <i>Equivalent Stress</i> , (c) Tsai – Wu <i>Safety Factor</i> , (d) <i>Displacement Y</i>	87
Gambar 4. 22 Grafik Distribusi Tegangan Von – Mises Per-Ply pada <i>Standing Stance</i>	87

Gambar 4. 23 ANSYS ACP-Post ; (a) <i>Most Compressive Stress</i> , (b) <i>Most Tensile Stress</i>	88
Gambar 4. 24 Perbandingan Geometri <i>Running Blade</i> ; (a) Kenaf/ Epoksi, (b) <i>Epoxy - Carbon Woven</i> (230 GPa) <i>Wet</i>	89

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 <i>Test forces of All Separate Tests on Ankle-foot Units and Prescribed Number of Cycles of the Cyclic Test, for Test Loading Level P3, P4, and P5 (ISO 10328 : 2016)</i>	9
Tabel 2. 2 <i>Test Forces of All Separate's Tests on Ankle foot Devices and Foot Units and Prescribed Number of Cycles of the Cyclic Test for Test Loading Level P6, P7, and P8 (ISO 10328: 2016)</i>	10
Tabel 2. 3 <i>Material Properties Single Fiber Kenaf</i>	22
Tabel 2. 4 <i>Material Properties</i> dari Resin Epoksi.....	23
Tabel 3. 1 <i>Properties</i> dari <i>Single Fiber Kenaf</i>	51
Tabel 3. 2 <i>Properties</i> dari Resin Epoksi.....	51
Tabel 3. 3 <i>Properties Epoxy Carbon Woven (230 GPa) Wet (ANSYS)</i>	51
Tabel 3. 4 Variasi Penelitian.....	52
Tabel 3. 5 Tabel Uji Konvergensi <i>Meshing</i>	58
Tabel 3. 6 Perbandingan antara Hasil Kalkulasi Manual dengan ANSYS Material Designer.	61
Tabel 3. 7 <i>Orthotropic Stress Limits</i>	62
Tabel 4. 1 Tabel Data Kumulatif Hasil Simulasi.....	83
Tabel 4. 2 Ketebalan Total Komposit vs Kekuatan <i>Running Blade</i>	84
Tabel 4. 3 Perbandingan Spesifikasi <i>Running Blade</i> Kenaf/ Epoksi dengan <i>Running Blade Epoxy Carbon Woven (230 GPa) Wet</i>	89

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

Pada BAB I ini dijelaskan mengenai hal yang mendasari dilakukannya penelitian tugas akhir ini. Substansi pada BAB pendahuluan sendiri mencakup latar belakang, perumusan masalah, tujuan, batasan masalah atau ruang lingkup, dan manfaat penelitian tugas akhir.

1.1 Latar Belakang

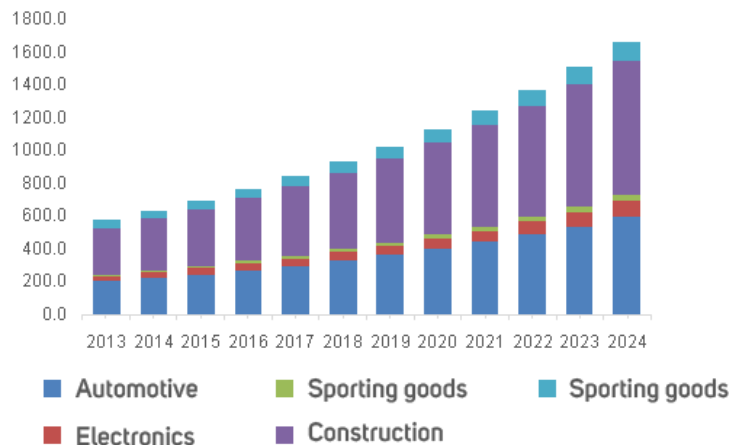
Dewasa ini di Indonesia, kebutuhan prostetik meningkat seiring dengan bertumbuhnya pula kelompok individu yang berkebutuhan khusus atau biasa juga disebut dengan tuna daksa. Tuna daksa adalah ketidakmampuan seseorang secara fisik untuk menjalankan fungsi tubuh, karena tidak lengkapnya anggota tubuh yang disebabkan sejak lahir, kecelakaan sehingga harus diamputasi, dan adanya gangguan neuromuscular (Mangunsong, 1998). Berdasarkan data dari Survei Sosial Ekonomi Nasional (SUSENAS) pada tahun 2019, jumlah penyandang disabilitas di Indonesia mencapai 9,7% dari total penduduk di Indonesia atau sekitar 26 juta jiwa.

Oleh karena itu, dalam dunia *engineering*, para insinyur mulai mengembangkan teknologi prostetik untuk menanggulangi kebutuhan tersebut. Prostesis adalah perangkat eksternal yang berfungsi untuk menggantikan bagian tubuh yang hilang (David, 2014). Oleh karena itu, idealnya prostesis harus nyaman dipakai, mudah dipasang dan dilepas, ringan, tahan lama, estetis, berfungsi dengan baik secara mekanis dan membutuhkan perawatan yang praktis (Eva, 2010).

Olahraga lari telah menjadi salah satu kompetisi yang paling spektakular pada olimpiade *paralympic*. Lari cepat dengan menggunakan prostetik khususnya *running blade* telah mencapai level performa yang cukup tinggi sehingga menuai kontroversi mengenai keadilan atlet yang menggunakan prostetik dan atlet yang memiliki anggota tubuh lengkap. Dari sisi lainnya perhatian dan antusiasme dari para penyandang disabilitas terhadap olahraga meningkat seiring dengan perkembangan dari kaki prostetik yang khusus dirancang untuk atlet (Hobara, 2014).

Foot-ankle system merupakan komponen yang menjadi tumpuan bawah yang melakukan kontak terhadap permukaan tanah pada *lower-limb prostheses*. *Foot-ankle system* sendiri memiliki banyak tipe salah satunya tipe *running blade*. *Running blade* sendiri merupakan prostetik yang dirancang khusus untuk memenuhi kebutuhan atlet penyandang cacat alat gerak bagian bawah. *Running blade* sendiri biasanya di manufaktur dengan material komposit seperti *carbon fiber – epoxy* agar dapat memenuhi kebutuhan akan kaki prostesis bawah lutut untuk atlet yaitu memiliki kekuatan dan kekakuan mekanik yang tinggi untuk menahan beban, ringan, memiliki faktor keamanan, serta memiliki respon dinamis yang mencukupi kebutuhan.

Komposit sendiri merupakan gabungan dari dua material atau lebih yang dapat dibedakan secara makroskopis. Komposit terdiri dari matriks dan penguat. Pada era teknologi industri seperti sekarang ini, perkembangan teknologi komposit juga berkembang pesat. Riset dunia tidak hanya berfokus pada pengembangan teknologi komposit sintetis, tapi juga memiliki kiblat baru yaitu komposit alam dikarenakan sifat istimewanya yaitu dapat di daur ulang atau dalam istilah moderen yaitu terbarukan. Komposit berpenguat serat alam mendapatkan perhatian karena potensinya besar serta arah pengembangan komposit tersebut menuju material alternatif pengganti logam, paduan maupun serat karbon. Alasan memilih serat alam sebagai pengganti serat sintetis ialah karena komposit alam memiliki beberapa keunggulan apabila disandingkan dengan komposit sintetis yaitu memiliki sifat mekanik yang dapat bersaing, memiliki sifat isolator listrik, panas, dan suara serta tahan korosi dan juga dapat terurai secara alami serta memiliki fungsi ekonomi yang lebih baik (Jonathan et al, 2008).



Gambar 1. 1 Aplikasi Serat Alam dalam Dunia Manufaktur Eropa beserta Proyeksinya (Grand View Research Inc, 2018)

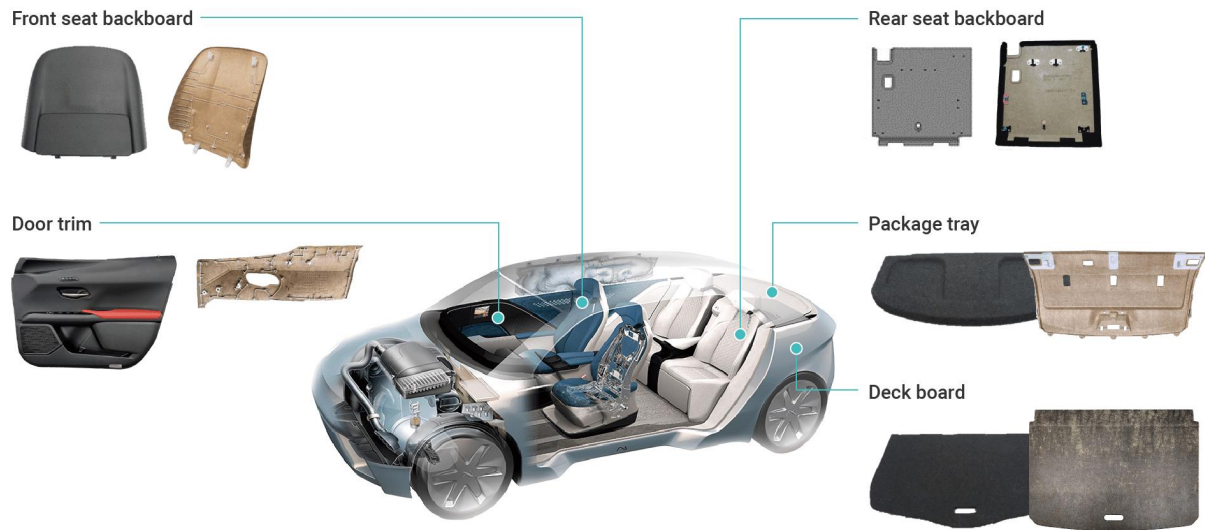
Karena kelebihan tersebut, para ilmuwan dan insinyur mencoba melakukan berbagai penelitian mengenai pemanfaatan komposit berpenguat serat alam sebagai bahan produksi. Dalam prosesnya, para ilmuwan dan insinyur tersebut menitikberatkan riset dalam mendapatkan *engineering data* dari serat alam tersebut apakah memenuhi standar keamanan maupun ekonomis dari produk yang ingin diproduksi. Untuk aplikasi serat alam dalam dunia manufaktur dapat dilihat pada Gambar 1.1.

Kenaf atau *Hibiscus cannabinus L.*, merupakan tanaman yang banyak ditemui di benua Asia dan Afrika. Di Indonesia sendiri tanaman kenaf banyak ditemui di daerah Jawa Timur, Jawa Barat, dan Lampung (Santoso, 2009). Kenaf sendiri memiliki keistimewaan yaitu sifatnya yang tangguh dan tidak perlu banyak melakukan perawatan agar tumbuhan ini dapat tumbuh dengan sempurna. Kenaf memiliki sifat yang mirip dengan tumbuhan kelapa karena seluruh bagiannya yang dapat dimanfaatkan. Mulai dari daunnya yang digunakan sebagai pakan ternak, bijinya dapat digunakan sebagai bahan baku minyak goreng, kayunya dimanfaatkan sebagai bahan baku furnitur serta seratnya yang digunakan sebagai bahan baku kertas, kerajinan tangan dan masih banyak lagi. Namun pada dewasa ini kenaf telah digunakan untuk kegunaan yang lebih luas lagi, yaitu sebagai bahan baku dari komposit.

Universitas Brawijaya sendiri telah melakukan riset mengenai pemanfaatan limbah dari serat kenaf dimana limbah serat kenaf ini diolah menjadi komposit dengan matriks polyester dan dilakukan pengujian tarik serta uji *flexural*. Hasilnya mengesankan dimana kekuatan tarik komposit jenis *unidirectional* memiliki kekuatan tarik sebesar 76.56 MPa. Lebih tinggi dari jenis *random* sebesar 26.78 MPa dan *woven* 21.44 MPa sejalan dengan pengujian *flexural properties*nya dimana untuk jenis *unidirectional* memiliki *flexural strength* sebesar 153.1 MPa sementara untuk *random* sebesar 69.21 MPa dan *woven* sebesar 24.63 MPa. Hasil ini mengesankan mengingat serat kenaf yang digunakan merupakan serat limbah.

Berbagai riset telah dilakukan mengenai pemanfaatan serat kenaf sebagai material pengganti dan hybrid dari *fibreglass* seperti E-Glass dan S-Glass serta pemanfaatan seratnya sebagai *filler* dan insulasi (Liu, 2003). Salah satu industri manufaktur otomotif terbesar di dunia yaitu PT Toyota Motors telah menggunakan serat ini sebagai material pada produk produk otomotif mereka yaitu mobil kijang khususnya pada bagian body dalam, *frame*, dan karpet. Pertimbangannya ialah karena untuk mengurangi emisi CO₂ tanpa mengurangi kualitas dari *sparepart*. Serat ini memiliki spesifikasi yang sesuai dengan kebutuhan dari perusahaan serta mengurangi berat *sparepart* 20% dibandingkan dengan *sparepart* konvensional yang juga berpengaruh terhadap *fuel economy* dimana kendaraan perlu tenaga yang lebih kecil untuk

bergerak sehingga konsumsi bahan bakar juga menurun. Adapun pemanfaatannya dapat dilihat pada Gambar 1.2.



Gambar 1. 2 Pemanfaatan Serat Kenaf oleh PT Toyota Motors (Puslima, 2013)

Tiap bulannya PT Toyota Astra Motor memproduksi sekitar 5.000-unit mobil kijang, dimana tiap mobil membutuhkan 11 kg serat kenaf, sehingga membutuhkan 55-ton serat kenaf per bulannya yang seharusnya dapat dipenuhi dari produk hasil dalam negeri saja (Puslima, 2013). Karena kebutuhan dan potensi dari serat kenaf yang tinggi ini, penulis mencoba melakukan simulasi untuk pengaplikasian serat kenaf sebagai material komposit pembentuk kaki prostetik tipe *running blade*.

1.2 Rumusan Masalah

Dalam penelitian ini terdapat rumusan masalah, yaitu:

1. Bagaimana pengaruh orientasi sudut serat dan ketebalan terhadap kekuatan dari kaki prostetik tipe *running blade* dari komposit kenaf/ epoksi?
2. Bagaimana perbedaan kekuatan kaki prostetik tipe *running blade* dari komposit kenaf/ epoksi dengan komposit *epoxy – carbon woven (230 GPa) wet*

1.3 Batasan Masalah atau Ruang Lingkup

Dalam penelitian ini terdapat batasan masalah yang perlu diperhatikan dan diaplikasikan, yaitu:

1. Material yang digunakan terdiri dari serat kenaf sebagai *reinforcement* dan resin epoksi sebagai matriks serta *epoxy – carbon woven (230 GPa) wet*.
2. Data dari serat kenaf diambil berdasarkan pada jurnal penelitian.
3. Data dari resin epoksi dan *epoxy – carbon woven (230 GPa) wet* diambil dari perangkat lunak ANSYS Workbench 2019.
4. *Material Properties* dari komposit yang dirancang didapatkan melalui analisis dari *tools Material Designer ANSYS*.
5. Jenis mikrostruktur komposit yang digunakan adalah jenis *unidirectional*.
6. Fraksi volume serat kenaf dari komposit yang dirancang adalah 40%.
7. Variasi sudut serat yang digunakan pada penelitian ini adalah [0/0], [90/90], [0/90], [0/90]_s, [±45], [±45]_s.
8. Ketebalan maksimal dari desain *running blade* sebesar 4 cm.

9. Standar pengujian yang dilakukan mengacu pada standar pengujian level P3 *Ultimate Static Force* ISO 10328 (2016).
10. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak SOLIDWORKS 2019.
11. Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ANSYS Workbench 2019.

1.4 Tujuan Penelitian

Dalam penelitian ini, terdapat beberapa tujuan penelitian yang ingin dicapai, yaitu:

1. Mengetahui dan menganalisis pengaruh orientasi sudut dan ketebalan terhadap kekuatan dari kaki prostetik tipe *running blade* dari komposit kenaf/ epoksi.
2. Mengetahui dan menganalisis perbedaan kekuatan kaki prostetik tipe *running blade* dari material komposit kenaf/ epoksi dengan komposit *epoxy – carbon woven* (230 GPa) *wet*.

1.5 Manfaat Penelitian

Dalam penelitian ini terdapat beberapa manfaat yang diharapkan, yaitu:

1. Penelitian ini diharapkan agar dapat digunakan sebagai referensi dari tugas akhir selanjutnya.
2. Penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai referensi maupun studi literatur pada perancangan kaki prostetik tipe *running blade* agar dapat dioptimalisasikan kembali nantinya dengan proses perancangan yang lebih efisien serta pengujian lebih lanjut.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada BAB II ini dijelaskan mengenai dasar teori dan kajian pustaka yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini. Adapun dasar teori yang digunakan meliputi prostetik, ISO 10328, komposit, material penyusun komposit, *rules of mixtures*, mekanika, teori kegagalan, metode elemen hingga, serta penelitian terdahulu.

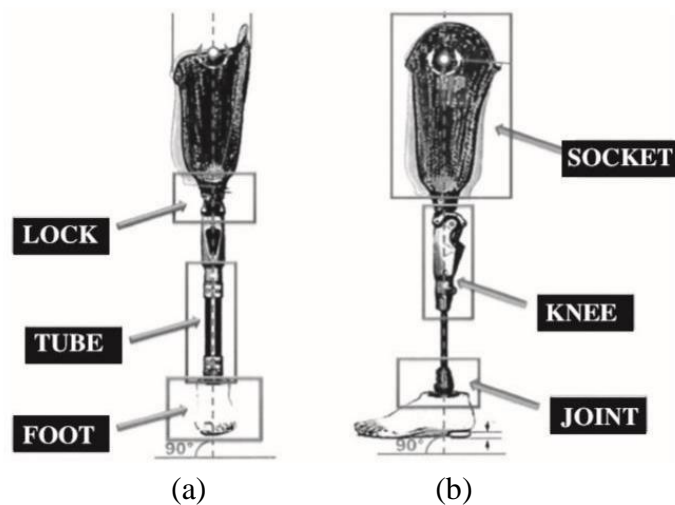
2.1 Dasar Teori

2.1.1 Prostetik

Prostheses atau prostetik merupakan perangkat yang digunakan untuk menggantikan bagian tubuh manusia (Irawan, 2009). *Prostheses* juga merupakan perangkat yang digunakan untuk merealisasikan tindakan korektif dalam jumlah besar yang diterapkan pada amputasi tubuh bagian atas maupun bawah. Selain itu, prostetik dirancang untuk meniru fungsi sambungan dan kinematis pada kerangka pasien (Dhokia, 2017).

Berdasarkan bagian amputasi pada anggota gerak bawah *prosthesis* dibedakan menjadi dua, yaitu *prosthesis* atas lutut (*transfemoral amputees*) dan *prosthesis* bawah lutut (*transtibial amputees*) (Craig, 2005).

Kekuatan dan tingkat aktivitas bagian yang teramputasi menentukan jenis dari *prosthesis*. Secara garis besar bagian mekanis dari *prosthesis* lutut, terdiri dari palang persendian, lutut polidentris, dan sumbu tunggal pada tengah *prosthesis* (Phanphet, 2017). Untuk bagian yang lebih spesifik dapat dilihat pada Gambar 2.1.

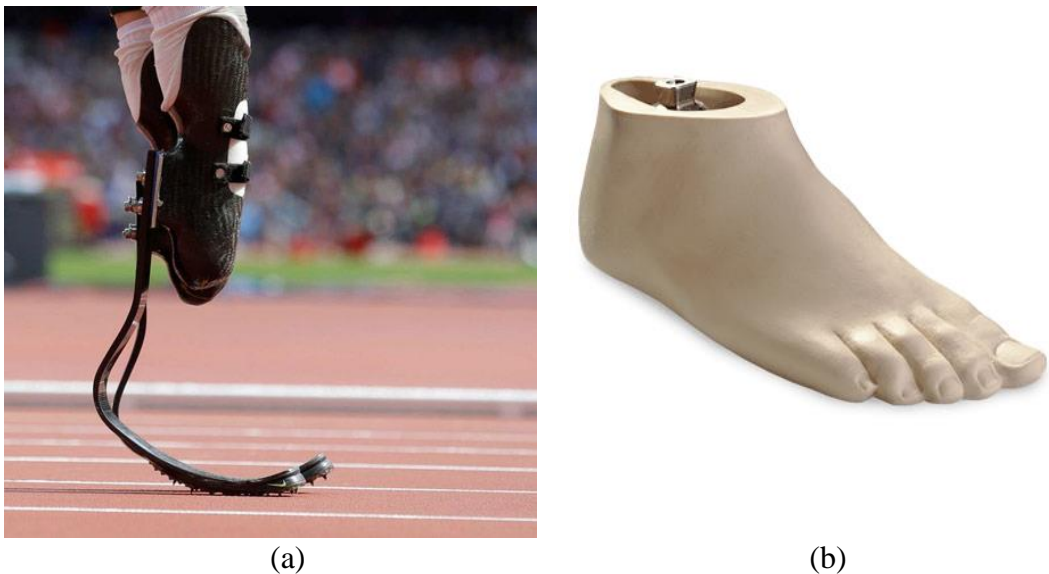


Gambar 2. 1 *Transfemoral* atau Prostetik Lutut Atas; (a) Tampak Depan, (b) Tampak Samping (Facoetti, et al., 2010)

1. *Foot-ankle*

Foot atau dalam bahasa Indonesia disebut sebagai kaki dasar merupakan bagian yang menjadi sebuah kesatuan dengan ankle. *Foot-ankle* merupakan komponen yang memiliki fungsi sebagai sebuah tumpuan yang akan membantu seseorang ketika berjalan. *Foot-ankle* harus memiliki beberapa kriteria agar dapat digunakan dengan baik, di antaranya harus mampu menopang berat tubuh ketika berdiri ataupun berjalan. Selanjutnya harus memiliki bentuk menyerupai kaki pada umumnya sehingga mempermudah pergerakan sendi lutut ketika berdiri. Kriteria selanjutnya harus dapat meredam getaran saat melakukan kontak ketika berjalan dan

harus cepat menyesuaikan posisi mendatar pada kaki. Untuk gambarnya dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 *Foot-Ankle System*; (a) *Running Blade* dan Konvensional (Iraola, 2018)

Pada penelitian ini jenis *foot-ankle* difokuskan kepada jenis *running blade*, *running blade* sendiri merupakan jenis *foot-ankle* yang khusus dirancang khusus untuk atlet. *Running blade* sendiri biasanya terbuat dari material *pure carbon fiber* atau *fiberglass* atau komposit dengan resin epoksi atau poliester. Alasan pemilihan material material tersebut yakni karena material tersebut memiliki kekuatan dan kekakuan mekanik yang tinggi karena dari fungsi *foot-ankle* sendiri yang merupakan tumpuan beban dari berat manusia. Kemudian desainnya disesuaikan dengan fungsi dari *running blade* yaitu difungsikan untuk berlari dan melompat. Mengutip dari Ari setiadi, desain *foot-ankle* yang baik ialah yang mampu menopang berat tubuh seseorang ketika berjalan maupun berdiri, dan juga bentuknya menyerupai kaki pada manusia normal sehingga dapat mempermudah pergerakan sendi lutut ketika berdiri atau berjalan (Ari Setiadi, 2018).

2.1.2 ISO 10328 (2016)

ISO 10328 (2016): *Prosthetics – Structural Testing of Lower-limb Prostheses – Requirements and Test Methods* merupakan standar yang dirancang oleh *International Organization for Standardization* khusus untuk produk produk prostetik alat gerak bagian bawah. ISO 10328 mengatur standar mulai dari standar geometri sampai standar pengujian. Dimana produk produk prostetik yang akan di distribusikan kepada masyarakat haruslah memenuhi standar keamanan yang telah di tetapkan oleh ISO.

Geometri prostetik alat gerak bagian bawah yang diatur oleh ISO sudah disesuaikan dengan antropometri dari kaki manusia. Sementara untuk pembebanannya sudah dirancang sedemikian rupa supaya produk prostetik dapat menunjang dengan aktifitas yang akan dilakukan oleh pengguna serta juga mempertimbangkan pembebanan pembebanan ekstrim akibat kegiatan yang mungkin terjadi.

Pembebanan pada standar ISO 10328 merupakan pembebanan yang kompleks karena mengikuti dari *actual gait analysis* atau siklus aktual berjalan dari manusia. Oleh karena itu diperlukan beberapa pembebanan yang bisa dilakukan studi eksperimen terhadap produk kaki prostetik atau di simulasikan.

Kondisi pembebanan dibagi menjadi dua kategori yaitu pembebanan khusus untuk produk terpisah atau *separate structural test* dan pembebanan untuk satu bagian utuh kaki prostetik atau *principal structural test*. Kondisi *separate structural test* dibagi kedalam dua kategori dengan dua kriteria yang harus dipenuhi yaitu *proof test* dan *ultimate static force*. *Proof test* merupakan pembebanan dimana produk kaki prostetik dapat menerima beban tanpa mengganggu fungsi dari kaki prostetik tersebut atau dalam kata lain masih dapat berfungsi

secara sempurna. Sementara untuk *ultimate static force* merupakan beban ekstrim yang diberlakukan ketika manusia melakukan aktifitas ekstrem sehingga beban yang diberikan bisa 5-6 kali dari berat aktual pengguna sehingga produk prostetik tersebut tidak dapat berfungsi sebagaimana mestinya.

Pada pembebanan terdapat beberapa level, yaitu P3, P4, P5, P6, P7, dan P8. P3 adalah level untuk berat badan kurang dari 60 kg, P4 untuk kurang dari 80 kg, P5 kurang dari 100 kg, P6 kurang dari 125 kg, P7 untuk kurang dari 150 kg, dan P8 untuk kurang dari 175 kg. Untuk tabel pembebanan untuk level P3, P4, dan P5 dapat dilihat pada Tabel 2.1. Untuk level P6, P7, dan P8 dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 1 Test forces of All Separate Tests on Ankle-foot Units and Prescribed Number of Cycles of the Cyclic Test, for Test Loading Level P3, P4, and P5 (ISO 10328 : 2016)

Test procedure and test load			Unit	Test loading level (Px) and test loading condition (I, II)					
				P5		P4		P3	
				Heel loading, F _{1x}	Forefoot loading, F _{2x}	Heel loading, F _{1x}	Forefoot loading, F _{2x}	Heel loading, F _{1x}	Forefoot loading, F _{2x}
Static test procedure	Proof test force	F _{1sp} , F _{2sp}	N	2240	2240	2065	2065	1610	1610
	Ultimate static force	F _{1su} , lower level F _{2su} , lower level	N	3360	3360	3098	3098	2415	2415
		F _{1su} , upper level F _{2su} , upper level	N	4480	4480	4130	4130	3220	3220
Cyclic test procedure	Minimum test force	F _{1cmin} , F _{2cmin}	N	50					
	Cyclic range	F _{1cr} , F _{2cr}	N	1280	1280	1180	1180	920	920
	Maximum test force	F _{1cmax} , F _{2cmax} F _{xcmax} =F _{xcmin} +F _{xcr}	N	1330	1330	1230	1230	970	970
	Mean test force	F _{1cmean} , F _{2cmean} F _{xcmean} =0.5(F _{xcmin} +F _{xcmax})	N	690	690	640	640	510	510

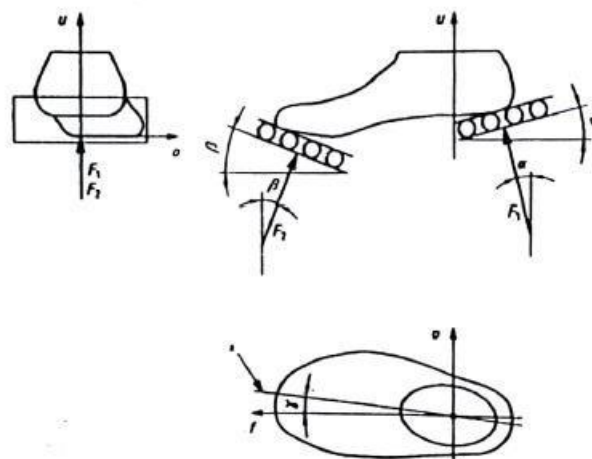
Test procedure and test load		Unit	Test loading level (Px) and test loading condition (I, II)					
			P5		P4		P3	
			Heel loading, F _{1x}	Forefoot loading, F _{2x}	Heel loading, F _{1x}	Forefoot loading, F _{2x}	Heel loading, F _{1x}	Forefoot loading, F _{2x}
Cyclic amplitude	F _{1ca} , F _{2ca} F _{xca} = 0.5F _{xcr}	N	640	640	590	590	460	460
Final static force	F _{1fin} , F _{2fin} F _{xfin} = F _{xsp}	N	2240	2240	2065	2065	1610	1610
Prescribed number of cycles		1	2 x 10 ⁶					

Table 2. 2 Test Forces of All Separate's Tests on Ankle foot Devices and Foot Units and Prescribed Number of Cycles of the Cyclic Test for Test Loading Level P6, P7, and P8 (ISO 10328: 2016)

Test procedure and test load		Unit	Test loading level (Px) and test loading condition (I, II)						
			P8		P7		P6		
			Heel loading F _{1x}	Forefoot loading F _{2x}	Heel loading F _{1x}	Forefoot loading F _{2x}	Heel loading F _{1x}	Forefoot loading F _{2x}	
Static test procedure	Proof test force	F _{1sp} , F _{2sp}	N	3200	3200	2900	2900	2490	2490
	Ultimate static force	F _{1su, lower level} , F _{2su, lower level}	N	4450	4450	4100	4100	3760	3760
		F _{1su, upper level} , F _{2su, upper level}	N	5700	5700	5300	5300	4880	4880
Cyclic test procedure	Minimum test force	F _{1cmin} , F _{2cmin}	N	50					
	Cyclic range	F _{1cr} , F _{2cr}	N	2050	2050	1770	1770	1530	1530

<i>Test procedure and test load</i>		<i>Unit</i>	<i>Test loading level (Px) and test loading condition (I, II)</i>					
			<i>P8</i>		<i>P7</i>		<i>P6</i>	
			<i>Heel loading</i> F_{1x}	<i>Forefoot loading</i> F_{2x}	<i>Heel loading</i> F_{1x}	<i>Forefoot loading</i> F_{2x}	<i>Heel loading</i> F_{1x}	<i>Forefoot loading</i> F_{2x}
<i>Maximum test force</i>	F_{1cmax}, F_{2cmax} $F_{xcmax} = F_{xcmin} + F_{xcr}$	N	2100	2100	1820	1820	1580	1580
<i>Mean test force</i>	F_{1cmean}, F_{2cmean} $F_{xcmean} = 0.5 (F_{xcmin} + F_{xcmax})$	N	1075	1075	935	935	815	815
<i>Cyclic amplitude</i>	F_{1ca}, F_{2ca} $F_{xca} = 0.5 F_{xcr}$	N	1025	1025	885	885	765	765
<i>Test procedure and test load</i>		<i>Unit</i>	<i>Test loading level (Px) and test loading condition (I, II)</i>					
			<i>P8</i>		<i>P7</i>		<i>P6</i>	
			<i>Heel loading</i> F_{1x}	<i>Forefoot loading</i> F_{2x}	<i>Heel loading</i> F_{1x}	<i>Forefoot loading</i> F_{2x}	<i>Heel loading</i> F_{1x}	<i>Forefoot loading</i> F_{2x}
<i>Final static force</i>	F_{1fin}, F_{2fin} $F_{xfin} = F_{xsp}$	N	3200	3200	2900	2900	2490	2490
<i>Prescribed number of cycles</i>		1	2×10^6					

Pada Gambar 2.3 merupakan referensi dan ilustrasi dari pembebanan diatas.



• Longitudinal axis of foot corresponding to 6.7.2.

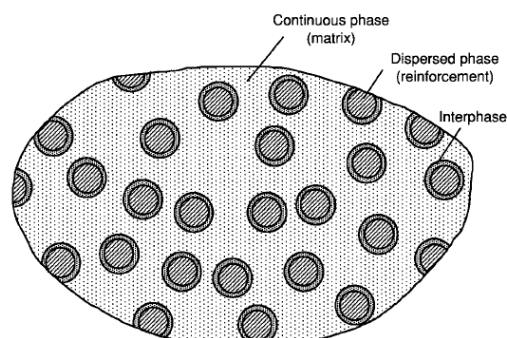
NOTE The test mechanism used to apply F_1 and F_2 , each should allow low-friction motion in both tangential directions, realized e.g. by ball bearings.

Gambar 2. 3 Referensi Pengujian untuk Bagian *Foot-ankle* (ISO 10328 : 2016)

2.1.2 Komposit

1. Pengertian Komposit

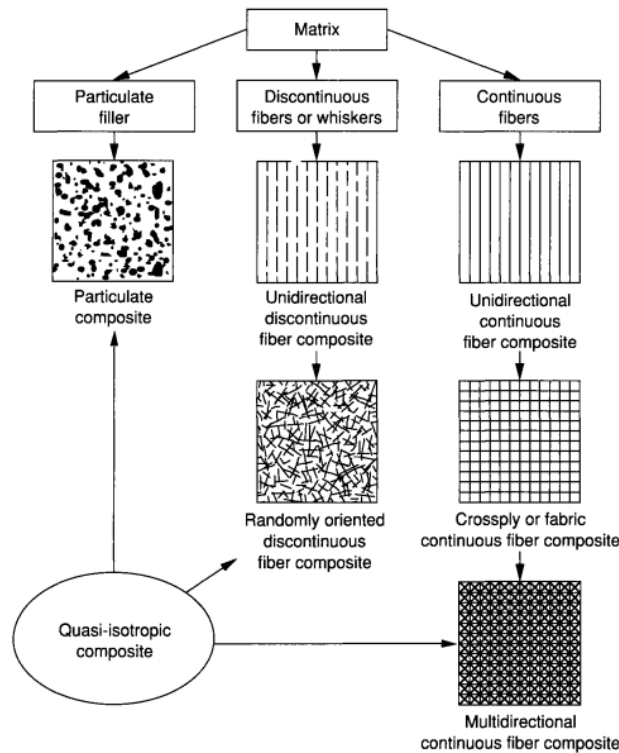
Komposit adalah suatu material yang terbentuk dari dua atau lebih komponen (bahan penguat dan matriks), yang memiliki karakteristik yang berbeda dengan bahan-bahan pembentuknya dan secara makroskopis dicampur dengan tetap memiliki batas fasa yang jelas dan teridentifikasi (Chawla, 1987). Bahan komposit pada umumnya terdiri dari dua unsur, yaitu serat (*fiber*) sebagai penguat atau *reinforcement* dan matriks sebagai bahan pengikat serat. Sebagai penguat, serat digunakan untuk menahan gaya-gaya yang bekerja pada bahan komposit, dan matriks berfungsi melindungi serta mengikat serat agar dapat bekerja dengan baik terhadap gaya-gaya yang terjadi. Untuk deskripsi gambarnya dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Fasa Pembentuk Komposit (Daniel & Ishai, 2006)

2. Klasifikasi Komposit

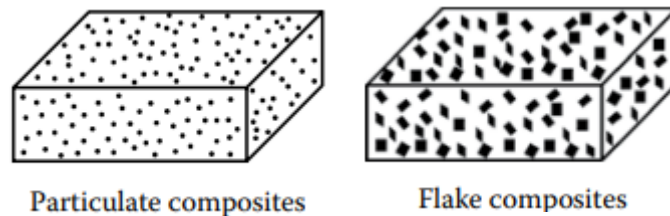
Berdasarkan jenis penguatnya, komposit dibagi menjadi 3 macam, yaitu komposit dengan penguat partikel/serpihan, struktural, dan fiber seperti pada Gambar 2.5:



Gambar 2. 5 Klasifikasi Komposit (Daniel & Ishai, 2006)

A. Komposit Partikel dan Serpilh (*Particulate and Flake Composite*)

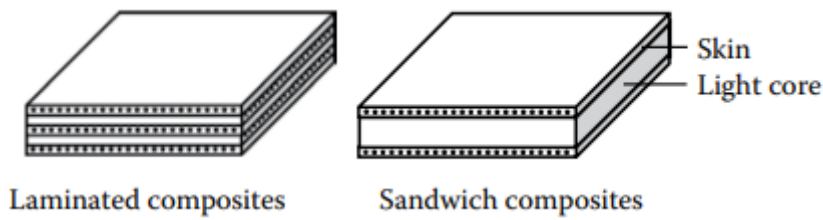
Komposit partikel adalah salah satu jenis komposit dimana dalam matriksnya ditambahkan material lain berupa serbuk/serpilh. Dalam komposit partikel atau serpilh, material penambah terdistribusi secara acak. Sebagai contoh adalah beton. Contoh ilustrasi komposit partikel dan butir dapat dilihat pada Gambar 2.6:



Gambar 2. 6 Komposit Partikel dan Komposit Serpilh (Kumar, 2017)

B. Komposit Struktural

Komposit struktural ialah komposit yang terdiri dari lembaran lembaran yang berlapis-lapis, paling sedikit terdiri dari dua lapis yang digabung menjadi satu, dimana setiap lapisan pembentuk memiliki karakteristik sifat tersendiri, serta terdiri dari berbagai arah serat. Komposit struktural dibagi lagi antara *laminated composite* dan *sandwich composite*. *Plywood*, yang terdiri dari *layer* alternatif berupa kayu mengandung lem dengan layer serat kayu yang tegak lurus layer terdekat, Contoh penyusunan komposit struktural dapat dilihat pada Gambar 2.7.

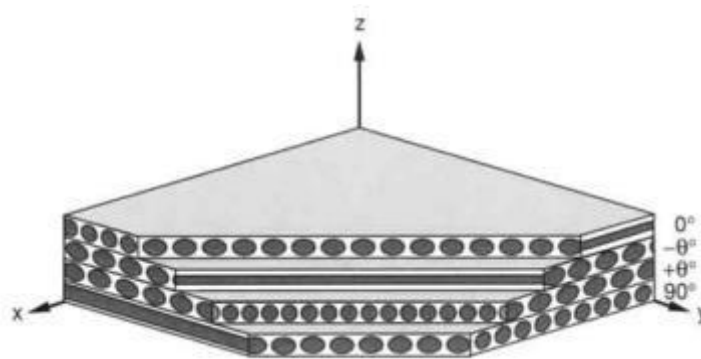


Gambar 2. 7 *Laminated Composites and Sandwich Composites* (Kumar, 2017)

Komposit laminasi didesain berdasarkan berapa banyak lapisan, tipe, arah orientasi serat, dan urutan penyusunan setiap laminanya. Konfigurasi yang menunjukkan komposisi lapisan dan urutan penyusunan lamina disebut sebagai *layup*. Berikut adalah beberapa contoh penyusunan lamina:

- Unidirectional six-ply:* $[0/0/0/0/0/0] = [0_6]$
- Crossply symmetric:* $[0/90/0/90/90/0/90/0] = [0/90]_{2s}$
 $[0/90/90/0] = [0/90]_s$
 $[0/90/0] = [0\overline{90}]_s$
- Angle-ply symmetric:* $[+45/-45/-45/+45] = [\pm 45]_s$
 $[30/-30/30/-30/-30/30/-30/30] = [\pm 30]_{2s}$
- Angle-ply asymmetric:* $[30/-30/30/-30/30/-30/30/-30] = [\pm 30]_4$
- Multidirectional:* $[0/45/-45/-45/45/0] = [0/\pm 45]_s$
 $[0/0/45/-45/0/0/0/0/-45/45/0/0] = [0_2/\pm 45/0_2]_s$
 $[0/15/-15/15/-15/0] = [0/\pm 15/\pm 15/0]_T = [0/(\pm 15)_2/0]_T$
- Hybrid:* $[0^K/0^K/45^C/-45^C/90^G/-45^C/45^C/0^K/0^K]_T = [0^K_2/\pm 45^C/90^G]_s$

Untuk gambar dari orientasi sudut penyusunan komposit dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2. 8 *Laminasi Multidirectional* (Daniel & Ishai, 2006)

Di mana makna dari angka dan simbol dijabarkan sebagai berikut:

Angka subscript = banyaknya lamina atau *laminates*

S = penyusunan simetris

T = banyaknya jumlah lamina

$\overline{\quad}$ (overbar) = lamina berada di tengah dan simetris

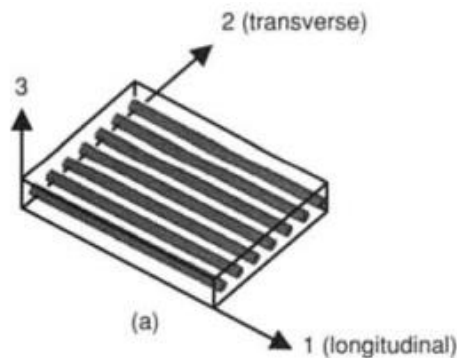
Makna dari huruf kapital seperti K, C, dan G mengartikan *Kevlar*, *Karbon*, dan *Glass Fiber*.

C. Komposit Serat (*Fiber Composite*)

Komposit serat merupakan komposit yang hanya terdiri dari satu lapisan yang menggunakan penguat berupa serat. Serat yang digunakan dapat berupa serat sintetis dan serat alam. Serat disusun secara acak maupun orientasi tertentu bahkan dapat juga dalam bentuk yang lebih kompleks seperti anyam (Schwartz, 1984). Komposit serat dapat dibagi berdasarkan penempatannya, yaitu:

1) *Unidirectional Fiber Composite*

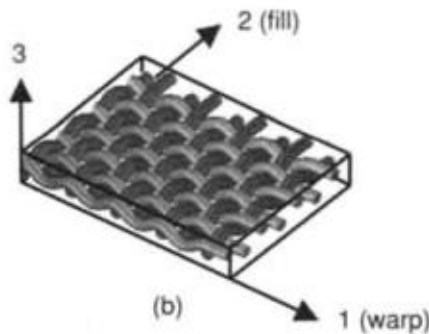
Tipe ini mempunyai susunan serat panjang dan lurus, membentuk lamina diantara matriksnya. Tipe ini mempunyai kelemahan pemisahan antar lapisan. Contoh *continous fiber composite* dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2. 9 *Continuous Fiber Composite* (Daniel & Ishai, 2006)

2) *Woven Fiber Composite (bi-directional)*

Komposit ini tidak mudah dipengaruhi pemisahan antar lapisan karena susunan seratnya mengikat antar lapisan. Susunan serat memanjang yang tidak begitu lurus mengakibatkan kekuatan dan kekakuan melemah. Contoh *woven fiber composite* dapat dilihat pada Gambar 2.10.

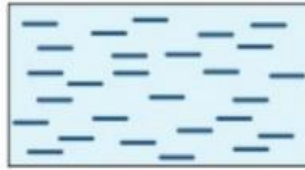


Gambar 2. 10 *Woven Fiber Composite* (Daniel & Ishai, 2006)

3) *Discontinuous Fiber Composite*

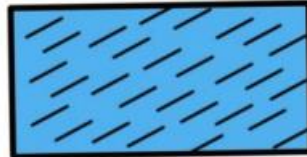
Discontinuous Fiber Composite adalah tipe komposit dengan serat pendek. Tipe ini dibedakan menjadi 3, yaitu *Aligned*, *Off- Axis*, dan *Random*. Untuk gambarnya dapat dilihat pada Gambar 2.11 sampai 2.13 secara berurutan.

a) *Aligned Discontinuous Fiber*



Gambar 2. 11 *Aligned Discontinuous Fiber* (Gibson, 1994)

b) *Off-axis Aligned Discontinuous Fiber*



Gambar 2. 12 *Off-axis Discintinous Fiber* (Gibson, 1994)

c) *Randomly Oriented Discontinuuous Fiber*



Gambar 2. 13 *Randomly Oriented Discontinuous Fiber* (Gibson, 1994)

d) *Hybrid Fiber Composite*

Hybrid fiber composite merupakan komposit gabungan antara tipe serat lurus dengan serat acak. Tipe ini digunakan supaya dapat mengganti kekurangan sifat dari kedua tipe dan dapat menggabungkan kelebihan keduanya. Untuk gambarnya dapat dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2. 14 *Hybrid Fiber Composite* (Gibson, 1994)

3. Faktor yang Memengaruhi Sifat-Sifat Mekanik Komposit

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi performa komposit, baik dari faktor serat penyusunnya maupun faktor matriksnya, yaitu:

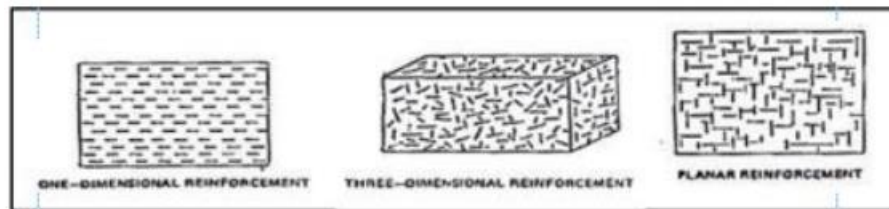
A. Faktor Serat

- Letak Serat

Ada 3 jenis orientasi letak serat, yaitu:

- *One dimensional reinforcement*, mempunyai kekuatan pada arah axis serat.

- *Two-dimensional reinforcement* (planar), mempunyai kekuatan pada dua arah atau masing-masing arah orientasi serat.
 - *Three-dimensional reinforcement*, mempunyai sifat isotropik, kekuatannya lebih tinggi dibanding dengan dua tipe sebelumnya.
- Untuk ilustrasi gambarnya dapat dilihat pada Gambar 2.15.

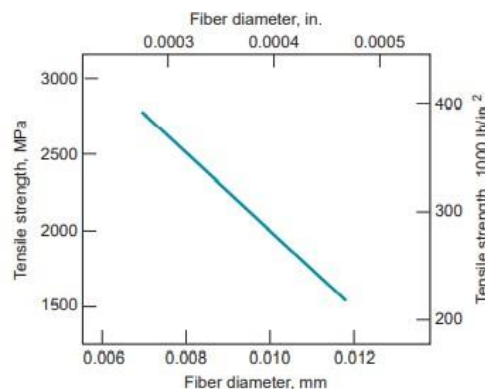


Gambar 2. 15 Orientasi Letak Serat (Schwartz, 1984)

- Panjang Serat

Serat panjang lebih kuat dibandingkan dengan serat pendek. Oleh karena itu panjang dan diameter sangat berpengaruh pada kekuatan maupun modulus komposit. Serat panjang (*continous fiber*) lebih efisien dalam peletakkannya dari pada serat pendek.
- Diameter Serat

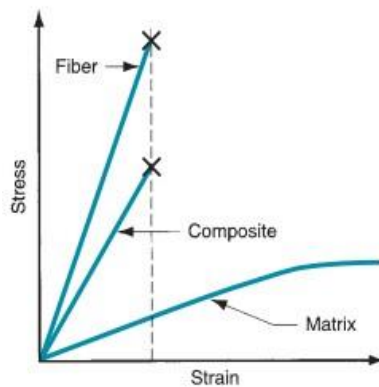
Diameter serat berpengaruh terhadap kekuatan serat. Semakin kecil diameter serat, maka menghasilkan kekuatan komposit yang tinggi. Sebagai contoh pada Gambar 2.16 dapat dilihat hubungan antara diameter serat dengan kekuatan tarik dari serat karbon.



Gambar 2. 16 Hubungan antara Kekuatan Tarik dengan Diameter dari Serat Karbon (Mikel, 2010)

B. Faktor Matriks

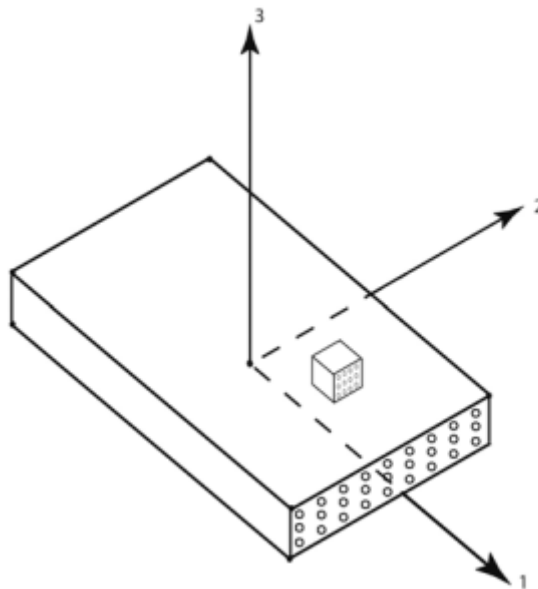
Matriks sangat berpengaruh dalam performa komposit. Tergantung dari matriks yang dipakai, dan tujuan pemakaian matriks tersebut. Secara alami, penggabungan dua material berbeda tidak selalu menguntungkan dan tidak terdapat peningkatan. Bahkan pada penggabungan itu bisa terdapat perlawanan antara satu sama lain seperti *thermal insulation versus thermal conductivity*. Oleh karena itu, pembuatan sebuah komposit harus memiliki karakteristik tertentu yang didesain sedemikian rupa agar dapat menyelesaikan tugasnya. Dengan pemilihan gabungan material yang saling menguntungkan maka akan terbentuk material baru yang memiliki kemampuan lebih dari material penyusunnya sehingga tercipta sinergitas antar material. Jika itu terjadi, komposit yang telah dibuat akan memiliki potensial terbaiknya. Secara umum karakteristik mekanis dari komposit dapat dilihat pada Gambar 2.17.



Gambar 2. 17 Sifat Serat, Matriks, dan Komposit (Groover, 2010)

4. ABD Matriks

Stiffness ABD Matriks adalah suatu matriks yang dapat menyatakan nilai dari kekakuan suatu material komposit. Matriks ini terdiri atas 3 matriks, yakni matriks A yang menyatakan nilai *extensional stiffness*, matriks B yang menyatakan nilai *coupling stiffness*, dan matriks D yang menyatakan nilai dari *bending stiffness*. Analisa struktur dari laminasi komposit dapat dilakukan dengan menggunakan *Classical Lamination Theory*. Tiap lapisan pada komposit dianggap *orthotropic* dan *linearly elastic*. *Orthotropic* adalah sifat material komposit, di mana kekuatan untuk tiap arah yang tegak lurus arah sumbu x, y, dan z berbeda-beda. Dalam aplikasinya pada material komposit, dapat diasumsikan kondisi *plane stress*, di mana kondisi ini hanya berfokus pada bagian *in plane*, sehingga arah *out of plane* dapat diabaikan pada material komposit. Jika ditunjukkan pada gambar 2.18, *plane stress* arah 3 (tiga) dapat diabaikan.



Gambar 2. 18 Lamina dengan Sistem Koordinat Material Utama (Voyiadjis & Kattan, 2005)

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

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

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

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

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

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

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

$$Q_{11} = \frac{S_{22}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2}$$

$$Q_{12} = -\frac{S_{12}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2}$$

$$Q_{22} = \frac{S_{11}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2}$$

$$Q_{66} = \frac{1}{S_{66}}$$

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

$$S_{11} = \frac{1}{E_1}$$

$$S_{12} = -\frac{\nu_{12}}{E_1}$$

$$S_{22} = \frac{1}{E_2}$$

$$S_{66} = \frac{1}{G_{12}}$$

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

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$Q_{66} = G_{12}$$

Nilai v_{21} didapat dengan menggunakan persamaan berikut:

$$v_{21} = \frac{E_2 v_{12}}{E_1}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

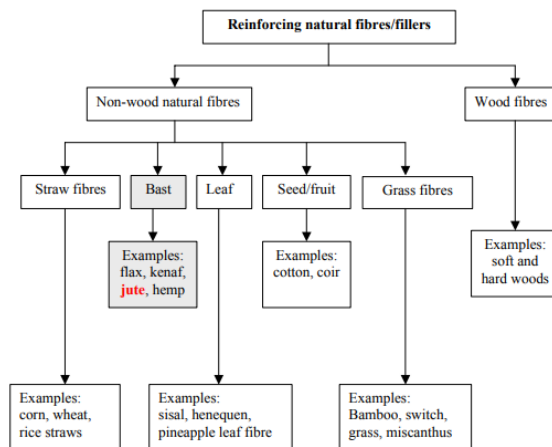
2.1.3 Natural Fibers

1. Klasifikasi Natural Fibers

Selanjutnya dijelaskan mengenai serat alam atau *natural fibers*. Secara umum serat alam yang berasal dari tumbuhan dapat dikelompokkan berdasarkan bagian tumbuhan yang diambil seratnya. Berdasarkan hal tersebut pengelompokkan dibedakan menjadi 3, yaitu:

1. Serat dari batang (*Bast Fiber*); contohnya serat jute, serat rami dan serat kenaf.
2. Serat dari daun (*Leaf Fiber*); contohnya serat sisal, serat nanas dan serat abaka.
3. Serat dari buah (*Seed Fiber*); contohnya serat kelapa

Untuk klasifikasi umum dari serat tumbuhan dapat dilihat pada Gambar 2.19.



Gambar 2.19 Klasifikasi Jenis Serat Alam (Loan, 2006)

Sebagai bahan penguat (*reinforcement*) pada struktur komposit, serat alam memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan serat sintetis yang selama ini digunakan, yaitu:

1. *Biodegradable*, yaitu kemampuan untuk dapat terurai secara alami sehingga tidak menimbulkan masalah berkepanjangan dalam hal limbah.
2. Merupakan sumber daya alam yang dapat diperbaharui.
3. Harganya relatif murah dan ketersediannya cukup melimpah di alam.

Dari segi sifat mekanik, serat alam ini memiliki variasi yang besar yang terjadi karena keberagaman pola tumbuh, seperti lokasi tumbuh, kondisi tanah, dan umur saat dipanen. Sehingga sifat mekanik serat yang berasal dari daerah yang berlainan untuk jenis serat yang sama bisa saja berbeda. Selain itu serat alam juga memiliki sifat hidrofilik yaitu mudah menyerap air. Hal ini dapat mempengaruhi sifat mekanik dari serat tersebut. Secara umum sifat mekanik dari beberapa serat alam dan sintetis dapat dilihat pada Gambar 2.20.

Properties of selected natural and manmade fibers [adapted from 3, 8].

Fiber	Density (g/cm ³)	Elongation (%)	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Refs.
Cotton	1.5–1.6	7.0–8.0	400	5.5–12.6	[6,7]
Jute	1.3	1.5–1.8	393–773	26.5	[6]
Flax	1.5	2.7–3.2	500–1500	27.6	[4]
Hemp	1.47	2–4	690	70	[4]
Kenaf	1.45	1.6	930	53	[4]
Ramie	N/A	3.6–3.8	400–938	61.4–128	[8]
Sisal	1.5	2.0–2.5	511–635	9.4–22	[8]
Coir	1.2	30	593	4.0–6.0	[9]
Softwood kraft pulp	1.5	4.4	1000	40	[9]
E-glass	2.5	0.5	2000–3500	70	[9]
S-glass	2.5	2.8	4570	86	[9]
Aramid (Std.)	1.4	3.3–3.7	3000–3150	63.0–67.0	[9]
Carbon (Std. PAN-based)	1.4	1.4–1.8	4000	230–240	[9]

Gambar 2. 20 Komparasi Sifat Mekanik dari Serat Alam (Ku et al., 2010)

1. Kenaf (*Hibiscus cannabinus L.*)

Kenaf atau Yute Jawa merupakan tumbuhan yang memiliki nama latin *Hibiscus cannabinus L.* Serat kenaf didapat dengan menguliti batang dari tumbuhan tersebut sehingga masuk kedalam kategori *bast fiber*. Kenaf merupakan tumbuhan yang tangguh karena dapat tumbuh di daerah tropis maupun subtropis dengan persebaran terbesar berada di benua Afrika dan Asia. Kenaf merupakan tumbuhan yang kuat karena memiliki ketahanan tinggi terhadap serangga sehingga memerlukan sedikit atau bahkan tidak perlu menggunakan pestisida untuk budidayanya. Tumbuhan kenaf juga memiliki toleransi tinggi terhadap air maupun kekeringan. Pohon kenaf biasanya tubuh hingga mencapai tinggi 3 meter, dengan ciri ciri warna hijau dan batangnya kadang memiliki duri yang cukup tajam. Untuk gambar dari tumbuhan ini dapat dilihat pada Gambar 2.21.



Gambar 2. 21 Tumbuhan Kenaf (a) dan Serat Kenaf (b) (BALITTAS, 2020)

Karena kelimpahannya kenaf sudah sering dibudidayakan di Indonesia, lahan kenaf banyak ditemukan di daerah Lampung, Jawa Barat, Jawa Tengah, Jawa Timur, dan Kalimantan Selatan. Kenaf memiliki rentang harga diantara Rp. 8.000,00 – Rp. 25.000,00 per kg tergantung pasar dan industrinya (Marantina, 2013). Kenaf ini mirip seperti kelapa dalam konteks fungsi karena hampir semua bagian tanaman bisa dimanfaatkan untuk bahan baku berbagai industri. Mulai dari daunnya yang mengandung protein kasar 24 persen yang biasa digunakan untuk pakan ternak unggas, juga biji kenaf yang memiliki kandungan lemak 20 persen yang bisa digunakan untuk bahan baku minyak goreng apalagi kenaf banyak mengandung asam lemak tidak jenuh. Kayu kenaf pun sangat baik digunakan sebagai bahan baku industri furnitur seperti pintu, jendela, kusen dan lain sebagainya. Serta seratnya juga sering digunakan sebagai bahan baku industri seperti kertas dan *pulp*, tekstil, karpet, kerajinan tangan dan lain sebagainya.

Serat kenaf sering pula dijuluki “*Golden Fiber*” karena keistimewanya tersebut serta sifat mekanik yang bisa dibilang diatas rata rata untuk kategori *natural fibre*. Karena keistimewannya tersebut pembudidayaan dari serat kenaf mulai di galakkan serta pula dilakukan riset demi riset untuk terus memajukan tanaman ini sehingga dapat dimanfaatkan lebih luas lagi. Diluar sana tumbuhan kenaf terus diteliti dan dijadikan material *hybrid* atau bahkan substitusi untuk material *fiberglass* seperti E-Glass dan S-Glass (Liu, 2003). Toyota Motors bahkan sudah menggunakan serat kenaf sebagai material baku untuk *sparepart* produk produk otomotif mereka. Contohnya untuk mobil kijang pada bagian *door trim*, karpet, dan sandaran kursi mereka sudah menggunakan material baku dari serat kenaf (Puslima, 2013).

Serat kenaf biasanya terbagi menjadi dua golongan yaitu kenaf panjang dan kenaf pendek. Untuk kenaf panjang ukurannya berkisar antara 10-30 mm sementara untuk kenaf pendek ukuran panjangnya berada diantara 1-6 mm serta memiliki diameter antara 75 hingga 125 μm (Ibrahim et al., 2018) untuk sifat mekaniknya kenaf panjang memiliki sifat mekanik yang lebih baik daripada kenaf pendek. Untuk *material properties single fiber test* kenaf dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Material Properties Single Fiber Kenaf

Entitas	Nilai	Referensi
Density (g/cm^3)	1,45	Saba et al., 2014
Poisson Ratio	0,324	Mariselvam & Logesh, 2015
Young Modulus (MPa)	11880	Ibrahim et al., 2018
Shear Modulus (MPa)	4486,4	ANSYS
Bulk Modulus (MPa)	11250	ANSYS
Tensile Strength (MPa)	267,69	Ibrahim et al., 2018
Diameter (μm)	75	Ibrahim et al., 2018

2.1.4 Resin Epoksi

Salah satu matriks polimer yang sering digunakan dalam berbagai macam industri adalah resin epoksi. Matriks resin epoksi tergolong matriks polimer *thermoset* yaitu matriksnya tidak akan meleleh kembali jika dipanaskan. Resin epoksi banyak digunakan tentu karena memiliki keunggulan dari berbagai macam faktor.

Untuk beberapa aplikasi kegunaan dari resin epoksi yaitu banyak dipakai untuk pengecoran, pelapisan, dan perlindungan bagian instalasi listrik. Resin yang telah diawetkan mempunyai sifat daya tahan kimia dan stabilitas dimensi yang baik, daya lekat pada material berbahan kaca dan logam yang baik juga dapat digunakan untuk membuat panel sirkuit cetak, tangki, dan cetakan. Lalu sifat resin epoksi yang tahan aus dan kejut, banyak digunakan untuk membuat cetakan tekan untuk pembentukan logam. Namun terdapat beberapa kelemahan atau kekurangan dari resin epoksi yaitu sifatnya yang agak getas sehingga mudah retak dan patah,

tidak terlalu ulet, dan biaya pembuatannya agak mahal dibandingkan dengan matriks polimer yang lainnya (Salam, 2007). Untuk *Material Properties* dari Resin Epoksi dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2. 4 *Material Properties* dari Resin Epoksi

Entitas	Nilai	Referensi
Density (g/cm ³)	1,16	ANSYS
Poisson Ratio	0,35	ANSYS
Young Modulus (MPa)	3780	ANSYS
Shear Modulus (MPa)	1400	ANSYS
Bulk Modulus (MPa)	4200	ANSYS
Tensile Strength (MPa)	54,6	ANSYS
Compressive Strength (MPa)	91	Bode, 2018

2.1.5 Rules of Mixtures

Rules of Mixtures (ROM) merupakan suatu metode yang dapat digunakan untuk menghitung sifat sifat pada komposit secara teoritis dengan menggunakan penjumlahan kekuatan tiap penyusun dengan menggunakan fraksi volume tiap penyusun tersebut.

1. Fraksi Volume

Fraksi volume pada komposit merupakan rasio antara serat dengan matriks yang digunakan untuk membuat suatu komposit. Fraksi volume dari suatu komposit berperan dalam menentukan sifat mekanik dari suatu material komposit yang dibentuk. Fraksi volume sendiri akan membagi presentase antara serat yang digunakan dengan matriks dari suatu komposit. Sifat mekanik dari sebuah material komposit ditentukan dengan adanya bentuk dan ukuran dari serat yang digunakan pada suatu komposit, kemudian fraksi volume dari suatu komposit akan ditentukan dari ikatan antara matriks dengan serat. Dalam penentuan prosentase pembagian antara matriks dengan serat, komposisi serat pada suatu komposit tidak dapat melebihi dari 50% atau dapat dikatakan matriks yang digunakan pada suatu komposit harus lebih dominan jika dibandingkan dengan serat. Komposisi matriks yang lebih dominan akan mengikat serat dengan lebih baik dan meningkatkan properti mekanik dari komposit yang dibentuk.

Sifat-sifat dari bahan komposit adalah pengaruh dari material penyusunnya. Sifat-sifat tertentu dari bahan komposit dapat dihitung melalui *rules of mixtures* atau aturan campuran, yang melibatkan perhitungan rata-rata berat dari bahan penyusun komposit. Massa jenis adalah contoh dari perhitungan rata-rata ini. Massa bahan komposit adalah jumlah massa fase matriks dan penguat yaitu:

$$m_c = m_m + m_r$$

Dimana:

m = Massa (kg)

c = Komposit

m = Matriks

r = *Reinforcement* atau Penguat.

Demikian pula, volume komposit adalah jumlah dari material penyusunnya:

$$V_c = V_m + V_r + V_v$$

Dimana:

V = Volume (cm³)

V_v = Voids dalam komposit

Massa jenis komposit adalah Massa dibagi dengan volume:

$$\rho_c = \frac{m_c}{V_c} = \frac{m_m + m_r}{V_c}$$

Karena massa matriks dan fase penguat adalah Massa jenis masing-masing yang dikalikan dengan volumenya, yaitu:

$$m_m = \rho_m V_m \text{ dan } m_r = \rho_r V_r$$

Lalu jika persamaan diatas disubstitusikan ke persamaan massa jenis, maka persamaannya menjadi:

$$\rho_c = f_m \rho_m + f_r \rho_r$$

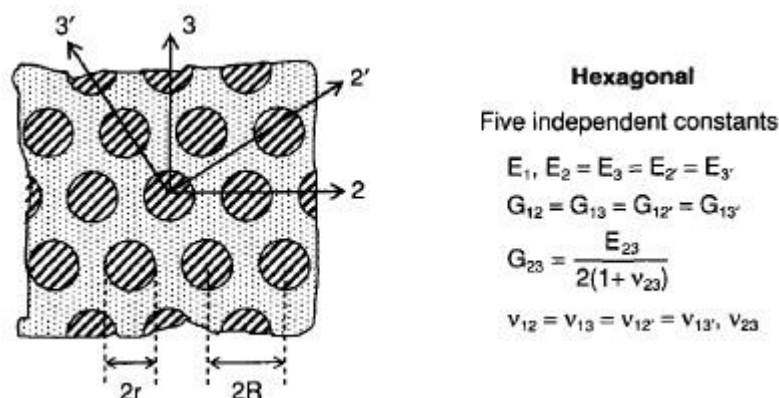
Di mana,

$$f_m = \frac{V_m}{V_c} \text{ dan } f_r = \frac{V_r}{V_c}$$

Merupakan fraksi volume matriks dan fase penguatnya.

2. Material Orthotropic Elasticity

Pada komposit dengan jenis *unidirectional* memiliki beberapa nilai dari *material properties*, nilai tersebut dibagi atas dua *properties*, yaitu *longitudinal properties* dan *transversal properties*. *Longitudinal properties* terbagi atas *young modulus* (E_1), *poisson ratio* (ν_{12} dan ν_{13}), dan *shear modulus* (G_{12} dan G_{13}). Kemudian, *transversal properties* terbagi atas *young modulus* (E_2 dan E_3), *poisson ratio* (ν_{23}), dan *shear modulus* (G_{23}). Untuk ilustrasi model geometri dari komposit jenis *hexagonal* dapat dilihat pada Gambar 2.22.



Gambar 2. 22 Model Geometri Serat Hexagonal (Daniel & Ishai, 2006)

Nilai massa jenis dapat dihitung dengan persamaan:

$$\rho c = v_f \rho_f + v_m \rho_m$$

Persamaan *longitudinal young modulus* pada elemen dengan hubungan matriks dan *fiber* dapat dituliskan menjadi:

$$E_1 = v_f E_f + v_m E_m$$

Sedangkan untuk nilai *young modulus* transversal atau E_2 dan E_3 dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

$$E_2 = \frac{E_m(1 + \xi \eta v_f)}{(1 - \eta v_f)}$$

Untuk mencari nilai *longitudinal shear modulus* G_{12} dan G_{13} serta *transversal shear modulus* G_{23} , dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

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

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

Untuk *longitudinal poisson ratio* (v_{12}) dan (v_{13}) serta *transversal poisson ratio* (v_{23}) dapat dihitung dengan persamaan berikut:

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

$$v_{23} = v_{13}$$

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

3. Material Orthotropic Stress Limit

Orthotropic stress limits adalah nilai kekuatan dari material komposit. Nilai ini dibagi atas 2 *properties*, yakni *longitudinal properties* dan *transversal properties*. *Longitudinal properties* terbagi atas *tensile strength X direction*, *compressive strength X direction*, *shear strength XY*, dan *shear strength XZ*. Sedangkan untuk *transversal properties* terbagi atas *tensile strength Y direction*, *tensile strength Z direction*, *compressive strength Y direction*, *compressive Z direction*, dan *shear strength YZ*.

Persamaan untuk *longitudinal tensile strength* pada komposit dibagi atas dua kondisi. Kondisi pertama adalah ketika nilai $\epsilon_m > \epsilon_f$ dan kondisi kedua adalah ketika nilai $\epsilon_m < \epsilon_f$ (Kumar, 2017).

Rumus perhitungan dari kedua kondisi tersebut adalah sebagai berikut:

Untuk nilai $\epsilon_m > \epsilon_f$

$$(\sigma_{x_c}^T)_{ult} = (\sigma_{x_f}^T) V_f + (\epsilon_{1_f}^T)_{ult} E_m (1 - V_f)$$

Untuk nilai $\epsilon_m < \epsilon_f$

$$(\sigma_{x_c}^T)_{ult} = (\epsilon_{1_m}^T) E_{1_f} V_f + (\sigma_m^T)_{ult} (1 - V_f)$$

Selanjutnya persamaan untuk *transverse tensile strength* pada komposit adalah sebagai berikut:

$$(\sigma_{y_c}^T)_{ult} = E_{2c} \left[1 + \left(\frac{E_m}{E_{2f}} - 1 \right) V_f \right] (\epsilon_m^T)_{ult}$$

Persamaan untuk *longitudinal compressive strength* dan *transverse compressive strength* adalah sebagai berikut:

$$(\sigma_{x_c}^C)_{ult} = \left[\frac{E_{1f} V_f + E_m (1 - V_f)}{v_{12} V_f + v_m (1 - V_f)} (1 - V_f) \right] \left[1 + \left(\frac{E_m V_f}{E_{2f}} - 1 \right) V_f \right] (\epsilon_m^T)_{ult}$$

$$(\sigma_{y_c}^C)_{ult} = E_{2c} \left(1 + \left(\frac{E_m}{E_f} - 1 \right) V_f \right) (\epsilon_m^C)_{ult}$$

Kemudian untuk persamaan *longitudinal shear strength (in-plane shear)* dan *transverse shear strength (out-plane shear)* adalah sebagai berikut:

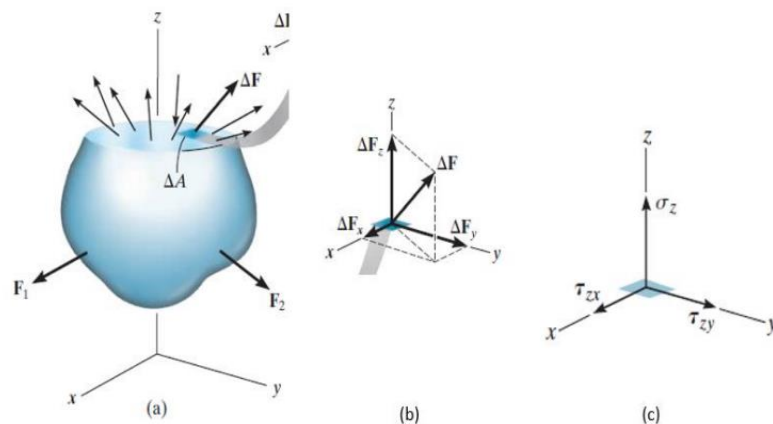
$$(\tau_{xy_c})_{ult} = G_{12c} \left[1 + \left(\frac{G_m}{G_{12f}} - 1 \right) V_f \right] (\gamma_m)_{ult}$$

$$(\tau_{yz_c})_{ult} = \frac{(\tau_{xy_c})_{ult}}{2}$$

2.1.6 Mekanika

1. Tegangan

Tegangan yaitu intensitas dari gaya-gaya internal yang bekerja pada bidang area tertentu yang melewati satu titik. Ada dua jenis tegangan yang bekerja pada suatu bidang, yaitu tegangan normal dan tegangan geser. Tegangan normal bekerja tegak lurus terhadap bidang ΔA pada Gambar 2.23.



Gambar 2. 23 Ilustrasi dari Tegangan; (a) Distribusi Beban pada Penampang Benda, (b) Gaya yang Bekerja pada ΔA , (c) Arah Kerja Tegangan Geser (Hibbeler, 2011)

Pada gambar 2.23 dapat dilihat bahwa ΔF_z normal terhadap area maka bisa didapatkan persamaan.

$$\sigma_z = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_z}{\Delta A}$$

Dengan (sigma) adalah tegangan normal. Jika tegangan menarik benda ada bidang maka hal ini mengacu kepada *tensile stress* atau tegangan tarik, sedangkan jika tegangan mendorong benda pada bidang hal ini mengacu kepada *compressive stress* atau tegangan tekan. Tegangan geser adalah intensitas gaya-gaya yang bekerja bersinggungan dengan bidang ΔA . Tegangan geser dapat dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$\tau_{zx} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_x}{\Delta A}$$

$$\tau_{zy} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_y}{\Delta A}$$

2. Deformasi

Ketika suatu benda dikenai gaya, maka benda tersebut akan cenderung mengubah bentuk maupun ukuran dari benda tersebut. Perubahan ini disebut sebagai deformasi, meskipun perubahan tersebut sangat besar ataupun tidak begitu terlihat dengan mata. Seperti contohnya pada karet gelang yang mudah memanjang apabila ditarik, dan bangunan yang tidak mudah terdeformasi meskipun dilalui oleh orang yang berlalu lalang. Persamaan deformasi dapat diperoleh melalui hubungan antara tegangan regangan sebagai berikut:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\frac{P}{A}}{\frac{\delta}{L}}$$

Dimana:

- E = Modulus Elastisitas (N/ m²)
- σ = Tegangan (MPa)
- ε = Regangan
- P = Beban (N)
- A = Luas permukaan (m²)
- δ = Deformasi
- L = Panjang awal spesimen (m)

Sehingga deformasi (δ) adalah sebagai berikut:

$$\delta = \frac{P \times L}{A \times E}$$

Selain bergantung pada gaya, besar kecilnya deformasi juga bergantung pada sifat materialnya. Pada awal pembebanan akan mengalami deformasi elastis yang besarnya linier sesuai dengan hubungan tegangan-regangan benda bisa kembali ke bentuk awalnya. Peningkatan beban melebihi *yield stress* menyebabkan benda berdeformasi plastis sehingga benda tidak akan kembali ke bentuk semulanya. (Hibbeler, 2011)

Dalam analisis *finite element method*, kondisi elastis dan plastis mempengaruhi hasil analisis. Kondisi ini sangat penting untuk menentukan asumsi asumsi yang dipakai agar hasil dari analisis mendekati kondisi sesungguhnya, perbedaan itu dapat dilihat dalam persamaan yang digunakan pada kondisi yang ada.

2.1.7 Teori Kegagalan

Teori kegagalan merupakan salah satu analisis numerik yang dilakukan untuk memprediksi kegagalan sebuah desain atau kegagalan sebuah material. Teori kegagalan memiliki teori yang dapat digunakan dan memiliki kegunaannya masing masing. Untuk teori kegagalan von – Mises digunakan untuk material *isotropic ductile*, lalu untuk komposit dapat digunakan teori kegagalan Tsai – Wu digunakan untuk memprediksi kegagalan pada lamina komposit dimana material komposit bersifat *orthotropic* dan mendekati *brittle*. Untuk *safety factor* digunakan untuk melihat keamanan dari suatu perancangan struktur.

1. von- Mises Failure Criterion

von – Mises *failure criterion* adalah teori kegagalan yang biasanya digunakan untuk material *ductile* atau ulet. Teori ini memprediksi bahwa material akan gagal bila tegangan yang terjadi (σ') lebih besar dibandingkan kekuatan luluh atau *yield strength* (S_y) dari sebuah material. Untuk analisis perancangan akan lebih mudah jika kita menggunakan tegangan von - Mises (Persamaan yang berkaitan dengan suatu tegangan dalam tiga sumbu) yaitu:

$$\sigma' = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

Akan terjadi kegagalan jika,

$$\sigma' \geq S_y$$

2. Tsai-Wu Failure Criterion

Kriteria kegagalan Tsai – Wu digunakan untuk memprediksi kegagalan pada lamina komposit yang mengalami *plane stress*. Keuntungan dari teori ini adalah adanya relasi antara komponen tegangan dan teori tidak membedakan antara gaya tarik dan tekan. Lamina komposit diprediksi akan mengalami kegagalan jika (Daniel & Ishai, 2006)

$$F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_{12}\sigma_1\sigma_2 \leq 1$$

$$F_{11} = \frac{1}{\sigma_1^T \sigma_1^C}$$

$$F_{22} = \frac{1}{\sigma_2^T \sigma_2^C}$$

$$F_1 = \frac{1}{\sigma_1^T} - \frac{1}{\sigma_1^C}$$

$$F_2 = \frac{1}{\sigma_2^T} - \frac{1}{\sigma_2^C}$$

$$F_{66} = \frac{1}{(\tau_{12}^F)^2}$$

Dimana:

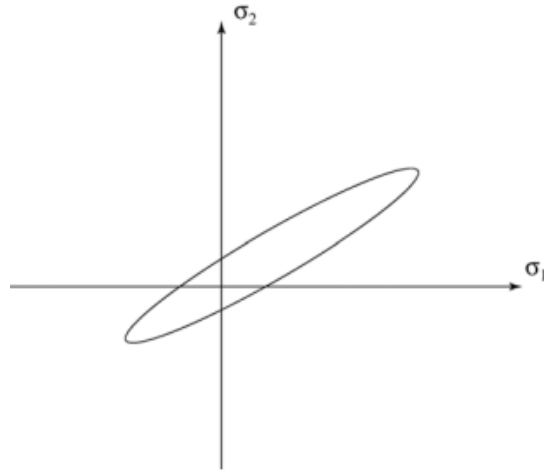
σ_1^T : tensile strength in longitudinal direction

σ_1^C : compressive strength in longitudinal direction

σ_2^T : tensile strength in transverse direction

σ_2^C : compressive strength in transverse direction
 τ_{12}^F : shear strength in the 1-2 plane

Pemetaan kegagalan untuk teori ini secara umum ditunjukkan pada gambar 2.24.



Gambar 2. 24 Pemetaan Umum dari Tsai-Wu *Failure Theorem* (Voyiadjis & Kattan, 2005)

3. *Safety Factor*

Safety factor atau faktor keamanan adalah faktor yang digunakan untuk mengevaluasi keamanan dari suatu perancangan struktur. Untuk menghindari terjadinya kegagalan struktur (*structure failure*) maka kekuatan sebenarnya dari suatu material haruslah melebihi kekuatan yang dibutuhkan. Perbandingan dari kekuatan sebenarnya terhadap kekuatan yang dibutuhkan disebut faktor keamanan (*factor of safety*) untuk kegagalan laminasi didapatkan dari persamaan:

$$FoS = \frac{-C_1 + R}{2C_2}$$

Dimana:

$$C_1 = F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_6\tau_{12}$$

$$C_2 = F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2$$

$$R = \sqrt{|C_1^2 + 4C_2|}$$

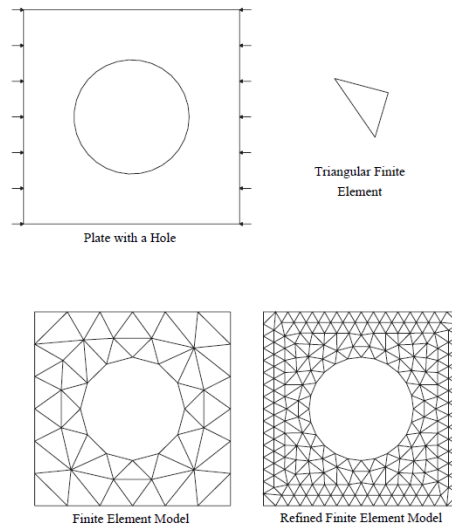
Faktor kerman lebih besar dari 1,0 menunjukkan bahwa perancangan struktur aman dari kegagalan.

2.1.8 Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga atau *finite element method* merupakan salah satu metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan dalam dunia *engineering*. Macam – macam permasalahan yang dapat diselesaikan dengan metode ini antara lain seperti analisis struktur, perpindahan panas, massa, aliran fluida dan potensial elektromagnetik. Metode elemen hingga baik dalam menyelesaikan masalah yang mencakup geometri yang rumit dengan pembebanan dan sifat mekanis material yang sulit diselesaikan dengan metode matematika analitis. Penyelesaian dengan metode matematika analitis akan membutuhkan persamaan diferensial yang lebih terperinci pada setiap detail geometri. Metode matematika analitis akan lebih menguras pikiran dan waktu yang lebih lama dalam melakukan analisis terhadap suatu geometri

husus yang rumit. Begitu juga pada penyelesaian masalah dengan metode eksperimental. Pada geometri yang besar akan banyak menghabiskan biaya dan waktu dalam menganalisis suatu tinjauan. Maka dari itu, digunakan metode elemen hingga sebagai pendekatan penyelesaian masalah *engineering* yang dapat dipertanggung-jawabkan kehandalan dan keakuratannya untuk menghemat biaya dan waktu dalam proses analisis (Liu, 2014).

Unit elemen hingga dapat divisualisasikan sebagai bagian kecil dari suatu struktur. Elemen-elemen ini terhubung pada sebuah titik yang disebut *nodes*. Kumpulan dari elemen disebut struktur elemen hingga, dan istilah “struktur” digunakan dalam pengertian umum untuk mendefinisikan sebuah bodi atau daerah. Untuk visualisasinya dapat dilihat pada Gambar 2.25



Gambar 2. 25 Plat dengan Sebuah Lubang Diskritisasi Metode Elemen Hingga (Liu, 2014)

Inti dari penyelesaian masalah menggunakan metode elemen hingga adalah membagi suatu objek yang akan dianalisis menjadi beberapa bagian atau elemen-elemen dengan ukuran dan geometri tertentu. Setiap bagian atau elemen-elemen yang telah dibagi-bagi kemudian dihubungkan dengan node, kemudian persamaan matematis yang terkandung dalam elemen dipergunakan untuk merepresentasikan permasalahan objek tersebut. Tujuan penyelesaian menggunakan metode elemen hingga adalah menyelesaikan permasalahan analisis pada suatu persamaan diferensial geometri dan pembebanan yang rumit, sehingga sulit untuk diselesaikan secara analitis. Karena perhitungan analitis membutuhkan besaran yang harus diketahui pada setiap titik objek yang dikaji, sedangkan pada geometri yang rumit memiliki banyak besaran yang tidak diketahui. Selain itu, metode elemen hingga juga dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan dinamik atau bergantung pada perubahan waktu (Guven, 2015).

Langkah-langkah dalam memformulasikan analisis elemen hingga dari permasalahan fisis umum digunakan dalam beberapa analisis, baik itu struktural, perpindahan panas, aliran fluida, atau permasalahan lainnya. Adapun beberapa langkah-langkah tersebut terbagi menjadi:

1. *Preprocessing*

Pada tahap ini pendefinisian model dilakukan sebagai data awal untuk pemodelan agar hasil yang didapatkan dapat sesuai dengan yang diharapkan. Hal-hal yang ditentukan pada tahap preprocessing ini antara lain seperti bentuk geometri, *material properties*, *boundary condition*, pembebanan, tipe elemen, ukuran dari elemen.

2. *Solution*

Pada tahap ini *software* penganalisis elemen hingga menyusun persamaan aljabar pengatur dalam bentuk matriks dan menghitung nilai yang tidak diketahui dari variabel bidang primer. Nilai yang sudah dihitung kemudian digunakan kembali untuk menghitung variabel turunan tambahan seperti, gaya reaksi, *element stress*, dan aliran panas menggunakan sistem *back substitution*.

3. *Post Processing*

Analisis dan evaluasi dari nilai hasil permasalahan mengacu pada proses post processing. Postprocessor software dapat melakukan penyortiran, mencetak, dan memplot hasil yang dipilih dari solusi elemen hingga. Contoh operasi yang dapat diselesaikan antara lain mengurutkan tegangan elemen berdasarkan besarnya, mengecek keseimbangan, menghitung faktor keamanan, plot bentuk struktur terdeformasi, animasi perilaku model dinamis, menghasilkan plot suhu berdasarkan warna. Data solusi dapat dimanipulasi dengan banyak cara dalam *postprocessing*, tujuan utama adalah untuk menerapkan pertimbangan teknik yang baik dalam menentukan apakah hasil solusi masuk akal secara fisik (Hutton, 2004).

Adapun persamaan dasar dari *finite elemen method* seperti dibawah ini,

$$[F] = [K] * [D]$$

Dimana [F] adalah vector dari beban atau gaya, [K] adalah matriks kekakuan, dan [D] adalah matriks dari perpindahan *nodes* yang terjadi ketika suatu benda terkena gaya (Kurowski,2004).

2.2 Penelitian Terdahulu

2.2.1 “*Utilization of Kenaf Fiber Waste as Reinforced Polymer Composites*” (Fajrin et al., 2022)

Penelitian berjudul “*Utilization of Kenaf Fiber Waste as Reinforced Polymer Composites*” ini dilakukan pada tahun 2022 oleh Jauhar Fajrin, Akmaluddin, dan Femiana Gapsari yang merupakan riset kolaborasi antara Departemen Teknik Sipil Universitas Mataram dengan Departemen Teknik Mesin Universitas Brawijaya. Penelitian dilatarbelakangi oleh tingginya jumlah limbah kenaf hasil industri tekstil yang akan diteliti *mechanical properties* nya agar dapat digunakan nantinya untuk kegunaan yang lebih luas lagi.

Peneliti disini merasa bahwa kenaf merupakan serat yang populer karena memiliki kualitas mekanik yang tinggi yang memberikan serat ini nilai kekakuan dan kekuatan yang tinggi. Oleh karena itu, potensi dari serat ini menjanjikan apalagi ditengah tengah tantangan dunia menghadapi permasalahan lingkungan dan kelangkaan serat sintetik. Penelitian ini bertujuan untuk menggali potensi dari serat kenaf sebagai penguat dari komposit dengan matriks poliester.

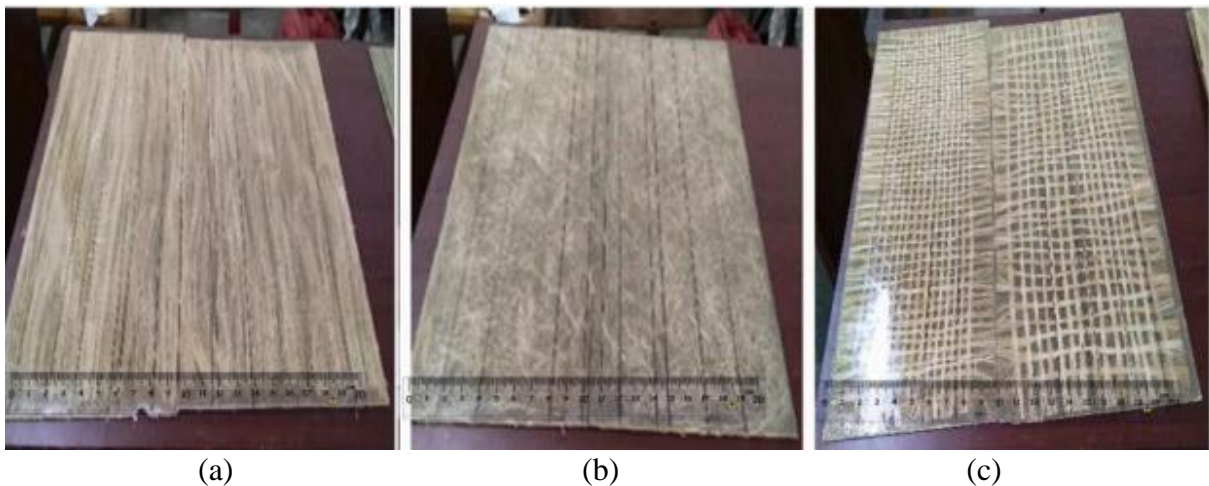
Limbah serat kenaf diambil dari sebuah pabrik tekstil di daerah Magelang, Jawa Tengah, Indonesia. Serat yang dikategorikan sebagai limbah ialah serat yang tidak lolos proses *sorting* dan tidak dapat digunakan lagi sebagai material baku tekstil. Serat tersebut diberikan perlakuan dengan perendaman air hangat dan dikeringkan pada suhu ruangan selama 12 Jam yang selanjutnya dikeringkan di oven dengan suhu 70 selama 3 jam. Gambar dari serat kenaf dapat dilihat pada Gambar 2.26.



Gambar 2. 26 Proses Pemilahan Serat; (a) Perlakuan Kimia terhadap Serat, (b) Serat Limbah (Fajrin et al., 2022)

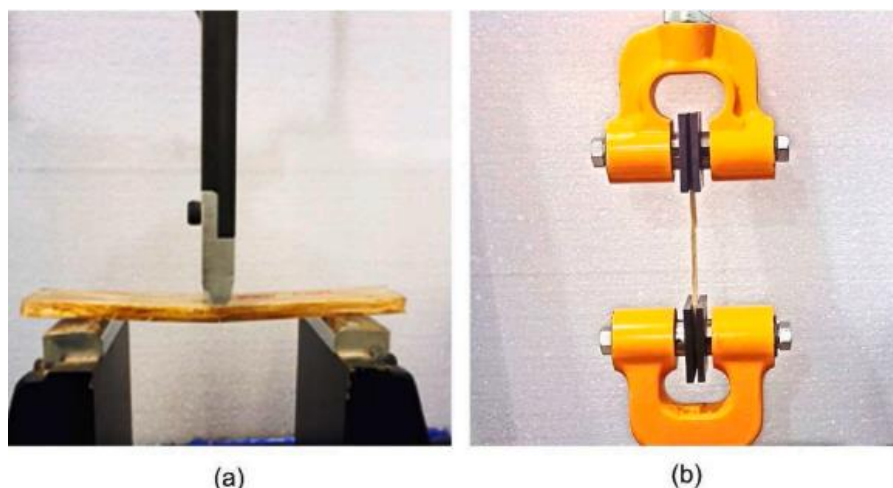
Setelah itu serat diberikan *treatment alkali* dengan cara merendam seras dengan NaOH selama 4 jam pada suhu ruangan, setelah itu dicuci dengan menggunakan air hangat dan dikeringkan pada suhu ruangan selama 12 jam. Setelah itu direndam lagi dengan menggunakan air hangat lalu di netralisir dengan menggunakan *acetic acid* dan dibersihkan dengan menggunakan air demineral, baru setelah itu dikeringkan selama tiga hari pada suhu ruangan. Langkah terakhir adalah mengeringkan serat didalam oven pada suhu 60 selama 6 jam.

Setelah serat selesai dikeringkan, komposit dibuat dengan metode *vacuum bagging* dimana sudah disiapkan cetakan terbuka. Komposit divariasikan menjadi tiga orientasi sudut serat, yaitu: *unidirectional*, *woven*, dan *random*. Setelah itu serat dicampurkan dengan poliester tak jenuh yang diberikan katalis. Untuk komposisinya kompositnya, serat diberikan fraksi 20% berat komposit. Gambar dari komposit yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 2.27.



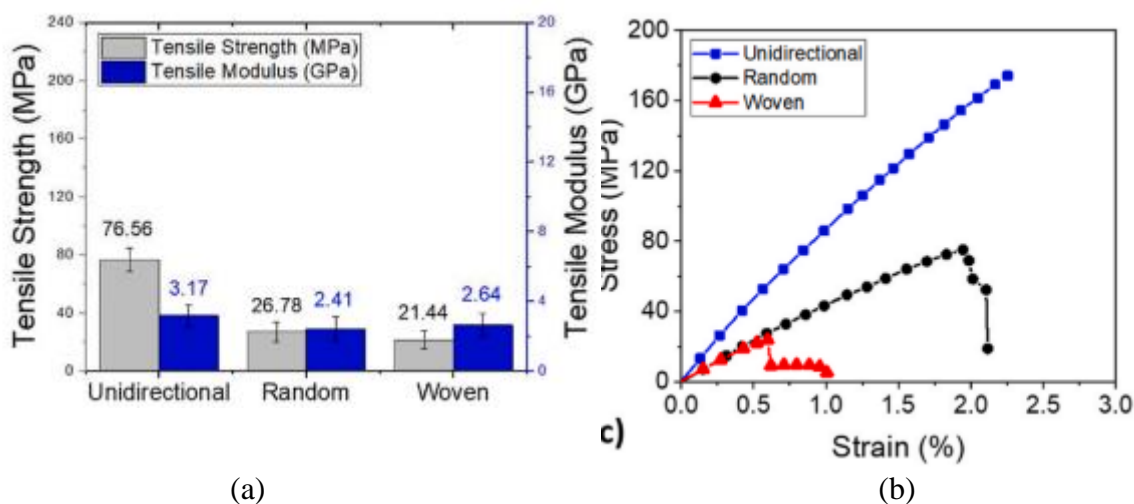
Gambar 2. 27 Fabrikasi Komposit; (a) *Unidirectional*, (b) *Random*, (c) *Woven* (Fajrin et al., 2022)

Selanjutnya pada komposit yang telah dibuat diberlakukan uji tarik dan uji *bending*. Uji tarik dilakukan sesuai standar ASTM D3039 sementara untuk uji *bending* digunakan standar ASTM D790. Untuk gambar Pengujian *flexural* dan *tensile* dapat dilihat pada Gambar 2.28.



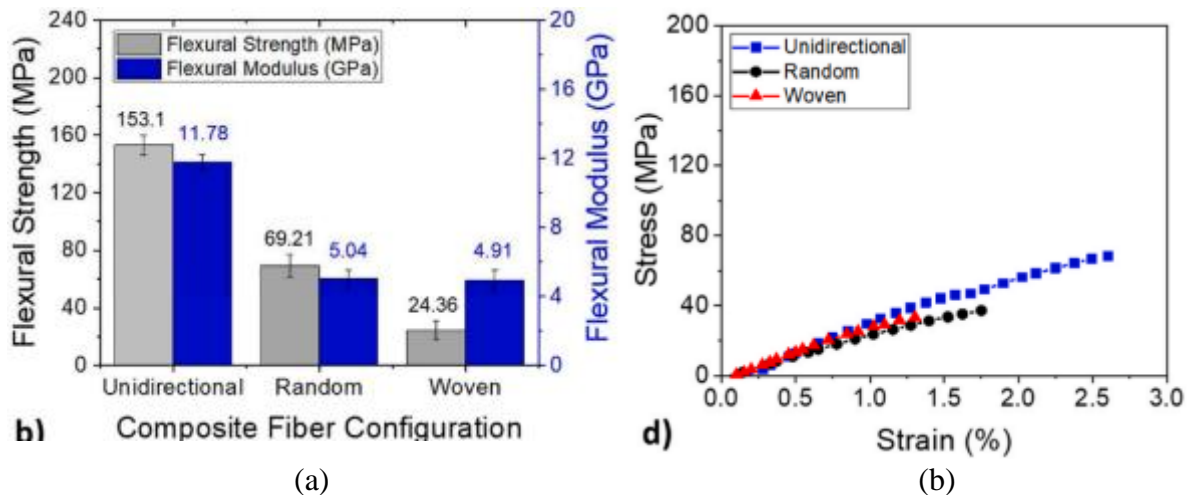
Gambar 2. 28 Pengujian *Mechanical Properties*; (a) *Flexural Test*, (b) *Tensile Test* (Fajrin et al., 2022)

Hasil pengujian memperlihatkan bahwa rata rata kekuatan tarik komposit tertinggi diraih oleh komposit jenis *unidirectional* sebesar 76.56 MPa, selanjutnya jenis *random* sebesar 26.78 MPa dan *woven* sebesar 21.44 MPa. Dapat dianalisa bahwa komposit jenis *unidirectional* memiliki kekuatan tarik 65,88% lebih tinggi dari jenis *random* dan 71,62 % dari jenis *woven*. Sementara untuk modulus tarik komposit jenis *unidirectional* memiliki nilai rata rata sebesar 3.18 GPa yang 23.89% lebih tinggi dari jenis *random* (2.42 GPa) dan 16.98% dari jenis *woven* (2.64 GPa). Untuk grafik hasil pengujian tarik dapat dilihat pada Gambar 2.29.



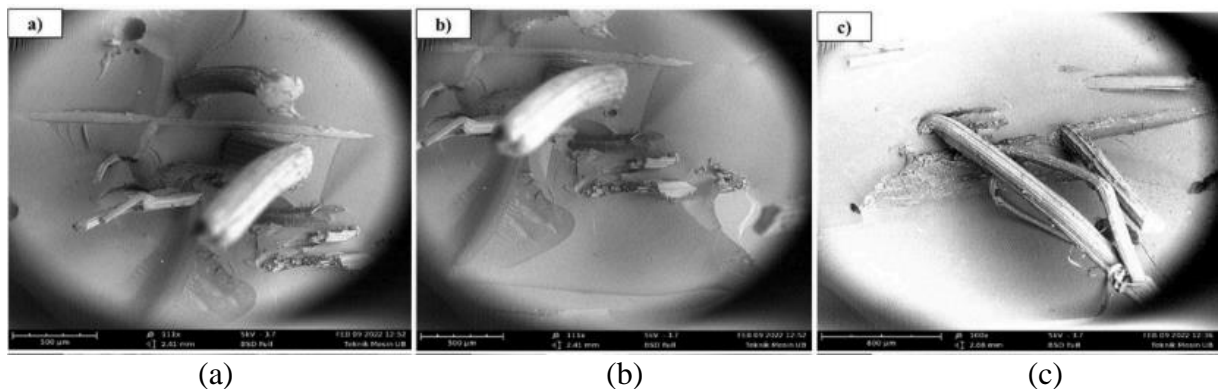
Gambar 2. 29 Grafik Hasil Pengujian Tarik Komposit; (a) *Tensile Strength vs Tensile Modulus*, (b) Kurva Tegangan-Regangan. (Fajrin et al., 2022)

Selanjutnya untuk hasil pengujian *three-point bending* didapatkan hasil dimana komposit jenis *unidirectional* memiliki *flexural strength* sebesar 153.1 MPa dan lebih tinggi 54,79 % dari jenis *random* (69.21 MPa) dan 84,08% dari jenis *woven* (24.36 MPa). Sementara untuk *flexural modulus*, jenis *unidirectional* memiliki nilai terbesar yaitu 11.78 GPa dimana 57,21% lebih tinggi dari jenis *random* (5.04 GPa) dan 58,23% dari jenis *woven* (4.92 GPa). Untuk hasil *flexural test* dapat dilihat pada Gambar 2.30.



Gambar 2. 30 Grafik Hasil *Flexural Test*; (a) *Flexural Strength vs Flexural Modulus*, (b) Kurva Tegangan-Regangan. (Fajrin et al., 2022)

Setelah dilakukan *tensile test* dan *flexural test*, dilakukan observasi dengan menggunakan SEM untuk melihat faktor kegagalan komposit. Dari hasil observasi dapat dilihat bahwa kenaf dan poliester memiliki keterikatan yang baik dilihat dari sedikitnya patahan kenaf dibandingkan dengan poliester. Sementara untuk jenis *random* memiliki rongga atau *voids* terbesar yang diakibatkan oleh acaknya posisi serat sehingga poliester tidak dapat membasahi dan mengikat serat secara sempurna dan akibatnya komposit menjadi kurang rapat. Untuk komposit jenis *woven* dapat dilihat bahwa dalam uji tarik, kekuatan mekanik hanya ditahan oleh serat dengan sudut 90 sehingga memiliki kekuatan tarik paling kecil dibandingkan dengan dua jenis lainnya. Untuk gambar observasi SEM dapat dilihat pada Gambar 2.31.



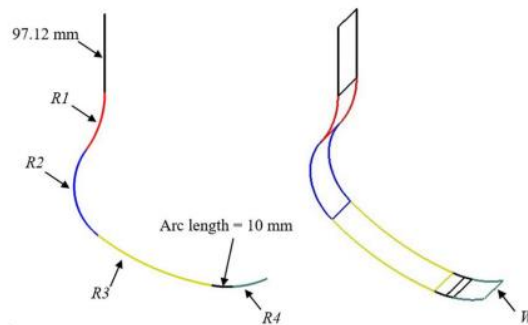
Gambar 2. 31 Hasil Observasi SEM; (a) *Unidirectional*, (b) *Random*, (c) *Woven* (Fajrin et al., 2022)

Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa orientasi sudut serat mempengaruhi *mechanical properties* dari komposit. Sementara untuk ukuran struktur dan bentuk serat mempengaruhi ikatan antara matriks dan serat. Orientasi serat dengan jenis *unidirectional* memiliki kekuatan tarik yang tertinggi karena arah seratnya yang searah dengan arah pembebanan dan juga dikarenakan tidak ada persilangan antara serat sehingga komposit memiliki densitas yang lebih tinggi yang mengakibatkan *tensile properties* ke arah longitudinal menjadi besar.

2.2.2 “Optimization of Running Blade Prosthetics Utilizing Crow Search Algorithm Assisted by Artificial Neural Networks” (Solis et al., 2021)

Penelitian ini dilakukan oleh Solis dan kawan kawan dari Autonomous University of Baja California, Mexico pada tahun 2021 dengan judul “*Optimization of Running Blade Prosthetics Utilizing Crow Search Algorithm Assisted by Artificial Neural Networks*”. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan optimasi dari sebuah RBP atau *running blade prosthetics* yang dirancang dari material komposit Epoxy – Carbon Woven (230 GPa) Wet dengan menggunakan variasi orientasi sudut serat [-45/45] dan [0/90] dan variasi desain serta jumlah *layer* dari komposit.

Fenomena yang melatarbelakangi penelitian ini ialah karena kaki prostetik tipe *running blade* yang dibuat oleh Ottobock dan Osur memiliki harga yang sangat tinggi sehingga tidak dapat diakses oleh publik. *Running blade* tersebut terbuat dari *carbon fibre composite* dimana memiliki *properties* yang mirip seperti baja namun memiliki bobot yang jauh lebih ringan sehingga membuat material tersebut cocok untuk aplikasi prostetik. Untuk desain dari *running blade* dapat dilihat pada Gambar 2.32.



Gambar 2. 32 Geometri Desain *Running Blade Prostheses* (Solis et al., 2021)

Lalu selanjutnya dilakukan *input* parameter variasi yang akan diberlakukan yaitu variasi geometri, variasi orientasi sudut serat, dan variasi jumlah *layer* komposit. Untuk *input* parameter variasi dapat dilihat pada Gambar 2.33.

Design parameter	Lower bound (<i>lb</i>)	Upper bound (<i>ub</i>)
<i>R1</i> [mm]	106.2	129.8
<i>R2</i> [mm]	74.7	91.3
<i>R3</i> [mm]	283.5	343.5
<i>R4</i> [mm]	110.7	135.3
<i>W</i> [mm]	40.5	49.5
No. of layers [-]	18	26
Fabrics	ABS, Core	
Number of layers	18, 20, 22, 24, 26	
Sub laminates	-45°/45°, 0°/90°	

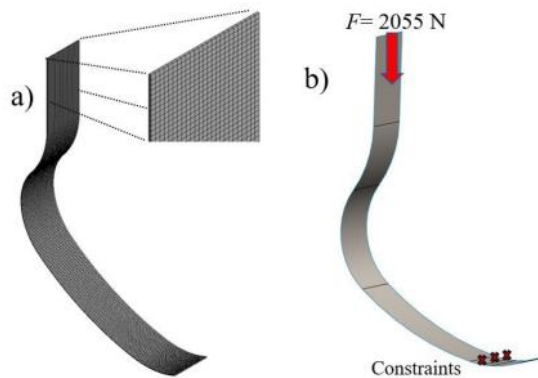
Gambar 2. 33 *Input* Parameter Variasi dari *Running Blade Prostheses* (Solis et al., 2021)

Selanjutnya *material properties* dari komposit dimasukkan kedalam *engineering data*. Untuk *orthotropic properties* dari komposit carbon fiber dapat dilihat pada Gambar 2.34.

Properties	Unit	Value
E_x	[MPa]	59160
E_y	[MPa]	59160
E_z	[MPa]	7500
ν_{xy}	[-]	0.04
ν_{yz}	[-]	0.3
ν_{xz}	[-]	0.3
ρ	[kg/m ³]	1451

Gambar 2. 34 Orthotropic Properties dari 3k Woven Carbon Fibres (Solis et al., 2021)

Setelah itu, konfigurasi yang telah diatur dimasukkan kedalam ANSYS *static structural* dengan menggunakan ukuran *meshing* 2 mm dengan jumlah elemen 6400 per *layer*. Lalu pemberian *boundary condition* berupa pembebanan sebesar 2055 N ke arah -Y dan dengan bagian paling bawah dari RBP menjadi tumpuan atau *fixed support*. Untuk *meshing* dan *input boundary condition* dapat dilihat pada Gambar 2.35.



Gambar 2. 35 Static Structural Setup; (a) Meshing, (b) Boundary Conditions (Solis et al., 2021)

Setelah dilakukan simulasi dengan lebih dari 300 iterasi, ditemukan solusi optimal dari variasi geometri dan jumlah *layer*. Untuk hasilnya dapat dilihat pada Gambar 2.36.

Design parameter	C1	C2	C3
$R1$ [mm]	106.207	129.7	108.85
$R2$ [mm]	74.7	74.7	74.7
$R3$ [mm]	346.49	305.61	333.68
$R4$ [mm]	133.75	129.14	110.7
W [mm]	40.5	49.48	49.5
No. of layers	18	18	24

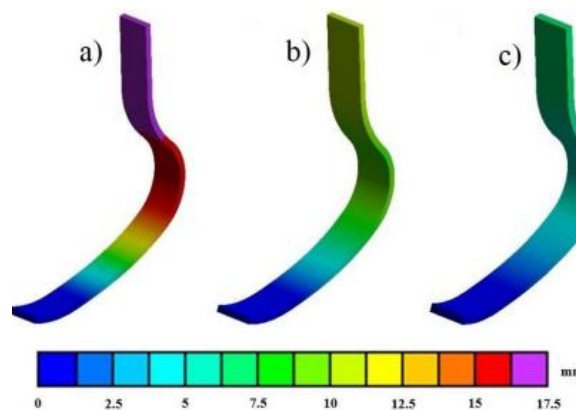
Gambar 2. 36 Optimasi dari Parameter Geometri (Solis et al., 2021)

Output pengujian berupa *displacement* dan Tsai-Wu *Safety Factor* dapat dilihat pada Gambar 2.37.

	Displacement [mm]	SF
C1	16.24	0.43
C2	9.19	1.34
C3	5	1.45

Gambar 2. 37 Displacement dan Safety Factor dari Hasil Optimasi (Solis et al., 2021)

Dari Penelitian ini dapat disimpulkan bahwa optimasi yang terbaik didapatkan oleh desain C2 dimana menggunakan orientasi sudut [0/90] dengan jumlah *layer* 18 karena memiliki spesifikasi yang seimbang antara *displacement* yang didapatkan yaitu 9.19 dan nilai *safety factor* sebesar 1.34. Hasil terbaik selanjutnya didapat oleh desain C3 dengan variasi orientasi sudut serat [0/90] dengan jumlah *layer* 24 dimana nilai *safety factor* tertinggi sebesar 1.45 namun di lain sisi *displacement* yang didapatkan paling kecil yaitu sebesar 5mm. Desain C1 dengan variasi [-45/45] tidak ditemukan solusi dimana nilai *safety factor* lebih besar dari 1.2 dan memiliki *displacement* tertinggi sehingga tidak cocok untuk menahan beban kerja dari *running blade prostheses*. Orientasi sudut [-45/45] memiliki sifat elastis yang lebih tinggi karena arah serat yang tidak tegak lurus terhadap beban yang diberikan sehingga terjadi disipasi energi.



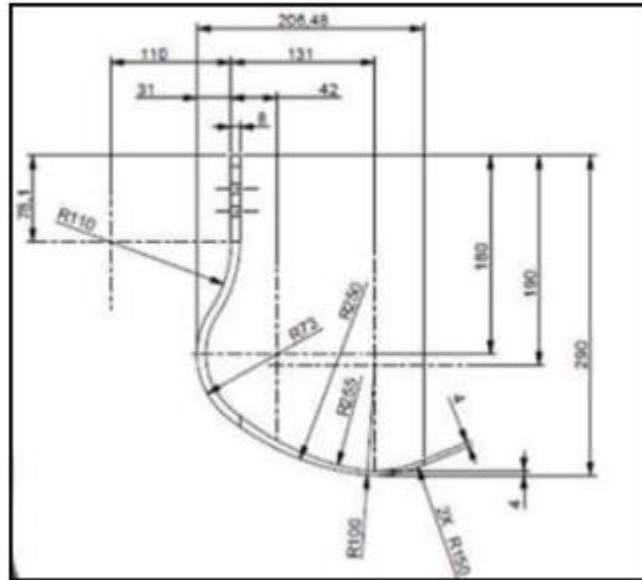
Gambar 2. 38 Kontur Displacement dari Optimasi; (a) C1, (b) C2, (c) C3 (Solis et al., 2021)

Dapat dilihat pada Gambar 2.38 bahwa desain C3 memiliki nilai kekakuan tertinggi sehingga memiliki *displacement* yang kecil. Sementara *displacement* merupakan karakter penting yang mengindikasikan adanya energi yang terserap yang harus dimiliki oleh *running blade prostheses*. Desain C1 memiliki *displacement* tertinggi dan bisa diterima apabila memiliki nilai *safety factor* di atas 1.2. Oleh karena itu desain optimasi terbaik dicapai oleh desain C2 dimana memiliki nilai kekakuan yang lebih tinggi dari desain C1 karena memiliki nilai *displacement* yang terbesar sementara nilai *safety factor* nya melampaui kriteria minimal sebesar 1.2. Oleh karena itu dapat disimpulkan orientasi sudut serat [0/90] memiliki nilai yang paling optimal dari segi *displacement* dan Tsai-Wu *safety factor* dan dengan jumlah *layer* yang lebih sedikit sehingga lebih ringan dan ekonomis.

2.2.3 “Analysis of Prosthetic Running Blade of Limb Using Different Composite Materials” (Abood & Habeeb, 2019)

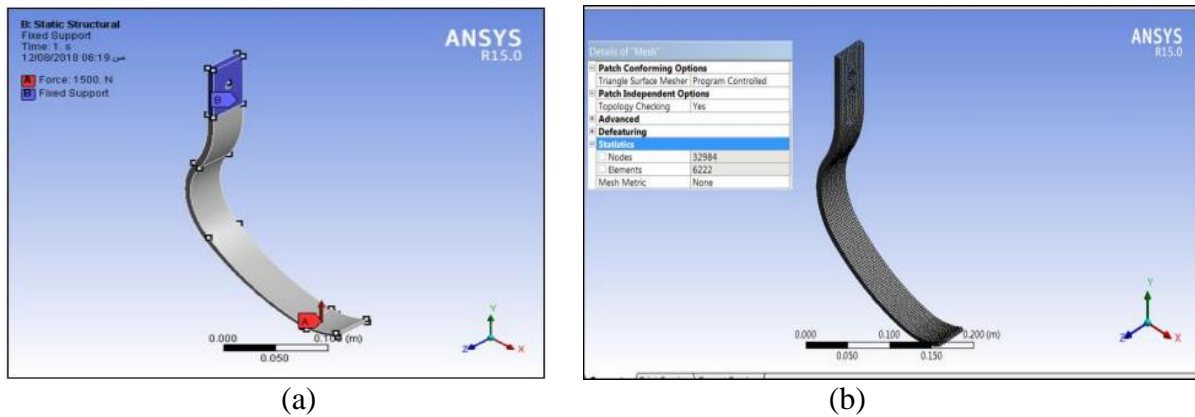
Penelitian ini dilakukan oleh Abood dan Habeeb dari Departemen Teknik Mesin University of Baghdad pada tahun 2019 dengan judul “Analysis of Prosthetic Running Blade of Limb Using Different Composite Materials”. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis

perbedaan karakteristik dan performa terbaik dari Flex-Foot Cheetah yang diproduksi menggunakan dua material komposit yang paling sering digunakan yaitu carbon dan glass dengan matriks poliester. Pada Gambar 2.39 dapat dilihat geometri yang digunakan.



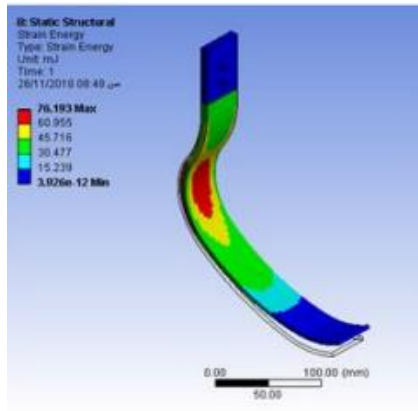
Gambar 2. 39 Geometri dari J-Blades (Abood & Habeeb,2019)

Setelah dilakukan *modelling* dengan menggunakan *software* AutoCAD, selanjutnya dimasukkan ke *software* ANSYS *static structural*. Selanjutnya diberikan *boundary conditions* yaitu pemberian pembebanan sebesar 1500N ke arah Y dari bagian paling bawah model dan pemberian *fixed support* pada bagian atas serta dilakukan *meshing* dengan ukuran *mesh* sebesar 3 mm dengan jumlah elemen 6222. Untuk gambarnya dapat dilihat pada Gambar 2.40.

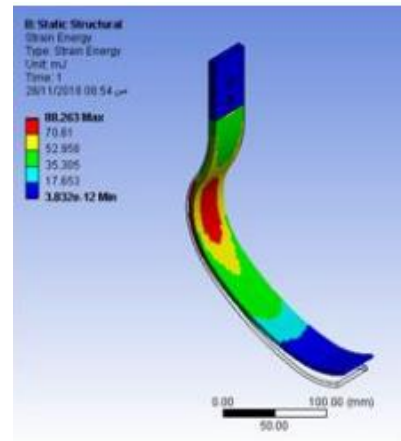


Gambar 2. 40 Setup Static Structural; (a) Boundary Conditions, (b) Meshing (Abood & Habeeb, 2019)

Setelah itu dilakukan *running* untuk mendapatkan nilai *maximum principal stress*, *strain energy*, dan *total deformation* untuk kedua material komposit tersebut. Untuk hasil simulasi ANSYS dapat dilihat pada Gambar 2.41.



(a)



(b)

Gambar 2. 41 Pengujian FEM untuk *Strain Energy*; (a) *Glass Fiber*, (b) *Carbon Fiber* (Abood & Habeeb, 2019)

Selanjutnya dilakukan studi eksperimen juga untuk mendapatkan nilai defleksi. Prostetik tersebut dibuat dengan menggunakan cetakan yang terbuat oleh kayu seperti pada Gambar 2.42.



Gambar 2. 42 Cetakan untuk Prostetik (Abood & Habeeb, 2019)

Selanjutnya dilakukan manufaktur prostetik dengan menggunakan *glass fibers* dan *carbon fibers* yang dicampur dengan matriks berupa polimer tak jenuh. Jumlah *layer* dari fiber disusun sebanyak 25-*layer* untuk mendapatkan ketebalan yang diinginkan. Manufaktur dari prostetik tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.43.



(a)

(b)

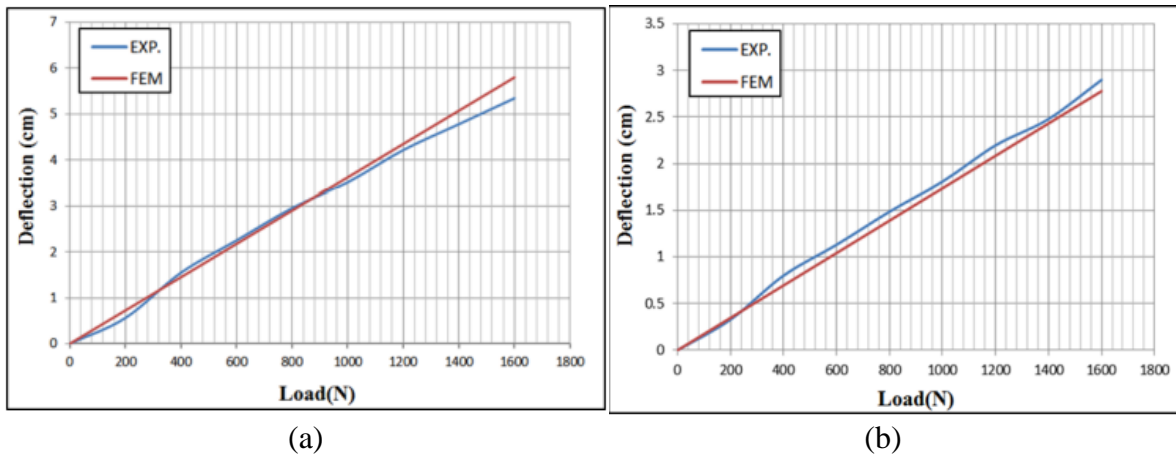
Gambar 2. 43 Proses *Lay-up*; (a) *Glass Fiber*, (b) *Carbon Fibier* (Abood & Habeeb, 2019)

Setelah spesimen berhasil dibuat selanjutnya dilakukan uji defleksi dengan mengaplikasikan pembebanan secara bertahap dari 0 sampai 1500N secara vertikal ke arah -Y dan dilakukan pembacaan defleksi dengan alat yang disambungkan ke komputer. Untuk proses pengujian defleksi dapat dilihat pada Gambar 2.44.



Gambar 2. 44 Uji Defleksi pada Spesimen; (a) *Glass Fiber*, (b) *Carbon Fiber* (Abood & Habeeb, 2019)

Selanjutnya dilakukan komparasi hasil defleksi dengan metode elemen hingga dan metode eksperimen dari kedua material komposit tersebut. Untuk hasil perbandingannya dapat dilihat pada Gambar 2.45.



Gambar 2. 45 Grafik Pembebanan vs Defleksi; (a) *Glass Fiber*, (b) *Carbon Fiber* (Abood & Habeeb, 2019)

Dari Gambar 2.45 dapat dilihat perbandingan antara FEM dengan eksperimen sangat kecil dimana nilai defleksi untuk *glass fiber* hasil FEM sebesar 5.4 cm dan hasil eksperimen sebesar 5.3 cm sementara untuk *carbon fiber* hasil FEM sebesar 2.8 cm dan hasil eksperimen sebesar 2.6 cm.

Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa prostetik dari *carbon fiber* memiliki nilai defleksi yang lebih rendah daripada prostetik dari *glass fiber* yang mengindikasikan bahwa *carbon fiber* memiliki kekuatan yang lebih tinggi dan juga melalui metode FEM dari nilai *strain energy* memperlihatkan bahwa prostetik *carbon fiber* memiliki kemampuan untuk menyerap energi yang lebih tinggi saat berlari daripada prostetik *glass fiber*. Dari penelitian ini pula dapat disimpulkan bahwa metode FEM memiliki tingkat error yang relatif kecil terhadap metode eksperimen.

2.2.4 “Compressive Strength Characteristics of Kenaf Fibre Reinforced Cement Mortar” (Moses et al, 2015)

Penelitian dilakukan oleh Moses dan kawan kawan dari Departemen Teknik Sipil Universitas Abubakar Tafawa Balewa, Bauchi, Bauchi State, Nigeria pada tahun 2015 dengan judul “*Compressive Strength Characteristics of Kenaf Fibre Reinforced Cement Mortar*”. Penelitian ini memiliki fokus yaitu menginvestigasi *compressive Strength* dari beton yang diberikan campuran serat kenaf.

Serat kenaf digunakan karena dikabarkan serat ini memiliki kekuatan tarik dan kelenturan yang tinggi apabila dibandingkan dengan serat alam lainnya yaitu sebesar 930 MPa. Banyak peneliti telah menginvestigasi kekuatan beton yang diberikan serat kenaf sebagai penguat. Oleh Hanizam dan kawan kawannya pada penelitian berjudul “*Mechanical and Durability Properties of Fiber Lightweight Foamed Concrete*” ditemukan bahwa penambahan serat kenaf meningkatkan kelenturan dari betook komposit sebesar 61% untuk 0,25% serat kenaf dan 78% untuk 0,4 % serat kenaf. Serta terjadi peningkatan penyerapan air sebesar 7% dan 9%. Namun terjadi sedikit penurunan kekuatan tekan dari beton.

Pada penelitian ini serat kenaf didapatkan dari daerah Bauchi, Nigeria. Selanjutnya diberlakukan *water-retting* terhadap serat selama 4 minggu, setelah itu serat dicuci dan dikeringkan. Setelah itu serat dipotong dengan panjang serat 10 mm, 20mm, dan 30mm. Langkah selanjutnya adalah pencampuran semen dengan pasir dengan perbandingan 1: 2.6 dengan rasio air dan semen sebesar 0.55. Setelah dilakukan pengadukan semen, serat dimasukkan kedalam campuran sesuai dengan takaran yang diinginkan. Selanjutnya dilakukan pencetakan kubus beton berukuran 50mm dan dibuat 150 kubus beton untuk dilakukan pengujian.

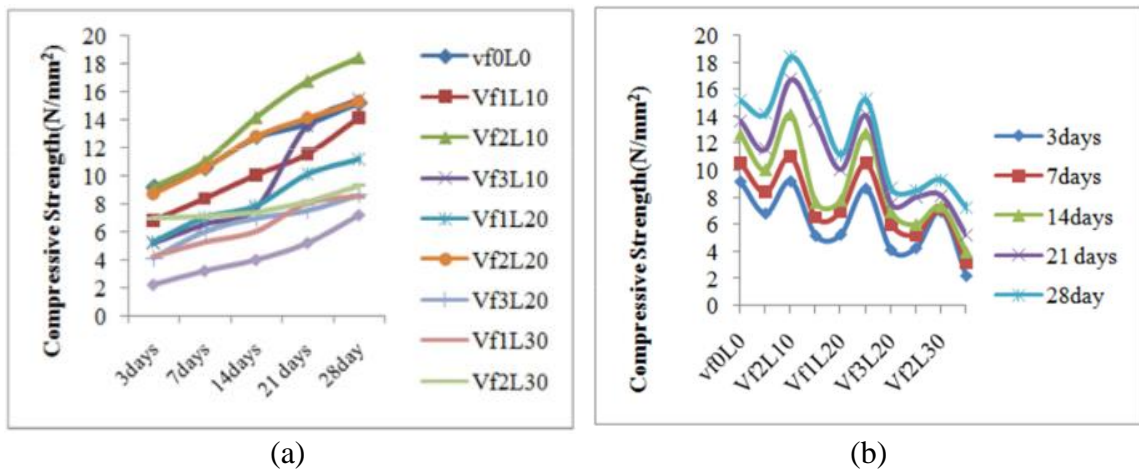
Setelah spesimen dibuat maka dilakukan uji serap air, uji densitas, dan uji tekan terhadap beton campuran yang sudah dibuat. Untuk uji serap air ditemukan hasil yaitu penambahan serat kenaf dengan ukuran 10mm dan dengan kadar kurang dari 2% dari volume komposit dapat mengurangi daya serap air dari beton dan mengakibatkan peningkatan durabilitas. Sementara untuk uji densitas didapatkan hasil bahwa densitas beton dengan campuran kenaf meningkat dibanding dengan densitas beton polos sehingga dapat meningkatkan berat dari beton. Untuk hasil pengujiannya dapat dilihat pada Gambar 2.46.

Mix ID	Fiber Volume(%)	Fiber Length(mm)	Density(kg/m ³)	Water Absorption (%)
KF0	0	0	2400	3.27
KF1	1.0	10	2408	3.23
KF2	2.0	10	2424	3.19
KF3	3.0	10	2512	3.31
KF4	1.0	20	2520	3.51
KF5	2.0	20	2556	3.41
KF6	3.0	20	2560	3.56
KF7	1.0	30	2392	3.48
KF8	2.0	30	2344	4.20
KF9	3.0	30	2328	4.42

Gambar 2. 46 Hasil Pengujian Daya Serap Air dari Beton (Moses et al., 2015)

Selanjutnya untuk pengujian tekan didapatkan hasil bahwa kekuatan tekan beton tertinggi dipegang oleh beton dengan campuran serat kenaf sebesar 2% dari volume serat dan dengan panjang serat 10mm yaitu sebesar 18.44 N/mm². sementara untuk waktu *curing*

menunjukkan pengaruh linear dimana semakin lama waktu *curing* maka semakin kuat beton komposit. Grafik hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 2.47.



Gambar 2. 47 Grafik Perbandingan; (a) *Compressive Strength vs Curing*, (b) *Compressive Strength vs Fiber Volume and Length* (Moses et al., 2015)

Untuk variasi volume fiber dan panjang fiber terjadi *up and down* pada grafik namun dapat dilihat bahwa puncak kekuatan kompresi berada pada puncaknya pada variasi volume 2% dari berat mortar komposit dan dengan panjang serat 10 mm. Secara detail hasil pengujian tekan dapat dilihat pada Gambar 2.48.

Mix ID	V _f (%)	L _r (mm)	Compressive Strength(N/mm ²)				
			3days	7days	14days	21days	28days
KF0	0	0	9.20	10.6	12.7	13.7	15.20
KF1	1	10	6.82	8.40	10.10	11.6	14.20
KF2	2	10	9.22	11.04	14.18	16.76	18.44
KF3	3	10	5.18	6.54	7.68	13.62	15.50
KF4	1	20	5.27	7.01	7.85	10.09	11.17
KF5	2	20	8.68	10.52	12.78	14.10	15.28
KF6	3	20	4.12	6.02	6.99	7.55	8.67
KF7	1	30	4.26	5.28	6.04	8.04	8.50
KF8	2	30	6.98	7.12	7.38	8.16	9.32
KF9	3	30	2.20	3.20	4.00	5.22	7.24

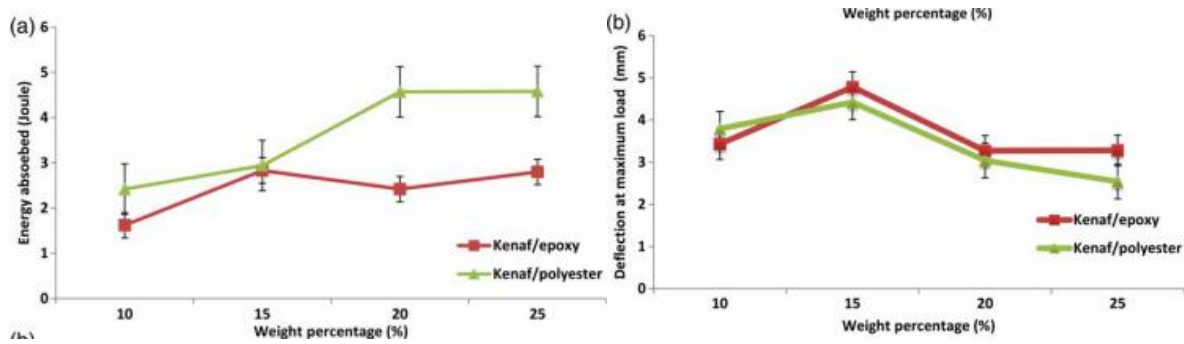
Gambar 2. 48 *Compressive Strength* dari Mortar Komposit

Dari penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa penambahan serat kenaf dapat meningkatkan daya serap air dari beton, lalu untuk densitas beton juga meningkat seiring dengan peningkatan panjang dan fraksi volume serat. Sementara untuk kekuatan tekan tertinggi didapatkan dengan menambahkan 2% fraksi volume serat dengan panjang 10 mm dan 20 mm dan dengan waktu *curing* mana saja. Sehingga dari penelitian ini penulis menyimpulkan bahwa penambahan 1-3 % fraksi volume serat dengan panjang serat 10mm dapat meningkatkan kekuatan tekan dari beton.

2.2.5 “Kenaf Fibre Composites Using Thermoset Epoxy and Polyester Polymer Resins: Energy Absorbed Versus Tensile Properties” (Bakar et al, 2014)

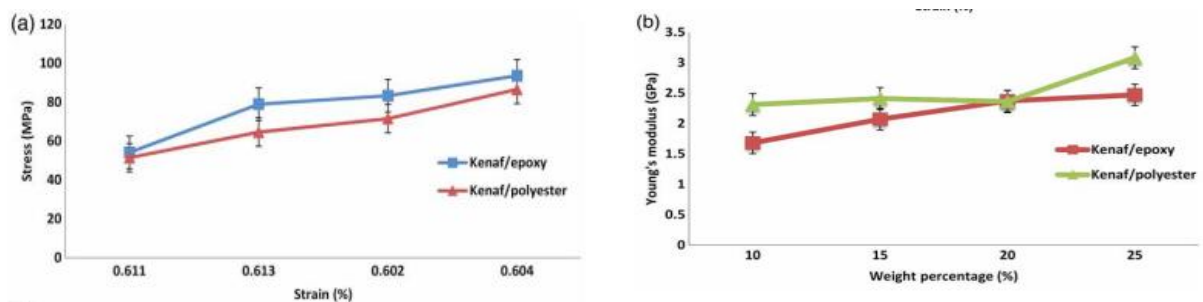
Penelitian ini dilakukan oleh Bakar dan kawan kawan dari institusi Materials Research Innovation pada tahun 2015 dengan judul “*Kenaf Fibre Composites Using Thermoset Epoxy and Polyester Polymer Resins: Energy Absorbed versus Tensile Properties*”. Penelitian ini berfokus untuk meneliti *tensile properties* dan sifat impak dari komposit berpenguat serat kenaf

apabila diberikan matriks berbeda yaitu resin epoksi dan resin poliester. Serat kenaf yang digunakan berasal dari Innovative Pultration Sdn. Bhd. Serat kenaf yang digunakan adalah tipe kenaf panjang (10-30 mm) karena memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi apabila dibandingkan dengan kenaf pendek (1-6 mm) seperti yang diteliti oleh Osman et al. komposit terdiri dari 4 variasi berat serat kenaf yaitu 10,15,20,25 % dari berat komposit. Lalu dibentuk spesimen dengan standar ASTM D3763 untuk pengujian impact dan standar ASTM D638 untuk pengujian tarik. Grafik hasil pengujian impact dapat dilihat pada Gambar 2.49.



Gambar 2. 49 Grafik Kenaf/ Epoxy vs Kenaf/ Poliester, (a) *Energy Absorbed* dan (b) *Deflection at Maximum Load* (Bakar et al., 2014)

Dari hasil pengujian impact pada Gambar 2.48 dapat disimpulkan bahwa energi serap terbanyak untuk kenaf/epoksi didapatkan oleh kenaf/epoksi dengan fraksi berat serat 15% yaitu sebesar 2.83 J dan untuk kenaf/poliester didapatkan oleh kenaf/poliester dengan fraksi berat serat 25% yaitu sebesar 4.58 J. Dapat ditarik kesimpulan bahwa kekuatan impact kenaf/poliester lebih tinggi daripada kenaf/epoksi sebesar 61.8% dan sejalan dengan penelitian oleh Rasmann et al yang berjudul “*Effect of Resin System on the Mechanical Properties and Water Absorption of Kenaf Fibre Reinforced Laminates*” dimana serat kenaf dengan laminasi poliester menunjukkan performa impact yang baik. defleksi dari kenaf/epoksi yang kecil diakibatkan oleh kekakuan yang lebih besar dari matriks dimana epoksi memiliki kekakuan yang lebih tinggi yang mengakibatkan kekuatan impact yang kecil.



Gambar 2. 50 Grafik Kenaf/ Epoxy vs Kenaf/ Poliester, (a) Kurva Tegangan – Regangan dan (b) Modulus Young vs Fraksi Berat (Bakar et al., 2014)

Dari grafik hasil pengujian tarik pada Gambar 2.50 dapat dilihat bahwa kekuatan tarik dari kenaf/epoksi terbaik didapatkan oleh kenaf/epoksi dengan fraksi berat serat 25% yaitu sebesar 93.59 MPa dan lebih tinggi 8,14% dari kenaf/poliester yaitu sebesar 86.54 MPa. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa komposit dari kenaf/epoksi memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi daripada komposit kenaf/poliester dan *valid* karena dari kekuatan tarik resin epoksi sebesar 35-110 MPa lebih tinggi dari resin poliester yaitu sebesar 40-90 MPa. Intisari dari penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2.50.

Kenaf content (wt-%)	Kenaf/epoxy				Kenaf/polyester			
	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Energy absorbed (J)	Deflection at maximum load (mm)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Energy absorbed (J)	Deflection at maximum load (mm)
10	54-13	1-68	1-62	3-43	51-47	2-31	2-42	3-79
15	78-92	2-07	2-83	4-78	64-57	2-41	2-94	4-42
20	83-30	2-37	2-42	3-27	71-5	2-36	4-57	3-04
25	93-59	2-47	2-80	3-28	86-54	3-08	4-58	2-54

Gambar 2. 51 *Mechanical Properties* dari Kenaf/ Epoksi dan Kenaf/ Poliester

Dari data yang terdapat pada Gambar 2.51 dapat disimpulkan bahwa serat kenaf dengan matriks epoksi memiliki kekuatan tarik lebih tinggi daripada poliester. Namun dari sisi lain kenaf dengan matriks poliester menawarkan kekuatan impact yang lebih tinggi daripada kenaf dengan epoksi. Dalam penelitian ini dapat disimpulkan bahwa serat kenaf dapat bekerja dengan baik dengan resin thermoset seperti epoksi maupun poliester. Seiring dengan bertambahnya fraksi volume serat, young modulus serta *mechanical properties* dari komposit meningkat. Dari penelitian ini juga dapat diambil hipotesa bahwa *tensile properties* dari komposit berpenguat serat kenaf dapat ditingkatkan lebih baik dengan menggunakan resin epoksi.

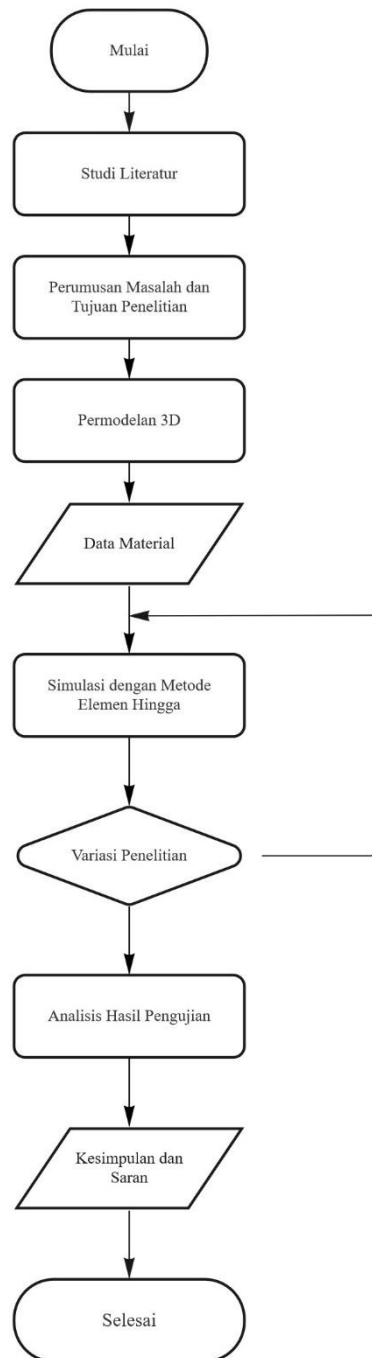
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III METODE PENELITIAN

Pada BAB III ini akan dijelaskan mengenai metode yang digunakan pada penelitian tugas akhir. Metode penelitian merupakan suatu tahapan sistematis yang dilakukan selama penelitian dilakukan.

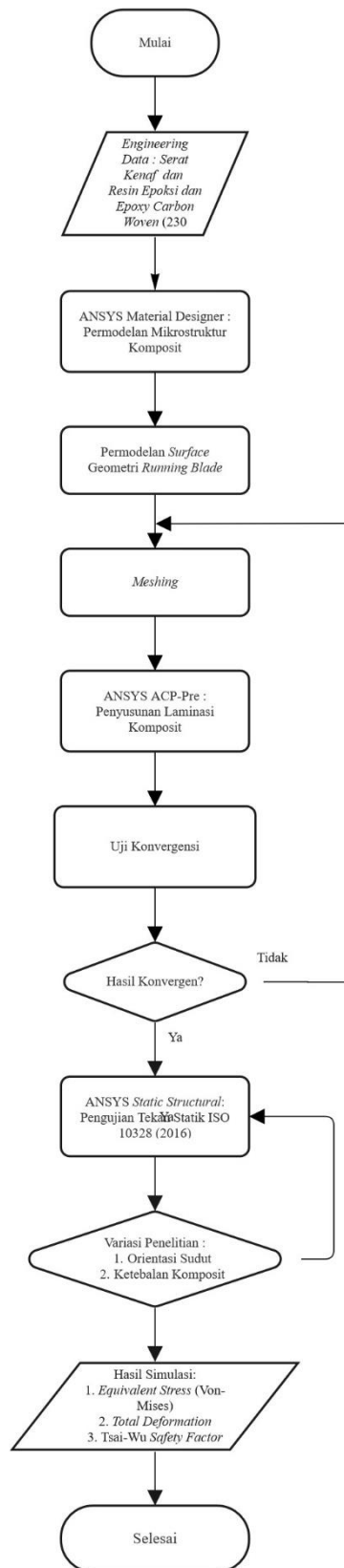
3.1 Diagram Alir Penelitian

Dalam penelitian ini dilakukan langkah langkah untuk mencapai tujuan penelitian sesuai dengan perincian diagram alir penelitian yang disajikan pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

Setelah mengikuti langkah langkah pada diagram alir penelitian, maka perlu dirincikan kembali diagram alir simulasi yang akan dijalankan. Untuk diagram alir simulasi dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3. 2 Diagram Alir Simulasi

3.2 Studi Literatur

Langkah pertama dalam penelitian ini ialah melakukan studi literatur untuk mempelajari dasar dasar serta mencari data yang diperlukan untuk menunjang penelitian. Studi literatur dilakukan dengan dilakukan dengan mencari jurnal penelitian, buku, serta sumber sumber lain yang relevan dengan topik penelitian ini yaitu “Analisis Pengaruh Orientasi Sudut dan Ketebalan terhadap Kekuatan Prostetik *Running Blade* Kenaf/ Epoksi dengan Metode Elemen Hingga”.

Untuk jurnal penelitian yang dijadikan acuan pada penelitian ini adalah “*Utilization of Kenaf Fiber Waste as Reinforced Polymer Composites*” (Fajrin et al., 2022), “*Optimization of Running Blade Prosthetics Utilizing Crow Search Algorithm Assisted by Artificial Neural Networks*” (Solis et al., 2021), “*Analysis of Prosthetic Running Blade of Limb Using Different Composite Materials*” (Abood & Habeeb, 2019), “*Compressive Strength Characteristics of Kenaf Fibre Reinforced Cement Mortar*” (Moses et al, 2015), dan “*Kenaf Fibre Composites Using Thermoset Epoxy and Polyester Polymer Resins: Energy Absorbed Versus Tensile Properties*” (Bakar et al, 2014).

Sementara untuk buku yang digunakan sebagai acuan dalam penelitian ini adalah “*Mechanics of Materials*” (Hibbeler, 2011), “*Mechanics of Composite Material*” (Kaw, 2006), “*Composite Materials: Design and Application*” (Gay et al., 2003), “*Engineering Mechanics of Composite Material*” (Daniel & Ishai, 2006), “*Principle of Composite Material Handbook*” (Gibson, 1994), “*Structure Design, Mechanics, Analysis, Manufacturing, and Testing*” (Kumar, 2017), dan ISO 10328 (2016): “*Prosthetics – Structural Testing of Lower-limb Prostheses – Requirements and Test Methods*”.

3.3 Perumusan Masalah dan Tujuan Penelitian

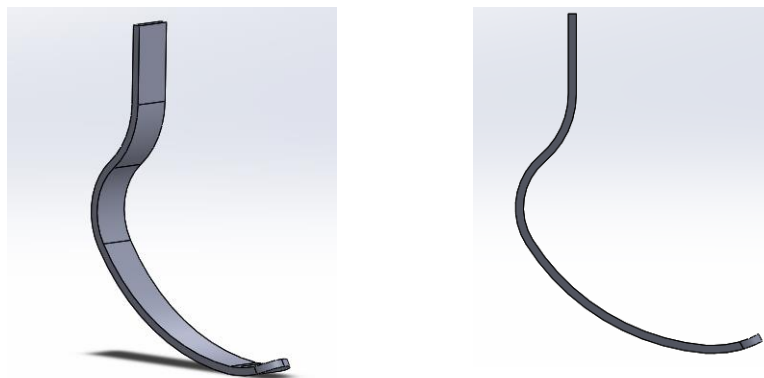
Rumusan masalah ditetapkan untuk merancang langkah penelitian yang akan dilakukan untuk mencapai tujuan penelitian. Rumusan masalah didapatkan dari studi literatur yang telah dilakukan dan menghasilkan tujuan penelitian seperti yang sudah dipaparkan pada BAB I.

3.4 Preprocessing

Preprocessing merupakan langkah permulaan dalam melakukan analisis dengan metode elemen hingga. Tahapan ini meliputi pemodelan 3D, penentuan standar pengujian beserta *boundary conditionnya*, data material, dan penentuan variasi penelitian.

3.4.1 Pemodelan 3D

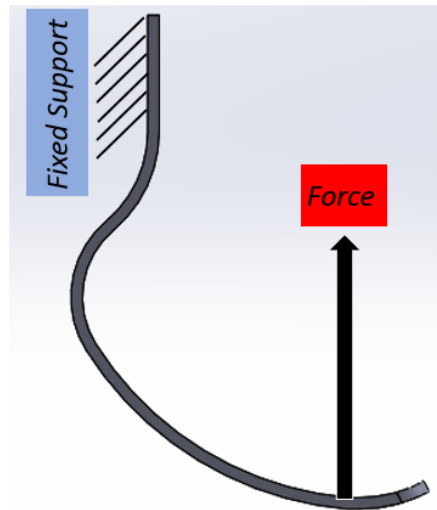
Pada tahap ini dilakukan perancangan model 3D dari prostetik tipe *running blade*. Untuk model prostetik tipe *running blade* yang digunakan pada penelitian ini berdasarkan dari penelitian terdahulu. Untuk gambarnya dapat dilihat pada Gambar 3.3.



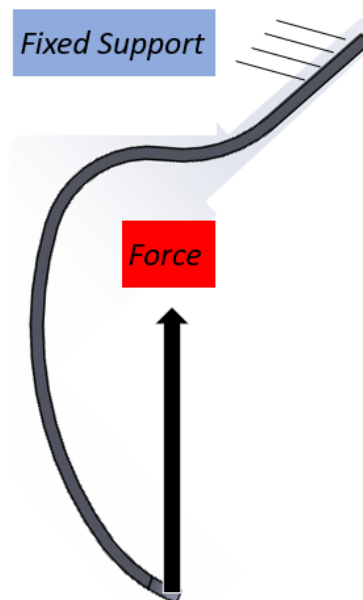
Gambar 3. 3 Permodelan 3D dari *Running Blade*; (a) *Isometric View*, (b) *Side View*

3.4.2 Standar Pengujian

Standar pengujian yang dilakukan pada *running blade prostheses* ini mengacu pada standar ISO 10328 (2016): *Prosthetics – Structural Testing of Lower-limb Prostheses – Requirements and Test Methods*. Pada penelitian ini pembebanan yang diberikan pada *running blade* adalah level P3 yaitu pembebanan *Proof Test* dan *Ultimate Static Test* yang dapat dilihat pada Tabel 2.1. Untuk kondisi pembebanan disesuaikan dengan *actual gait analysis* dari prostetik tipe *running blade* yaitu *standing stance* dan *running stance*. Untuk *boundary condition* dari pengujian dapat dilihat pada Gambar 3.4 dan Gambar 3.5.



Gambar 3. 4 *Boundary Condition* untuk *Standing Stance*



Gambar 3. 5 *Boundary Condition* untuk *Running Stance*

3.4.3 Data Material

Material yang digunakan pada penelitian ini adalah komposit berpenguat serat kenaf serta *epoxy carbon woven (230 GPa) wet*. Komposit terdiri dari serat kenaf dan matriks resin epoksi. Data material yang digunakan pada penelitian ini berdasarkan referensi dari buku serta jurnal penelitian yang dapat dilihat pada Tabel 3.1 untuk *properties* dari *single fiber* kenaf,

Tabel 3.2 untuk *properties* dari resin epoksi, dan Tabel 3.3 untuk *properties* dari *epoxy carbon woven* (230 GPa) *wet*.

Tabel 3. 1 *Properties* dari *Single Fiber Kenaf*

Entitas	Nilai	Referensi
Density (g/cm ³)	1,45	Saba et al., 2014
Poisson Ratio	0,324	Mariselvam & Logesh, 2015
Young Modulus (MPa)	11880	Ibrahim et al., 2018
Shear Modulus (MPa)	4486,4	ANSYS
Bulk Modulus (MPa)	11250	ANSYS
Tensile Strength (MPa)	267,69	Ibrahim et al., 2018
Diameter (µm)	75	Ibrahim et al., 2018

Tabel 3. 2 *Properties* dari Resin Epoksi

Entitas	Nilai	Referensi
Density	1,16 g/cm ³	ANSYS
Poisson Ratio	0,35	ANSYS
Young Modulus	3780 MPa	ANSYS
Shear Modulus	1400 MPa	ANSYS
Bulk Modulus	4200 MPa	ANSYS
Tensile Strength	54,6 MPa	ANSYS
Compressive Strength	91 MPa	Bode, 2018

Tabel 3. 3 *Properties Epoxy Carbon Woven* (230 GPa) *Wet* (ANSYS)

Properties	Nilai
Densitas	1,451 g/cm ³
Young Modulus X	59160 MPa
Young Modulus Y	59160 MPa
Young Modulus Z	7500 MPa
Poisson Ratio XY	0,04
Poisson Ratio YZ	0,3
Poisson Ratio XZ	0,3
Shear Modulus XY	17500 MPa
Shear Modulus YZ	2700 MPa
Shear Modulus XZ	2700 MPa
Tensile X	513 MPa
Tensile Y	513 MPa
Tensile Z	50 MPa
Compressive X	437 MPa
Compressive Y	437 MPa
Compressive Z	150 MPa
Shear XY	120 MPa
Shear YZ	55 MPa
Shear XZ	55 MPa

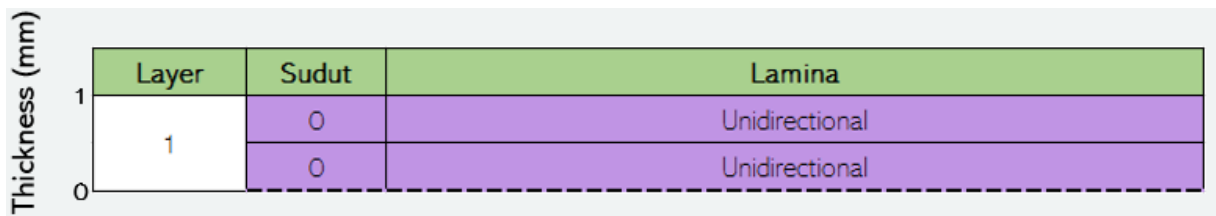
3.4.4 Variasi Penelitian

Variasi penelitian yang akan dilakukan pada penelitian ini yaitu variasi orientasi sudut dan variasi ketebalan total. Variasi penelitian dapat dilihat pada Tabel 3.4.

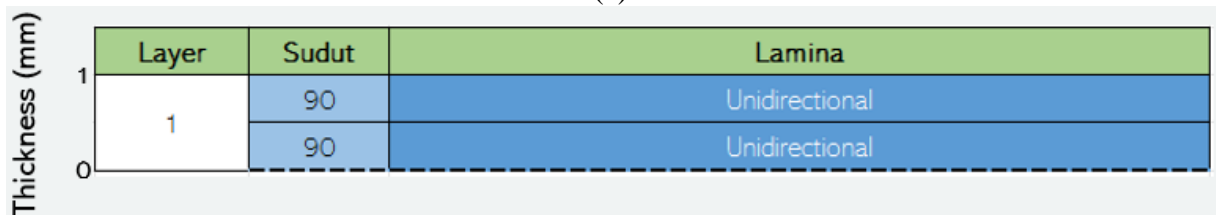
Tabel 3. 4 Variasi Penelitian

Material	Orientasi Sudut Serat	Jenis Komposit	Ketebalan Komposit
Kenaf/ Epoksi	[0/0] ₁₀	<i>Unidirectional</i>	2 cm
	[90/90] ₁₀		
	[0/90] ₁₀	<i>Cross-ply Assymetric</i>	
	[0/90] _{10s}	<i>Cross-ply Symetric</i>	
	[±45] ₁₀	<i>Angle-Ply Assymetric</i>	
	[±45] _{10s}	<i>Angle-ply Symetric</i>	
	[0/0] ₁₅	<i>Unidirectional</i>	3 cm
	[90/90] ₁₅		
	[0/90] ₁₅	<i>Cross-ply Assymetric</i>	
	[0/90] _{15s}	<i>Cross-ply Symetric</i>	
	[±45] ₁₅	<i>Angle-Ply Assymetric</i>	
	[±45] _{15s}	<i>Angle-ply Symetric</i>	
	[0/0] ₂₀	<i>Unidirectional</i>	4 cm
	[90/90] ₂₀		
	[0/90] ₂₀	<i>Cross-ply Assymetric</i>	
	[0/90] _{20s}	<i>Cross-ply Symetric</i>	
	[±45] ₂₀	<i>Angle-Ply Assymetric</i>	
	[±45] _{20s}	<i>Angle-ply Symetric</i>	

Variasi penelitian ini dipilih berdasarkan rujukan dari tinjauan pustaka serta penambahan untuk jenis *asymmetric* dan *unidirectional* untuk melihat pengaruhnya terhadap kekuatan dari *running blade*. Untuk *stacking sequence* tiap variasi dapat dilihat pada Gambar 3.6.



(a)



(b)

Thickness (mm)	Layer	Sudut	Lamina
	2	2	90
1	0		Unidirectional
1	1	90	Unidirectional
0		0	Unidirectional

(c)

Thickness (mm)	Layer	Sudut	Lamina
	2	2	0
1	90		Unidirectional
1	1	90	Unidirectional
0		0	Unidirectional

(d)

Thickness (mm)	Layer	Sudut	Lamina
	2	2	-45
1	45		Unidirectional
1	1	-45	Unidirectional
0		45	Unidirectional

(e)

Thickness (mm)	Layer	Sudut	Lamina
	2	2	45
1	-45		Unidirectional
1	1	-45	Unidirectional
0		45	Unidirectional

(f)

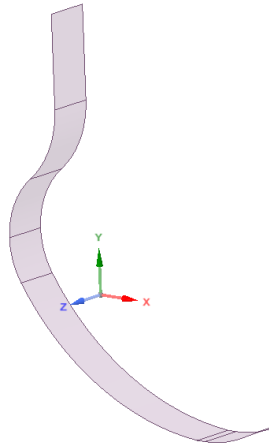
Gambar 3. 6 Stacking Sequence Setiap Variasi Orientasi Sudut; (a) [0/0], (b) [90/90], (c) [0/90], (d) [0/90]_s, (e) [±45], (f) [±45]_s

3.5 Process

Process pada metode elemen hingga dibantu dengan adanya *tools tools* pada ANSYS. Untuk tools yang digunakan pada penelitian ini adalah ANSYS Material Designer untuk pemodelan mikrostruktur komposit, ANSYS ACP-Pre untuk penyusunan laminasi komposit, ANSYS Static Structural untuk simulasi statik, dan ANSYS ACP-Post untuk melihat kondisi komposit setelah simulasi statik. Selain itu juga dilakukan uji konvergensi untuk menentukan ukuran *mesh* yang akan digunakan pada analisa metode elemen hingga.

3.5.1 Pemodelan Surface

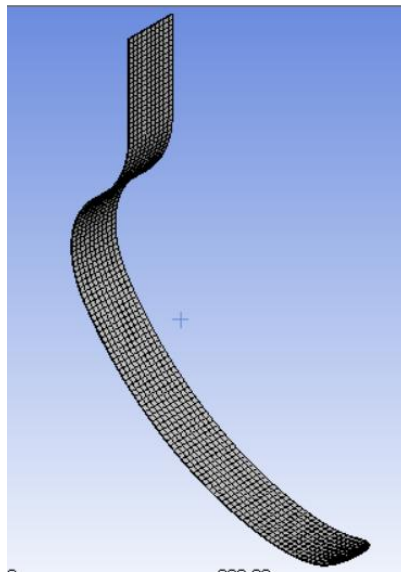
Pemodelan *surface* dilakukan untuk memodelkan permukaan dari *running blade prostheses* sebelum dilakukan laminasi komposit pada ANSYS ACP-Pre. Gambar dari *surface model running blade prostheses* dapat dilihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3. 7 Pemodelan *Surface* dari *Running Blade*

3.5.2 *Meshing*

Sebelum dilakukan penyusunan komposit, perlu dilakukan *meshing* terhadap model *surface* yang telah dibuat. Untuk jenis jenis *meshing* yang digunakan pada tahap ini masih menggunakan jenis *automatic/ program controlled* dan juga untuk ukuran *mesh* diabaikan terlebih dahulu karena nantinya akan dilakukan uji konvergensi. Untuk gambar dari proses *meshing* dapat dilihat pada Gambar 3.8.

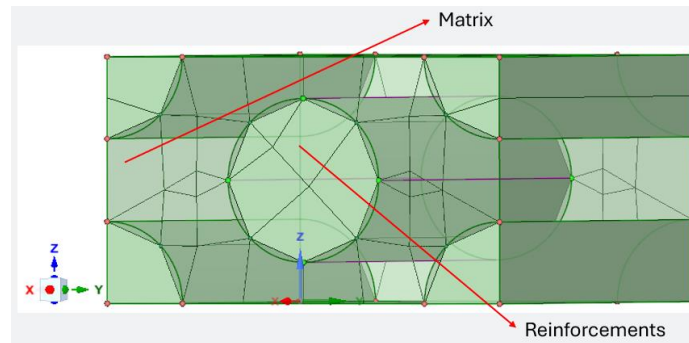


Gambar 3. 8 *Meshing Surface* pada *Running Blade Prostheses*

3.5.3 Pemodelan Mikrostruktur Komposit

Pemodelan mikrostruktur komposit dapat dilakukan dengan *tools* ANSYS Material Designer. Pemodelan mikrostruktur komposit dimulai dengan memasukkan *engineering data* dari komponen pembentuk komposit, dalam hal ini yaitu serat kenaf dan resin epoksi. Setelah itu dilakukan pemodelan *representative volume element (RVE)* pada ANSYS Material Designer. RVE adalah volume kecil material yang masih cukup besar untuk menunjukkan sifat material makroskopis dimana pengukuran dapat dilakukan dan akan menghasilkan nilai representatif dari komposit secara keseluruhan. Langkah selanjutnya ialah dengan mengatur fraksi volume dari komponen pembentuk komposit, seperti yang sudah dijelaskan pada batasan masalah untuk fraksi volume dari serat kenaf yang digunakan ialah 0.4. Selanjutnya dilakukan

proses *meshing* dan *solving* untuk mendapatkan hasil simulasi dari ANSYS Material Designer. *Material properties* yang dikomputasikan adalah *orthotropic elasticity* dari komposit yang terdiri dari *young modulus*, *shear modulus*, dan *poisson ratio*. Untuk mem-verifikasi hasil komputasi nilai *orthotropic elasticity* dari ANSYS Material Designer, dilakukan perhitungan manual dengan menggunakan *rules of mixtures* dan komparasi *relative error* yang akan dijelaskan pada subbab selanjutnya. Untuk ilustrasi dari RVE yang sudah dibuat dapat dilihat pada Gambar 3.9 sementara untuk hasil komputasi *orthotropic elasticity* dari ANSYS Material Designer dapat dilihat pada Gambar 3.10.



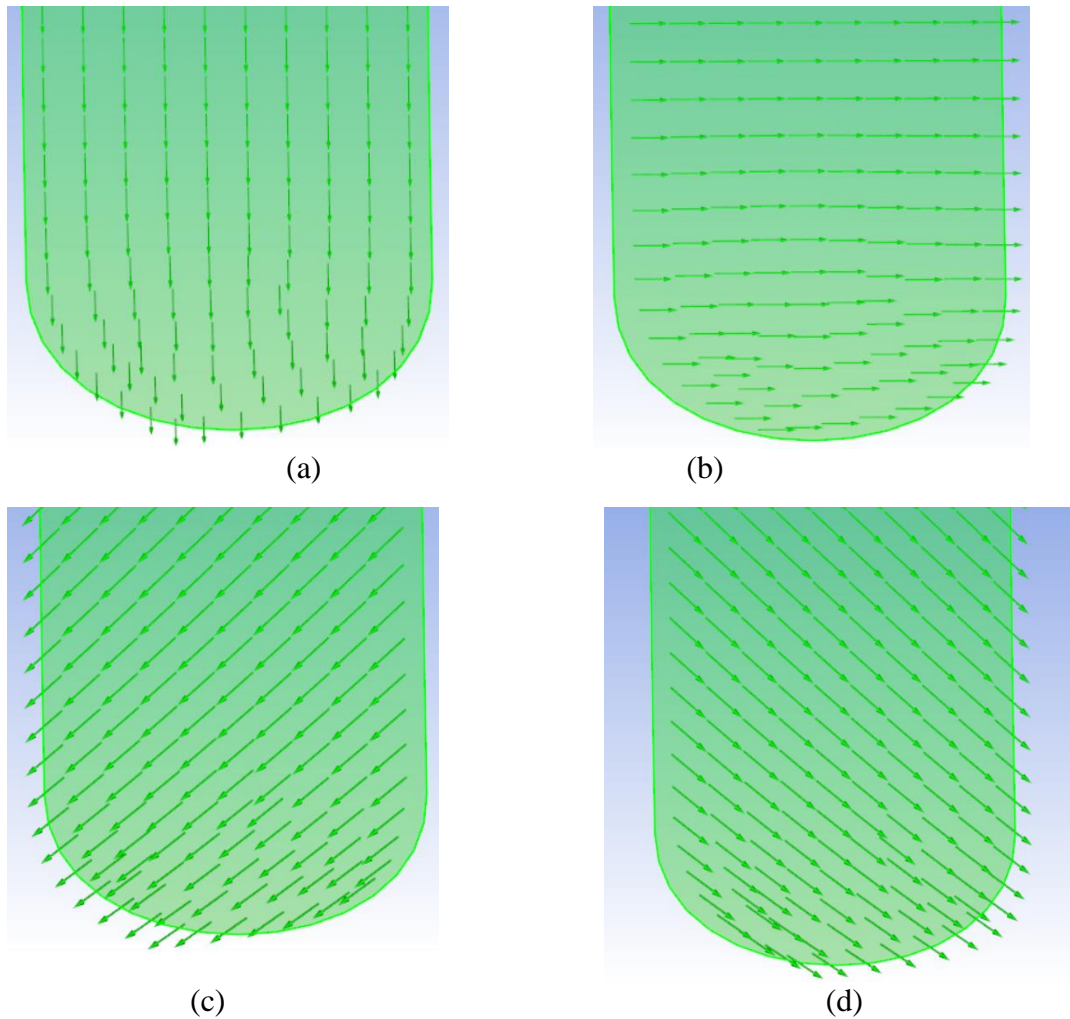
Gambar 3. 9 Representative Volume Element (RVE) dari Komposit

	Name	Value	Unit	P
Engineering Constant				
	E1	7,0215E+10	MPa	<input type="checkbox"/>
	E2	5,7258E+10	MPa	<input type="checkbox"/>
	E3	5,7258E+10	MPa	<input type="checkbox"/>
	G12	2,1434E+10	MPa	<input type="checkbox"/>
	G23	2,0896E+10	MPa	<input type="checkbox"/>
	G31	2,1434E+10	MPa	<input type="checkbox"/>
	nu12	0,3386		<input type="checkbox"/>
	nu13	0,3386		<input type="checkbox"/>
	nu23	0,37009		<input type="checkbox"/>
Density				
	rho	1,276E-09	t m...	<input type="checkbox"/>

Gambar 3. 10 Hasil Komputasi *Orthotropic Elasticity* oleh ANSYS Material Designer

3.5.4 Penyusunan Laminasi Komposit

Penyusunan laminasi komposit dilakukan oleh ANSYS ACP-Pre. Dalam hal ini yang diatur ialah ketebalan *fabric* komposit, orientasi sudut serat, jumlah *stackup* pada lamina, konfigurasi penyusunan lamina komposit, dan jumlah *layer* dari komposit. Dalam hal ini konfigurasi disesuaikan dengan variasi yang akan dilakukan pada penelitian ini. Untuk salah satu contoh penyusunan orientasi sudut serat dapat dilihat pada Gambar 3.11.

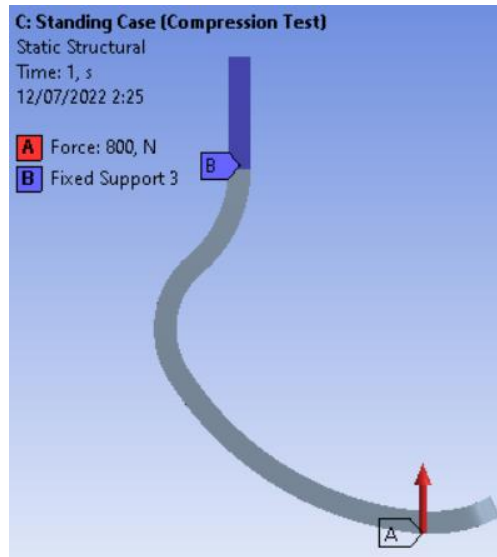


Gambar 3. 11 Penyusunan Orientasi Sudut; (a) 90° , (b) 0° , (c) -45° , (d) 45°

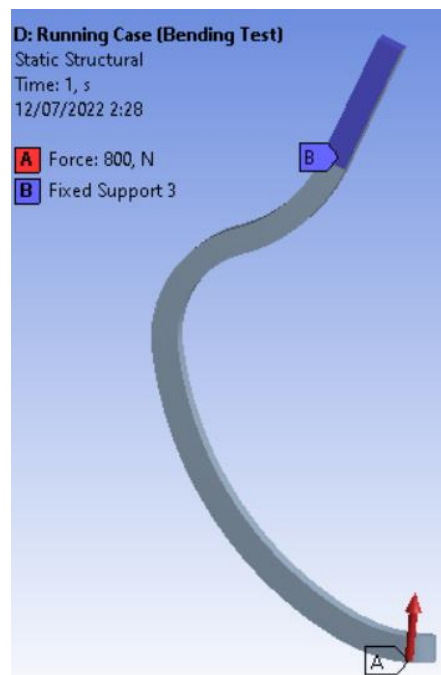
Langkah selanjutnya ialah mendefinisikan arah *rosette* yang akan digunakan, *rosette* sendiri digunakan sebagai sumbu acuan dalam melakukan *Set-up* komposit. Dimana sumbu x pada *rosette* digunakan sebagai arah orientasi sudut 0° dari komposit. Setelah pendefinisian *rosette*, dilakukan pendefinisian dari *oriented selection sets* atau OSS. OSS sendiri digunakan untuk menentukan arah laminasi komposit. Setelah itu dilakukan solving untuk mendapatkan *solid model* dari komposit yang sudah dibuat.

3.5.5 Pengujian Statik

Pengujian static dilakukan dengan *tools* ANSYS Static Structural. Pada tahap ini model dari *running blade prostheses* yang telah dirancang menggunakan komposit sebelumnya akan diberikan *boundary condition* sesuai dengan standar pengujian yang dijadikan acuan. Untuk ilustasinya dapat dilihat pada Gambar 3.12 dan Gambar 3.13.



Gambar 3. 12 *Boundary Condition Standing Stance*

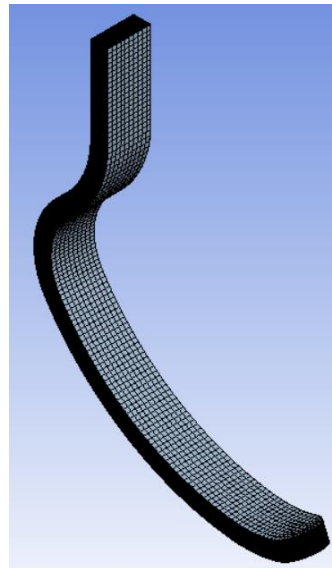


Gambar 3. 13 *Boundary Condition Running stance*

3.5.6 Uji Konvergensi

Uji konvergensi pada analisis menggunakan metode elemen hingga bertujuan untuk mendapatkan hasil yang akurat pada jumlah elemen tertentu. Pada uji konvergensi ini suatu kasus dimodelkan dengan jumlah elemen yang berbeda-beda. Semakin tinggi jumlah elemen yang digunakan, maka hasil yang didapatkan akan semakin akurat. Jika jumlah elemen yang digunakan terlalu tinggi, waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan analisis juga semakin lama. Maka dari itu uji konvergensi ini selain digunakan untuk mendapatkan hasil yang akurat, juga digunakan untuk memilih jumlah elemen paling sedikit yang hasilnya tetap akurat. Jumlah elemen yang dapat memodelkan suatu kasus dengan akurat berbeda-beda. Pada analisis struktur, jumlah elemen yang sedikit dapat digunakan untuk menganalisis kasus-kasus sederhana dengan akurat. Dalam kasus ini digunakan perbandingan antara ukuran elemen

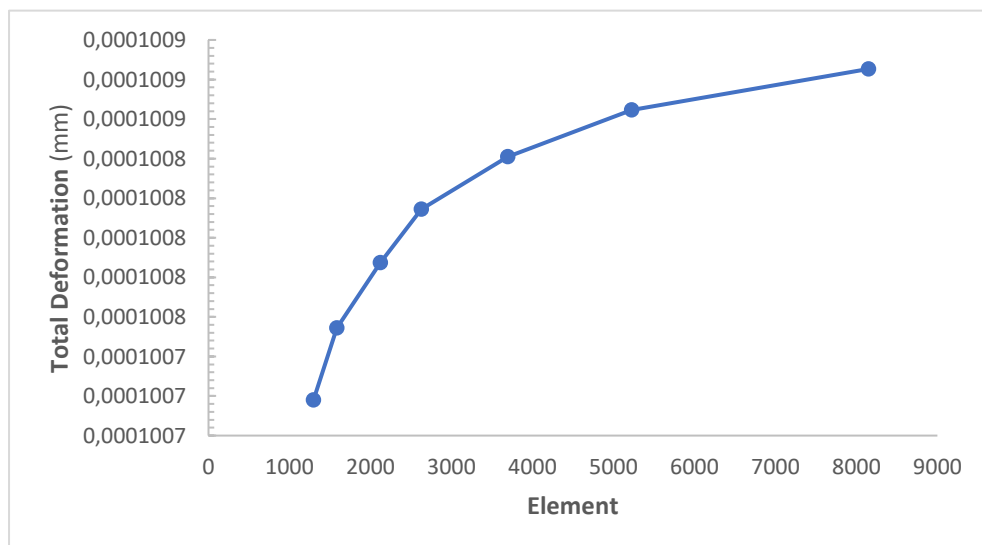
dengan nilai deformasi. Hasil dari *meshing* dapat dilihat pada gambar 3.14, sementara untuk tabel hasil uji konvergensi dan grafiknya dapat dilihat pada Tabel 3.5 dan Gambar 3.15.



Gambar 3. 14 Hasil *Meshing* pada *Running Blade Prostheses*.

Tabel 3. 5 Tabel Uji Konvergensi *Meshing*

No.	<i>Element Size (mm)</i>	<i>Nodes</i>	<i>Element</i>	<i>Orthogonal Quality</i>	<i>Maximum Deformation</i>	<i>Relative Error</i>
1	5,5	1346	1078	0,99834718	0,000100663	
2	5	1434	1296	0,99871548	0,000100718	0,000381268
3	4,5	1738	1584	0,99866837	0,000100754	0,000361875
4	4	2298	2123	0,99829737	0,000100787	0,00032668
5	3,5	2826	2627	0,99866289	0,000100814	0,000268687
6	3	3928	3697	0,99840605	0,000100841	0,000262825
7	2,5	5503	5224	0,99927569	0,000100865	0,000233729
8	2	8498	8150	0,99935935	0,000100885	0,000206496



Gambar 3. 15 Grafik Hasil Uji Konvergensi Simulasi

Dari uji konvergensi yang sudah dilakukan dapat dilihat bahwa hasil pengujian sudah konvergen pada iterasi kedua dengan ukuran elemen sebesar 5 mm dan *relative error* sebesar 0,000381268%. Selain dilakukan uji konvergensi *meshing*, kualitas *meshing* juga dapat dinilai dengan menggunakan *orthogonal quality mesh spectrum*. Untuk gambar dari *orthogonal quality mesh spectrum* dapat dilihat pada Gambar 3.16.



Gambar 3. 16 *Orthogonal Quality Mesh Spectrum*

Dari spektrum ini dapat dibandingkan juga dengan hasil pada Tabel 3.5 bahwa kualitas *meshing* yang dihasilkan masuk kedalam kategori *excellent*. Dari hasil uji konvergensi dan *orthogonal quality meshing* dapat ditetapkan bahwa ukuran *meshing* yang digunakan pada penelitian ini adalah ukuran 5 mm.

3.6 Postprocessing

Postprocessing merupakan langkah setelah langkah *preprocessing* dan *process* dan merupakan langkah terakhir dalam analisis menggunakan metode elemen hingga. Pada tahap *postprocessing* ini akan didapatkan nilai atau *output* yang sudah didefinisikan sebelumnya. *Output* yang didapatkan pada penelitian kali ini berupa nilai tegangan von-Mises, nilai deformasi total, dan nilai faktor keamanan Tsai-Wu serta nilai *stiffness* dari *running blade*. Untuk nilai lain yang didapatkan ialah distribusi tegangan pada tiap *ply* pada komposit.

Dari nilai nilai tersebut akan dibandingkan hasil dari tiap variasi orientasi sudut yang telah ditentukan. Kriteria terbaik ditentukan dari nilai tegangan von-Mises terkecil, nilai faktor keamanan Tsai-Wu terbesar, nilai deformasi total terbesar, dan nilai *stiffness* terbesar. Setelah didapatkan orientasi sudut yang masuk kedalam kriteria variasi orientasi sudut terbaik maka selanjutnya akan ditambahkan 1cm ketebalan total komposit mulai dari 2 cm hingga 4 cm dengan cara penambahan jumlah *layer* sebanyak 5 *layer*.

3.7 Verifikasi Simulasi

Dalam simulasi yang dilakukan perlu dilakukan proses verifikasi untuk memastikan langkah langkah simulasi yang dilakukan sudah benar. Pada subbab ini akan dijelaskan mengenai proses validasi yang dilakukan.

3.7.1 Validasi Data Simulasi

Nilai *orthotropic elasticity* terdiri dari *young modulus*, *shear modulus*, dan *poisson ratio*. Nilai *orthotropic elasticity* yang digunakan merupakan hasil dari *tools* ANSYS Material Designer. Pada sub subbab ini akan dilakukan perhitungan manual untuk nilai *orthotropic elasticity* dari komposit dengan menggunakan *rules of mixtures* yang terdapat pada subbab 2.1.5. Setelah itu akan dilakukan perbandingan antara hasil kalkulasi manual dengan hasil ANSYS Material Designer dan akan dilakukan perhitungan *relative error*.

Nilai densitas dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned} \rho_c &= f_m \rho_m + f_r \rho_r \\ \rho_c &= (0,4 \times 1450) + (0,6 \times 1160) \\ \rho_c &= 1,276 \text{ g/mm}^3 \end{aligned}$$

Untuk nilai *longitudinal* dan *transverse* dari *young modulus* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$E_1 = v_f E_f + v_m E_m$$

$$E_1 = (0,4 \times 11,88) + (0,6 \times 3,78)$$

$$E_1 = 7020 \text{ MPa}$$

$$E_2 = \frac{E_m(1 + \xi \eta v_f)}{(1 - \eta v_f)}$$

$$E_2 = 5711,26 \text{ MPa}$$

$$E_2 = E_3$$

Sedangkan nilai *longitudinal* dan *transverse* dari *shear modulus* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

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

$$G_{12} = 1,4 \frac{(1+0,4) \times 4486,4}{0,6 \times 4486,4} \frac{0,6 \times 1,4}{(1+0,4) \times 1,4}$$

$$G_{12} = 2143,09 \text{ MPa}$$

$$G_{12} = G_{31}$$

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

$$G_{23} = \frac{1,4 \times 4,2 \times (1,4 + 4,486) + 2 \times 4486,4 \times 1400 + 4,2 \times (4,486 - 1,4) \times 0,4}{4,2 \times (1,4 + 4,486) + 2 \times 4486,4 \times 1400 - (4,2 + 2 \times 1,4) \times (4,486 - 1,4) \times 0,4}$$

$$G_{23} = 2143,097$$

Untuk nilai *longitudinal* dan *transverse* dari Poisson's Ratio dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

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

$$v_{12} = 0,4 \times 0,324 + 0,6 \times 0,35$$

$$v_{12} = 0,3396$$

$$v_{23} = v_{13}$$

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

$$v_{23} = \frac{5197,5}{2 \times 2143,09} - 1$$

$$v_{23} = 0,3478$$

Jika dibandingkan antara hasil perhitungan teoritis *rules of mixtures* dengan hasil dari ANSYS Material Designer didapatkan besar *relative error* sebagaimana yang dijelaskan pada Tabel 3.6.

Tabel 3. 6 Perbandingan antara Hasil Kalkulasi Manual dengan ANSYS Material Designer

Entitas	Material Designer	Kalkulasi Manual	Relative Error (%)
ρ	1,276	1,276	0.00
E1	7021	7020	0.01
E2	5725	5711	0.24
E3	5725	5197,5	0.24
G12	2143,4	2143,097	0.00
G23	2089,6	2075,83	0.06
G31	2143,4	2143,097	0.00
V12	0,3386	0,3396	0.02
V13	0,3386	0,3396	0.02
V23	0,37	0,3478	0.06

Berdasarkan tabel diatas, nilai *relative error* dari perbandingan hasil *tools* ANSYS Material Designer dengan hasil kalkulasi manual sangat kecil atau memiliki perbedaan yang tidak begitu signifikan. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa data yang dihasilkan oleh ANSYS Material Designer merupakan data yang *valid* dan dapat digunakan pada simulasi yang akan dijalankan.

Selanjutnya dilakukan perhitungan tangan untuk nilai *orthotropic stress limits* dengan menggunakan rumus yang sudah di cantumkan pada sub subbab 2.1.5. Perhitungan untuk nilai *orthotropic stress limit* dapat dilihat pada perhitungan dibawah.

$$\varepsilon_m = \frac{\sigma_m}{E_m} \qquad \varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f}$$

$$\varepsilon_m = \frac{86,04}{3780} \qquad \varepsilon_f = \frac{267,69}{11880}$$

$$\varepsilon_m = 0,0276 > \varepsilon_f = 0,0225$$

Jika nilai dari $\varepsilon_m > \varepsilon_f$, maka perhitungan nilai *longitudinal tensile strength* akan menggunakan persamaan berikut ini.

$$(\sigma_{x_c}^T)_{ult} = (\sigma_{x_f}^T) V_f + (\varepsilon_{1_f}^T)_{ult} E_m (1 - V_f)$$

$$(\sigma_{x_c}^T)_{ult} = (267,69) 0,4 + (0,0225) 3780 (1 - 0,3)$$

$$(\sigma_{x_c}^T)_{ult} = 158,18 \text{ MPa}$$

Selanjutnya untuk mendapatkan nilai *tranverse tensile strength* akan menggunakan persamaan berikut ini.

$$\begin{aligned}(\sigma_{y_c}^T)_{ult} &= (\sigma_m^T)_{ult} \left(1 - 2 \sqrt{\frac{V_f}{\pi}} \right) \\(\sigma_{y_c}^T)_{ult} &= 86,04 \left(1 - 2 \sqrt{\frac{0,4}{\pi}} \right) \\(\sigma_{y_c}^T)_{ult} &= 80,89 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Setelah mendapatkan hasil nilai *transverse tensile strength* maka akan didapatkan nilai *longitudinal compressive strength* dengan menggunakan perumusan berikut ini.

$$\begin{aligned}(\sigma_{ic}^c)_{ult} &= \left[\frac{E_{1f}V_f + E_m(1-V_f)}{\nu_{12f}V_f + \nu_m(1-V_f)} \right] \left[1 + \left(\frac{E_m}{E_{2f}} - 1 \right) V_f \right] (\epsilon_m^T)_{ult} \\(\sigma_{x_c}^c)_{ult} &= 59,88 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Lalu setelah mendapatkan hasil dari *longitudinal compressive strength*, maka akan dicari nilai *transverse compressive strength* dengan perumusan berikut ini.

$$\begin{aligned}(\sigma_{y_c}^c)_{ult} &= E_{2c} \left(1 + \left(\frac{E_m}{E_f} - 1 \right) V_f \right) (\epsilon_m^c)_{ult} \\(\sigma_{y_c}^c)_{ult} &= 104,13 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Dan yang terakhir, untuk nilai *in-plane shear strength* dan juga *out-plane shear strength* akan didapatkan dengan perumusan sebagai berikut ini.

$$\begin{aligned}(\tau_{xy_c})_{ult} &= G_{12c} \left[1 + \left(\frac{G_m}{G_{12f}} - 1 \right) V_f \right] (\gamma_m)_{ult} \\(\tau_{xy_c})_{ult} &= 1111,8 \left[1 + \left(\frac{905,8}{1840} - 1 \right) 0,3 \right] 0,027599 \\(\tau_{xy_c})_{ult} &= 76,85 \\(\tau_{yz_c})_{ult} &= \frac{(\tau_{xy_c})_{ult}}{2} \\(\tau_{yz_c})_{ult} &= \frac{76,85}{2} = 38,42 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Untuk data *orthotropic stress limits* dalam bentuk tabel dapat dilihat pada Tabel 3.7.

Tabel 3. 7 Orthotropic Stress Limits

Entitas	Nilai	Satuan
Tensile X Direction	158,18	MPa
Tensile Y Direction	80,89	MPa
Tensile Z Direction	80,89	MPa
Compressive X Direction	59,88	MPa
Compressive Y Direction	104,13	MPa

Compressive Z Direction	104,13	MPa
Shear XY	76,85	MPa
Shear YZ	38,42	MPa
Shear XZ	76,85	MPa

3.7.2 Verifikasi Langkah Simulasi

Pada penelitian ini dilakukan juga validasi langkah simulasi dengan cara melakukan simulasi ulang terhadap penelitian terdahulu yang berjudul “*Optimization of Running Blade Prosthetics Utilizing Crow Search Algorithm Assisted by Artificial Neural Networks*” (Solis et al., 2021). Pada penelitian tersebut telah diberikan untuk geometri sesuai pada Gambar 3.17.

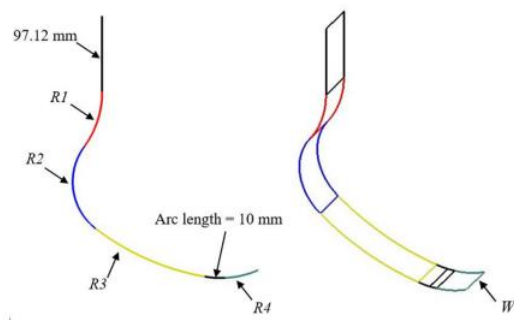
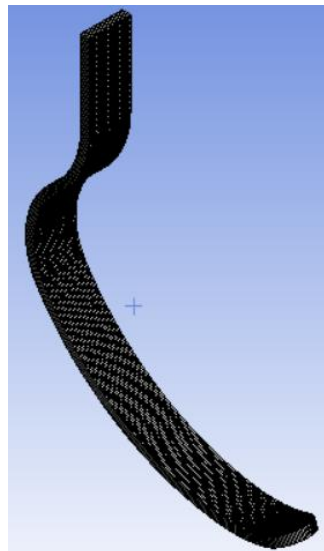


Fig. 3. Geometrical parameters of the RBP

Design parameter	Lower bound (<i>lb</i>)	Upper bound (<i>ub</i>)
<i>R1</i> [mm]	106.2	129.8
<i>R2</i> [mm]	74.7	91.3
<i>R3</i> [mm]	283.5	343.5
<i>R4</i> [mm]	110.7	135.3
<i>W</i> [mm]	40.5	49.5
No. of layers [-]	18	26

Gambar 3. 17 Geometri dari *Running Blade Prostheses*

Setelah itu kita lakukan pemodelan *surface* dan *meshing* dari geometri yang diberikan, pemodelan *surface* dapat dilihat pada Gambar 3.18.



Gambar 3. 18 Pemodelan *Surface* dan *Meshing*

Setelah pemodelan dilakukan, maka selanjutnya ialah memasukkan data *orthotropic* dari material yang akan digunakan. Untuk data material yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.19.

Properties	Unit	Value
E_x	[MPa]	59160
E_y	[MPa]	59160
E_z	[MPa]	7500
ν_{xy}	[-]	0.04
ν_{yz}	[-]	0.3
ν_{xz}	[-]	0.3
ρ	[kg/m ³]	1451

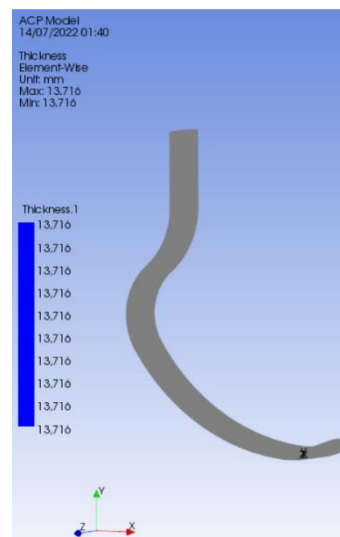
Gambar 3. 19 *Material Properties* Penelitian Terdahulu

Setelah data material dimasukkan maka dilakukan konfigurasi penyusunan komposit sesuai dengan data yang sudah diberikan pada jurnal. Untuk data konfigurasi komposit dapat dilihat pada Gambar 3.20.

Fabrics	ABS, Core
Number of layers	18, 20, 22, 24, 26
Sub laminates	-45°/45°, 0°/90°

Gambar 3. 20 Konfigurasi Penyusunan Komposit

Konfigurasi penyusunan komposit dilakukan dengan menggunakan *tools* ANSYS ACP-Pre dengan *input* yang disesuaikan dengan jurnal yaitu dengan orientasi sudut [0/90] dengan ketebalan *fabric* 0.762 mm dan dengan jumlah *layer* sebanyak 18 sehingga mendapatkan ketebalan komposit sebesar 13.768 mm. Untuk hasil *set-up* pada ACP-Pre dapat dilihat pada Gambar 3.21.



Gambar 3. 21 Hasil *Set-up* ACP-Pre

Setelah dilakukan penyusunan komposit pada ACP-Pre, langkah selanjutnya ialah melakukan pengujian statik pada ANSYS Static Structural untuk mendapatkan *output* berupa *deformasi*. Untuk *boundary condition* yang diberikan disesuaikan dengan jurnal penelitian yang digunakan. Untuk gambar dari *boundary condition* yang diberikan dapat dilihat pada Gambar 3.22.

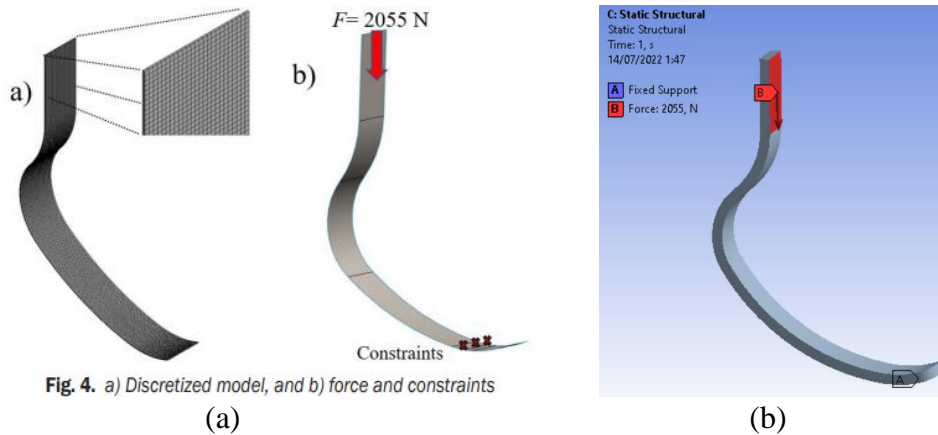
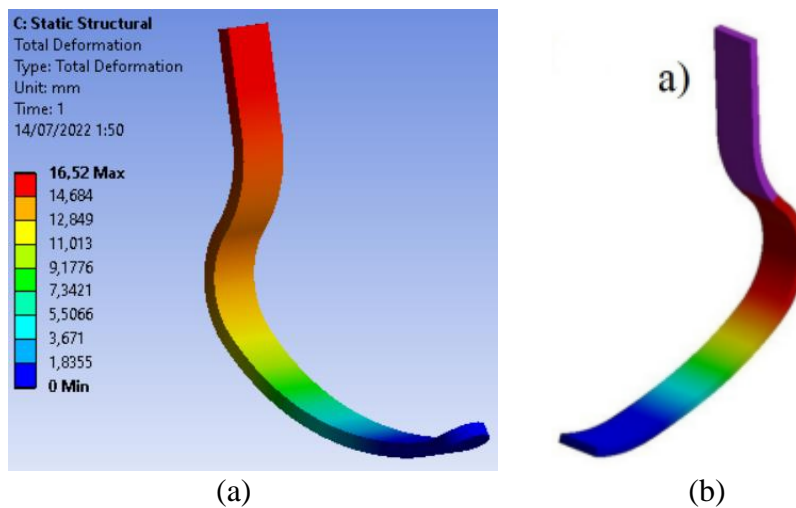


Fig. 4. a) Discretized model, and b) force and constraints

Gambar 3. 22 *Boundary Condition* untuk RBP; (a) Jurnal Penelitian Terdahulu, (b) Simulasi yang Dilakukan

Setelah pemberian *boundary condition*, maka selanjutnya dilakukan *solving* untuk mendapatkan *output* berupa deformasi dan akan dibandingkan dengan hasil dari jurnal penelitian terdahulu. Untuk *output* dari simulasi dapat dilihat pada Gambar 3.23.



Gambar 3. 23 *Output* Deformasi ; (a) Simulasi yang Dilakukan, (b) Jurnal Penelitian Terdahulu

Setelah didapatkan *output* berupa deformasi maka dilakukan perbandingan antara hasil dari simulasi yang dilakukan dengan hasil dari jurnal penelitian yang digunakan. Untuk hasil *deformasi* simulasi yang dilakukan mendapatkan nilai sebesar 16.52 mm sedangkan hasil *deformasi* yang dihasilkan pada penelitian terdahulu sebesar 16.24 mm sehingga terdapat *relative error* sebesar 0,016 % antara simulasi yang dilakukan dengan penelitian terdahulu. Dari hasil yang didapatkan mengacu pada *relative error* yang tidak begitu signifikan maka dapat disimpulkan bahwa langkah langkah yang dilakukan pada penelitian ini sudah ter-verifikasi dan dapat dilakukan pengambilan data.

Halaman ini sengaja dikosongkan

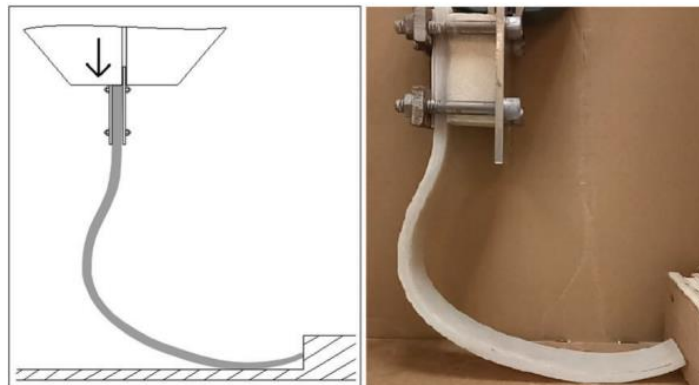
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai hasil simulasi yang disertai pembahasan mengenai kekuatan dari prostetik *running blade* dengan variasi orientasi sudut dan ketebalan komposit dan juga perbandingan antara *running blade* dari material kenaf/epoksi dengan material *epoxy – carbon woven (230 GPa) wet*.

4.1 Hasil Simulasi Penelitian dan Pembahasan

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari orientasi sudut dan ketebalan terhadap kekuatan dari prostetik *running blade* dengan menggunakan material komposit kenaf/epoksi. Dalam penelitian ini dilakukan simulasi untuk tiap variasi sudut yaitu [0/0], [90/90], [0/90], [0/90]_s, [±45], dan [±45]_s dengan pembebanan aktual (800N). Kemudian orientasi sudut terbaik akan dilakukan simulasi lanjut untuk variasi ketebalan dengan total tebal komposit 2cm, 3cm, dan 4cm agar memperoleh spesifikasi yang optimal yang dapat lulus standar pengujian level P3 ISO 10328 (2016): *Prosthetics – Structural Testing of Lower-limb Prostheses – Requirements and Test Methods*. Hasil simulasi pada penelitian ini berupa nilai *equivalent stress*, *total deformation*, *Tsai-Wu safety factor* dan *stiffness* dari *running blade*. Setelah orientasi sudut terbaik serta ketebalan yang optimum didapatkan maka *running blade* akan dibandingkan dengan *running blade* yang menggunakan material *epoxy carbon woven (230 GPa) wet*. Untuk hasil simulasi pengujian dapat dilihat pada subbab selanjutnya.

4.1.1 Pengaruh Orientasi Sudut Terhadap Kekuatan Prostetik *Running Blade* pada *Standing Stance*

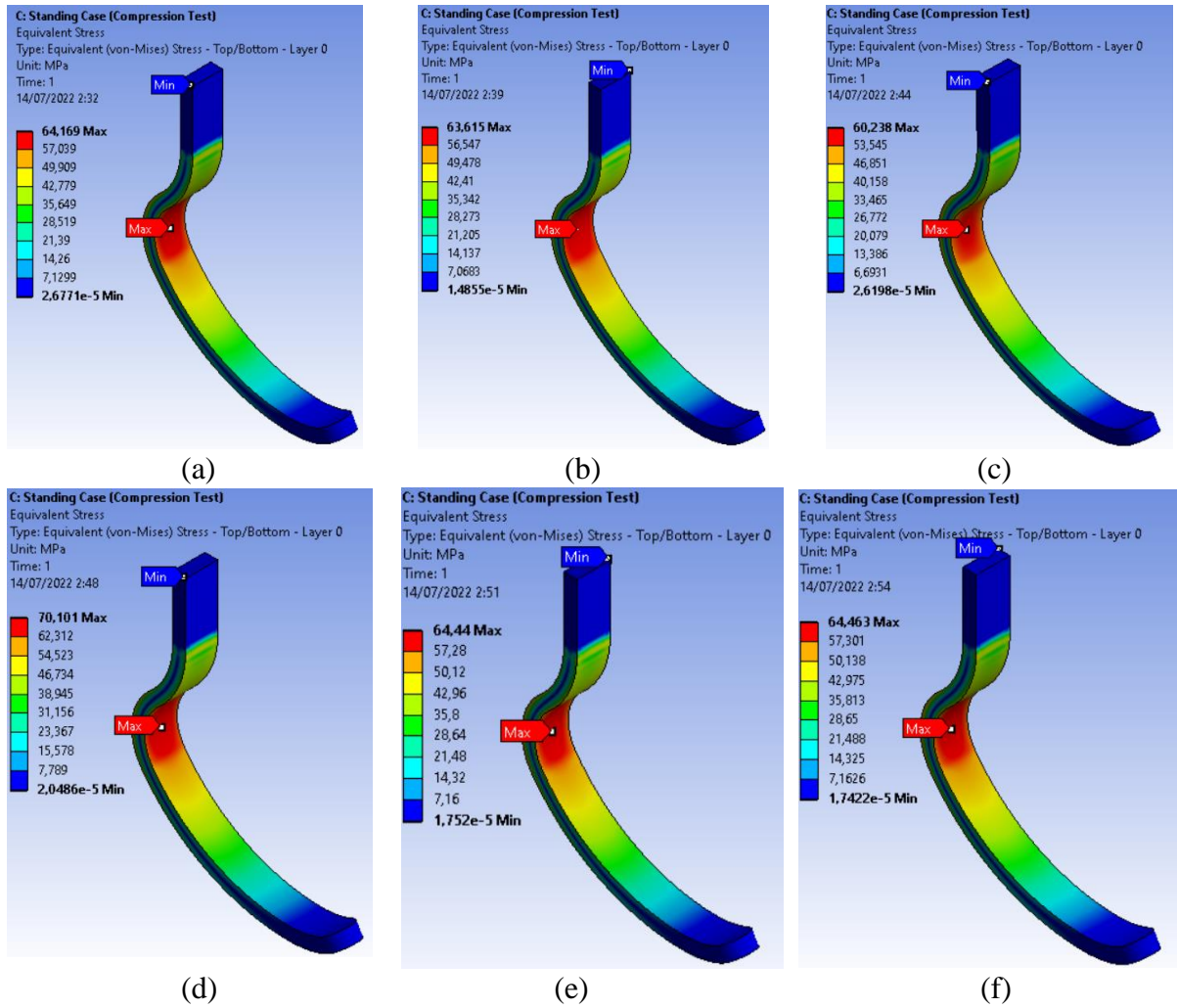


Gambar 4. 1 Ilustrasi Pengujian pada *Standing Stance*

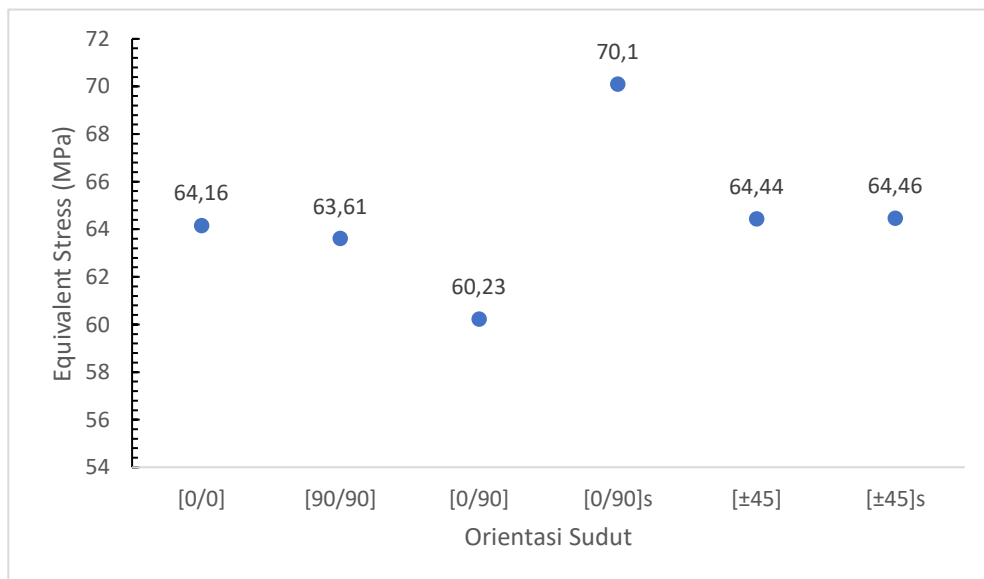
Pada pengujian ini dilakukan pengujian pada kondisi *standing stance* terhadap *running blade* dengan output berupa *equivalent stress*, *total deformation*, *Tsai – Wu safety factor*, dan *stiffness running blade*. Pembebanan yang diberikan merupakan pembebanan aktual sebesar 800 N.

1. Orientasi Sudut vs *Equivalent Stress (von – Mises)*

Pada simulasi yang dilakukan, didapatkan nilai tegangan von – Mises. Tegangan von – Mises digunakan untuk mencari nilai faktor keamanan struktur, dari nilai tegangan von mises dapat diprediksi bahwa struktur akan mengalami kegalan atau tidak. Untuk kontur hasil simulasi dengan variasi sudut [0/0], [90/90], [0/90], [0/90]_s, [±45], dan [±45]_s dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4. 2 *Equivalent Stress* dari Setiap Variasi Sudut pada Pengujian *Standing Stance* ; (a) [0/0], (b) [90/90], (c) [0/90], (d) [0/90]_s, (e) [±45], (f) [±45]_s



Gambar 4. 3 Grafik Orientasi Sudut vs *Equivalent Stress* pada Kondisi *Standing Stance*

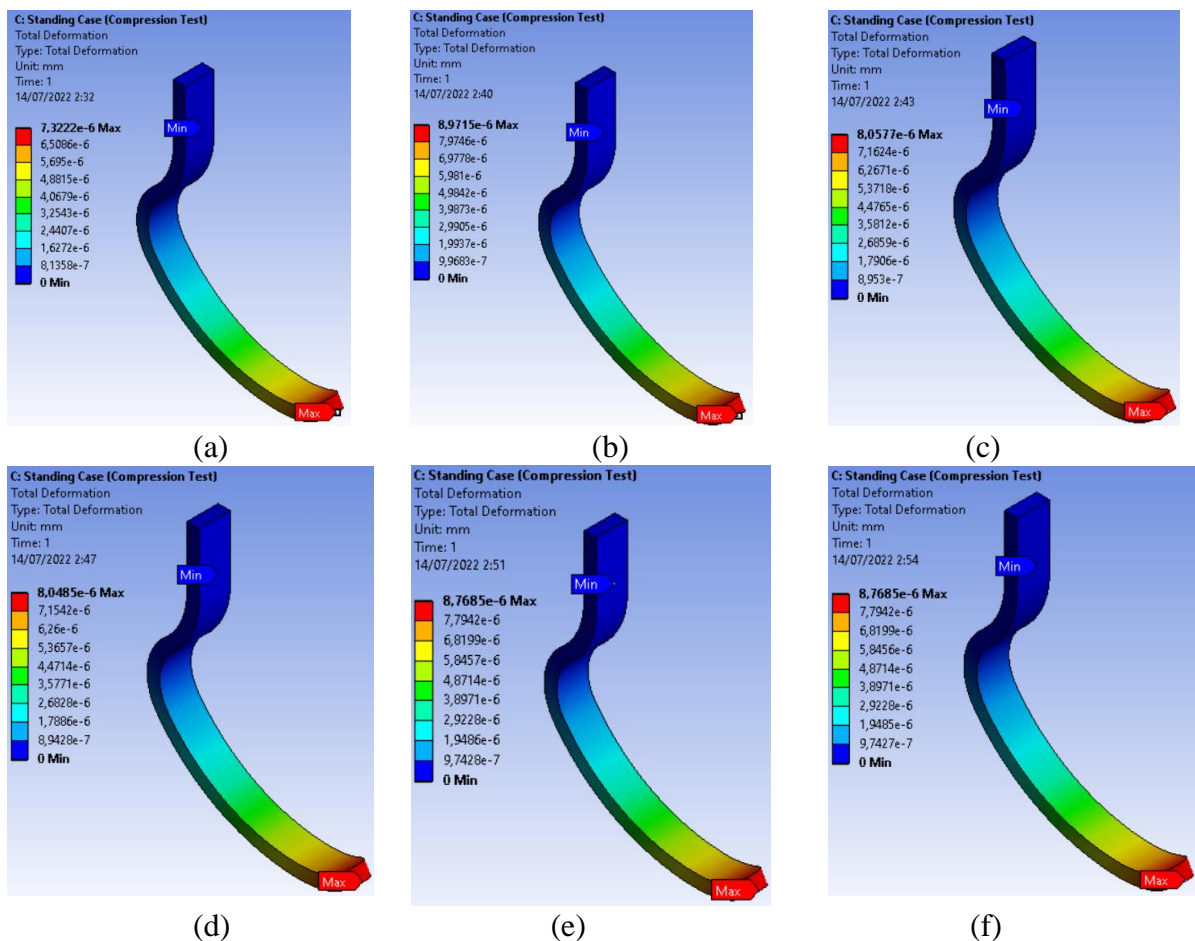
Dari data hasil simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.3 diatas, dapat dilihat bahwa *running blade* dengan orientasi sudut [0/0] mendapatkan nilai *equivalent stress* sebesar 64.16 MPa. Untuk orientasi sudut [90/90] didapatkan nilai *equivalent stress* sebesar 63.61 MPa. Untuk orientasi sudut [0/90] didapatkan nilai *equivalent stress* sebesar 60.23 MPa. Untuk orientasi sudut [0/90]_s didapatkan nilai *equivalent stress* sebesar 70.1 MPa. Untuk orientasi sudut [±45] didapatkan nilai *equivalent stress* sebesar 64.44 MPa. Untuk Orientasi sudut [±45]_s didapatkan nilai *equivalent stress* sebesar 64.46 MPa.

Titik dimana terjadinya tegangan tertinggi semua sama terjadi pada bagian lekukan, yang kemungkinan terjadinya tegangan tarik dan tegangan tekan secara bersamaan pada bagian tersebut sehingga memiliki nilai tegangan von – Mises tertinggi.

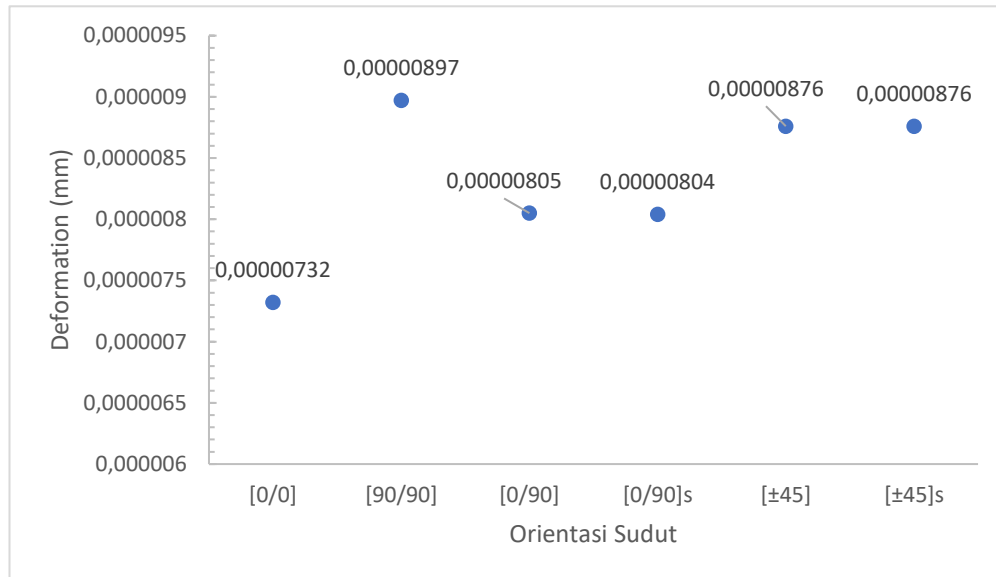
Tegangan von – Mises tertinggi didapat pada orientasi sudut [0/90]_s dan yang terendah pada orientasi sudut [0/90]. Berdasarkan teori von – Mises, Material akan semakin aman apabila nilai tegangan von – mises yang dimiliki semakin kecil dan juga sebaliknya. Nilai tegangan akan dibandingkan dengan nilai *yield* dari material, darisana didapatkan nilai faktor keamanan von- Mises.

2. Orientasi Sudut vs Total Deformation

Deformasi total yang terjadi pada *running blade* dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4. 4 Total Deformation dari Setiap Variasi Sudut pada Pengujian *Standing Stance* ; (a) [0/0], (b) [90/90], (c) [0/90], (d) [0/90]_s, (e) [±45], (f) [±45]_s



Gambar 4. 5 Grafik Orientasi Sudut vs *Total Deformation* pada Kondisi *Standing Stance*

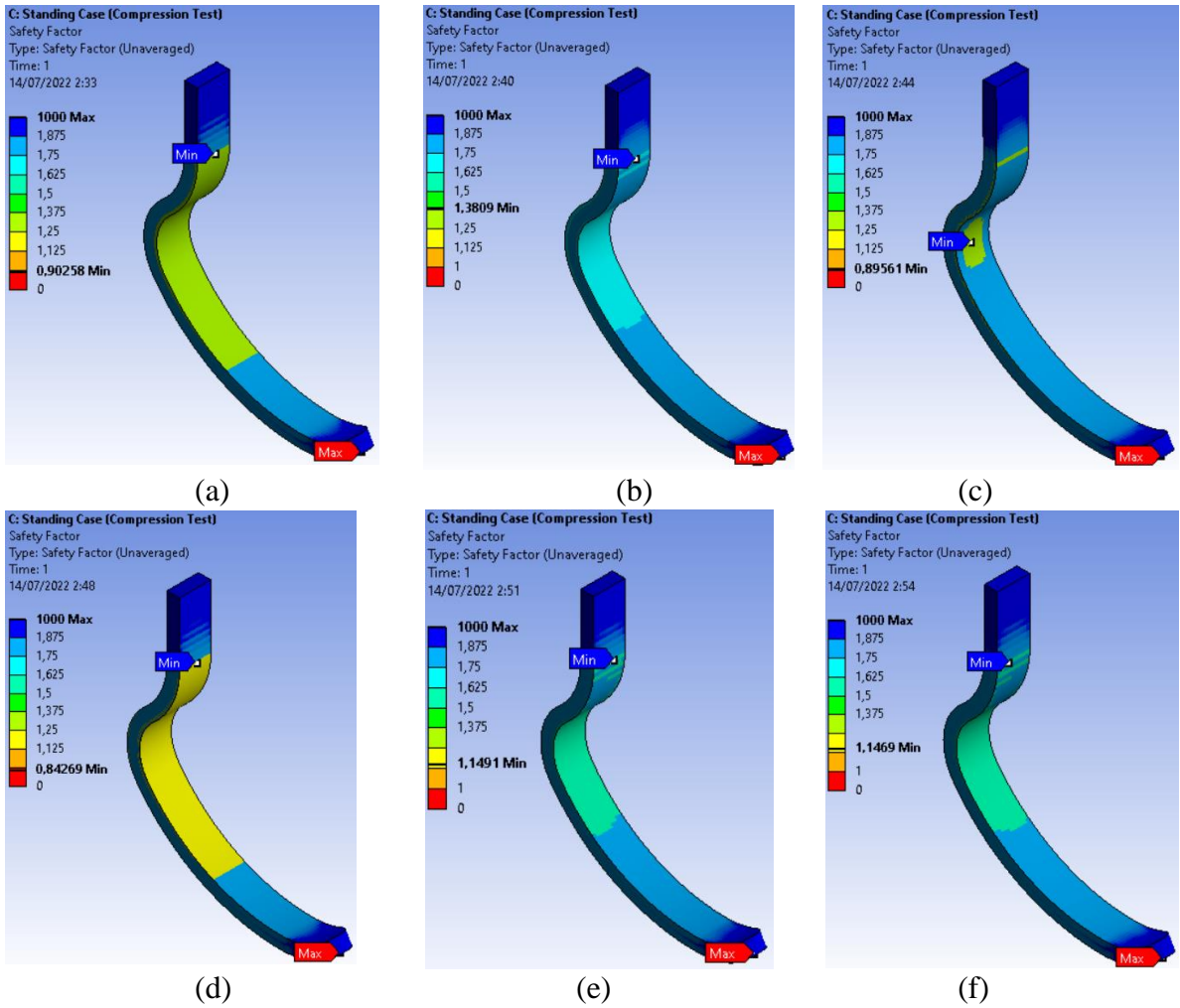
Dari data hasil simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.5 diatas, dapat dilihat bahwa *running blade* dengan orientasi sudut [0/0] mendapatkan nilai *total deformation* sebesar 0,00000732 mm. Untuk orientasi sudut [90/90] didapatkan nilai *total deformation* sebesar 0,00000897 mm. Untuk orientasi sudut [0/90] didapatkan nilai *total deformation* sebesar 0,00000805 mm. Untuk orientasi sudut [0/90]_s didapatkan nilai *total deformation* sebesar 0,00000804 mm. Untuk orientasi sudut [±45] didapatkan nilai *total deformation* sebesar 0,00000876 mm. Untuk Orientasi sudut [±45]_s, didapatkan nilai *total deformation* sebesar 0,00000876 mm.

Lokasi terjadinya deformasi semuanya sama, terdapat pada bagian ujung atau *tip* dari *running blade*. Deformasi tersebut terjadi karena pada bagian *tip* mengalami kontak secara langsung dengan permukaan tanah sehingga mengakibatkan terjadinya deformasi yang besar dibandingkan dengan bagian lainnya.

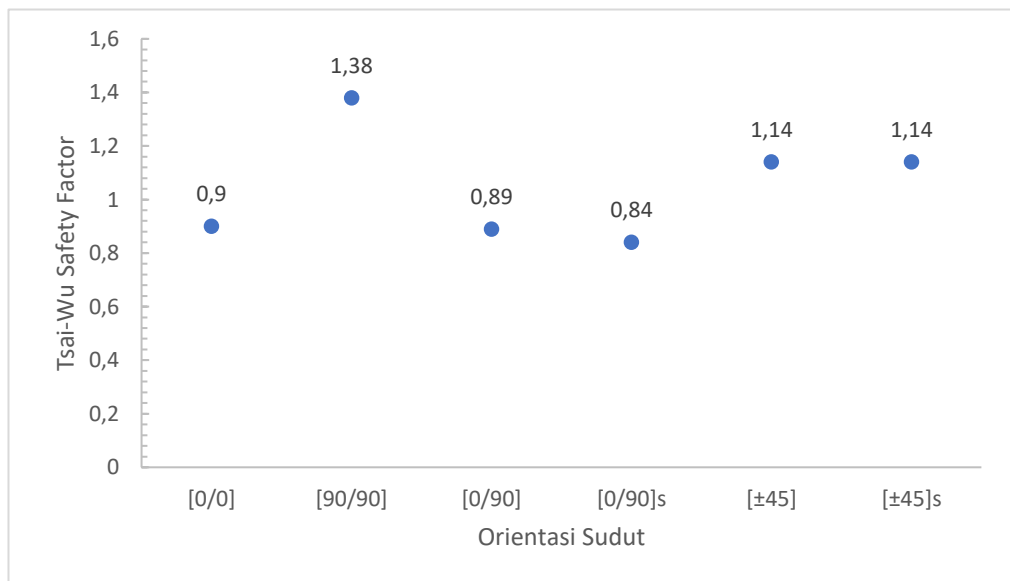
Nilai total deformasi tertinggi didapat pada orientasi sudut [90/90] dan yang terendah pada orientasi sudut [0/0]. Berdasarkan teori deformasi, apabila nilai deformasi semakin tinggi maka bisa dianggap bahwa material komposit yang dirancang sebagai struktur akan semakin lentur atau tidak kaku dan juga sebaliknya. Dapat dinilai bahwa untuk orientasi sudut [90/90] memiliki nilai kekakuan paling tinggi dan orientasi sudut [0/0] memiliki nilai kekakuan paling rendah.

3. Orientasi Sudut vs Tsai – Wu Safety Factor

Nilai faktor keamanan Tsai – Wu merupakan nilai yang dijadikan acuan untuk menentukan apakah pada material komposit yang bersifat *orthotropic* ini akan terjadi kegagalan pada laminanya atau tidak. Untuk nilai faktor keamanan Tsai – Wu yang sudah disimulasikan dapat dilihat pada Gambar 4.6



Gambar 4. 6 Tsai – Wu *Safety Factor* dari Setiap Variasi Sudut pada Pengujian *Standing Stance* ; (a) [0/0], (b) [90/90], (c) [0/90], (d) [0/90]_s, (e) [±45]_s, (f) [±45]_s



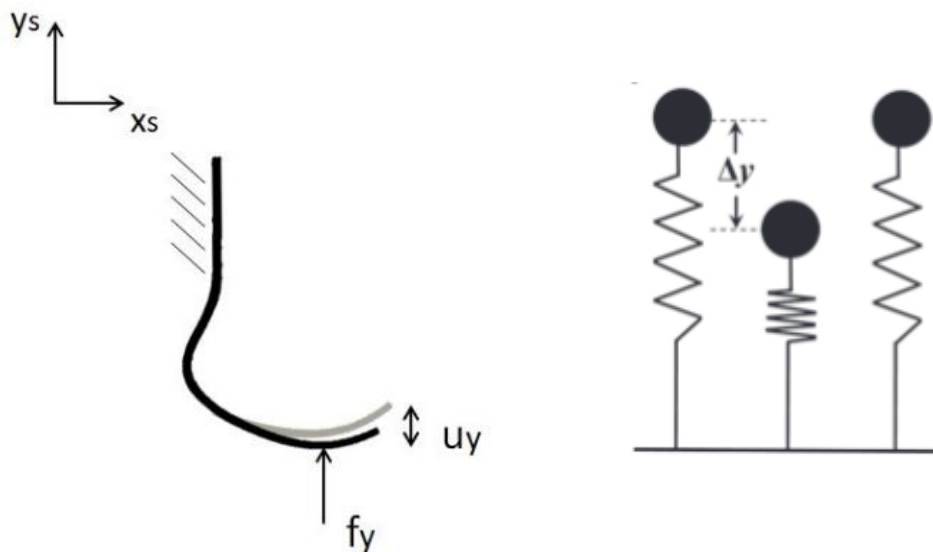
Gambar 4. 7 Grafik Orientasi Sudut vs Tsai – Wu *Safety Factor* pada Kondisi *Standing Stance*

Dari data hasil simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.7 diatas, dapat dilihat bahwa *running blade* dengan orientasi sudut [0/0] mendapatkan nilai Tsai – Wu *safety factor* sebesar 0.9. Untuk orientasi sudut [90/90] didapatkan nilai Tsai – Wu *safety factor* sebesar 1.38. Untuk orientasi sudut [0/90] didapatkan nilai Tsai – Wu *safety factor* sebesar 0.89. Untuk orientasi sudut [0/90] s didapatkan nilai Tsai – Wu *safety factor* sebesar 0.84. Untuk orientasi sudut [±45] didapatkan nilai Tsai – Wu *safety factor* sebesar 1.14 MPa. Untuk Orientasi sudut [±45]_s, didapatkan nilai Tsai – Wu *safety factor* sebesar 1.14 MPa.

Titik yang memiliki nilai Tsai – Wu *safety factor* terendah hampir semua sama pada bagian atas dari *running blade* kecuali untuk orientasi sudut [0/90] yang terjadi pada bagian lekukan dalam. Hal tersebut terjadi karena pada bagian atas merupakan bagian yang dijadikan tumpuan atau *fixed support* sehingga terjadi pula momen yang mengakibatkan bagian tersebut memiliki nilai Tsai – Wu *safety factor* terkecil.

Nilai Tsai – Wu *safety factor* tertinggi didapat pada orientasi sudut [90/90] dan yang terendah pada orientasi sudut [0/90]_s. Berdasarkan nilai faktor keamanan Tsai – Wu, apabila nilai yang didapat semakin kecil maka material komposit akan memiliki kemungkinan yang makin tinggi untuk terjadi kegagalan serta sebaliknya. Material komposit akan dikatakan gagal apabila memiliki nilai faktor keamanan Tsai – Wu kurang dari atau sama dengan 1.

4. Orientasi Sudut vs *Stiffness Running Blade*



Gambar 4. 8 Ilustrasi *Stiffness Running Blade*

Stiffness atau kekakuan merupakan salah satu faktor utama dalam perancangan *running blade*. Dimana kekakuan dari *running blade* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan dibawah

$$k_{leg} = \frac{F}{\Delta l}$$

ini,

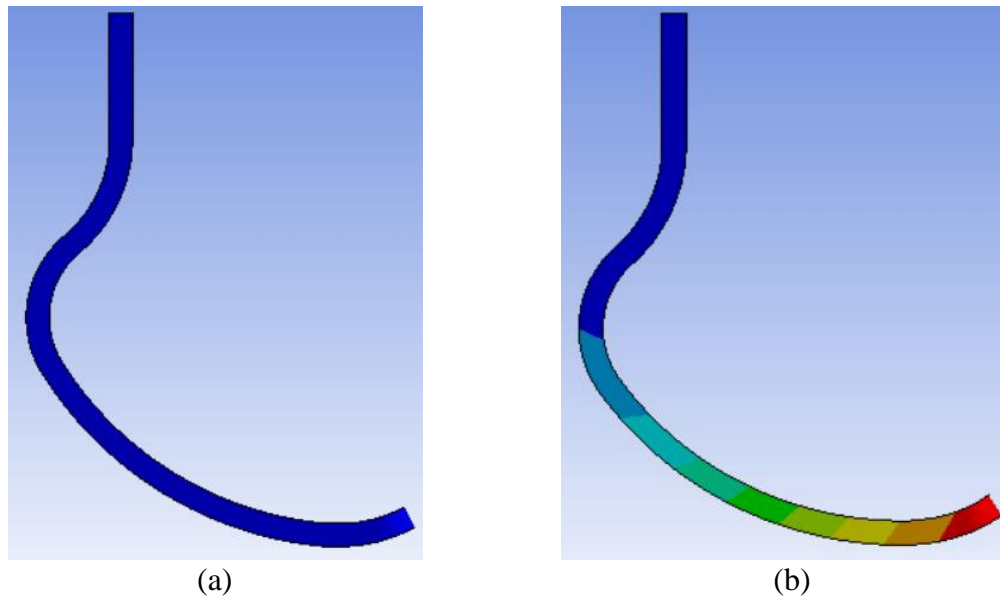
Dimana:

K = *Stiffness* (N/mm)

F = *Applied Force* (N)

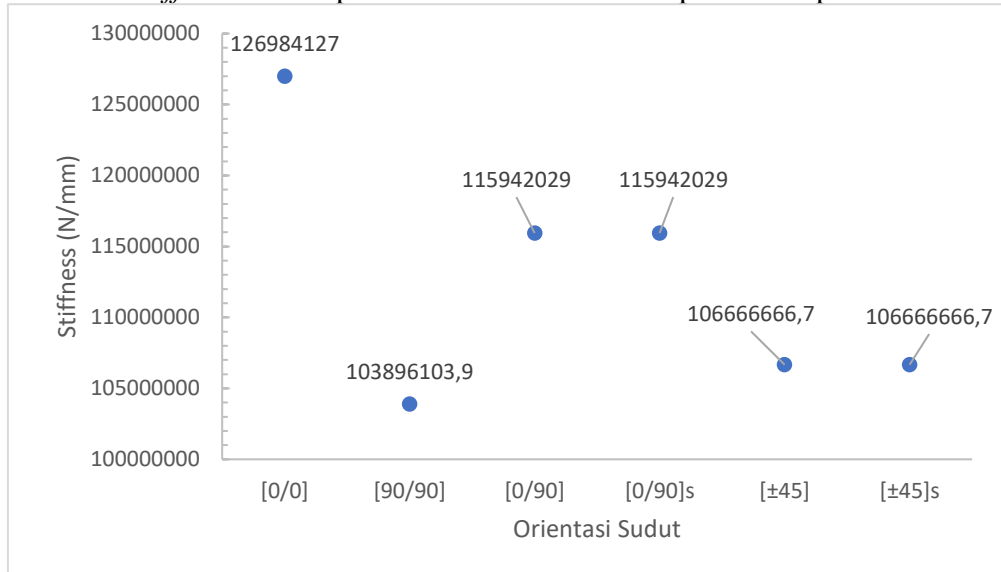
ΔL = *Displacement* (mm)

Untuk kontur dari *displacement* secara umum dapat dilihat pada Gambar 4.9.



Gambar 4. 9 Kontur *Displacement Running Blade*; (a) Sebelum Pembebanan, (b) Setelah Pembebanan

Untuk nilai *stiffness* dari tiap variasi orientasi sudut dapat dilihat pada Gambar 4.10



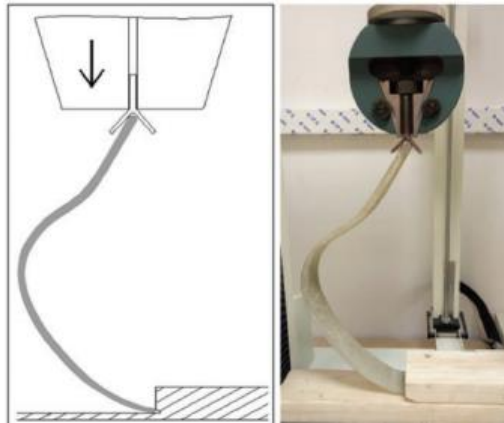
Gambar 4. 10 Grafik Orientasi Sudut vs *Stiffness* pada Kondisi *Standing Stance*

Dari data hasil simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.10 diatas, dapat dilihat bahwa *running blade* dengan orientasi sudut [0/0] mendapatkan nilai *stiffness* sebesar 126984127 N/mm. Untuk orientasi sudut [90/90] didapatkan nilai *stiffness* sebesar 103896103,9 N/mm. Untuk orientasi sudut [0/90] didapatkan nilai *stiffness* sebesar 115942028 N/mm. Untuk orientasi sudut [0/90]_s didapatkan nilai *stiffness* sebesar 115942028 N/mm. Untuk orientasi sudut [±45] didapatkan nilai *stiffness* sebesar 106666666,7 N/mm. Untuk Orientasi sudut [±45]_s, didapatkan nilai *stiffness* sebesar 106666666,7 N/mm.

Nilai *stiffness* tertinggi didapat pada orientasi sudut [0/0] dan yang terendah pada orientasi sudut [90/90]. Berdasarkan *stiffness*, apabila nilai *stiffness* tinggi maka bisa dianggap bahwa *running blade* yang dirancang semakin kaku dan juga sebaliknya. Dapat dinilai bahwa

untuk orientasi sudut [0/0] memiliki nilai kekakuan paling tinggi dan orientasi sudut [90/90] memiliki nilai kekakuan paling rendah.

4.1.2 Pengaruh Orientasi Sudut Terhadap Kekuatan Prostetik *Running Blade* pada *Running Stance*

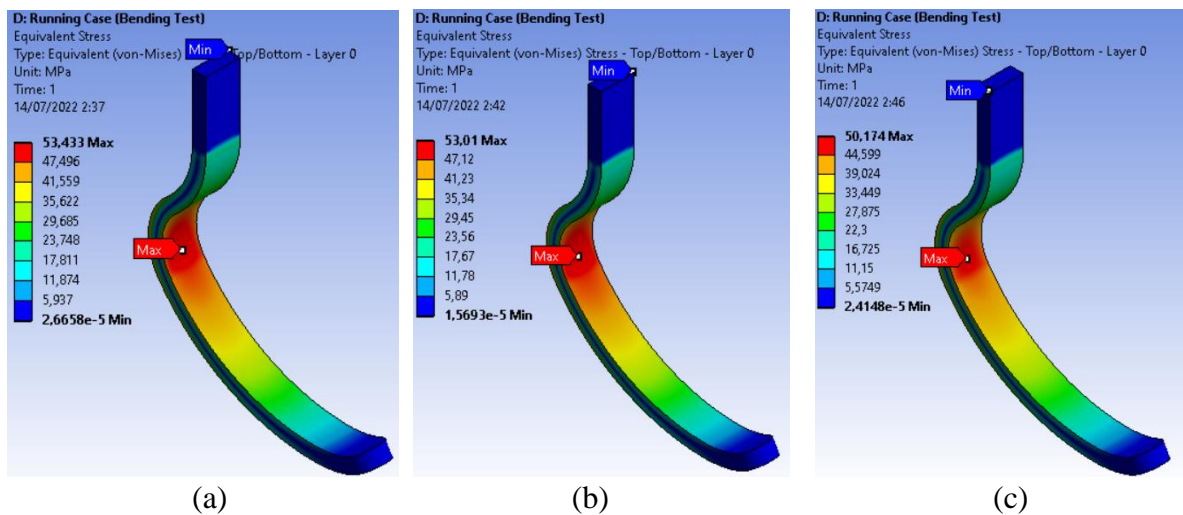


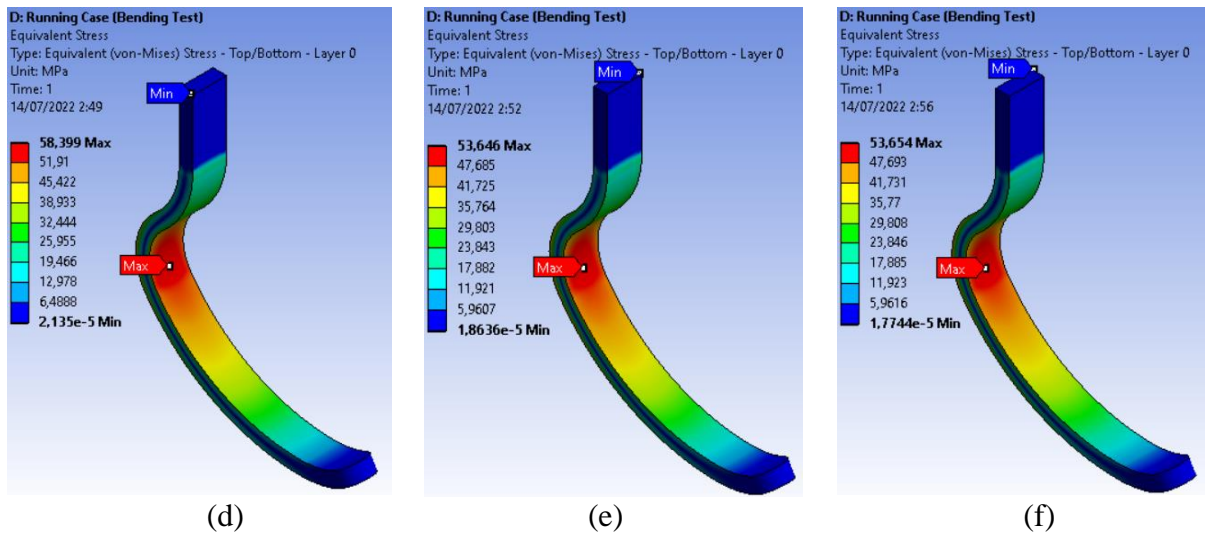
Gambar 4. 11 Ilustrasi Pengujian pada *Running Stance*

Pada pengujian ini dilakukan pengujian pada kondisi *running stance* terhadap *running blade* dengan *output* berupa *equivalent stress*, *total deformation*, Tsai – Wu *safety factor*, dan *stiffness running blade*. Pembebanan yang diberikan merupakan pembebanan aktual sebesar 800 N.

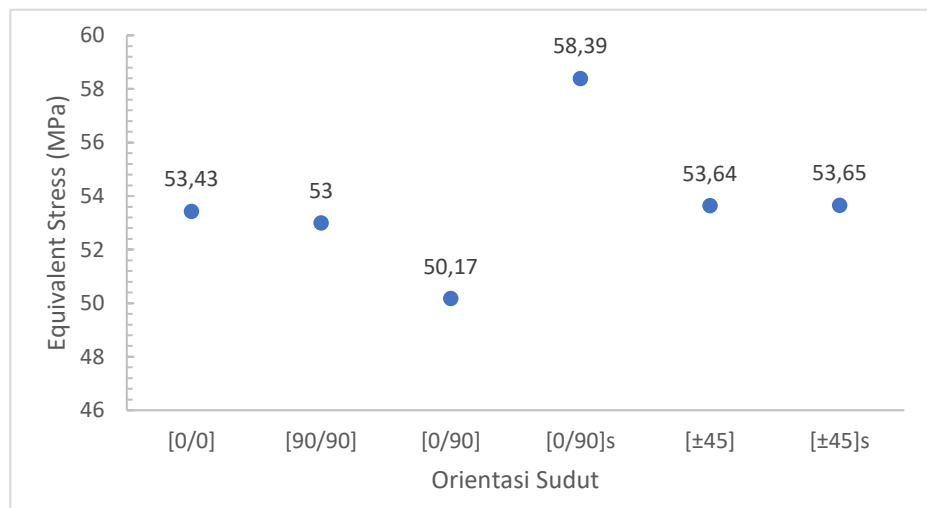
1. Orientasi Sudut vs *Equivalent Stress* (von – Mises)

Pada simulasi yang dilakukan, didapatkan nilai tegangan von – Mises. Tegangan von – Mises digunakan untuk mencari nilai faktor keamanan struktur, dari nilai tegangan von mises dapat diprediksi bahwa struktur akan mengalami kegagalan atau tidak. Untuk kontur hasil simulasi dengan variasi sudut [0/0], [90/90], [0/90], [0/90]_s, [±45] dan [±45]_s dapat dilihat pada Gambar 4.12.





Gambar 4. 12 *Equivalent Stress* dari Setiap Variasi Sudut pada Pengujian *Running Stance* ; (a) [0/0], (b) [90/90], (c) [0/90], (d) [0/90]_s, (e) [±45], (f) [±45]_s



Gambar 4. 13 Grafik Orientasi Sudut vs *Equivalent Stress* pada Kondisi *Running Stance*

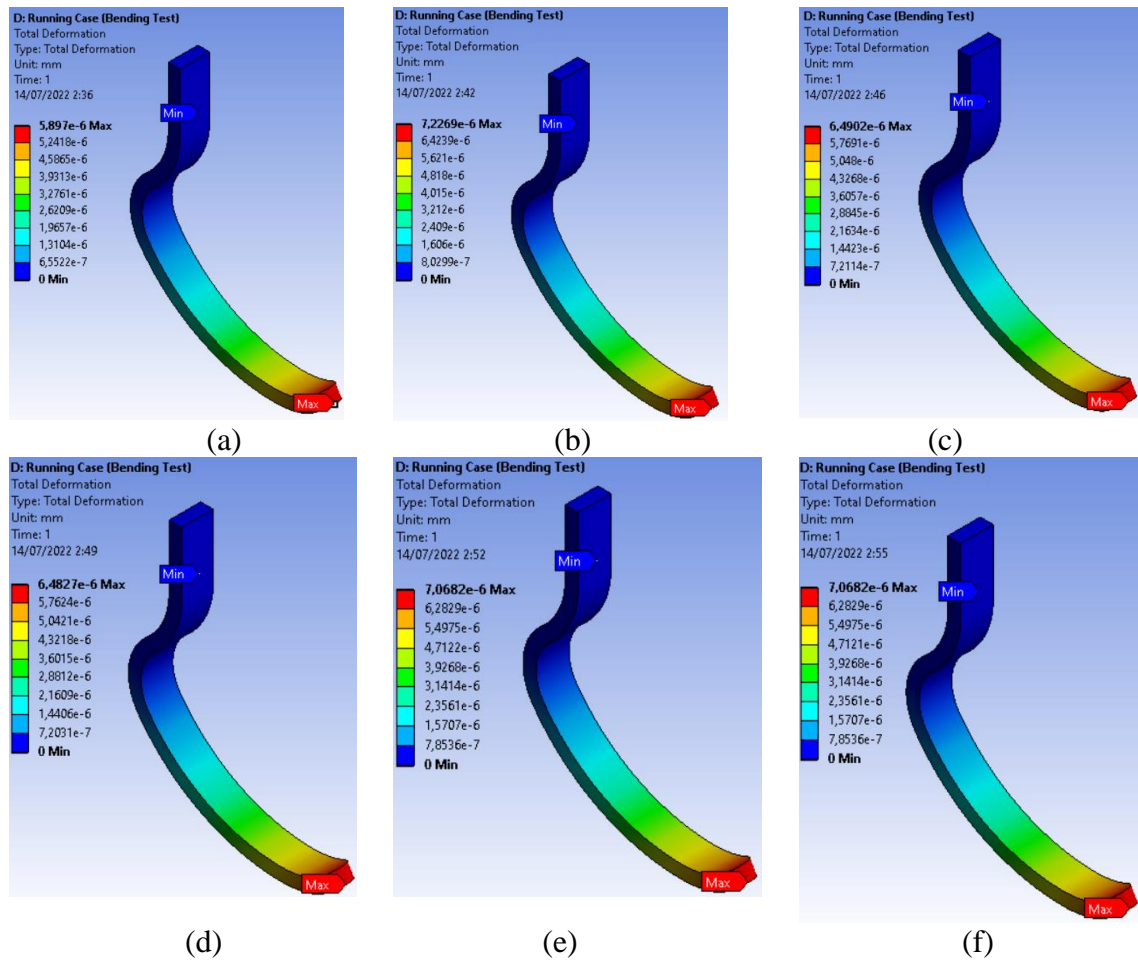
Dari data hasil simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.13 diatas, dapat dilihat bahwa *running blade* dengan orientasi sudut [0/0] mendapatkan nilai *equivalent stress* sebesar 53.43 MPa. Untuk orientasi sudut [90/90] didapatkan nilai *equivalent stress* sebesar 53 MPa. Untuk orientasi sudut [0/90] didapatkan nilai *equivalent stress* sebesar 50.17 MPa. Untuk orientasi sudut [0/90]_s didapatkan nilai *equivalent stress* sebesar 58.39 MPa. Untuk orientasi sudut [±45] didapatkan nilai *equivalent stress* sebesar 53.64 MPa. Untuk Orientasi sudut [±45]_s, didapatkan nilai *equivalent stress* sebesar 53.65 MPa.

Titik dimana terjadinya tegangan tertinggi semua sama terjadi pada bagian lekukan, yang kemungkinan terjadinya tegangan tarik dan tegangan tekan secara bersamaan pada bagian tersebut sehingga memiliki nilai tegangan von – Mises tertinggi.

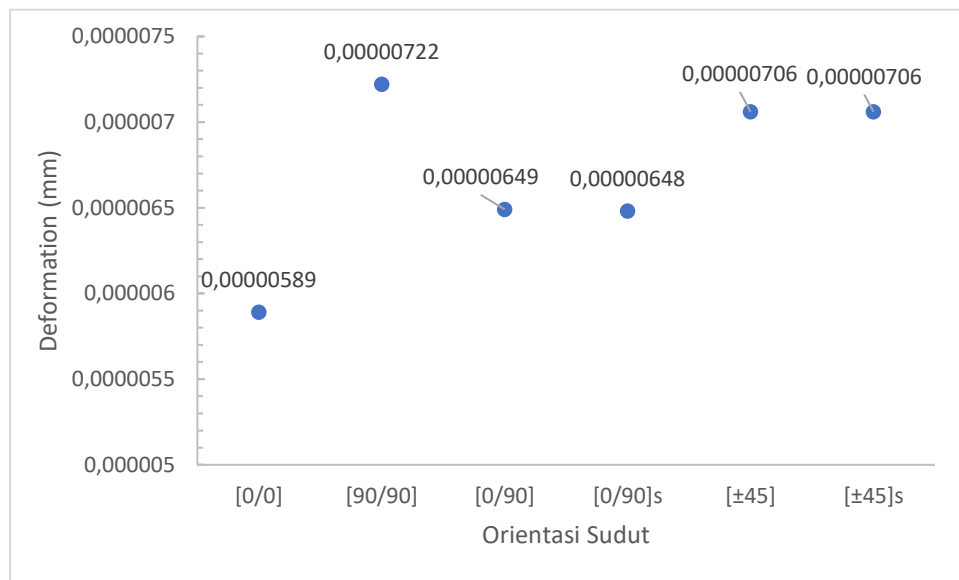
Tegangan von – Mises tertinggi didapat pada orientasi sudut [0/90] s dan yang terendah pada orientasi sudut [0/90]. Berdasarkan teori von – Mises, material akan semakin aman apabila nilai tegangan von – Mises yang dimiliki semakin kecil dan juga sebaliknya. Nilai tegangan akan dibandingkan dengan nilai *yield* dari material, darisana didapatkan nilai faktor keamanan von- Mises.

2. Orientasi Sudut vs Total Deformation

Deformasi total yang terjadi pada *running blade* dapat dilihat pada Gambar 4.14.



Gambar 4. 14 Total Deformation dari Setiap Variasi Sudut pada Pengujian *Running Stance* ; (a) [0/0], (b) [90/90], (c) [0/90], (d) [0/90]_s, (e) [±45], (f) [±45]_s



Gambar 4. 15 Grafik Orientasi Sudut vs Total Deformation pada Kondisi *Running Stance*

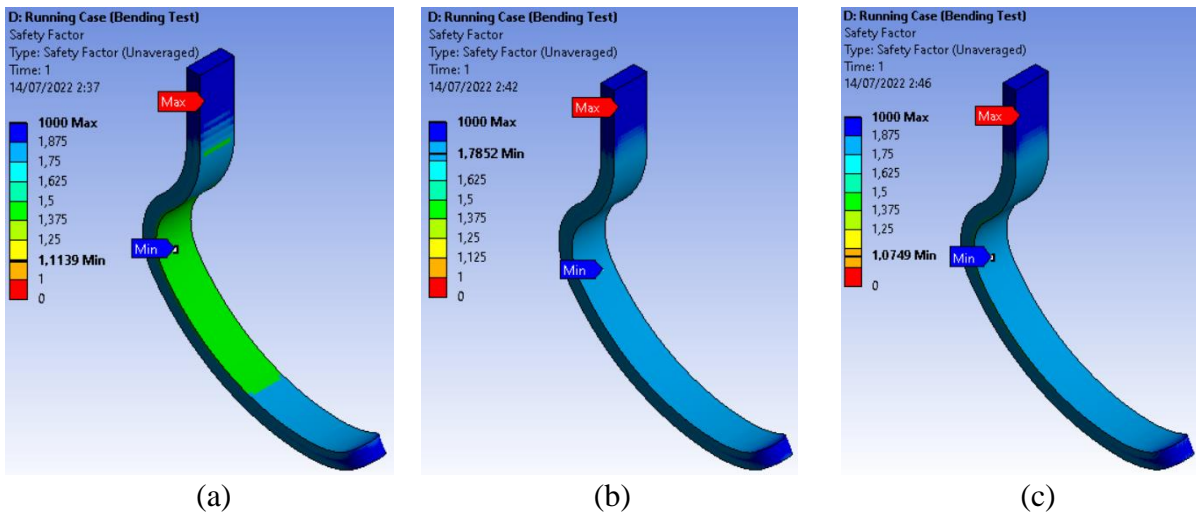
Dari data hasil simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.15 diatas, dapat dilihat bahwa *running blade* dengan orientasi sudut [0/0] mendapatkan nilai *total deformation* sebesar 0,00000589 mm. Untuk orientasi sudut [90/90] didapatkan nilai *total deformation* sebesar 0,00000722 mm. Untuk orientasi sudut [0/90] didapatkan nilai *total deformation* sebesar 0,00000649 mm. Untuk orientasi sudut [0/90]_s didapatkan nilai *total deformation* sebesar 0,00000648 mm. Untuk orientasi sudut [±45], didapatkan nilai *total deformation* sebesar 0,00000706 mm. Untuk Orientasi sudut [±45]_s, didapatkan nilai *total deformation* sebesar 0,00000706 mm.

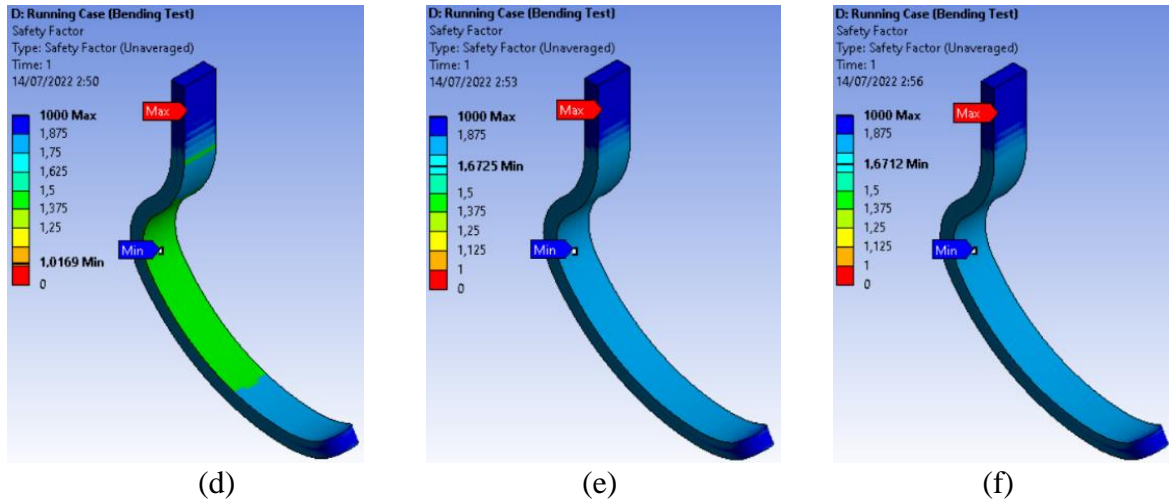
Lokasi terjadinya deformasi semuanya sama, terdapat pada bagian ujung atau *tip* dari *running blade*. Deformasi tersebut terjadi karena pada bagian *tip* mengalami kontak secara langsung dengan permukaan tanah sehingga mengakibatkan terjadinya deformasi yang besar dibandingkan dengan bagian lainnya.

Nilai total deformasi tertinggi didapat pada orientasi sudut [90/90] dan yang terendah pada orientasi sudut [0/0]. Berdasarkan teori deformasi, apabila nilai deformasi semakin tinggi maka bisa dianggap bahwa material komposit yang dirancang sebagai struktur akan semakin lentur atau tidak kaku dan juga sebaliknya. Dapat dinilai bahwa untuk orientasi sudut [90/90] memiliki nilai kekakuan paling tinggi dan orientasi sudut [0/0] memiliki nilai kekakuan paling rendah.

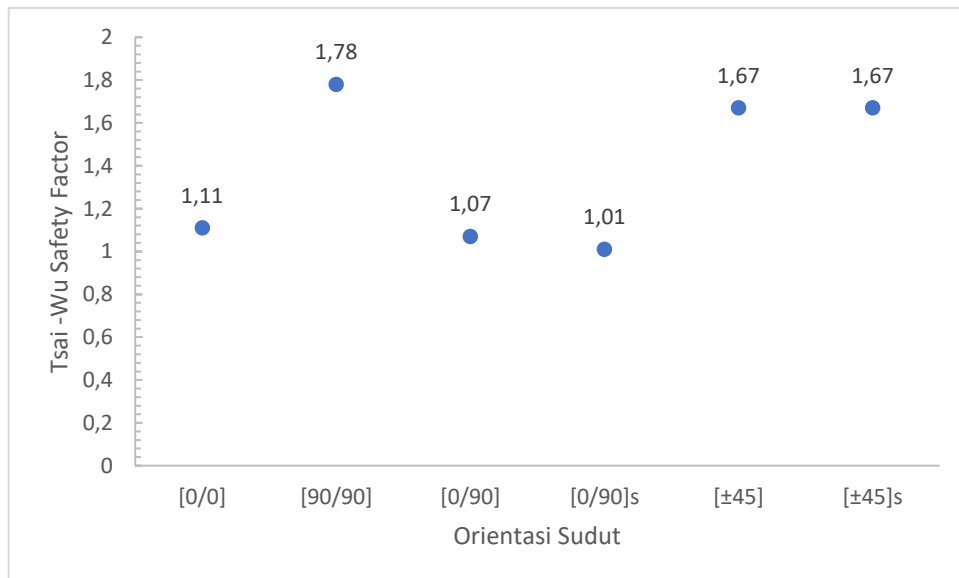
3. Orientasi Sudut vs Tsai – Wu Safety Factor

Nilai faktor keamanan Tsai – Wu merupakan nilai yang dijadikan acuan untuk menentukan apakah pada material komposit yang bersifat *orthotropic* ini akan terjadi kegagalan pada laminanya atau tidak. Untuk nilai faktor keamanan Tsai – Wu yang sudah disimulasikan dapat dilihat pada Gambar 4.16.





Gambar 4. 16 Tsai – Wu *Safety Factor* dari Setiap Variasi Sudut pada Pengujian *Running Stance* ; (a) [0/0], (b) [90/90], (c) [0/90], (d) [0/90]_s, (e) [±45], (f) [±45]_s



Gambar 4. 17 Grafik Orientasi Sudut vs Tsai – Wu *Safety Factor* pada Kondisi *Running Stance*

Dari data hasil simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.17 diatas, dapat dilihat bahwa *running blade* dengan orientasi sudut [0/0] mendapatkan nilai Tsai – Wu *safety factor* sebesar 1.11. Untuk orientasi sudut [90/90] didapatkan nilai Tsai – Wu *safety factor* sebesar 1.78. Untuk orientasi sudut [0/90] didapatkan nilai Tsai – Wu *safety factor* sebesar 1.07. Untuk orientasi sudut [0/90]_s didapatkan nilai Tsai – Wu *safety factor* sebesar 1.01. Untuk orientasi sudut [±45], didapatkan nilai Tsai – Wu *safety factor* sebesar 1.67 MPa. Untuk Orientasi sudut [±45]_s , didapatkan nilai Tsai – Wu *safety factor* sebesar 1.67 MPa.

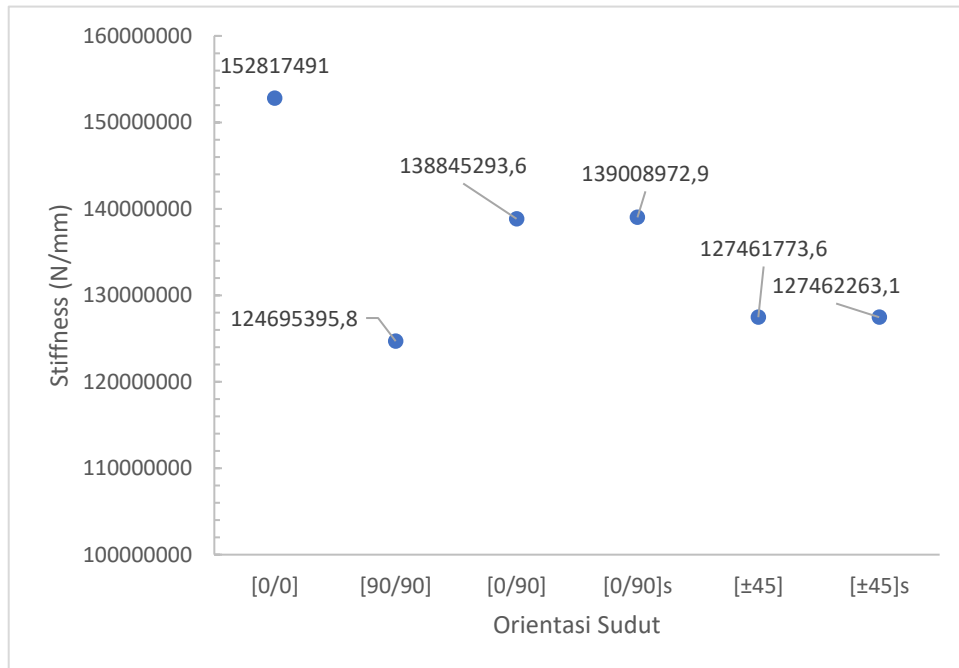
Titik yang memiliki nilai Tsai – Wu *safety factor* terendah hampir semua sama pada bagian atas dari *running blade* kecuali untuk orientasi sudut [0/90]_s yang terjadi pada bagian lekukan dalam. Hal tersebut terjadi karena pada bagian atas merupakan bagian yang dijadikan tumpuan atau *fixed support* sehingga terjadi pula momen yang mengakibatkan bagian tersebut memiliki nilai Tsai – Wu *safety factor* terkecil.

Nilai Tsai – Wu *safety factor* tertinggi didapat pada orientasi sudut [90/90] dan yang terendah pada orientasi sudut [0/90] s. Berdasarkan nilai faktor keamanan Tsai – Wu, apabila

nilai yang didapat semakin kecil maka material komposit akan memiliki kemungkinan yang makin tinggi untuk terjadi kegagalan serta sebaliknya. Material komposit akan dikatakan gagal apabila memiliki nilai faktor keamanan Tsai – Wu kurang dari atau sama dengan 1.

4. Orientasi Sudut vs *Stiffness Running Blade*

Untuk nilai *stiffness* dari tiap variasi orientasi sudut dapat dilihat pada Gambar 4.18



Gambar 4. 18 Grafik Orientasi Sudut vs *Stiffness* pada Kondisi *Standing Stance*

Dari data hasil simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.18 diatas, dapat dilihat bahwa *running blade* dengan orientasi sudut [0/0] mendapatkan nilai *stiffness* sebesar 152817491 N/mm. Untuk orientasi sudut [90/90] didapatkan nilai *stiffness* sebesar 124695395,8 N/mm. Untuk orientasi sudut [0/90] didapatkan nilai *stiffness* sebesar 138845293,6 N/mm. Untuk orientasi sudut [0/90] s didapatkan nilai *stiffness* sebesar 139008972,9 N/mm. Untuk orientasi sudut [±45] didapatkan nilai *stiffness* sebesar 127461773,6 N/mm. Untuk Orientasi sudut [±45]s, didapatkan nilai *stiffness* sebesar 127462263,1 N/mm.

Nilai *stiffness* tertinggi didapat pada orientasi sudut [0/0] dan yang terendah pada orientasi sudut [90/90]. Berdasarkan *stiffness*, apabila nilai *stiffness* tinggi maka bisa dianggap bahwa *running blade* yang dirancang semakin kaku dan juga sebaliknya. Dapat dinilai bahwa untuk orientasi sudut [0/0] memiliki nilai kekakuan paling tinggi dan orientasi sudut [90/90] memiliki nilai kekakuan paling rendah.

4.1.3 Komparasi ABD Matriks

Selanjutnya dilakukan komparasi ABD Matriks untuk setiap variasi orientasi sudut. ABD Matriks dapat digunakan untuk menyatakan nilai dari kekakuan suatu material komposit. Matriks ini terdiri atas 3 matriks, yaitu matriks A yang menyatakan nilai *extensional stiffness*, matriks B yang menyatakan nilai *coupling stiffness*, dan matriks D yang menyatakan nilai dari *bending stiffness*. Untuk ABD Matriks dari tiap variasi orientasi sudut dapat dilihat dibawah ini:

1. ABD Matriks untuk Orientasi Sudut [0/0]

$$\begin{bmatrix} 154.9 & 42.79 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 42.79 & 126.2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 42.86 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5164 & 1426 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1426 & 4207 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1429 \end{bmatrix}$$

2. ABD Matriks untuk Orientasi Sudut [90/90]

$$\begin{bmatrix} 126.2 & 42.79 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 42.79 & 154.9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 42.86 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4207 & 1426 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1426 & 5164 & 0.000002 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.000002 & 1429 \end{bmatrix}$$

3. ABD Matriks untuk Orientasi Sudut [0/90]

$$\begin{bmatrix} 140.6 & 42.79 & 0 & 3.586 & 0 & 0 \\ 42.79 & 140.6 & 0 & 0 & -3.586 & 0 \\ 0 & 0 & 42.86 & 0 & 0 & 0 \\ 3.586 & 0 & 0 & 4685 & 1426 & 0 \\ 0 & -3.586 & 0 & 1426 & 4685 & 0.000001 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.000001 & 1429 \end{bmatrix}$$

4. ABD Matriks untuk Orientasi Sudut [0/90]_s

$$\begin{bmatrix} 140.6 & 42.79 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 42.79 & 140.6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 42.86 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4689 & 1426 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1426 & 4682 & 0.000001 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.000001 & 1429 \end{bmatrix}$$

5. ABD Matriks untuk Orientasi Sudut [±45]

$$\begin{bmatrix} 134.5 & 48.82 & 0 & 0 & 0 & 1.793 \\ 48.82 & 134.5 & 0 & 0 & 0 & 1.793 \\ 0 & 0 & 48.89 & 1.793 & 1.793 & 0 \\ 0 & 0 & 1.793 & 4485 & 1627 & 0 \\ 0 & 0 & 1.793 & 1627 & 4485 & 0 \\ 1.793 & 1.793 & 0 & 0 & 0 & 1630 \end{bmatrix}$$

6. ABD Matriks untuk Orientasi Sudut [±45]_s

$$\begin{bmatrix} 134.5 & 48.82 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 48.82 & 134.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 48.89 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4485 & 1627 & 1.793 \\ 0 & 0 & 0 & 1627 & 4485 & 1.793 \\ 0 & 0 & 0 & 1.793 & 1.793 & 1630 \end{bmatrix}$$

Dapat dilihat pengaruh ABD matriks terhadap hasil simulasi, dimana apabila matriks A atau matriks *ekstensional stiffness* besar maka nilai *total deformation* yang terjadi maka akan semakin besar. Nilai *total deformation* yang semakin besar maka akan membuat nilai *stiffness running blade* semakin kecil.

Dapat dilihat juga perbandingan *equivalent stress* antara ABD matriks dari orientasi sudut [0/90] dan [0/90]_s. Hasilnya berbeda jauh dikarenakan *maximum equivalent stress* terjadi pada *ply* terluar dari *running blade*. Untuk orientasi sudut [0/90], maka *ply* terluar adalah *ply* dengan sudut serat 90 dan searah dengan arah pembebanan sehingga menyebabkan *maximum equivalent stress* menjadi kecil. Sedangkan untuk orientasi sudut [0/90]_s *ply* terluar merupakan *ply* dengan sudut serat 0 dan tegak lurus dengan arah pembebanan sehingga menyebabkan *maximum equivalent stress* menjadi besar. Sedangkan untuk orientasi sudut [±45] dan [±45]_s tidak ada perbedaan yang signifikan dikarenakan arah serat memiliki sudut terhadap pembebanan yang sama sehingga tidak ada perbedaan nilai yang begitu signifikan.

Dapat dilihat perbandingan antara komposit dengan penyusunan simetrik dan asimetrik bahwa nilai deformasi dengan penyusunan simetrik lebih kecil. Hal ini disebabkan karena penyusunan simetrik memiliki nilai matriks B yaitu *coupling stiffness matrix* sebesar 0 sehingga tidak terjadi distorsi dan *warpage* (kerutan).

4.1.4 Orientasi Sudut Terbaik

Dalam sub subbab ini akan dijelaskan mengenai orientasi sudut terbaik yang bisa diaplikasikan terhadap prostetik *running blade*, untuk tabel perbandingan orientasi sudut dapat dilihat pada Tabel 4.1

Tabel 4. 1 Tabel Data Kumulatif Hasil Simulasi

Jenis Pengujian	Entitas	[0/0]	[90/90]	[0/90]	[0/90] _s	[45/-45]	[45/-45] _s
Standing Case	Equivalent Stress (MPa)	64,16	63,63	60,23	70,1	64,44	64,46
	Total Deformation (mm)	0,00000732	0,00000897	0,00000805	0,00000804	0,00000876	0,00000876
	Tsai - Wu Safety Factor	0,9	1,38	0,89	0,84	1,14	1,14
	Stiffness (N/mm)	126984127	103896104	115942029	115942029	106666666,7	106666666,7
Running Case Case	Equivalent Stress (MPa)	53,43	53	50,17	58,39	53,64	53,65
	Total Deformation (mm)	0,00000589	0,00000722	0,00000649	0,00000648	0,00000706	0,00000706
	Tsai - Wu Safety Factor	1,11	1,78	1,07	1,01	1,67	1,67
	Stiffness (N/mm)	152817491	124695396	138845294	139008973	127461774	127466263

Orientasi sudut [0/90] memiliki nilai terbaik untuk kategori *equivalent stress* dalam kedua jenis pengujian karena memiliki nilai terendah sehingga dianggap memiliki nilai keamanan struktur yang paling aman untuk digunakan. Sementara untuk kategori nilai *total deformation* terbaik didapatkan oleh orientasi sudut [90/90] dalam kedua jenis pengujian sehingga dianggap memiliki nilai kekakuan yang lebih baik dibandingkan dengan orientasi sudut lain. Untuk kategori nilai Tsai – Wu *safety factor*, orientasi sudut [90/90] memiliki nilai tertinggi dalam kedua jenis pengujian. Oleh karena itu dianggap orientasi sudut [90/90] memiliki nilai faktor keamanan terbaik sehingga mengurangi resiko terjadinya kegagalan

lamina komposit. Untuk kategori nilai *stiffness* terbaik didapatkan oleh orientasi sudut [90/90] dalam kedua jenis pengujian sehingga *running blade* dengan orientasi sudut [90/90] dianggap memiliki nilai kelenturan yang terbaik dibandingkan dengan orientasi sudut lainnya.

Dari hasil kumulatif dapat di intisarikan bahwa orientasi sudut [90/90] merupakan orientasi sudut terbaik yang bisa diaplikasikan kedalam prostetik tipe *running blade* dikarenakan memiliki nilai *total deformation* dan *stiffness* yang tertinggi, nilai Tsai – Wu *safety factor* yang tertinggi, serta memiliki *equivalent stress* kedua terendah setelah orientasi [0/90]

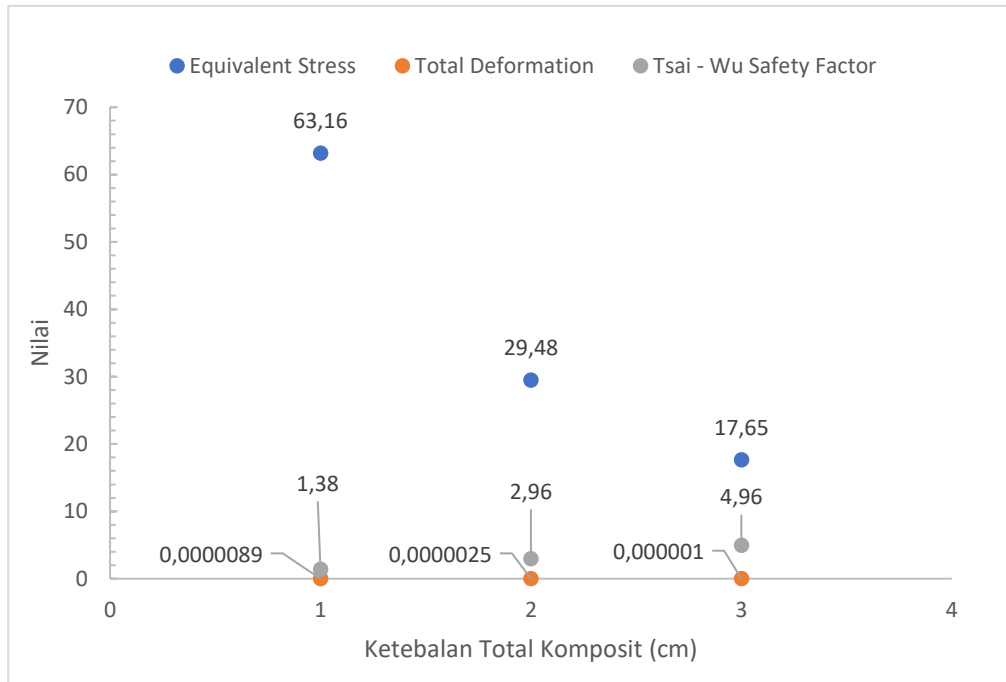
4.1.5 Pengaruh Ketebalan Total Komposit Terhadap Kekuatan Prostetik *Running Blade*

Setelah mendapatkan orientasi sudut terbaik yaitu orientasi sudut [90/90] maka dilakukan juga variasi ketebalan total dari komposit. Variasi ketebalan komposit dibatasi untuk penambahan 5-layer sampai prostetik *running blade* dapat menahan pembebanan level P3 standar ISO 10328 (2016). Tujuannya ialah mencari ketebalan total komposit yang optimum dan sanggup dalam menahan beban level P3 sesuai standar ISO 10328 (2016).

Pada tahap ini dilakukan simulasi untuk melihat pengaruh ketebalan total komposit terhadap kekuatan *running blade* pada kondisi *standing stance* saja karena dari hasil pengujian orientasi sudut yang sudah dilakukan, hasil menunjukkan bahwa nilai yang dihasilkan pada pengujian *standing stance* dan *running stance* menunjukkan tren yang sama. Untuk data hasil pengujian *standing stance* dalam bentuk tabel dapat dilihat pada Tabel 4.2 dan untuk data dalam bentuk grafik dapat dilihat pada Gambar 4.19.

Tabel 4. 2 Ketebalan Total Komposit vs Kekuatan *Running Blade*

Ketebalan Komposit	Jumlah Layer	Entitas	Nilai
2 cm	10	Equivalent Stress (MPa)	63,16
	10	Total Deformation (mm)	0,0000089
	10	Tsai - Wu Safety Factor	1,38
	10	Stiffness (N/mm)	103896104
3 cm	15	Equivalent Stress (MPa)	29,48
	15	Total Deformation (mm)	0,0000025
	15	Tsai - Wu Safety Factor	2,96
	15	Stiffness (N/mm)	1490740741
4 cm	20	Equivalent Stress (MPa)	17,65
	20	Total Deformation (mm)	0,000001
	20	Tsai - Wu Safety Factor	4,96
	20	Stiffness (N/mm)	3744186047

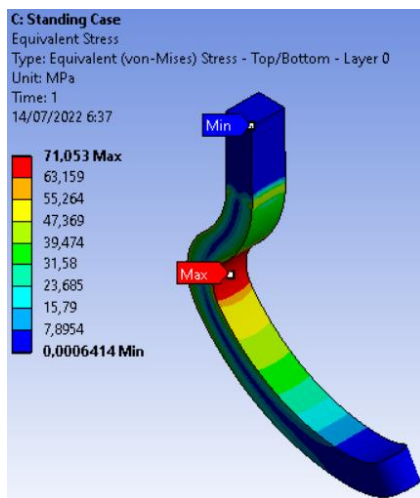


Gambar 4. 19 Ketebalan Total Komposit vs Kekuatan *Running Blade*

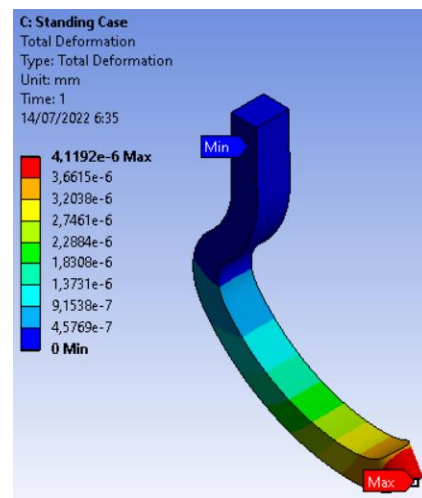
Dapat dilihat pada Gambar 4.19 dan Tabel 4.2, bahwa kekuatan *running blade* meningkat seiring dengan bertambahnya ketebalan total komposit dilihat dari meningkatnya nilai Tsai-Wu *safety factor* dan menurunnya nilai *equivalent stress*. Namun kekakuan dari *running blade* juga meningkat dengan meningkatnya nilai *stiffness* dan menurunnya nilai *total deformation*. Dapat dilihat bahwa untuk ketebalan total komposit 4 cm memiliki nilai kekuatan yang cukup tinggi yang selanjutnya kita lakukan pengujian sesuai standar ISO 10328 (2016).

4.1.6 Pengujian *Running Blade* Kenaf/ Epoksi dengan Standar ISO 10328

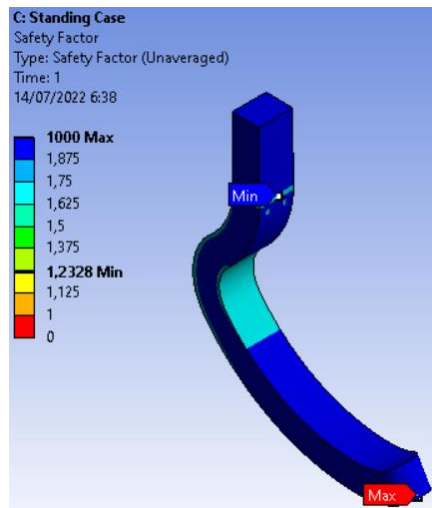
Setelah didapatkan orientasi sudut terbaik dan ketebalan optimum maka selanjutnya akan dilakukan pengujian sesuai standar ISO 10328 (2016) terhadap *running blade* yang sudah dirancang. Pengujian diatur pada kedua jenis pengujian yaitu *standing stance* dan *running stance* dengan pembebanan level P3 *Ultimate Static Force* yaitu 3220 N. Untuk hasil pengujiannya dapat dilihat pada Gambar 4.20.



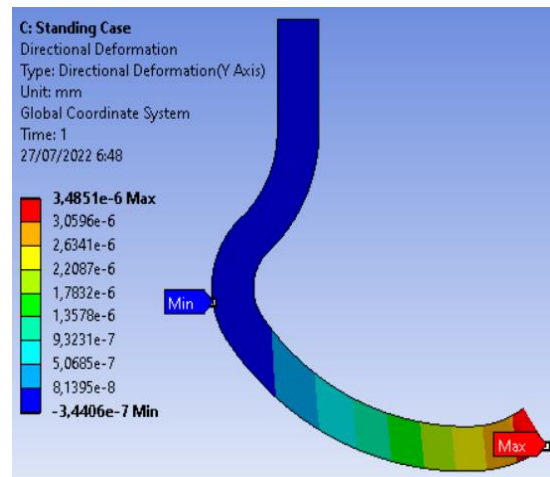
(a)



(b)



(c)

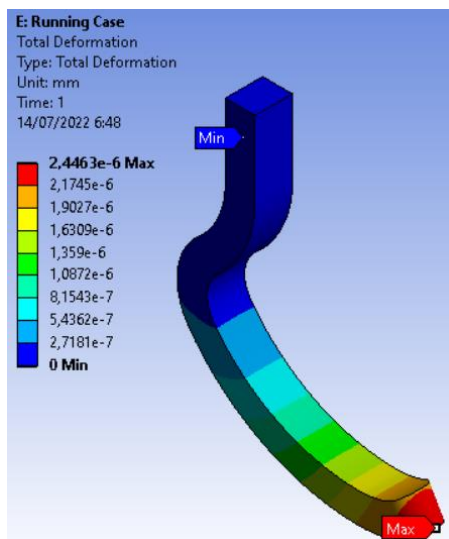


(d)

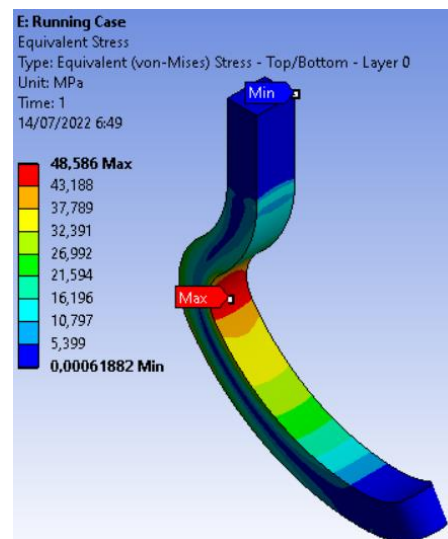
Gambar 4. 20 Hasil Pengujian Jenis *Standing Stance* dengan Standar ISO 10328 (2016); (a) *Total Deformation*, (b) *Equivalent Stress*, (c) *Tsai – Wu Safety Factor*, (d) *Displacement Y*

Dapat dilihat pada Gambar 4.20 untuk nilai *equivalent stress* sebesar 71.05 MPa, nilai *total deformation* 0,0000041 mm, nilai *Tsai – Wu safety factor* sebesar 1,23 dan nilai *stiffness* sebesar 947058824 N/mm.

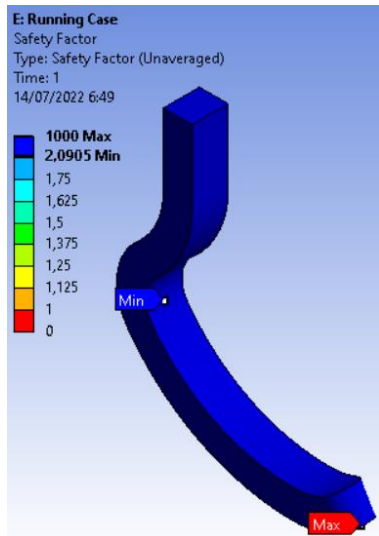
Untuk hasil pengujian jenis *running stance* dapat dilihat pada Gambar 4.21.



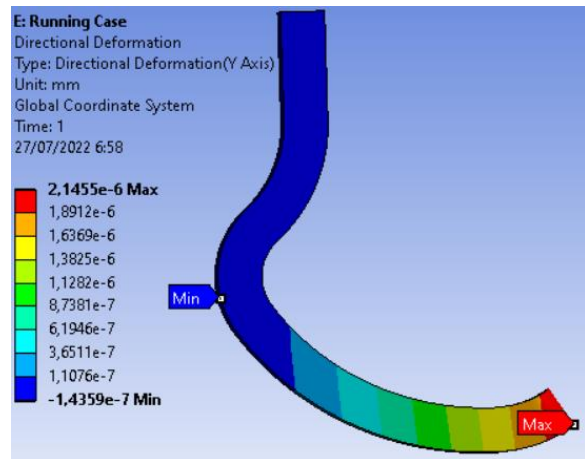
(a)



(b)



(c)



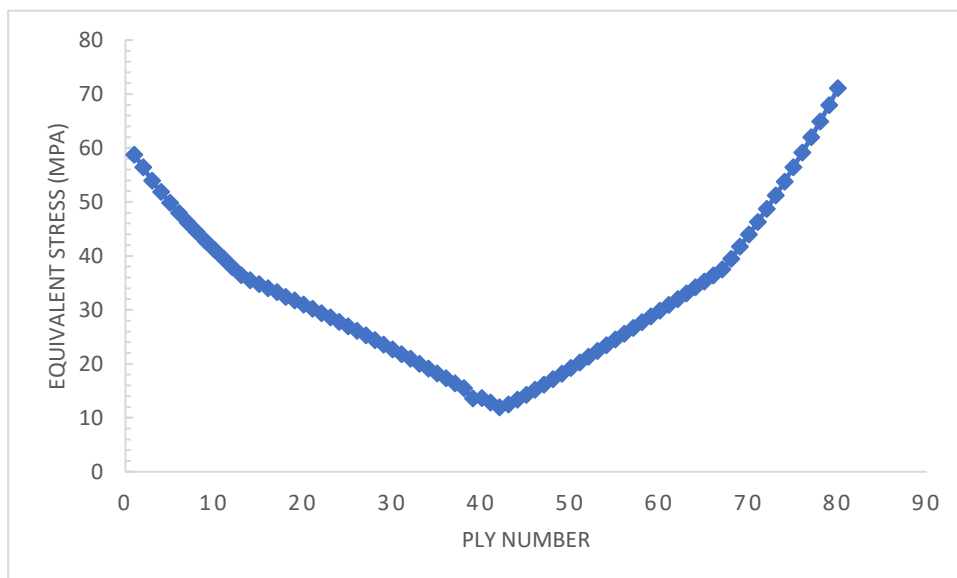
(d)

Gambar 4. 21 Hasil Pengujian Jenis *Running Stance* dengan Standar ISO 10328 (2016); (a) *Total Deformation*, (b) *Equivalent Stress*, (c) Tsai – Wu *Safety Factor*, (d) *Displacement Y*

Dapat dilihat pada Gambar 4.21 untuk nilai *equivalent stress* sebesar 48.58 MPa, nilai *total deformation* 0,0000024 mm, nilai Tsai – Wu *safety factor* sebesar 2,09, dan nilai *stiffness* sebesar 1533333333 N/mm.

Masih menunjukkan tren yang sama untuk kedua jenis pengujian dimana nilai *equivalent stress* terbesar berada di bagian lekukan *running blade*, untuk nilai *total deformation* tertinggi berada di bagian *tip* dari *running blade* dan nilai Tsai – Wu untuk jenis pengujian *running stance* lebih tinggi daripada *standing stance* dan nilai *stiffness* untuk jenis pengujian *running stance* lebih tinggi daripada *standing stance*.

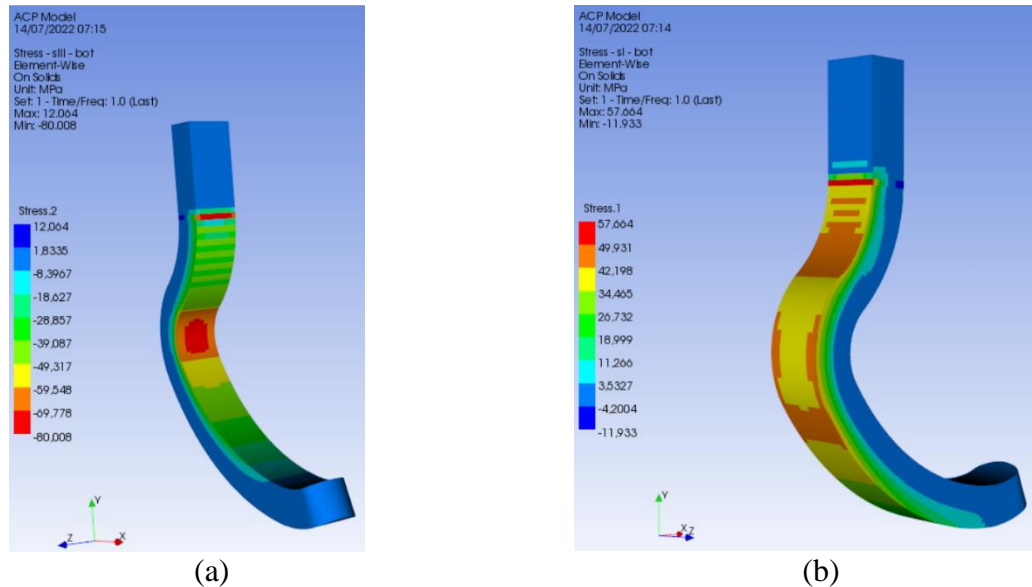
Selanjutnya digunakan fitur ANSYS ACP-Post untuk melihat distribusi *stress per-ply*, Untuk hasilnya dapat dilihat pada Gambar 4.22.



Gambar 4. 22 Grafik Distribusi Tegangan Von – Mises Per-Ply pada *Standing Stance*

Dari grafik distribusi Tegangan von – Mises per-ply pada Gambar 4.22 dapat dilihat bahwa *ply* yang mengalami tegangan paling tinggi ialah *ply* terluar dari komposit dimana untuk

ply 1 memiliki nilai tegangan von – Mises sebesar 58.739 MPa dan untuk *ply* 80 memiliki nilai tegangan von – Mises sebesar 71.053 MPa. Untuk melihat tegangan apa yang terjadi pada *ply* tersebut dapat dilihat menggunakan fitur ACP-Post untuk *ply* yang memiliki nilai tegangan von – mises tertinggi. Untuk gambarnya dapat dilihat pada Gambar 4.23.



Gambar 4. 23 ANSYS ACP-Post ; (a) *Most Compressive Stress*, (b) *Most Tensile Stress*

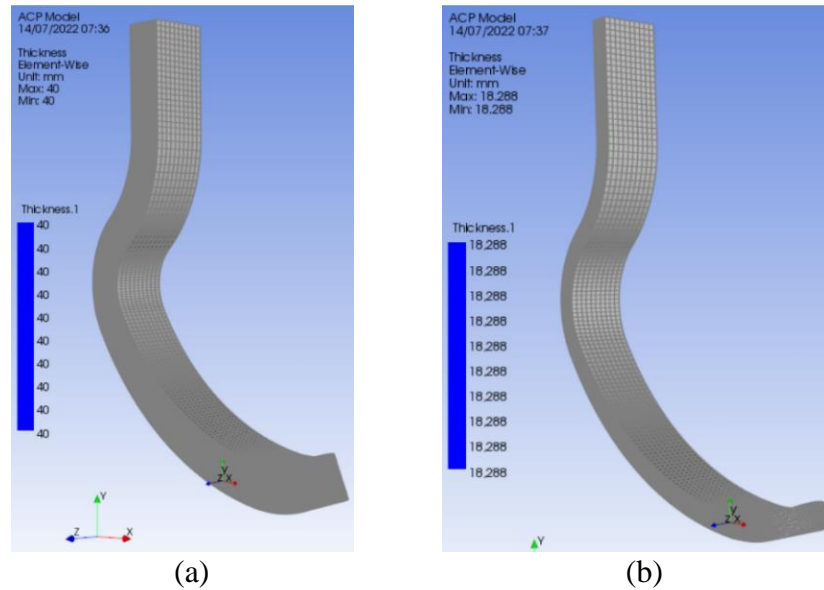
Dari Gambar 4.23 dapat dilihat untuk lokasi dimana *ply* mengalami tegangan tertinggi, dapat dilihat dari Gambar 4.19 untuk *ply* yang mengalami tegangan tekan tertinggi berada pada *ply* terluar atau *ply* 80 pada komposit yaitu pada bagian lekukan dalam dan untuk *ply* yang mengalami tegangan tarik tertinggi berada di *ply* terdalam di bagian lekukan luar atau *ply* 1.

Dari sini dapat ditarik kesimpulan bahwa apabila terjadi kegagalan nantinya pada *running blade* pada *standing stance*, maka kegagalan tersebut terjadi karena tegangan tekan yang terlalu tinggi sehingga menyebabkan delaminasi pada komposit. Untuk gambar dari distribusi tegangan von – Mises per *ply* dapat dilihat pada lampiran.

Hal ini sesuai dengan teori *first ply failure* dan teori *last ply failure* dimana komposit akan menerima beban secara terus menerus hingga terjadi kegagalan pada lapisan komposit yang kemungkinan terbesar akan terjadi pada *ply* pertama ataupun *ply* terakhir.

4.2 Perbandingan Kekuatan antara *Running Blade* Kenaf/ Epoksi dengan *Running Blade Epoxy Carbon Woven (230 GPa) Wet*.

Setelah mendapatkan spesifikasi dari *running blade* kenaf/ epoksi maka selanjutnya dilakukan perbandingan dengan *running blade epoxy carbon woven (230 GPa) Wet*. Untuk gambarnya dapat dilihat pada Gambar 4.20.



Gambar 4. 24 Perbandingan Geometri *Running Blade*; (a) Kenaf/ Epoksi, (b) *Epoxy - Carbon Woven (230 GPa) Wet*

Untuk perbandingan spesifikasinya dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Perbandingan Spesifikasi *Running Blade* Kenaf/ Epoksi dengan *Running Blade Epoxy Carbon Woven (230 GPa) Wet*

	Entitas	Kenaf/ Epoksi	<i>Epoxy Carbon Woven (230 GPa) Wet</i>
<i>Standing Stance</i>	Equivalent Stress (MPa)	71,053	301,21
	Deformation (mm)	0,0000051	48,042
	Tsai Wu Safety Factor	1,23	1,12
	Stiffness (N/mm)	947058824	77,87
	Ketebalan (cm)	4	1,8
	Jumlah Layer	20	12
	Berat Total (kg)	1,55	0,83
<i>Running Stance</i>	Equivalent Stress (MPa)	48,536	210,73
	Deformation (mm)	0,0000041	29,78
	Tsai Wu Safety Factor	2,09	2,06
	Stiffness (N/mm)	1533333333	121,43
	Ketebalan (cm)	4	1,8
	Jumlah Layer	20	12
	Berat Total (kg)	1,55	0,83

Running blade dari kenaf/ epoksi apabila menggunakan ketebalan yang sama dengan *running blade* dari *epoxy carbon woven (230 GPa) wet* yaitu 1,8 cm akan mengalami kegagalan sehingga untuk dapat menahan pembebanan yang setara diperlukan penambahan ketebalan sebesar 222% lebih tebal sehingga mencapai ketebalan 4 cm. dapat dilihat dari nilai Tsai-Wu *safety factor* yang hampir setara serta nilai *equivalent stress* yang masih dibawah dari nilai *yield strength* dari material sehingga struktur dari *running blade* dianggap masih aman.

Namun dari segi berat, *running blade* kenaf/ epoksi jauh lebih berat daripada *running blade epoxy carbon woven* (230 GPa) *wet* yaitu 0,83 kg. *Running blade* kenaf epoksi memiliki berat 186% atau hampir dua kali lebih berat yaitu sebesar 1,55 kg.

Dari segi kekakuan juga jauh berbeda, dimana *running blade* dari kenaf/ epoksi memiliki nilai *total deformation* yang jauh lebih kecil (0,51 mm pada kondisi *standing stance* dan 0,64 mm pada kondisi *running stance*) dibandingkan dengan *running blade* dari *epoxy carbon woven* (230 GPa) *wet* (48,042 mm pada kondisi *standing stance* dan 29,78 mm pada kondisi *running stance*). Juga dapat dilihat dari nilai *stiffness running blade*, nilai *stiffness running blade* kenaf epoksi pada kondisi *standing stance* sebesar 947058824 N/mm dan 1533333333 pada kondisi *running stance* sehingga memiliki nilai kekakuan yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan *running blade* dari *epoxy carbon woven* yaitu sebesar 77,87 N/mm pada kondisi *standing stance* dan 121,43 N/mm pada kondisi *running stance*.

Oleh karena itu dapat dipertimbangkan kembali apabila ingin menggunakan material kenaf/ epoksi sebagai material *running blade* karena memiliki ketebalan yang lebih tinggi serta nilai kekakuan yang sangat tinggi. Tentunya kedua hal tersebut harus dipertimbangkan serta dari segi geometri yang semakin tebal akan menyebabkan model yang semakin tidak sesuai dengan bentuk dari *running blade* yang optimal dan akan menyebabkan ketidaknyamanan penggunaannya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang sudah dilakukan, maka didapat kesimpulan pada penelitian kali ini, yaitu:

1. Pada penelitian ini didapatkan bahwa orientasi sudut paling optimal untuk *running blade* ada pada orientasi sudut [90/90]. Hal ini disimpulkan karena orientasi sudut [90/90] memiliki nilai Tsai-Wu *safety factor* tertinggi, nilai *total deformation* tertinggi, nilai *stiffness* tertinggi, dan nilai *equivalent stress* terendah kedua setelah orientasi sudut [0/90]. Sementara untuk pengaruh ketebalan pada kekuatan *running blade* yaitu adanya peningkatan untuk nilai Tsai-Wu *safety factor* dan penurunan nilai *equivalent stress*. Namun dari segi kekakuan juga meningkat dilihat dari menurunnya nilai *total deformation* dan meningkatnya nilai *stiffness* dari *running blade*.
2. Untuk dapat menyamai kekuatan *running blade* dari *epoxy carbon woven* (230 GPa) *wet*, *running blade* dari kenaf/ epoksi perlu dibuat 2,22 kali lebih tebal. Namun memiliki keterbatasan yaitu nilai kekakuan yang jauh lebih besar serta massa yang dihasilkan 1,86 kali lebih berat.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan, maka saran yang dapat penulis berikan untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Melakukan analisis dengan orientasi sudut dan ketebalan yang lebih bervariasi untuk *running blade prostheses*.
2. Melakukan analisis dengan menggunakan material *hybrid* yang memiliki nilai kelenturan tinggi.
3. Melakukan optimasi terhadap desain geometri dari *running blade* dengan mempertimbangkan untuk memperlebar geometri dan menggunakan jenis *hollow*.
4. Melakukan *cyclic test* untuk melihat respon dinamis dari *running blade* dan kegagalan akibat *fatigue*.
5. Melakukan studi eksperimen dari prostetik *running blade* untuk membandingkan hasil eksperimen dengan hasil analisis menggunakan metode elemen hingga ini.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Abood, S. H., & Faidh-Allah, M. H. (2019). Analysis of prosthetic running blade of limb using different composite materials. *Journal of Engineering*, 25(12), 15-25.
- Arbaoui, J., Moustabchir, H., Vigué, J. R., & Royer, F. X. (2016). The effects of various nanoparticles on the thermal and mechanical properties of an epoxy resin. *Materials Research Innovations*, 20(2), 145-150.
- Bakar, N. H., Hyie, K. M., Mohamed, A. F., Salleh, Z., & Kalam, A. (2014). Kenaf fibre composites using thermoset epoxy and polyester polymer resins: energy absorbed versus tensile properties. *Materials Research Innovations*, 18(sup6), S6-505.
- BALITTAS. 2013. Mengenal Manfaat Tanaman Kenaf di Indonesia.
- Bode, K. A. (2018). Investigation in Remediation of Wind Turbine Generator (WTG) Foundations with Epoxy Resin. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 199, p. 07012). EDP Sciences.
- Boone, David A. (2014). *Journal of Prosthetics and Orthotics*. 26(2):69
- Bridger, R. (2008). *Introduction to ergonomics*. Crc Press.
- Chawla, K. K. (2012). *Composite materials: science and engineering*. Springer Science & Business Media.
- Chen, X., & Liu, Y. (2014). *Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench*. in *Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench*. Northwestern: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17284>
- Daniel, I. M., Ishai, O., Daniel, I. M., & Daniel, I. (2006). *Engineering mechanics of composite materials* (Vol. 1994). New York: Oxford university press.
- Denis J. Marcellin-Little, David Levine. (2014). *Devices for Ambulation Assistance in Companion Animals, Canine Rehabilitation and Physical Therapy (Second Edition)*
- Dhokia, V., Bilzon, J., Seminati, E., Talamas, D. C., Young, M., & Mitchell, W. (2017). The design and manufacture of a prototype personalized liner for lower limb amputees. *Procedia CIRP*, 60, 476-481.
- Doan Thi Thu Loan. (2006). *Investigation on jute fibres and their composites based on polypropylene and epoxy matrices*, Dissertation Der Fakultät Maschinenwesen Der Technischen Universität Dresden.
- E. Randjbaran, R. Zahari, D. L. Majid, N. A. A. Jalil, R. Vaghei, R. Ahmadi. (2013). *An Experimental Investigation of the Effects of Stacking Sequence on Hybrid Composite Materials Response to Open-Hole Compression Strength*, MATRIX Academic International Online Journal of Engineering and Technology, Vol. 1, Issue 2, pp. 1-6
- Eva Ludwig, (2010). *Prosthetics and Orthotics International*.
- Facoetti, G., S. Gabbiadini, G. Colombo, dan C. Rizzi. (2010). *Knowledge-Based System for Guided Modeling of Sockets for Lower Limb Prostheses*. *Journal of Computer-Aided Design & Applications* 7(5): 723-737.
- Fajrin, J., Akmaluddin, A., & Gapsari, F. (2022). Utilization of kenaf fiber waste as reinforced polymer composites. *Results in Engineering*, 13, 100380.
- Gay, D., & Hoa, S. V. (2007). *Composite materials: design and applications*. CRC press.
- Gibson F.R., (1994), "*Principles of Composite Material Handbook*", Mc Graw-Hill, Singapura.
- Grand View Research Inc., (2018), "*Natural Fiber Composites (NFC) Market Size, Share & Trend Analysis Report by Raw Material, By Matrix, By Technology, By Application, and Segment Forecast*"

- Hamzah, M., & Gatta, A. (2018). *Design of a Novel Carbon-Fiber Ankle-Foot Prosthetic Using Finite Element Modeling*. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 433, No. 1, p. 012056). IOP Publishing.
- Hashim, N. F., Zainal, N. M., Jamil, N., Nor, N. N. M., & Jusoh, S. M. (2019). Strength and Durability of Kenaf Fiber Reinforced Concrete for Marine Structures. *Universiti Malaysia Terengganu Journal of Undergraduate Research*, 1(1), 113-118.
- Hibbeler, R. C. (2011). *Mechanics of Materials Eight Edition* (8th ed.). Pearson Prentice Hall
- HOBARA, H. (2014). Running-specific prostheses: The history, mechanics, and controversy. *Journal of the Society of Biomechanisms*, 38(2), 105-110.
- Hutton, D. V. (2004). *Fundamentals of Finite Element Analysis*. Boston: McGraw-Hill.
- Ibrahim, M. I., Hassan, M. Z., Dolah, R., Yusoff, M. Z. M., & Salit, M. S. (2018). Tensile behaviour for mercerization of single kenaf fiber. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 14(4), 437-439. <https://doi.org/10.11113/mjfas.v14n4.1099>
- Irawan, A. P., T. P. Soemardi., K. Widjajaksmi, dan A. H. S. Reksoprodjo. (2009). *Komposit Laminat Rami Epoksi sebagai Bahan Alternatif Socket Prosthesis*. *Jurnal Teknik Mesin* 11(1): 41-45.
- ISO. (2016). *ISO 10328:2016 Prosthetics — Structural testing of lower-limb prostheses — Requirements and test methods*
- Jonathan D. Mar, Efim Litovsky and Jacob Kleiman. (2008). *Journal of Building Physics*, Vol. 32, No.9,
- Kaw, A. K. (2005). *Mechanics of composite materials*. CRC press.
- Ku, H., Wang, H., Pattarachaiyakoo, N., & Trada, M. (2011). A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 42(4), 856-873
- Kumar, M. (2017). *Composite Structure Design, Mechanics, Analysis, Manufacturing, and Testing* (Vol.59). CRC Press.
- Kurowski, P. M. (2004). *Finite Element Analysis for Design Engineers*. United States of America: SAE International.
- Liu, A. M. (2003). Making pulp and paper from kenaf. *Am kenaf Soc. TX, USA*.
- Logan, D. L. (2016). *A first course in the finite element method*. Cengage Learning.
- Madenci, E. & Guven I. (2015). *The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS*. London: Springer International Publishing.
- Madenci, E., & Guven, I. (2015). *The finite element method and applications in engineering using ANSYS®*. Springer.
- Mahjoub, R., Yatim, J. M., Sam, A. R. M., & Hashemi, S. H. (2014). Tensile properties of kenaf fiber due to various conditions of chemical fiber surface modifications. *Construction and Building Materials*, 55, 103-113.
- Mangunsong, F. (1998). *Psikologi dan Pendidikan Anak Luar Biasa*. LPSP3. Jakarta: Universitas Indonesia
- Marantina. 2013. Budidaya kenaf (1) Menggulung laba dari budidaya tanaman kenaf (1). <http://peluangusaha.kontan.co.id/news/menggulung-labadari-budidaya-tanaman-kenaf-1>.
- Mariselvam, V., & Logesh, M. (2015). *Analytical Analysis on Material Properties of Kenaf Fiber Composite*. *International Journal of Applied Engineering Research*, 10(50), 2015.
- Mikell, P. (2010). Groover Fundamentals of Modern Manufacturing. *Materials, Processes and Systems, 4th ed.; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA*, 395-403.

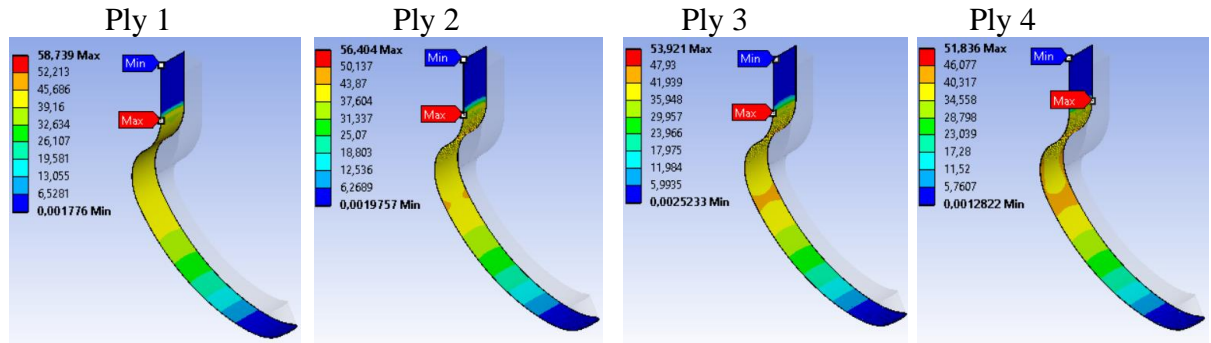
- Moses, O. T., Samson, D., & Waila, O. M. (2015). Compressive strength characteristics of kenaf fibre reinforced cement mortar. *Pan*, 75, 0-54.
- Nair, A. B., & Joseph, R. (2014). Eco-friendly bio-composites using natural rubber (NR) matrices and natural fiber reinforcements. In *Chemistry, manufacture and applications of natural rubber* (pp. 249-283). Woodhead Publishing.
- Nurmianto, E. (2008). *Egronomi Konsep Dasar dan Aplikasinya (2 ed.)*. Surabaya: Guna Widya.
- Phanphet, S., Dechjarern, S., & Jomjanyong, S. (2017). Above-knee prosthesis design based on fatigue life using finite element method and design of experiment. *Medical Engineering & Physics*, 43, 86-91.
- Puslima., (2013). "Peluang Usaha Kenaf". Available online at <https://puslima.wordpress.com/2013/02/20/peluang-usaha-kenaf/>. Diakses pada 1 Juli 2022.
- Rosel Solis, M. J., Dávalos Ramírez, J. O., Molina Salazar, J., Ruiz Ochoa, J. A., & Gómez Roa, A. (2021). Optimization of Running Blade Prosthetics Utilizing Crow Search Algorithm Assisted by Artificial Neural Networks. *Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, 67(3).
- Salam, S. (2007). Studi Sifat Fisis Dan Mekanis Komposit Matriks Resin Epoxy Yang Diperkuat Dengan Serbuk Titania.
- Sanders, M. S., & McCormick, E. J. (1998). Human factors in engineering and design. *Industrial Robot: An International Journal*.
- Santoso, B. (2014). Teknik Budi Daya Varietas Baru Kenaf di Lahan Bonorowo, Podsolik Merah Kuning, Dan Gambut.
- Schwartz M.M. (1984). "*Composite Material Handbook*", Mc Graw-Hill, Singapura.
- Setiadi, A. (2018). *Desain, Simulasi dan Pembuatan Model Protesis Bawah Lutut Berdasarkan Antropometri Orang Indonesia*.
- Surdia, T., & Saito, S. (2005). Pengetahuan Bahan Teknik, PT. Pradnya Paramita, Jakarta.
- Tayari, & Smith. (1997). *Occupational Egronomics Principles and Applications*. New York: Chapment & Hall.
- Ugural, A. C. (2017). *Plates and Shells: Theory and Analysis*. CRC Press.
- Virk, A. S., Summerscales, J., & Hall, W. (2016). A Finite Element Analysis to Validate the Rule-of-Mixtures for the Prediction of the Young's Modulus of Composites with Non-circular Anisotropic Fibres. In *Natural Fibres: Advances in Science and Technology Towards Industrial Applications* (pp. 173-182). Springer, Dordrecht
- Voyiadjis, G. Z., & Kattan, P. I. (2005). *Mechanics of composite materials with MATLAB*. Springer Science & Business Media.

Halaman ini sengaja dikosongkan

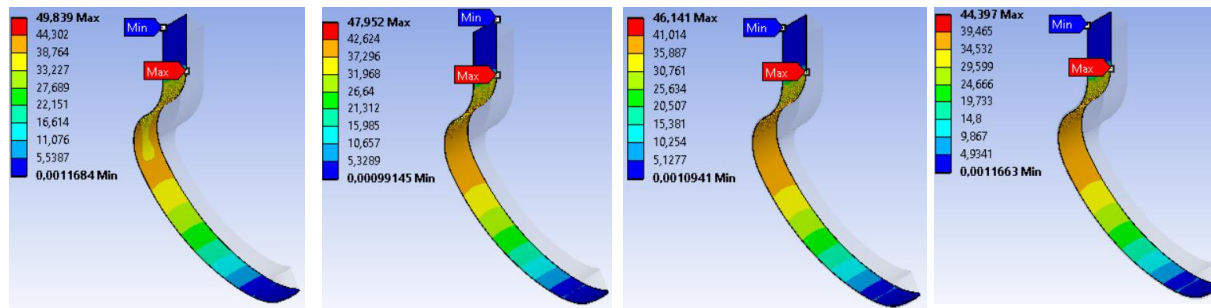
LAMPIRAN

A. Kontur distribusi tegangan von – Mises per layer pada kondisi *standing stance*

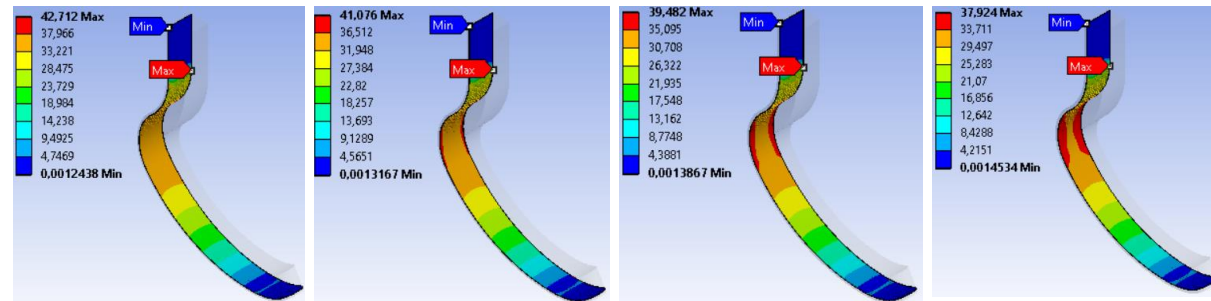
Layer 1



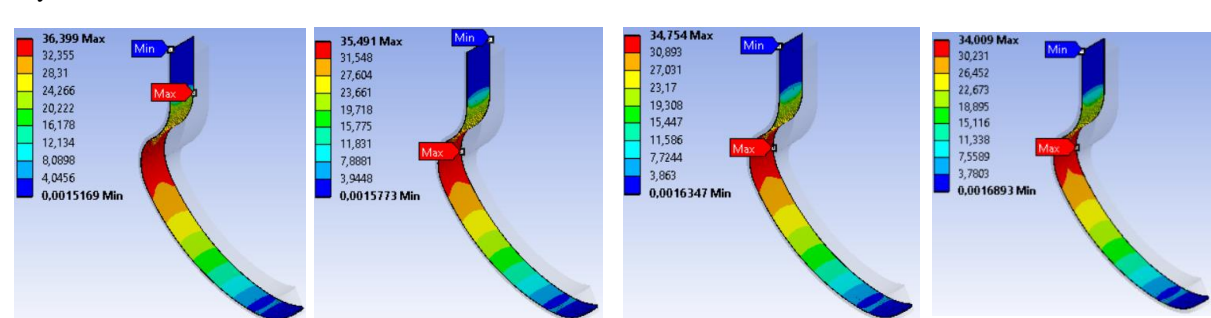
Layer 2



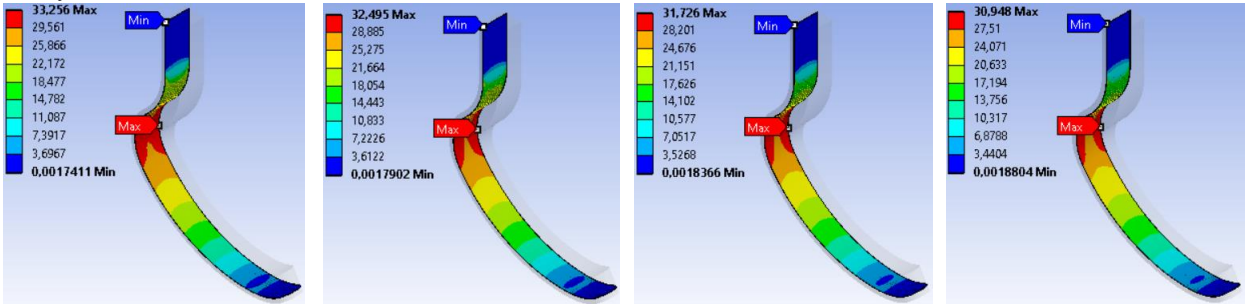
Layer 3



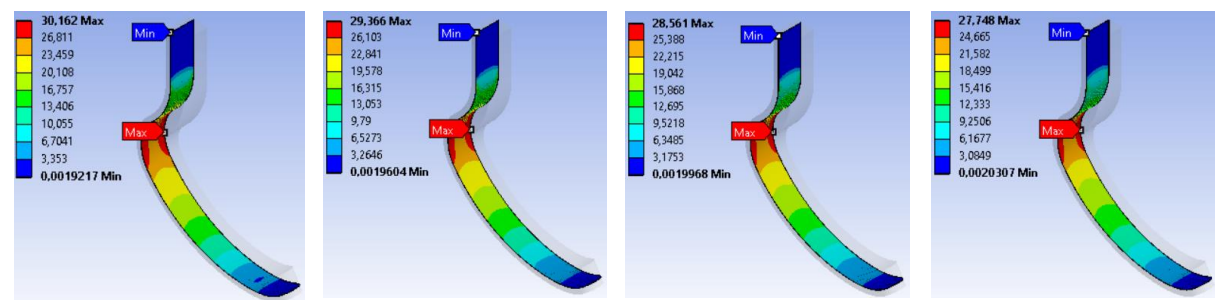
Layer 4



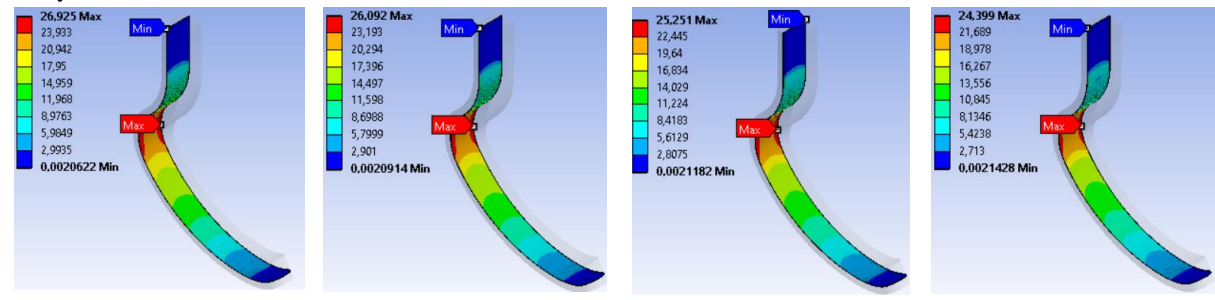
Layer 5



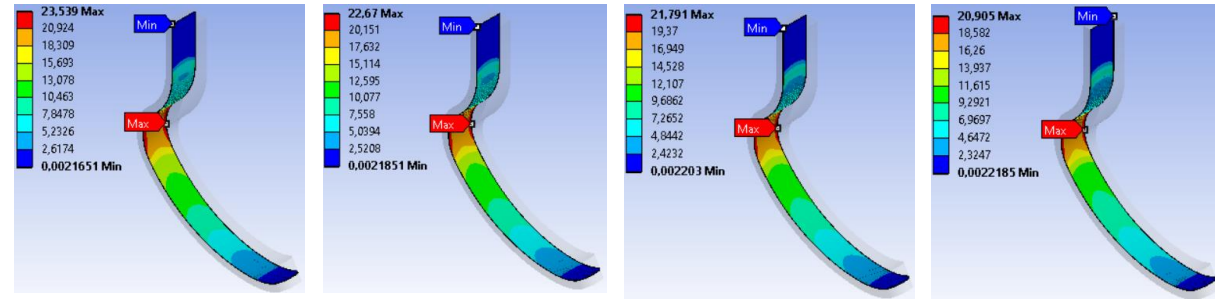
Layer 6



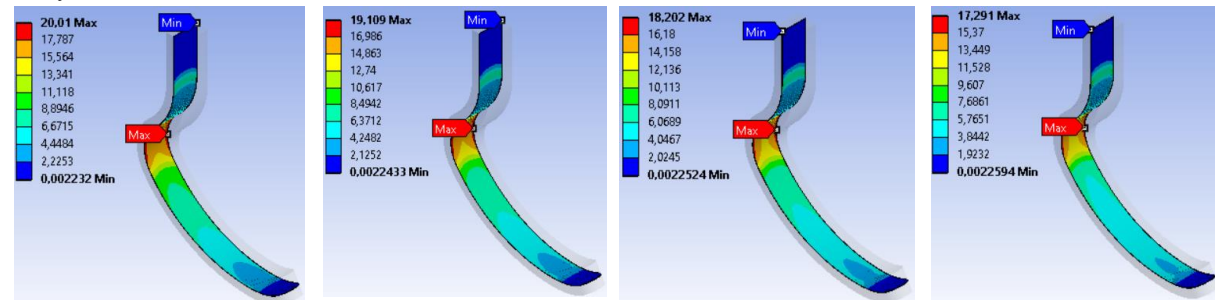
Layer 7



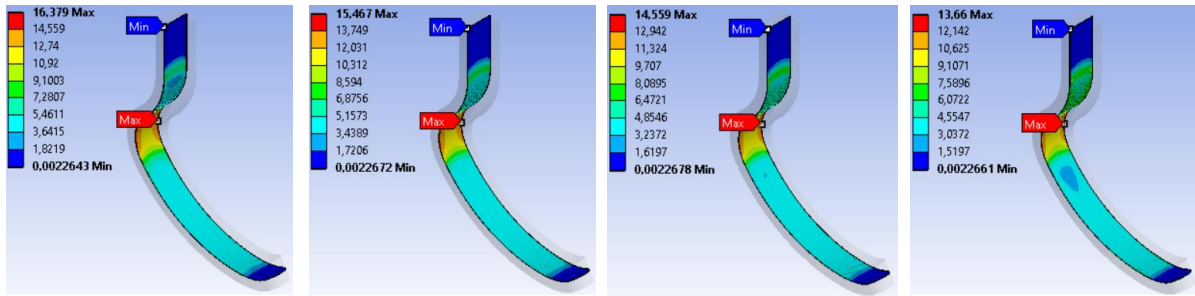
Layer 8



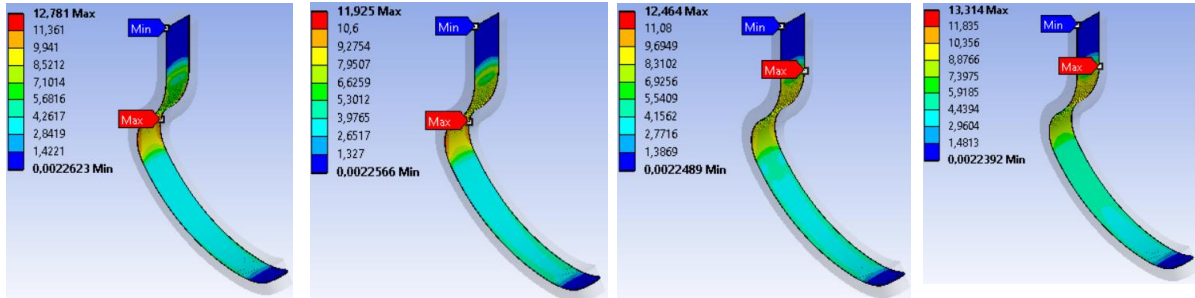
Layer 9



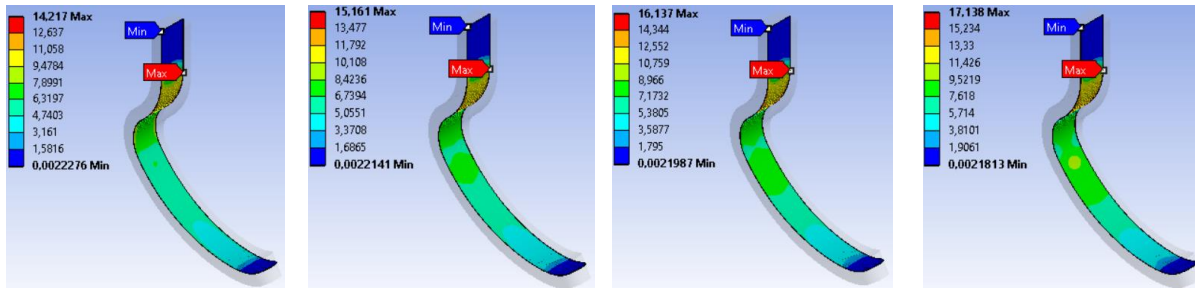
Layer 10



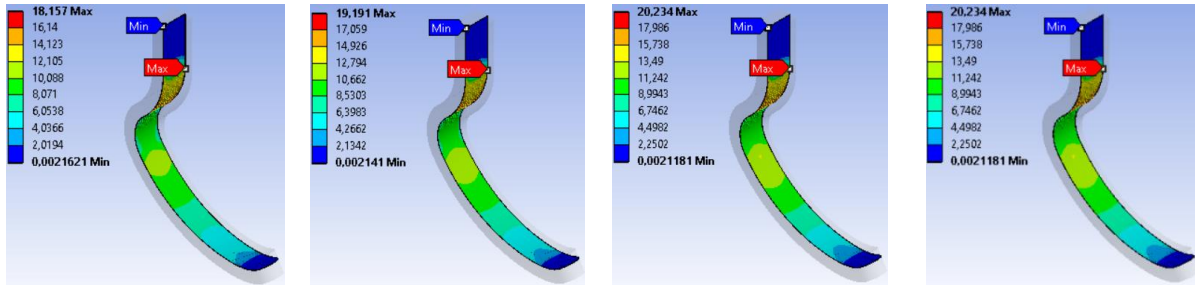
Layer 11



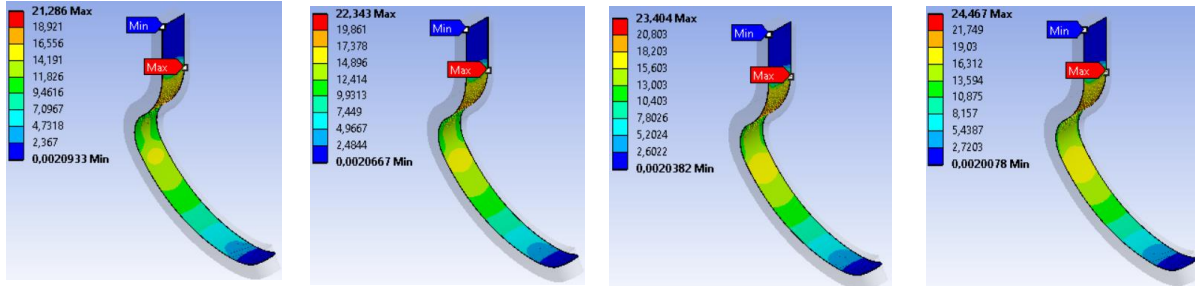
Layer 12



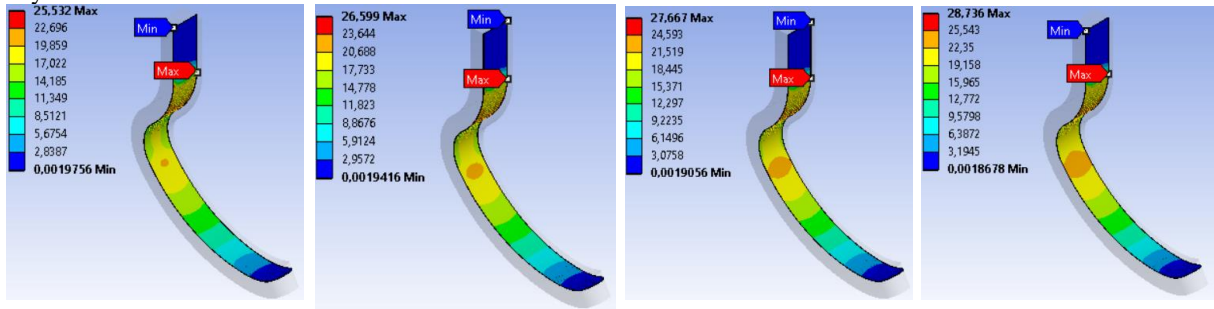
Layer 13



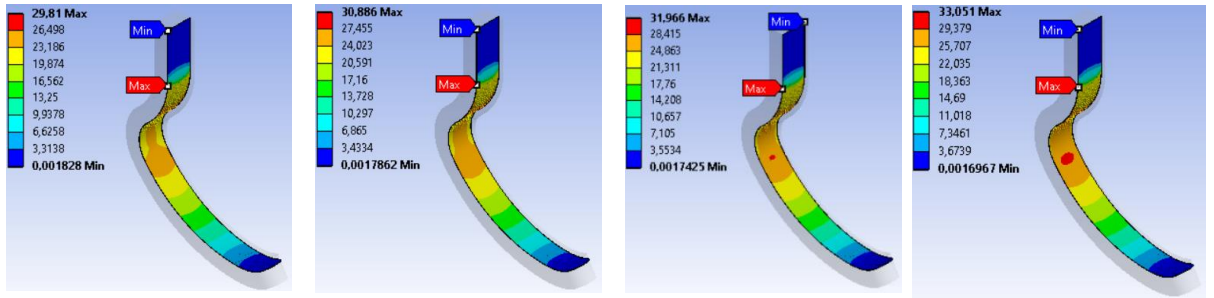
Layer 14



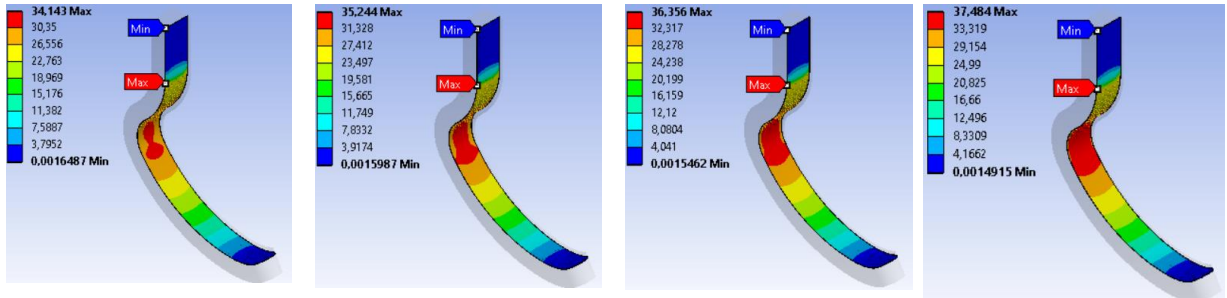
Layer 15



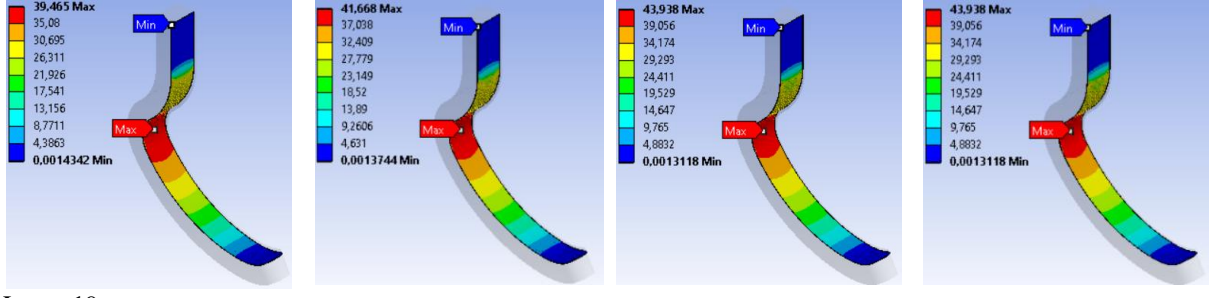
Layer 16



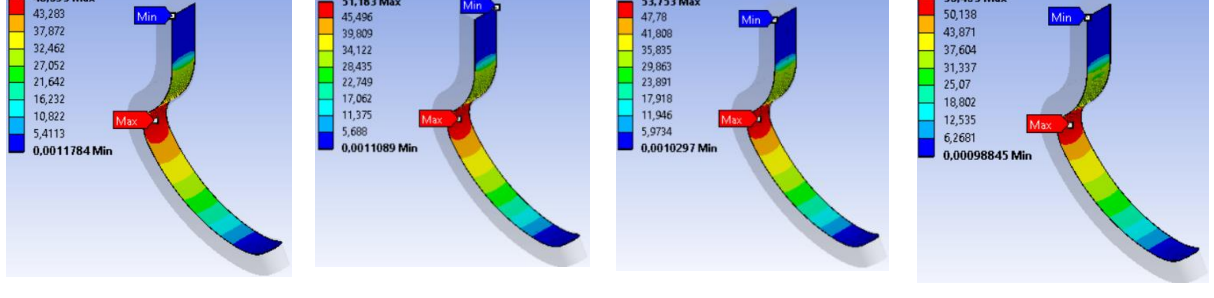
Layer 17



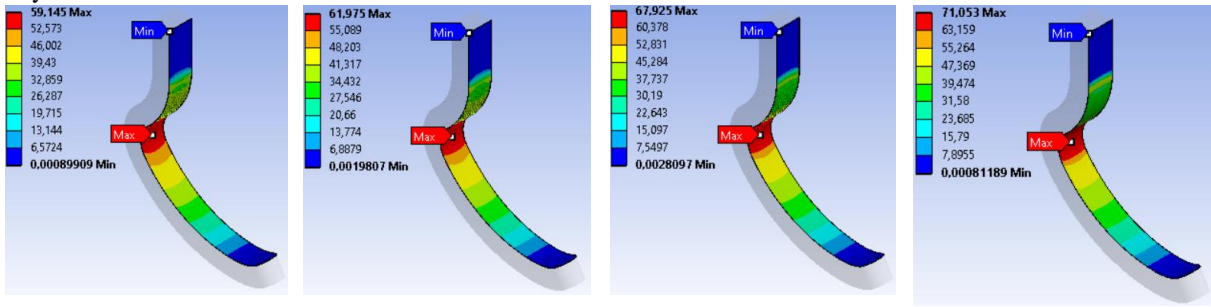
Layer 18



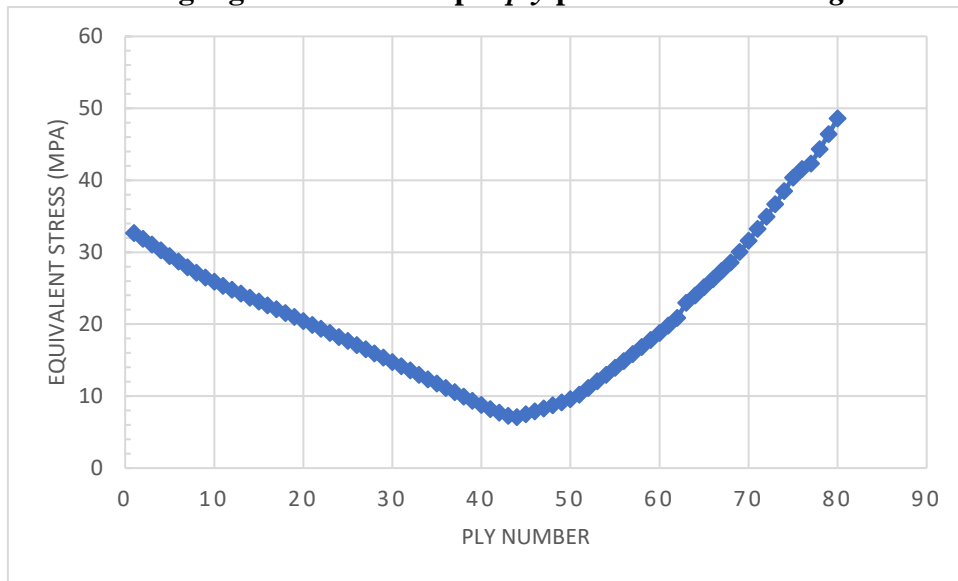
Layer 19



Layer 20



B. Grafik distribusi tegangan von – Mises per ply pada kondisi *running stance*



Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Penulis bernama Arighi Dhika Pratama. Penulis lahir di Kota Jakarta pada tanggal 15 September 2000. Penulis menempuh pendidikan formal di SD Al-Fath Tangerang Selatan lulus pada tahun 2012, SMP Kesatuan Bangsa Yogyakarta lulus pada tahun 2015, SMA Muhammadiyah 1 Yogyakarta, dan menempuh pendidikan sarjana di Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Selama masa studinya, penulis aktif dalam berbagai kegiatan baik kegiatan akademik maupun non – akademik. Dalam kegiatan akademik penulis aktif mengikuti seminar khususnya dalam bidang studi desain dan menjadi asisten praktikum untuk mata kuliah mekanika fluida. Dalam kegiatan non – akademik penulis aktif dalam keorganisasian, penulis menjabat sebagai kepala divisi *human resources development* Mesin ITS Autosport periode 2020 – 2021 dan sebagai asisten kedirjenan harmonisasi internal Badan Eksekutif Mahasiswa Institut Teknologi Sepuluh Nopember (BEM ITS) Periode 2020 – 2021 serta turut aktif didalam banyak kegiatan kemahasiswaan lainnya.

Untuk segala informasi, saran, dan kepentingan yang berhubungan dengan penelitian ini silahkan menghubungi penulis melalui arighidhika@gmail.com.