

TUGAS AKHIR - TM184835

ANALISIS PENGARUH ORIENTASI SUDUT SERAT DAN KETEBALAN PADA KOMPOSIT SERAT SISAL/EPOXY DAN PALEM/EPOXY TERHADAP KEKUATAN STATIK RUNNING BLADE PROSTHETIC MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

RIDHO TAQILLAH
NRP 02111840000158

Dosen Pembimbing
Alief Wikarta S.T., M.Sc.Eng., Ph.D.
NIP 198202102006041002

Program Studi S-1 Teknik Mesin
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022



TUGAS AKHIR - TM184835

ANALISIS PENGARUH ORIENTASI SUDUT SERAT DAN KETEBALAN PADA KOMPOSIT SERAT SISAL/EPOXY DAN PALEM/EPOXY TERHADAP KEKUATAN STATIK RUNNING BLADE PROSTHETIC MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

RIDHO TAQILLAH
NRP 02111840000158

Dosen Pembimbing
Alief Wikarta S.T., M.Sc.Eng., Ph.D.
NIP 198202102006041002

Program Studi S-1 Teknik Mesin
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022



FINAL PROJECT - TM184835

**ANALYSIS OF THE EFFECT OF FIBER ANGLE
ORIENTATION AND THICKNESS ON SISAL/EPOXY AND
PALM/EPOXY FIBER COMPOSITES ON STATIC RUNNING
BLADE PROSTHETIC STRENGTH USING FINITE ELEMENT
METHOD**

RIDHO TAQILLAH
NRP 02111840000158

Advisor
Alief Wikarta S.T., M.Sc.Eng., Ph.D.
NIP 198202102006041002

Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering
Departement of Mechanical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2022

LEMBAR PENGESAHAN

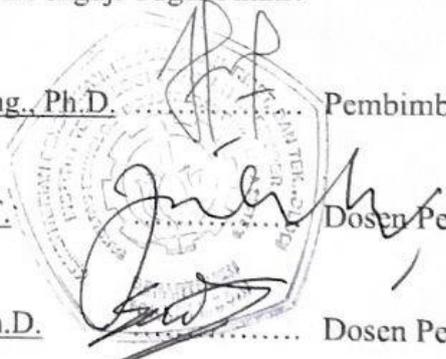
ANALISIS PENGARUH ORIENTASI SUDUT SERAT DAN KETEBALAN PADA KOMPOSIT SERAT SISAL/EPOXY DAN PALEM/EPOXY TERHADAP KEKUATAN STATIK RUNNING BLADE PROSTHETIC MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

TUGAS AKHIR

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

Oleh: **RIDHO TAQILLAH**
NRP. 02111840000158

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Alief Wikarta S.T., M.Sc., Eng., Ph.D. Pembimbing
NIP. 198202102006041002
 2. Ir. Julendra B. Ariatedja, M.T. Dosen Penguji I
NIP. 196807061999031004
 3. Putu Suwarta, S.T., M.Sc., Ph.D. Dosen Penguji II
NIP. 198203032009121007
- 

SURABAYA
Juli, 2022

APPROVAL SHEET

ANALYSIS OF THE EFFECT OF FIBER ANGLE ORIENTATION AND THICKNESS ON SISAL/EPOXY AND PALM/EPOXY FIBER COMPOSITES ON STATIC RUNNING BLADE PROSTHETIC STRENGTH USING FINITE ELEMENT METHOD

FINAL PROJECT

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

By: **RIDHO TAQILLAH**
NRP. 02111840000158

Approved by Final Project Examiner Team:

1. Alief Wikarta S.T., M.Sc., Eng., Ph.D. Advisor
NIP. 198202102006041002
2. Ir. Julendra B. Ariatedja, M.T. Examiner I
NIP. 196807061999031004
3. Putu Suwarta, S.T., M.Sc., Ph.D. Examiner II
NIP. 198203032009121007

SURABAYA
July, 2022

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Ridho Taqillah / 02111840000158

Departemen : Teknik Mesin FT-IRS ITS

Dosen Pembimbing / NIP : Alief Wikarta S.T., M.Sc., Eng., PhD. / 198202102006041002

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Analisis Pengaruh Orientasi Sudut Serat Dan Ketebalan Pada Komposit Serat Sisal/Epoxy Dan Palem/Epoxy Terhadap Kekuatan Statik *Running Blade Prosthetic* Menggunakan Metode Elemen Hingga” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah Penulisan ilmiah.

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

Surabaya, 29 Juli 2022

Mengetahui

Dosen Pembimbing,



Alief Wikarta S.T., M.Sc., Eng., PhD.
NIP. 198202102006041002

Mahasiswa,

Ridho Taqillah
NRP. 02111840000158

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Ridho Taqillah / 02111840000158
Departement : Mechanical Engineering FT-IRS ITS
Advisor / NIP : Alief Wikarta S.T., M.Sc., Eng., PhD. / 198202102006041002

Hereby declare that the Final Project with the title of “Analysis Of The Effect Of Fiber Angle Orientation And Thickness On Sisal/Epoxy And Palm/Epoxy Fiber Composites On Static Running Blade Prosthetic Strength 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 sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 29th July 2022

Acknowledged

Advisor,

Student,



Alief Wikarta S.T., M.Sc., Eng., PhD.
NIP. 198202102006041002

The image shows a handwritten signature in black ink, which appears to be 'Ridho Taqillah'.

Ridho Taqillah
NRP. 02111840000158

**ANALISIS PENGARUH ORIENTASI SUDUT SERAT DAN KETEBALAN PADA
KOMPOSIT SERAT SISAL/EPOXY DAN PALEM/EPOXY TERHADAP
KEKUATAN STATIK RUNNING BLADE PROSTHETIC MENGGUNAKAN
METODE ELEMEN HINGGA**

Nama Mahasiswa : Ridho Taqillah
NRP : 0211184000158
Departemen : Teknik Mesin FT-IRS ITS
Dosen Pembimbing : Alief Wikarta S.T., M.Sc., Eng., Ph.D.

ABSTRAK

Running blade prosthetic adalah salah satu teknologi alat bantu buatan berbentuk bagian kaki yang dapat membantu penyandang disabilitas melakukan berbagai aktivitas olahraga seperti berlari. Untuk itu, diciptakan *running blade prosthetic* yang kuat dengan menggunakan material komposit. Jenis material komposit yang digunakan pada penelitian ini adalah jenis komposit alam. Komposit alam yang digunakan pada penelitian ini adalah campuran antara serat sisal dan serat palem dengan matriks resin epoxy. Kekuatan komposit dapat dipengaruhi arah orientasi pada serat komposit dan ketebalan pada plat. Sehingga pada penelitian ini dilakukan analisis terhadap variasi orientasi sudut serat dan ketebalan pada komposit menggunakan *software* Ansys dengan metode elemen hingga. Terdapat beberapa variasi pada analisis yang dilakukan terhadap orientasi sudut serat. Variasi arah orientasi serat berupa $[0^\circ]$, $[0^\circ/90^\circ]$, $[45^\circ/-45^\circ]$, $[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]$, dan $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ]$. Pada penelitian ini, terdapat dua jenis pengujian yang dibedakan sesuai standar ISO 10328 diantara adalah *midstance* dan *forefoot*. Pembebanan pada penelitian ini menggunakan tiga level pembebanan yaitu 1610 N untuk berat badan 60 kg, 2065 N untuk berat badan 80 kg dan 2240 N untuk berat badan 100 kg. Hasil penelitian ini diperoleh kombinasi sudut orientasi terbaik yang berada pada kombinasi $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ pada ketebalan 35 mm dengan jenis pengujian *midstance* dan *forefoot* yang menghasilkan nilai *safety factor* tergolong aman dan menjadikan desain *running blade prosthetic* menjadi kuat dan aman. Kemudian dilakukan penambahan level pembebanan dari ketebalan 35 mm dan 40 mm terhadap level pembebanan 2065 N dan 2240 N. Hasil dari level pembebanan tersebut yaitu ketebalan 35 mm dapat dinyatakan aman pada pembebanan 1610 N, sedangkan ketebalan 40 mm dapat dinyatakan aman sampai pada level pembebanan 2240 N. Setelah kedua material dibandingkan, material sisal/epoxy lebih unggul dibandingkan material palem/epoxy karena material sisal/epoxy memiliki nilai *safety factor*/keamanan yang lebih tinggi dan tegangan maksimum yang lebih rendah dibanding dengan material palem/epoxy.

Kata kunci: *Running Blade Prosthetic, sisal/epoxy, palem/epoxy, metode elemen hingga, arah orientasi serat.*

ANALYSIS OF THE EFFECT OF FIBER ANGLE ORIENTATION AND THICKNESS ON SISAL/EPOXY AND PALM/EPOXY FIBER COMPOSITES ON STATIC RUNNING BLADE PROSTHETIC STRENGTH USING FINITE ELEMENT METHOD

Student Name : Ridho Taqillah
NRP : 0211184000158
Departement : Teknik Mesin FT-IRS ITS
Advisor : Alief Wikarta S.T., M.Sc., Eng., Ph.D.

ABSTRACT

Running blade prosthetic is one of the artificial assistive device technologies in the form of legs that can help people with disabilities perform various sports activities such as running. For this reason, a strong prosthetic running blade was created using composite materials. The type of composite material used in this study is natural composite. The natural composite used in this study is a mixture of sisal fiber and palm fiber with an epoxy resin matrix. The strength of the composite can be influenced by the orientation of the composite fiber and the thickness of the plate. Therefore, in this study, an analysis of variations in fiber angle orientation and thickness of the composite is carried out using Ansys software with finite element method. There are several variations in the analysis performed on the angular orientation of the fibers. Variations in the fiber orientation direction are $[0^\circ]$, $[0^\circ/90^\circ]$, $[45^\circ/-45^\circ]$, $[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]$, and $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ]$. In this study, there are two types of tests that are distinguished according to the ISO 10328 standard, namely midstance and forefoot. The loading in this study used three levels of loading, namely 1610 N for 60 kg body weight, 2065 N for 80 kg body weight and 2240 N for 100 kg body weight. The results of this study obtained the best combination of orientation angles which were in the combination of $[45^\circ/-45^\circ]$ 20 at a thickness of 35 mm with the midstance and forefoot testing types which resulted in a safety factor value that was classified as safe and made the prosthetic running blade design strong and safe. Then the loading level was added from a thickness of 35 mm and 40 mm to the loading level of 2065 N and 2240 N. The results of the loading level, namely a thickness of 35 mm can be declared safe at a loading of 1610 N, while a thickness of 40 mm can be declared safe up to a loading level of 2240 N. After both materials have been compared, the result shows that the sisal/epoxy materials have more advantage compared to the palm/epoxy material, due to the safety factor of sisal/epoxy material that is higher and lower maximum stress than the palm/epoxy material.

Keyword: *Running Blade Prosthetic, sisal/epoxy, palm/epoxy, finite element method, fiber orientation direction.*

KATA PENGANTAR

Puji syukur atas Kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, dengan izin dan berkah-Nya Penulis dapat menyelesaikan penelitian tugas akhir ini dengan judul “Analisis Pengaruh Orientasi Sudut Serat dan Ketebalan pada Komposit Serat Sisal/Epoxy dan Palem/Epoxy Terhadap Kekuatan Statik *Running Blade Prosthetic* Menggunakan Metode Elemen Hingga” dengan lancar dan sebaik-baiknya. Penelitian ini Penulis dedikasikan kepada diri Penulis sendiri dan juga kepada keluarga Penulis yang telah membatu Penulis dalam melalui perjalanan Panjang hingga akhirnya Penulis dapat menyampaikan rasa syukur dan ucapan terimakasih pada kata pengantar ini. Tidak lupa juga Penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada.

1. Bapak Pontjo Juni Atmo dan Ibu Fifi Eka Yanti selaku orang tua Penulis, serta kepada Mbak Sainah Binti Kasirun, Mas Ridwansyah, Mbak Farrah Rosalina, Mas Ega Pratama Putra, Mbak Marcelia Prielly Putri Pratama, Mbak Rana Dinah Nurtahany, Dede Rasyid Abdul Malik, Dede Aisyah Naziya Almahira, dan Dede Maira Anaya Putri, serta keluarga besar Djumongs yang selalu memberikan doa-doanya, dan menjadi motivasi tersendiri untuk Penulis menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Bapak Alief Wikarta S.T., M.Sc., Eng., PhD. Selaku dosen pembimbing Penulis yang selalu memberikan pelajaran dan bimbingan kepada Penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Bapak Ir. Julendra. B Ariatedja, M.T., Bapak Putu Suwarta, S.T., M.Sc., Ph.D. selaku dosen penguji Penulis yang telah memberikan banyak saran serta masukan yang berguna dalam menyempurnakan tugas akhir ini.
4. Bapak Dr Agus Sigit Pramono, DEA., M.Sc., Ph.D., selaku dosen wali Penulis yang selalu membantu dan membimbing Penulis selama masa perkuliahan
5. Seluruh teman bimbingan tugas akhir (Ganesha, Fazhli, Rizaldy, dan Vicky) yang selalu membantu Penulis dalam hal motivasi, bantuan, dan ilmu diberikan selama menyelesaikan tugas akhir ini.
6. Seluruh keluarga besar Pemuda Pancawarna Karmel (Alpey, Bule, Timmy, Mas Tor, Taqi, Intel, Acung, Karim, Nadip, Enjang, Dipa, Ipali, Teke, Nandut) yang telah membantu dengan dipenuhi canda, tawa, pujian, cacian, serta semangat yang tiada henti diberikan untuk Penulis selama perkuliahan.
7. Seluruh keluarga besar Gunadya (Ajis, Vicky, Pray, Rapli, Ican, Mumud, Acid, Jono, Pajli, Fadel, Ganes, Andi, Athallah, Aga, Apin, Ghani, Klipo, dan Ilham) yang telah membantu dan menemani Penulis dengan dipenuhi canda, tawa, pujian, cacian, serta semangat yang tiada henti diberikan untuk Penulis selama perkuliahan.
8. Seluruh Warga Lab MBP (Jay, Faqih, Kelpo, Arighi, Aldi) yang telah membantu dan menemani Penulis dalam mengerjakan tugas akhir dengan penuh canda tawa, pujian, motivasi yang sangat berarti bagi Penulis.
9. Seluruh keluarga besar M61 yang telah menemani Penulis selama menempuh pendidikan di Departemen Teknik Mesin FT-IRS ITS.

Penulis sadar bahwa Penulisan laporan Tugas Akhir ini tidak sempurna, namun semoga laporan ini dapat memberikan kontribusi positif dan menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembaca, keluarga besar Teknik Mesin khususnya, dan civitas akademika ITS pada umumnya. Selain itu, semoga dapat bermanfaat sebagai referensi pengerjaan laporan Tugas Akhir bagi mahasiswa yang akan mengerjakan.

Surabaya, 29 Juli 2022

Penulis

DAFTAR ISI

COVER.....	i
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.....	xxv
DAFTAR TABEL.....	xxix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II DASAR TEORI.....	5
2.1 Komposit.....	5
2.1.1 Klasifikasi Material Komposit.....	5
2.1.1.1 Synthetic Fiber Composite.....	5
2.1.1.2 Natural Fiber Composite.....	5
2.1.1.3 Hybrid Composite.....	6
2.2 Faktor Yang Mempengaruhi Performa Komposit.....	6
2.2.1 Jenis Serat.....	6
2.2.2 Orientasi Serat.....	6
2.2.3 Komposisi Serat dan Bentuk Penguat.....	7
2.2.4 Fraksi Volume Serat.....	7
2.2.5 Faktor Matriks.....	8
2.3 Serat Sisal.....	9
2.4 Serat Palem.....	10
2.5 Matriks Resin Epoxy.....	10
2.6 Laminasi.....	11

2.7	<i>Running Blade Prosthetic</i>	12
2.7.1	Standarisasi Prostetik ISO 10328(2016).....	13
2.8	<i>Rules of Mixtures</i>	14
2.9	<i>Material Orthotropic Elasticity</i>	14
2.10	<i>Material Orthotropic Stress Limit</i>	16
2.10.1	Perhitungan Buku <i>Engineering Mechanics of Composite Materials</i>	16
2.10.2	Perhitungan Buku <i>Composite Structures: Design, Mechanics, Analysis, Manufacturing and Testing</i>	17
2.11	Teori Kegagalan	18
2.11.1	Von-Misses <i>Criterion</i>	18
2.11.2	Tsai-Wu Failure Criterion.....	19
2.12	<i>Safety factor</i>	19
2.13	Metode Elemen Hingga (Finite Element Method).....	20
2.14	Tinjauan Pustaka	21
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		29
3.1	Diagram Alir Tugas Akhir	29
3.2	Identifikasi Masalah	32
3.3	Studi Literatur.....	32
3.4	Pengumpulan Data Sifat Material	32
3.5	Variasi Penelitian	33
3.6	Uji Konvergensi Meshing	35
3.7	Simulasi Uji Kekuatan <i>Running Blade Prosthetic</i> Dengan <i>Finite Element Method</i>	36
3.7.1	Pembuatan 3D Geometri	36
3.7.2	Material Designer	37
3.7.3	Input Engineering Data Material.....	38
3.7.4	Permodelan Surface Geometry.....	39
3.7.5	Meshing	40
3.7.6	Set-up Komposit.....	41
3.7.7	Pengujian <i>Running Blade Prosthetic</i>	44
3.8	Validasi Simulasi.....	46
3.8.1	Rules of Mixture	46
3.8.2	Perhitungan Orthotropic <i>Stress Limit</i>	47
3.8.2.1	Perhitungan Buku <i>Engineering Mechanics of Composite Materials</i>	48
3.8.2.2	Perhitungan Buku <i>Composites Structures: Design, Mechanics Analysis, Manufacturing, and Testing</i>	51

3.8.3 Desain <i>Running Blade Prosthetic</i>	56
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	57
4.1 Hasil Simulasi Penelitian dan Pembahasan	57
4.2 Simulasi <i>Running Blade Prosthetic</i> Menggunakan Material Komposit Sisal/Epoxy	57
4.2.1 Hasil Simulasi Pengujian <i>Midstance</i>	57
4.2.1.1 Pembahasan Nilai Equivalent <i>Stress</i>	57
4.2.1.2 Pembahasan Nilai Deformasi	59
4.2.1.3 Pembahasan Nilai <i>Safety factor</i>	60
4.2.1.4 Orientasi Sudut Terbaik	62
4.2.1.5 Pembahasan Pengaruh Ketebalan	62
4.2.2 Hasil Simulasi Pengujian <i>Forefoot</i>	66
4.2.2.1 Pembahasan Nilai Equivalent <i>Stress</i>	66
4.2.2.2 Pembahasan Nilai Deformasi	68
4.2.2.3 Pembahasan Nilai <i>Safety factor</i>	69
4.2.2.4 Pembahasan Orientasi Sudut Terbaik	71
4.2.2.5 Pembahasan Pengaruh Ketebalan	71
4.3 Simulasi <i>Running Blade Prosthetic</i> Menggunakan Material Komposit Palem/Epoxy ..	75
4.3.1 Hasil Simulasi Pengujian <i>Midstance</i>	75
4.3.1.1 Pembahasan Nilai Equivalent <i>Stress</i>	75
4.3.1.2 Pembahasan Nilai Deformation	77
4.3.1.3 Pembahasan Nilai <i>Safety factor</i>	78
4.3.1.4 Pembahasan Orientasi Sudut Terbaik	80
4.3.1.5 Pembahasan Pengaruh Ketebalan	80
4.3.2 Hasil Simulasi Pengujian <i>Forefoot</i>	84
4.3.2.1 Pembahasan Nilai Equivalent <i>Stress</i>	84
4.3.2.2 Pembahasan Nilai Deformasi	86
4.3.2.3 Pembahasan Nilai <i>Safety factor</i>	87
4.3.2.4 Pembahasan Orientasi Sudut Terbaik	89
4.3.2.5 Pembahasan Pengaruh Ketebalan	89
4.4 Hasil Simulasi Pengujian <i>Running Blade Prosthetic</i> pada peningkatan Level Pembebanan	93
4.4.1 Hasil Simulasi dengan Ketebalan 35 mm pada Peningkatan Level Pembebanan....	93
4.4.2 Hasil Simulasi dengan Ketebalan 40 mm pada Peningkatan Level Pembebanan....	99
4.5 Perbandingan Material Komposit Sisal/Epoxy dan Palem/Epoxy Sebagai Material Penyusun <i>Running Blade Prosthetic</i>	105

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	109
5.1 Kesimpulan.....	109
5.2 Saran.....	109
DAFTAR PUSTAKA	111
LAMPIRAN.....	113
BIODATA PENULIS	119

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Jenis Orientasi Serat Pada Komposit (Klemens, 2009).....	7
Gambar 2. 2 Bentuk Penguat Komposit (Ishai & Daniel, 2006).....	7
Gambar 2. 3 Tanaman Sisal.....	9
Gambar 2. 4 Pohon <i>Palem</i>	10
Gambar 2. 5 Laminated Composites (Jones, 1999).....	11
Gambar 2. 6 Lamina dan Sumbu Koordinat (Ishai & Daniel, 2006)	12
Gambar 2. 7 Running Blade Prosthetic (Ainhoa Murillo I, 2018)	12
Gambar 2. 8 Model Geometri Serat Hexagonal (Daniel & Ishai, 2006).....	15
Gambar 2. 9 Penggunaan Metode Elemen Hingga Pada Plat Dengan Lubang di Tengah (Fish et al., 2007).....	20
Gambar 2. 10 (a) Mesh Metode Elemen Hingga, (b) Elemen Segitiga, (c) Elemen Segi empat (Isworo & Ansyah, 2018)	21
Gambar 2. 11 Desain <i>Sprinting Prosthesis</i> model 1E90 (Ainhoa Murillo I, 2018)	21
Gambar 2. 12 Material Properties Carbon/Epoxy (Ainhoa Murillo I, 2018)	22
Gambar 2. 13 Penyusunan Layer Carbon/Epoxy (Ainhoa Murillo I, 2018)	22
Gambar 2. 14 Boundary Condition Carbon/Epoxy Running Blade Prosthetic	23
Gambar 2. 15 Hasil Carbon/Epoxy Running Blade Prosthetic: (a) <i>Midstance</i> , (b) <i>Forefoot</i> (Ainhoa Murillo I, 2018)	23
Gambar 2. 16 Grafik Longitudinal Tensile Strength (Zuccarello et al., 2021)	27
Gambar 2. 17 Grafik Longitudinal Young's Modulus (Zuccarello et al., 2021).....	27
Gambar 3. 1 Flowchart Penelitian	29
Gambar 3. 2 Flowchart Simulasi	30
Gambar 3. 3 Flowchart pengujian <i>Running Blade Prosthetic</i>	31
Gambar 3. 4 <i>Stacking sequence</i> untuk masing-masing variasi orientasi sudut:	34
Gambar 3. 5 Grafik Hasil Uji Konvergensi Simulasi	35
Gambar 3. 6 Permodelan 3D Running Blade Prosthetic	36
Gambar 3. 7 Model Mikrostruktur Komposit Serat/Resin UD	37
Gambar 3. 8 Hasil <i>Material Designer</i> Sisal/Epoxy	38
Gambar 3. 9 Hasil <i>Material Designer</i> Palem/Epoxy.....	38
Gambar 3. 10 Permodelan Surface Geometri dari <i>Running Blade Prosthetic</i>	40
Gambar 3. 11 Meshing 4mm dari Desain <i>Running Blade Prosthetic</i>	40
Gambar 3. 12 <i>Orthogonal Quality Parameter</i>	41
Gambar 3. 13 <i>Orthogonal Quality</i> dari meshing <i>Running Blade Prosthetic</i>	41
Gambar 3. 14 Fabric Properties <i>Komposit Sisal/Epoxy</i>	42
Gambar 3. 15 Stackup Properties $[0^\circ]_{40}$	42
Gambar 3. 16 Arah Orientasi Sudut: (a) 0° , (b) 90° , (c) 45° , dan (d) -45°	43
Gambar 3. 17 Menentukan salah satu Sumbu <i>Rosettes</i>	43
Gambar 3. 18 Menentukan salah satu Sumbu <i>Oriented Selection Sets</i> (OSS).....	44
Gambar 3. 19 Menentukan jumlah layer yang digunakan pada <i>modelling group</i>	44
Gambar 3. 20 <i>Boundary Condition Midstance</i>	45
Gambar 3. 21 <i>Boundary Condition Forefoot</i>	45
Gambar 3. 22 Grafik Perbandingan Longitudinal Tensile dengan Eksperimen.....	50
Gambar 3. 23 Grafik Perbandingan Transverse Tensile dengan Eksperimen.....	50
Gambar 3. 24 Grafik Perbandingan Longitudinal Compressive dengan Eksperimen.....	50

Gambar 3. 25 Grafik Perbandingan Transverse Compressive dengan Eksperimen	51
Gambar 3. 26 Grafik Perbandingan In Plane Shear dengan Eksperimen	51
Gambar 3. 27 Grafik Perbandingan Longitudinal Tensile dengan Eksperimen	53
Gambar 3. 28 Grafik Perbandingan Transverse Tensile dengan Eksperimen	54
Gambar 3. 29 Grafik Perbandingan Longitudinal Compressive Strength dengan Eksperimen	54
Gambar 3. 30 Grafik Perbandingan Transverse Compressive Strength dengan Eksperimen..	55
Gambar 3. 31 Grafik Perbandingan In Plane Shear Strength dengan Eksperimen.....	55
Gambar 4. 1 Hasil simulasi <i>running blade prosthetic</i> menggunakan material komposit sisal/epoxy dengan kombinasi sudut serat $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ terhadap tegangan maksimum Von-Misses pada pengujian <i>midstance</i>	58
Gambar 4. 2 Grafik hasil simulasi pengujian <i>running blade prosthetic</i> menggunakan material sisal/epoxy dengan kombinasi sudut serat terhadap tegangan maksimum von misses pada pengujian <i>midstance</i>	58
Gambar 4. 3 Hasil Pengujian <i>running blade prosthetic</i> menggunakan material sisal/epoxy dengan kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ terhadap Deformasi pada pengujian <i>midstance</i>	59
Gambar 4. 4 Grafik hasil pengujian <i>running blade prosthetic</i> menggunakan material sisal/epoxy dengan kombinasi sudut serat terhadap total deformasi pada pengujian <i>midstance</i>	60
Gambar 4. 5 Hasil pengujian <i>running blade prosthetic</i> menggunakan material komposit sisal/epoxy dengan kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ terhadap <i>safety factor</i> pada pengujian <i>midstance</i>	61
Gambar 4. 6 Grafik pengujian <i>running blade prosthetic</i> menggunakan material sisal/epoxy dengan kombinasi orientasi sudut serat terhadap <i>safety factor</i> pada pengujian <i>midstance</i>	61
Gambar 4. 7 Hasil pengujian <i>running blade prosthetic</i> menggunakan material komposit sisal/epoxy dengan kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ dan ketebalan 10 mm pada pengujian <i>midstance</i> terhadap: (a) Tegangan Maksimum Von-Misses <i>Stress</i> , (b) Deformasi, (c) <i>Safety factor</i>	63
Gambar 4. 8 Grafik Simulasi Variasi Ketebalan dari Material Komposit Sisal/Epoxy terhadap Tegangan Von-Misses <i>Stress</i> pada pengujian <i>Midstance</i>	64
Gambar 4. 9 Grafik Hasil Simulasi Variasi Ketebalan dari Material Komposit Sisal/Epoxy dan Deformasi pada pengujian <i>midstance</i>	65
Gambar 4. 10 Hasil Simulasi Variasi Ketebalan dari Material Sisal/Epoxy terhadap <i>Safety factor</i> pada pengujian <i>midstance</i>	66
Gambar 4. 11 Hasil pengujian <i>running blade prosthetic</i> menggunakan material sisal/epoxy dengan kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ terhadap tegangan maksimum Von-Misses pada pengujian <i>forefoot</i>	67
Gambar 4. 12 Grafik hasil pengujian <i>running blade prosthetic</i> menggunakan material sisal/epoxy dengan kombinasi sudut serat terhadap Von-Misses <i>stress</i> pada pengujian <i>forefoot</i>	67
Gambar 4. 13 Hasil pengujian <i>running blade prosthetic</i> menggunakan material komposit sisal/epoxy dengan kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ terhadap Deformasi pada pengujian <i>forefoot</i>	68
Gambar 4. 14 Grafik hasil pengujian <i>running blade prosthetic</i> menggunakan material komposit sisal/epoxy dengan kombinasi sudut serat terhadap Deformasi pada pengujian <i>forefoot</i>	68
Gambar 4. 15 Hasil pengujian <i>running blade prosthetic</i> menggunakan material komposit sisal/epoxy dengan kombinasi sudut serat terhadap nilai <i>safety factor</i> pada pengujian <i>forefoot</i>	69

Gambar 4. 16 Hasil pengujian <i>running blade prosthetic</i> material komposit sisal/epoxy dengan kombinasi sudut serat terhadap <i>safety factor</i> setiap variasi pada pengujian <i>forefoot</i>	70
Gambar 4. 17 Hasil pengujian <i>running blade prosthetic</i> menggunakan material komposit sisal/epoxy dengan kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_5$ dan ketebalan 9 mm pada pengujian <i>forefoot</i> terhadap: (a) tegangan maksimum Von-Misses, (b) deformasi, (c) <i>safety factor</i>	72
Gambar 4. 18 Hasil Simulasi Variasi Ketebalan dari Material sisal/epoxy terhadap tegangan maksimum Von-Misses	73
Gambar 4. 19 Hasil Simulasi variasi ketebalan dari material komposit sisal/epoxy terhadap <i>Deformasi</i>	74
Gambar 4. 20 Hasil simulasi variasi ketebalan dari material komposit sisal/epoxy terhadap <i>Safety factor</i>	74
Gambar 4. 21 Hasil simulasi <i>running blade prosthetic</i> menggunakan material komposit palem/epoxy dengan kombinasi sudut serat $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ terhadap tegangan maksimum Von-Misses pada pengujian <i>midstance</i>	75
Gambar 4. 22 Grafik hasil simulasi pengujian <i>running blade prosthetic</i> menggunakan material palem/epoxy dengan kombinasi sudut serat terhadap tegangan maksimum Von-Misses pada pengujian <i>midstance</i>	76
Gambar 4. 23 Hasil Pengujian <i>running blade prosthetic</i> menggunakan material palem/epoxy dengan kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ terhadap Deformasi pada pengujian <i>midstance</i>	77
Gambar 4. 24 Grafik hasil pengujian <i>running blade prosthetic</i> menggunakan material palem/epoxy dengan kombinasi sudut serat terhadap total deformasi pada pengujian <i>midstance</i>	77
Gambar 4. 25 Hasil pengujian <i>running blade prosthetic</i> menggunakan material komposit palem/epoxy dengan kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ terhadap <i>safety factor</i> pada pengujian <i>midstance</i>	78
Gambar 4. 26 Grafik pengujian <i>running blade prosthetic</i> menggunakan material palem/epoxy dengan kombinasi orientasi sudut serat terhadap <i>safety factor</i> pada pengujian <i>midstance</i>	79
Gambar 4. 27 Hasil pengujian <i>running blade prosthetic</i> menggunakan material komposit palem/epoxy dengan kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ dan ketebalan 10 mm pada pengujian <i>midstance</i> terhadap: (a) Tegangan Maksimum Von-Misses <i>Stress</i> , (b) Deformasi, (c) <i>Safety factor</i>	81
Gambar 4. 28 Grafik Simulasi Variasi Ketebalan dari Material Komposit Palem/Epoxy terhadap Tegangan Von-Misses <i>Stress</i> pada pengujian <i>Midstance</i>	82
Gambar 4. 29 Grafik Hasil Simulasi Variasi Ketebalan dari Material Komposit Palem/Epoxy dan <i>Deformasi</i> pada pengujian <i>midstance</i>	83
Gambar 4. 30 Hasil Simulasi Variasi Ketebalan dari Material Palem/Epoxy terhadap <i>Safety factor</i> pada pengujian <i>midstance</i>	84
Gambar 4. 31 Hasil pengujian <i>running blade prosthetic</i> menggunakan material palem/epoxy dengan kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ terhadap tegangan maksimum Von-Misses pada pengujian <i>forefoot</i>	85
Gambar 4. 32 Grafik hasil pengujian <i>running blade prosthetic</i> menggunakan material palem/epoxy dengan kombinasi sudut serat terhadap Von-Misses <i>stress</i> pada pengujian <i>forefoot</i>	85
Gambar 4. 33 Hasil pengujian <i>running blade prosthetic</i> menggunakan material komposit palem/epoxy dengan kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ terhadap <i>Deformasi</i> pada pengujian <i>forefoot</i>	86

Gambar 4. 34 Grafik hasil pengujian <i>running blade prosthetic</i> menggunakan material komposit palem/epoxy dengan kombinasi sudut serat terhadap <i>Deformasi</i> pada pengujian <i>forefoot</i>	87
Gambar 4. 35 Hasil pengujian <i>running blade prosthetic</i> menggunakan material komposit palem/epoxy dengan kombinasi sudut serat terhadap nilai <i>safety factor</i> pada pengujian <i>forefoot</i>	88
Gambar 4. 36 Hasil pengujian <i>running blade prosthetic</i> material komposit palem/epoxy dengan kombinasi sudut serat terhadap <i>safety factor</i> setiap variasi pada pengujian <i>forefoot</i>	88
Gambar 4. 37 Hasil pengujian <i>running blade prosthetic</i> menggunakan material komposit palem/epoxy dengan kombinasi sudut $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_5$ dan ketebalan 9 mm pada pengujian <i>forefoot</i> terhadap: (a) tegangan maksimum Von-Misses, (b) total deformasi, (c) <i>safety factor</i>	90
Gambar 4. 38 Hasil Simulasi Variasi Ketebalan dari Material palem/epoxy terhadap tegangan maksimum Von-Misses.....	91
Gambar 4. 39 Hasil Simulasi variasi ketebalan dari material komposit palem/epoxy terhadap <i>Deformasi</i>	92
Gambar 4. 40 Hasil simulasi variasi ketebalan dari material komposit palem/epoxy terhadap <i>Safety factor</i>	93
Gambar 4. 41 Grafik Perbandingan antara Pembebanan 2065 N dan 2240 N menggunakan material Sisal/Epoxy pada ketebalan 35 mm terhadap tegangan Von-Misses <i>stress</i>	94
Gambar 4. 42 Grafik Perbandingan antara Pembebanan 2065 N dan 2240 N menggunakan material Sisal/Epoxy pada ketebalan 35 mm terhadap Deformasi	95
Gambar 4. 43 Grafik Perbandingan antara Pembebanan 2065 N dan 2240 N menggunakan material Sisal/Epoxy pada ketebalan 35 mm terhadap <i>Safety factor</i>	96
Gambar 4. 44 Grafik Perbandingan antara Pembebanan 2065 N dan 2240 N menggunakan material Palem/Epoxy pada ketebalan 35 mm terhadap tegangan Von-Misses <i>stress</i>	97
Gambar 4. 45 Grafik Perbandingan antara Pembebanan 2065 N dan 2240 N menggunakan material Palem/Epoxy pada ketebalan 35 mm terhadap Deformasi	98
Gambar 4. 46 Grafik Perbandingan antara Pembebanan 2065 N dan 2240 N menggunakan material Palem/Epoxy pada ketebalan 35 mm terhadap <i>Safety factor</i>	99
Gambar 4. 47 Grafik Perbandingan antara Pembebanan 2065 N dan 2240 N menggunakan material Sisal/Epoxy pada ketebalan 40 mm terhadap tegangan Von-Misses <i>stress</i>	100
Gambar 4. 48 Grafik Perbandingan antara Pembebanan 2065 N dan 2240 N menggunakan material Sisal/Epoxy pada ketebalan 40 mm terhadap Deformasi	101
Gambar 4. 49 Grafik Perbandingan antara Pembebanan 2065 N dan 2240 N menggunakan material Sisal/Epoxy pada ketebalan 40 mm terhadap <i>Safety factor</i>	102
Gambar 4. 50 Grafik Perbandingan antara Pembebanan 2065 N dan 2240 N menggunakan material Palem/Epoxy pada ketebalan 40 mm terhadap tegangan Von-Misses <i>stress</i>	103
Gambar 4. 51 Grafik Perbandingan antara Pembebanan 2065 N dan 2240 N menggunakan material Palem/Epoxy pada ketebalan 40 mm terhadap Deformasi	104
Gambar 4. 52 Grafik Perbandingan antara Pembebanan 2065 N dan 2240 N menggunakan material Palem/Epoxy pada ketebalan 40 mm terhadap <i>Safety factor</i>	105
Gambar 4. 53 Grafik Perbandingan Tegangan Von-Misses antara Material Sisal/Epoxy dengan Material Palem/Epoxy menggunakan kombinasi sudut $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_{20}$	106
Gambar 4. 54 Grafik Perbandingan Deformasi antara Material Sisal/Epoxy dengan Material Palem/Epoxy menggunakan kombinasi sudut $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_{20}$	107
Gambar 4. 55 Grafik Perbandingan <i>Safety factor</i> antara Material Sisal/Epoxy dengan Material Palem/Epoxy menggunakan kombinasi sudut $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_{20}$	108

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 <i>Material Properties</i> Serat Sisal	9
Tabel 2. 2 <i>Mechanical Properties</i> Serat Palem	10
Tabel 2. 3 <i>Material Properties</i> Resin Epoxy.....	11
Tabel 2. 4 Test forces of all separate tests on ankle-foot units and prescribed number of cycles of the cyclic test, for test loading level P5, P4 and P3	13
Tabel 2. 5 Variasi sudut serat pada Pengujian Bending (Parmiggiani et al., n.d.)	24
Tabel 2. 6 Hasil pengujian bending berdasarkan arah orientasi sudut serat (Parmiggiani et al., n.d.).....	24
Tabel 2. 7 Sifat mekanik dari serat sisal (Kusumastuti et al., 2009)	25
Tabel 2. 8 Sifat mekanik serat sisal dengan <i>treatment</i> dan tanpa <i>treatment</i> (Kusumastuti et al., 2009).....	26
Tabel 3. 1 Data <i>Material Properties</i> Sisal <i>Single Fiber</i> (Kusumastuti et al., 2009)	32
Tabel 3. 2 Data <i>Material Properties</i> Palem <i>Single Fiber</i>	32
Tabel 3. 3 <i>Material Properties</i> Resin Epoxy (Daniel & Ishai, 2006)	32
Tabel 3. 4 Tabel Variasi Penyusunan Orientasi Sudut	33
Tabel 3. 5 Variasi Ketebalan Desain <i>Running Blade Prosthetic</i>	35
Tabel 3. 6 Hasil Uji Konvergensi Simulasi	36
Tabel 3. 7 Data <i>Material Properties</i> Sisal/Epoxy	39
Tabel 3. 8 Data <i>Material Properties</i> Palem/Epoxy	39
Tabel 3. 9 Perbandingan Nilai Elastic Properties Perhitungan ROM dengan Hasil Material Designer.....	47
Tabel 3. 10 <i>Material Properties</i> dari Sisal/Green Epoxy (Zuccarello et al., 2021)	48
Tabel 3. 11 Perbandingan Hasil Simulasi dengan penelitian terdahulu pada pengujian <i>midstance</i>	56
Tabel 3. 12 Perbandingan Hasil simulasi dengan penelitian terdahulu pada pengujian <i>forefoot</i>	56
Tabel 4. 1 Hasil Data Kumulatif Simulasi Pengujian <i>Midstance</i> Material Sisal/Epoxy	62
Tabel 4. 2 Hasil pengujian <i>running blade prosthetic</i> menggunakan material komposit sisal/epoxy dengan kombinasi sudut $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_{20}$ terhadap variasi ketebalan, dengan nilai tegangan maksimum Von-Misses <i>stress</i> , deformasi, dan <i>safety factor</i> yang dihasilkan.....	64
Tabel 4. 3 Hasil Data Kumulatif Simulasi Pengujian <i>Forefoot</i> Material Sisal/Epoxy.....	71
Tabel 4. 4 Hasil pengujian <i>running blade prosthetic</i> menggunakan material komposit sisal/epoxy dengan kombinasi sudut $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_5$ pada pengujian <i>forefoot</i> terhadap variasi ketebalan, dengan nilai tegangan maksimum Von-Misses, deformasi, dan <i>safety factor</i> yang dihasilkan.....	72
Tabel 4. 5 Hasil Data Kumulatif Simulasi Pengujian <i>Midstance</i> Material Palem/Epoxy	80
Tabel 4. 6 Hasil pengujian <i>running blade prosthetic</i> menggunakan material komposit palem/epoxy dengan kombinasi sudut $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_{20}$ terhadap variasi ketebalan, dengan nilai tegangan maksimum Von-Misses <i>stress</i> , deformasi, dan <i>safety factor</i> yang dihasilkan.....	82
Tabel 4. 7 Hasil Data Kumulatif Simulasi Pengujian <i>Forefoot</i> Material Palem/Epoxy.....	89
Tabel 4. 8 Hasil pengujian <i>running blade prosthetic</i> menggunakan material komposit palem/epoxy dengan kombinasi sudut $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_5$ pada pengujian <i>forefoot</i> terhadap variasi ketebalan, dengan nilai tegangan maksimum Von-Misses, total deformasi, dan <i>safety factor</i> yang dihasilkan.....	91

Tabel 4. 9 Perbandingan Material yang digunakan berdasarkan pengujian *midstance* dan *forefoot* terhadap tegangan Von-Misses, total deformasi, dan *safety factor*..... 106

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penyandang disabilitas merupakan bagian dari masyarakat yang memiliki hak dan kedudukan yang setara dengan masyarakat lainnya. Disabilitas merupakan suatu ketidakmampuan tubuh dalam melakukan suatu aktivitas atau kegiatan tertentu sebagaimana manusia normal. Dengan demikian, penyandang disabilitas kerap mengalami stigma sosial oleh masyarakat yang dimana hal ini mengakibatkan para penyandang disabilitas memiliki keterbatasan dan kesulitan dalam mengakses pekerjaan formal. Berdasarkan data Survei Sosial-Ekonomi Nasional (SUSENAS) pada tahun 2019, jumlah penyandang disabilitas di Indonesia mencapai 26 juta orang atau sebesar 9,7% dari jumlah penduduk di Indonesia. Salah satu upaya dalam membantu penyandang disabilitas adalah membuat sebuah teknologi yang mampu mempermudah penyandang disabilitas melakukan berbagai aktifitas.

Prostetik adalah sebuah teknologi di bidang alat bantu buatan yang berbentuk bagian tubuh untuk menggantikan bagian tubuh yang hilang akibat diamputasi karena penyakit atau kecacatan dari lahir. Saat ini ada banyak jenis prostetik bawah lutut yang dikembangkan oleh berbagai ilmuwan atau perusahaan.

Namun, sebagian besar produk yang dihasilkan hanya terbatas pada berjalan. Perkembangan teknologi material, desain, dan manufaktur yang menyebabkan kaki palsu tidak hanya diperlukan untuk digunakan berjalan tetapi juga dapat digunakan untuk berlari dan kegiatan lainnya (Rifky Ismail, 2020). Salah satu jenis prostetik tersebut adalah *running blade prosthetic*. Jenis prostetik ini memiliki manfaat bagi para difabel kaki agar dapat membantu keterbatasan seseorang dalam melakukan berbagai aktivitas seperti berolahraga. Untuk itu diciptakan *running blade prosthetic* yang kuat agar dapat menopang berat tubuh dan membantu mobilitas mereka dalam berlari pada saat berolahraga. *Running blade prosthetic* yang dapat berfungsi dengan baik adalah *running blade prosthetic* yang mampu menopang berat tubuh seseorang ketika sedang berlari. Adapun material yang dibutuhkan agar mendapatkan *running blade prosthetic* yang kuat. Salah satu pemilihan material yang tepat dalam membuat desain ini adalah menggunakan material komposit.

Komposit merupakan material yang terdiri dari dua fase atau lebih pada skala makroskopik, yang kinerjanya dan sifat mekaniknya dirancang untuk lebih unggul (Isaac M. Daniel dan Ori Ishai, 2006). Maka dari itu selain kuat, model prostetik yang menggunakan material komposit pun memiliki berat yang cukup ringan. Material komposit sangat dipengaruhi oleh sifat dan distribusi dari material penyusun, selain itu interaksi bahan penyusun sangat mempengaruhi sifat dari material komposit. Parameter lain yang mempengaruhi sifat dari material komposit adalah bentuk, ukuran, orientasi, dan distribusi dari penguat, dan berbagai ciri-ciri dari matriks. Pada era teknologi industri seperti sekarang ini, perkembangan teknologi komposit juga berkembang pesat. Riset dunia tidak hanya berfokus pada pengembangan teknologi komposit sintetis, tapi komposit berbasis komposit alam memiliki potensi besar untuk dikembangkan (Willy Artha Wirawan et al, 2017). Hal ini pun didukung oleh jumlah sumber daya alam yang melimpah pada lingkungan negara kita. tapi juga memiliki kiblat baru yaitu komposit alam dikarenakan sifat istimewanya yaitu dapat di daur ulang atau dalam istilah modern yaitu terbarukan. Pengembangan komposit alam berpotensi menjadi 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). Berbagai macam serat alam yang dapat dimanfaatkan, salah satunya adalah serat pada tanaman sisal dan palem.

Sisal merupakan tanaman yang tumbuh di daerah yang beriklim kering. Tanaman sisal memiliki nama latin *Agave Sisalana*. Tanaman sisal pada umumnya tumbuh pada daerah tropis seperti Brazil, Kenya, Tanzania, Madagaskar dan Indonesia. Sisal dibudidayakan di banyak daerah di Indonesia seperti di daerah Madura, Malang, Jember dan Sumbawa (Kusumastuti, 2009). Sama halnya dengan tanaman palem, tanaman palem adalah tanaman yang mampu hidup di berbagai karakteristik tanah, mulai dari yang subur sampai tanah yang gersang. Berbeda dengan tanaman lain yang hanya ditemukan di daerah tropis, tanaman palem ini mampu ditemukan dan juga tersebar luas di daerah tropis maupun sub tropis, wilayah dengan dataran tinggi maupun dataran rendah sekaligus. Dengan banyaknya jumlah tanaman sisal dan tanaman palem dinegara kita, tanaman tersebut sangat berpotensi untuk dikembangkan. Oleh karena itu, dilakukan penelitian untuk memperoleh *running blade prosthetic* yang lebih kuat berdasarkan arah orientasi serat dan ketebalan pada material komposit dari serat sisal dan serat palem dengan matriks resin epoxy menggunakan metode elemen hingga.

1.2 Rumusan Masalah

Berikut rumusan masalah dari penelitian yang akan dilakukan:

1. Bagaimana mengetahui dan menganalisa efek variasi orientasi sudut serat sisal/epoxy dan palem/epoxy terhadap kekuatan dari *running blade prosthetic*?
2. Bagaimana mengetahui dan menganalisa efek variasi ketebalan komposit terhadap kekuatan dari *running blade prosthetic*?
3. Bagaimana mengetahui dan menganalisa perbedaan kekuatan *running blade prosthetic* menggunakan material komposit sisal/epoxy dengan material komposit palem/epoxy?

1.3 Tujuan Penelitian

Berikut tujuan penelitian yang akan dicapai pada penelitian ini yaitu:

1. Mengetahui dan menganalisa efek variasi orientasi sudut serat sisal/epoxy dan palem/epoxy terhadap kekuatan statik dari *running blade prosthetic*.
2. Mengetahui dan menganalisa efek variasi ketebalan komposit terhadap kekuatan statik dari *running blade prosthetic*.
3. Mengetahui dan menganalisa perbedaan kekuatan *running blade prosthetic* menggunakan material komposit sisal/epoxy dengan material komposit palem/epoxy.

1.4 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini terdapat Batasan masalah yang perlu diperhatikan, yaitu:

1. Penelitian ini dilakukan secara simulasi menggunakan *software ANSYS Workbench 2021 R1*.
2. Material komposit yang digunakan pada *running blade prosthetic* adalah serat sisal dan serat palem sebagai *reinforcement* dan *resin epoxy* sebagai *matrix*.
3. *Data properties* material serat didapat melalui jurnal penelitian yang sudah ada.
4. *Data properties* material komposit didapat melalui analisis dari *tools Material Designer ANSYS*.
5. Standar pengujian yang dilakukan mengacu pada standar ISO 10328
6. Variasi arah serat pada penelitian ini berupa $[0^\circ]$, $[0^\circ/90^\circ]$, $[45^\circ/-45^\circ]$, $[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]$, dan $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ]$.
7. Fraksi volume antara serat sisal dan matriks adalah 40%.
8. Fraksi volume antara serat palem dan matriks adalah 30%

1.5 Manfaat Penelitian

Terdapat beberapa manfaat pada penelitian *running blade prosthetic* ini, yaitu:

1. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi pertimbangan dalam pemilihan material komposit sebagai material alternatif dalam industri teknologi.
2. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi agar dapat dioptimisasikan oleh penelitian selanjutnya.
3. Penelitian ini diharapkan dapat dijadikan referensi untuk perancangan *running blade prosthetic* dengan metode variasi penelitian yang lebih efektif.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II DASAR TEORI

2.1 Komposit

Struktur komposit adalah sistem material yang terdiri atas dua atau lebih fase pada skala makroskopik, dimana dalam struktur komposit ini diinginkan memiliki sifat mekanik yang sengaja dirancang lebih unggul dengan menggunakan bahan-bahan penyusun yang bertindak secara independen. Salah satu fase biasanya terputus-putus, lebih kaku, dan lebih kuat dan disebut penguat (*reinforcement*), sedangkan yang kurang kaku dan fase yang lebih lemah itu disebut dengan matriks. Kadang-kadang, akibat dari interaksi kimia atau efek pemrosesan lainnya terdapat *interface* antara *reinforcement* dan matriks. Sebenarnya sifat material komposit bergantung pada sifat-sifat konstituen, geometri, dan distribusi fase. Parameter yang paling penting adalah volume fraksi *reinforcement* atau rasio volume serat. Distribusi penguat (*reinforcement*) menentukan homogenitas atau keseragaman dari sistem material. Semakin tidak seragamnya distribusi dari *reinforcement* maka semakin heterogen suatu material, dan semakin tinggi sifat hamburan dan kemungkinan kegagalan di daerah terlemah.

Geometri dan orientasi *reinforcement* akan mempengaruhi anisotropi sistem. Fase dari sistem komposit memainkan peranan yang berbeda, dimana hal ini bergantung pada jenis dan aplikasi material komposit. Dalam kasus kekuatan komposit material dari rendah ke medium, penguat biasanya dalam bentuk serat pendek atau partikel dapat memberikan beberapa kekakuan tetapi hanya penguatan material yang terbatas. Di sisi lain, matriks adalah konstituen bantalan beban utama yang mengatur sifat mekanik dari bahan. Dalam kasus struktural komposit dengan ketahanan tinggi, penguat serat yang biasanya kontinu adalah tulang punggung dari material, hal itu yang akan menentukan kekakuannya dan kekuatan dalam arah serat. Untuk fase matriks memiliki peran sebagai pelindung *reinforcement* dan memindahkan tegangan dari *reinforcement* yang satu ke *reinforcement* yang lainnya. Untuk fase *interface*, memiliki ukuran yang kecil namun memiliki peranan yaitu mampu untuk mengendalikan kegagalan, *fracture toughness*, dan perilaku *stress-strain* secara keseluruhan untuk kegagalan material (Daniel, 2006).

2.1.1 Klasifikasi Material Komposit

Material komposit bisa diklasifikasikan berdasarkan cara pembuatannya yang dibedakan menjadi menjadi tiga jenis seperti *synthetic fiber composite*, *natural fiber composite*, dan *hybrid composite*.

2.1.1.1 Synthetic Fiber Composite

Synthetic Fiber Composite merupakan serat yang berasal dari olahan manusia. Pembuatan serat sintetis umumnya berasal dari dua bahan kimia yang diolah menjadi suatu material serat komposit. Serat sintetis saat ini banyak digunakan untuk keperluan komersil seperti benang, kain, dan sebagainya. Kelebihan dari serat sintetis ini adalah sifat dan ukuran serat sintetis yang cenderung seragam, bahan dasar pembuatannya cenderung lebih mudah ditemukan dan harganya cenderung lebih murah bila dibandingkan dengan serat alami. Namun, untuk kekurangan serat sintetis sendiri adalah sebagian besar serat sintetis tidak mudah terurai, sehingga tidak ramah untuk lingkungan.

2.1.1.2 Natural Fiber Composite

Natural fiber composite adalah jenis serat yang dapat diperoleh dari alam seperti tumbuhan, hewan, maupun mineral yang berada di alam. Contoh tanaman yang sering

digunakan sebagai serat komposit sendiri adalah pohon kelapa, pohon pisang, dan pohon lainnya yang batangnya memiliki serat. Salah satu jenis serat alam yaitu serat dari tumbuhan memiliki komposisi utama yaitu selulosa, hemiselulosa, pektin, dan liktin. Persentase komposisi kimia dari masing-masing kandungan tersebut berbeda-beda dari tiap jenis serat. Perbedaan ini dipengaruhi oleh kondisi tumbuh dan panen (Faruk et al., 2012). Kelebihan dari serat alami ini adalah seratnya lebih ringan, dapat didaur ulang, berisiko rendah terhadap kesehatan, memiliki sifat *biodegradable* dan ketersediaannya cukup berlimpah di beberapa daerah. Selain ramah lingkungan, serat alam juga memiliki sifat non-abrasif baik terhadap kulit maupun terhadap alat-alat permesinan, sehingga relative lebih aman dibandingkan serat sintesis. Kekurangan dari serat alami sendiri ialah kualitas dari serat yang bergantung pada alam di sekitarnya, biasanya tidak cukup kuat untuk menahan perbedaan *temperature* tinggi, dan dikarenakan kandungan kimia pada serat tersebut mengakibatkan kemampuan untuk merekatnya cukup rendah. (Klemens, 2009)

2.1.1.3 Hybrid Composite

Komposit *Hybrid* adalah komposit yang diperkuat dengan beberapa gabungan serat sintesis maupun serat alami. Komposit *Hybrid* umumnya digunakan untuk meminimalisir kekurangan dari sifat kedua serat dan menggabungkannya agar menciptakan sifat material yang lebih baik lagi. (Daniel, 2006)

2.2 Faktor Yang Mempengaruhi Performa Komposit

Material komposit sangat dipengaruhi oleh sifat dan distribusi dari material penyusun, selain itu interaksi dari kedua bahan (*reinforcement* dan matriks) sangat mempengaruhi sifat dari material komposit. Parameter lain yang mempengaruhi sifat dari material komposit adalah bentuk, ukuran, orientasi, dan distribusi dari penguat, dan sebagai ciri-ciri dari matriks (Mukmin, 2019)

2.2.1 Jenis Serat

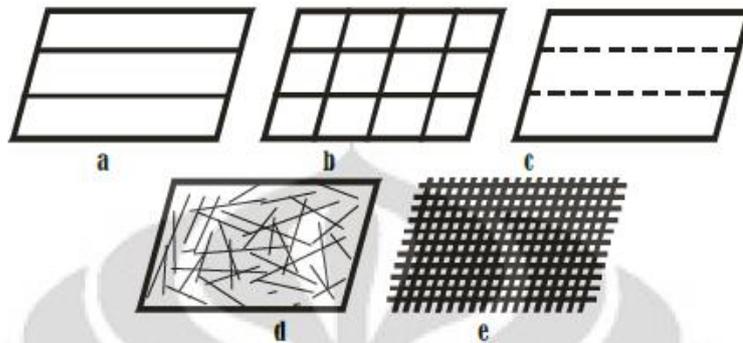
Jenis serat dibedakan menjadi dua yaitu serat kontinu dan tidak kontinu, menurut fungsi teoritis serat yang memiliki sifat kontinu memiliki kekuatan yang lebih baik jika dibandingkan dengan serat yang tidak kontinu (**Widjayarto, 2007**). Namun hal ini menjadi kendala ketika diterapkan pada metode eksperimen karena adanya faktor manufaktur yaitu terjadinya ketimpangan pembebanan di satu titik serat saja. Sehingga apabila komposit diberikan pembebanan mendekati beban maksimumnya, sebagian serat akan mengalami patah terlebih dahulu.

2.2.2 Orientasi Serat

Jarang sekali serat dalam laminasi komposit dapat disejajarkan dengan sempurna. Ketidaksejajaran serat menyebabkan hilangnya sifat mekanik secara dramatis, terutama dalam kompresi, karena peningkatan kemungkinan tekuk. Penting untuk memastikan keselarasan serat yang akurat selama pembuatan komponen secara efisien. Keselarasan pada serat juga dapat memaksimalkan keuntungan dari penggunaan material komposit.

Komposit lembaran (*laminated composite*) merupakan material yang terusun dari lapisan yang terikat satu sama lain. Setiap lapisan terdiri atas serat yang terendam dalam matriks. Apabila serat yang digunakan untuk membuat satu lamina, serat tersebut merupakan jenis serat panjang (*continuous fiber*), maka serat tersebut akan diorientasikan pada satu arah (*unidirectional orientation*) Gambar 2.3 (a) atau pada dua arah (*bidirectional orientation*) Gambar 2.3 (b). Lapisan juga dapat dikonstruksikan dengan menggunakan serat pendek yaitu *discontinuous fiber* baik secara searah Gambar 2.3 (c) maupun secara acak Gambar 2.3 (d).

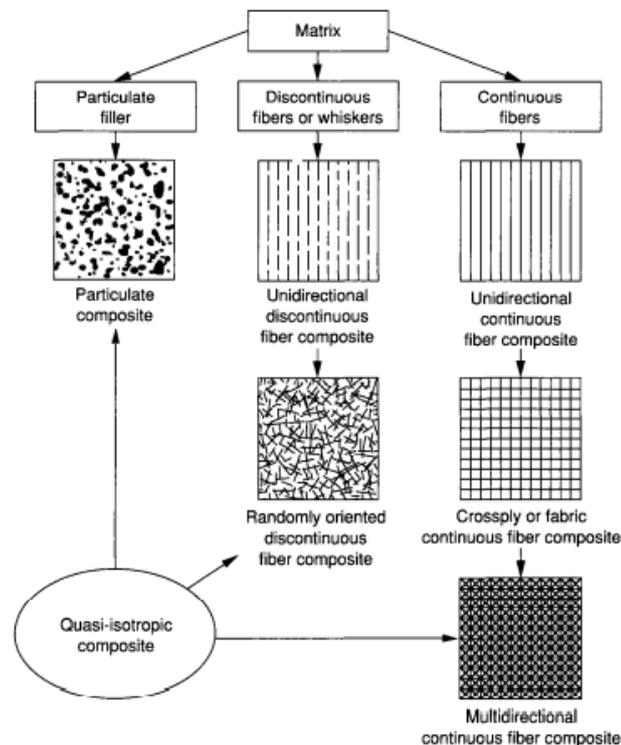
Beberapa lapisan ditumpuk satu sama lain untuk memperoleh ketebalan tertentu akan membentuk lembaran, dimana variasi lapisan dalam lembaran dapat terdiri dari serat searah maupun berbeda arah Gambar 2.3 (e)



Gambar 2. 1 Jenis Orientasi Serat Pada Komposit (Klemens, 2009)

2.2.3 Komposisi Serat dan Bentuk Penguat

Semakin banyak komposisi serat penguat maka material komposit juga akan semakin kuat, akan tetapi material komposit akan cenderung bersifat getas. Namun pada kondisi yang lain komposisi serat penguat yang sedikit akan menyebabkan material bersifat lebih ulet dengan sifat mekanis yang cenderung lemah. Selain itu, bentuk penguat juga akan mempengaruhi kekuatan material komposit. Berdasarkan bentuk penguat yang digunakan, komposit dapat dibedakan menjadi *particulate composites*, *discontinuous composites*, dan *continuous-fiber composites*.



Gambar 2. 2 Bentuk Penguat Komposit (Ishai & Daniel, 2006)

2.2.4 Fraksi Volume Serat

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 tertentu dari bahan komposit bisa dihitung melalui *Rule of Mixtures* 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 (lb), untuk subskrip c,m,r menunjukkan massa dari komposit, matriks, dan penguat. Kemudian, volume komposit adalah jumlah dari material penyusunnya:

$$V_c = V_m + V_r + V_v$$

Dimana,

V = volume (cm³), untuk subskrip c, m, r, dan v menunjukkan volume dari komposit, matriks, penguat, dan void (rongga).

Kemudian terdapat hubungan massa dan volume dari komposit yaitu massa jenis komposit, yang mana massa jenis komposit adalah massa dibagi volume:

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

Massa matriks dan penguat merupakan massa jenis masing-masing yang dikalikan dengan volumenya, yaitu:

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

Apabila persamaan di atas dihubungkan dengan persamaan massa jenis komposit, maka persamaannya menjadi:

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

Dimana,

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

f_m dan f_r merupakan fraksi volume untuk matriks dan penguat komposit.

2.2.5 Faktor Matriks

Matriks merupakan material yang akan mengisi dan mengikat material penguat, sehingga matriks akan berperan sebagai serat *adhesive* yang baik agar menghasilkan struktur komposit yang sempurna. Kegunaan dari matriks adalah mendistribusikan beban yang terjadi pada material komposit ke serat yang memiliki kekuatan tinggi dan matriks sebagai pelindung permukaan serat penguat dari gesekan antar serat.

2.3 Serat Sisal



Gambar 2. 3 Tanaman Sisal

Sisal merupakan tanaman yang tumbuh di daerah yang beriklim kering. Tanaman sisal memiliki nama latin *Agave Sisalana*. Tanaman sisal pada umumnya tumbuh pada daerah tropis seperti Brazil, Kenya, Tanzania, Madagaskar dan Indonesia. Sisal dibudidayakan di banyak daerah di Indonesia seperti di daerah Madura, Malang, Jember dan Sumbawa (Kusumastuti, 2009). Tanaman sisal hanya dapat tumbuh pada daerah yang terpapar matahari dengan temperatur maksimum 27-28°C dan tanah berpasir. Sisal memiliki karakteristik tanaman yang memiliki daun menyatu dengan batangnya sehingga tanaman sisal ini memiliki kekuatan serat yang baik. Pemanfaatan serat sisal sudah menjamur di berbagai bidang seperti bidang industri, bidang kelautan, bidang pertanian, bidang kerajinan bahkan bidang keamanan. Serat sisal dapat diaplikasikan menjadi rompi anti peluru dikarenakan memiliki sifat mekanik yang kuat terutama untuk serat alami.

Tabel 2. 1 *Material Properties* Serat Sisal

Properties		Referensi
Density (g/cm ³)	1,45	(Gupta & Srivastava, 2014)
Tensile Strength (MPa)	450	(Kusumastuti, 2009)
Young Modulus (GPa)	7	(Kusumastuti, 2009)
Poisson's Ratio	0,44	(Sinitsky, 2022)
Shear Modulus (GPa)	2,5	ANSYS

Penggunaan serat sisal tentunya dapat menjadi opsi pengganti material yang tidak ramah lingkungan dikarenakan sifat mekaniknya yang kuat dan tentunya keberadaan serat sisal sangatlah melimpah.

2.4 Serat Palem



Gambar 2. 4 Pohon *Palem*

Tanaman Palem adalah tanaman yang mampu hidup di berbagai karakteristik tanah, mulai dari yang subur sampai tanah yang gersang. Berbeda dengan tanaman lain yang hanya ditemukan di daerah tropis, tanaman palem ini mampu ditemukan dan juga tersebar luas di daerah tropis maupun sub tropis, wilayah dengan dataran tinggi maupun dataran rendah sekaligus. Tanaman ini sendiri tersebar luas bukan hanya karena kemampuannya namun juga dikarenakan kemudahannya dalam perawatannya, sehingga tanaman ini cukup sering digunakan sebagai tanaman hias dan juga sebagai tanaman peneduh jalan yang memang disengaja ditanaman untuk meneduhkan jalan. Tanaman palem sendiri saat ini pemafaatannya hanya sebatas sebagai tanaman hias dan tanaman peneduh jalan. Seharusnya dengan banyaknya tanaman palem, tanaman ini dapat memiliki manfaat lain. Oleh sebab itu peneliti akan melanjutkan penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya, dimana pada penelitian tersebut dilakukan eksperimen guna mengetahui *mechanical properties* dari serat palem yang dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 *Mechanical Properties* Serat Palem

Properties Palem	
Diameter (μm)	100
Young Modulus (MPa)	23424
Poisson's Ratio	0,35
Ultimate Tensile Strength (MPa)	487,78

2.5 Matriks Resin Epoxy

Matriks merupakan salah satu material penyusun komposit. Matriks memiliki fungsi yaitu sebagai pelindung dari serat dan bertugas untuk memindahkan tegangan local dari satu serat ke serat yang lainnya. Jenis matriks polimer ialah jenis matriks yang paling sering digunakan untuk menyusun komposit pada saat ini. *Polymer-matrix* merupakan salah satu jenis matriks yang memiliki sifat *thermoset* dan *thermoplastic* dimana dari kedua sifat ini matriks yang digunakan hanya dapat bertahan pada suhu yang rendah (M.Daniel & Ishai, 2006). Contoh matriks yang

memiliki sifat *thermoplastic* adalah *polysulfone* sedangkan contoh dari matriks yang memiliki sifat *thermoset* adalah *polyimide*, *polyester*, dan *epoxy*.

Tabel 2. 3 *Material Properties Resin Epoxy*

Properties		Referensi
Density (g/cm ³)	1,16	ANSYS
Tensile Strength (MPa)	80	(M.Daniel & Ishai, 2006)
Young Modulus (GPa)	3,4	(M.Daniel & Ishai, 2006)
Poisson's Ratio	0,36	(M.Daniel & Ishai, 2006)
Shear Modulus (GPa)	1,25	Perhitungan ANSYS

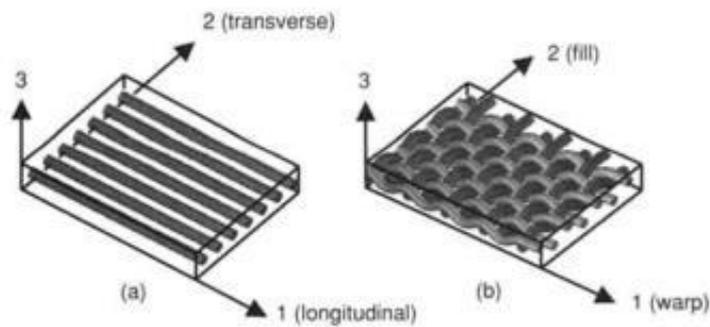
Epoxy resin, pada beberapa aplikasi digunakan untuk pengecoran, pelapisan, dan perlindungan bagian dari instalasi listrik. Resin yang sudah diawetkan memiliki sifat daya tahan kimia dan stabilitas dimensi yang baik, daya lekat pada material yang berbahan kaca dan logam yang baik juga dapat digunakan untuk membuat panel sirkuit cetak, tangki, dan cetakan. Sifat dari epoxy resin yaitu tahan aus dan kejut, hal ini banyak digunakan untuk membuat cetakan tekan untuk membentuk logam. Kekurangan dari epoxy resin yaitu sifatnya getas sehingga mudah retak dan patah, tidak terlalu ulet, dan biaya pembuatannya agak mahal bila dibandingkan dengan matriks polimer yang lainnya. (Salam, 2007)

2.6 Laminasi



Gambar 2. 5 Laminated Composites (Jones, 1999)

Laminasi adalah tumpukan lamina yang terdiri dari dua lamina atau lebih dan ditumpuk secara bersama. Tumpukan lamina yang searah diilustrasikan dengan berbagai orientasi pada gambar 2.4. Orientasi serat lapisan tidak selalu simetris dengan permukaan tengah laminasi. Lamina individu merupakan lapisan laminasi yang terikat bersama oleh bahan matriks yang sama pula. Dapat dikatakan bahwa permukaan lamina dilapisi oleh beberapa bahan matriks dan dapat digunakan untuk mengikat lamina yang saling berdekatan, serta laminasi dapat terdiri dari pelat bahan yang berbeda atau lapisan lamina yang diperkuat serat.



Gambar 2. 6 Lamina dan Sumbu Koordinat (Ishai & Daniel, 2006)

Lamina memiliki berbagai ketebalan dan terdiri dari bahan yang berbeda. Laminasi menggunakan sistem atau koordinat tetap umum (x,y,z) agar mudah untuk dianalisis dengan sistem koordinat material yang bervariasi. Orientasi ply yang diberikan oleh sudut antara referensi sumbu x dan sumbu material utama dari ply yang diukur dalam arah jarum jam yang berlawanan x-y. Laminasi memiliki tujuan untuk menyesuaikan ketergantungan arah kekuatan dan kekakuan dari material komposit guna menyesuaikan dengan lingkungan pemuatan elemen struktural. Tujuan utama laminasi adalah untuk menyesuaikan ketergantungan arah kekuatan dan kekakuan bahan komposit agar sesuai dengan lingkungan pemuatan elemen struktural. Laminasi secara unik cocok untuk tujuan ini karena arah material utama dari setiap lapisan dapat berorientasi sesuai dengan kebutuhan.

2.7 *Running Blade Prosthetic*

Prostetik dikenal sebagai alat yang dikembangkan untuk mengganti anggota tubuh yang hilang, agar individu dapat kembali ke keadaan produktif di dalam struktur sosial. Saat ini ada banyak jenis prostetik bawah lutut yang dikembangkan oleh berbagai ilmuwan atau perusahaan. Namun, sebagian besar produk yang dihasilkan hanya terbatas pada berjalan. Perkembangan teknologi material, desain, dan manufaktur yang menyebabkan kaki palsu tidak hanya diperlukan untuk digunakan berjalan tetapi juga dapat digunakan untuk berlari dan kegiatan lainnya (Rifky Ismail et al, 2020). Salah satu jenis prostetik tersebut adalah *running blade prosthetic*. Jenis prostetik ini memiliki manfaat bagi para difabel kaki agar dapat membantu keterbatasan seseorang dalam melakukan aktivitas olahraga seperti berlari. *Running blade prosthetic* yang dapat berfungsi dengan baik adalah *running blade prosthetic* yang mampu menopang berat tubuh seseorang ketika sedang berlari.



Gambar 2. 7 Running Blade Prosthetic (Ainhua Murillo I, 2018)

2.7.1 Standarisasi Prostetik ISO 10328(2016)

Kompleksitas dari pembebanan pada kaki prostetik saat digunakan untuk membantu amputasi kaki tidak dapat disimulasikan dengan satu prosedur saja. Ada beberapa tes statik dan tes kekuatan terhadap siklus yang terbagi menjadi dua kategori yaitu "*Principal structural test*" dan "*Separate structural tests*". Masing-masing tes terdapat satu atau dua tes pembebanan yang berbeda.

Kondisi pembebanan pada "*Principal structural test*" dibagi menjadi dua kondisi. Pertama berhubungan dengan pembebanan maksimum sesaat yang terjadi di awal fase berdiri saat berjalan. Kedua, berhubungan dengan pembebanan maksimum sesaat yang terjadi di akhir fase berdiri saat berjalan.

Pada "*Separate structural test*" terdapat 4 kondisi tes. Masing-masing tes menguji pembebanan pada tes statik dalam torsi, pembebanan pada perangkat pergelangan kaki dan bagian kaki, pembebanan dengan tes ultimate strength di tekukan lutut maksimum pada knee joint, dan pembebanan pada kuncian lutut.

Pada pembebanan terdapat beberapa level, yaitu P3, P4, dan P5. P3 adalah level untuk berat badan kurang dari 60 kg, P4 untuk kurang dari 80 kg, dan P5 kurang dari 100 kg.

Tabel 2. 4 Test forces of all separate tests on ankle-foot units and prescribed number of cycles of the cyclic test, for test loading level P5, P4 and P3

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					

2.8 Rules of Mixtures

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

$$V = V_f + V_m + V_v$$

$$v_f = \frac{V_f}{V}$$

$$v_m = \frac{V_m}{V}$$

$$v_v = \frac{V_v}{V}$$

Dimana, V dan v merupakan volume dan volume fraksi dari elemen. *Subscript* f, m, dan v ditujukan untuk *fiber*, matriks, dan *void*. Dari kedua persamaan diatas, maka didapat :

$$v_f + v_m + v_v = 1$$

Saat proses penyatuan *fiber* dan matriks dianggap baik, maka *void* atau rongga kosong dapat diabaikan, sehingga persamaan dapat menjadi :

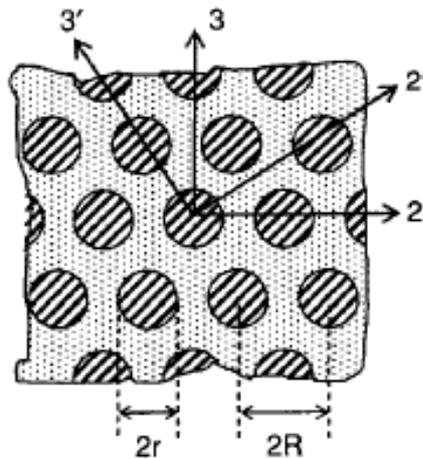
$$v_m = 1 - v_f$$

Sehingga didapatkan rumus untuk massa jenis komposit adalah :

$$\rho_c = v_f \rho_f + v_m \rho_m$$

2.9 Material Orthotropic Elasticity

Pada komposit dengan jenis *unidirectional* memiliki beberapa nilai dari *material properties*, nilai tersebut dibagi atas dua *properties*, yaitu *longitudinal properties* dan *transverse properties*. *Longitudinal properties* terbagi atas Young's modulus (E_1), Poisson's ratio (ν_{12} dan ν_{13}), dan *shear modulus* (G_{12} dan G_{13}). Kemudian, *Transverse properties* terbagi atas Young's modulus (E_2 dan E_3), Poisson's ratio (ν_{23}), dan *shear modulus* (G_{23}).



Hexagonal

Five independent constants

$$E_1, E_2 = E_3 = E_{2'} = E_{3'}$$

$$G_{12} = G_{13} = G_{12'} = G_{13'}$$

$$G_{23} = \frac{E_{23}}{2(1 + \nu_{23})}$$

$$\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{12'} = \nu_{13'}, \nu_{23}$$

Gambar 2. 8 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 :

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

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

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

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

$$\nu_{12} = V_f \nu_f + V_m \nu_m$$

$$\nu_{12} = \nu_{13}$$

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

2.10 Material Orthotropic Stress Limit

Orthotropic Stress Limit 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*.

2.10.1 Perhitungan Buku *Engineering Mechanics of Composite Materials*

Perhitungan didapatkan dari buku (M.Daniel & Ishai, 2006), persamaan untuk *longitudinal tensile strength* dibagi menjadi dua kondisi:

Jika $\varepsilon_m^u > \varepsilon_f^u$, maka persamaan tensile longitudinal X direction yaitu:

$$F_{1t} = F_{ft} \left(V_f + V_m \frac{E_m}{E_f} \right)$$

F_{1t} = longitudinal composite tensile strength

F_{ft} = longitudinal fiber tensile strength

V_m = Volume fraksi matriks

V_f = Volume fraksi fiber

E_m = Modulus elastisitas matriks

E_f = Modulus elastisitas fiber

Jika $\varepsilon_m^u < \varepsilon_f^u$, maka persamaan tensile longitudinal X direction yaitu:

$$F_{1t} = F_{mt} \left(V_f \frac{E_m}{E_f} + V_m \right)$$

F_{1t} = longitudinal composite tensile strength

F_{mt} = matrix tensile strength

V_m = Volume fraksi matriks

V_f = Volume fraksi fiber

E_m = Modulus elastisitas matriks

E_f = Modulus elastisitas fiber

Untuk mendapatkan nilai transverse strength dari komposit dilakukan perhitungan menggunakan persamaan yang didapatkan dari transverse strength composite adalah sebagai berikut:

$$F_{2t} = \frac{1 - v_m}{k_\sigma (1 + v_m)(1 - 2v_m)} (F_{mt} - \varepsilon_{rm} E_m)$$

Dimana, untuk mendapatkan nilai k_σ dengan menggunakan persamaan berikut:

$$k_\sigma = \frac{1 - V_f \left(1 - \frac{E_m}{E_f}\right)}{1 - \left(\frac{4V_f}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{E_m}{E_f}\right)}$$

Keterangan:

F_{2t} = Transverse tensile strength composite

F_{mt} = Matriks Tensile Strength

v_m = poisson ratio matriks

E_m = Modulus elastisitas matriks

ε_{rm} = strain residual strain
 k_{σ} = stress concentration factor

Guna mendapatkan nilai dari longitudinal compressive strength dari komposit dilakukan perhitungan menggunakan persamaan dari transverse strength composite seperti berikut ini:

$$F_{1c} = 2F_{fs} \left[V_f + (1 - V_f) \frac{E_m}{E_f} \right]$$

Keterangan:

F_{1c} = Longitudinal compressive strength composite

F_{fs} = Shear Strength fiber

Untuk menghitung nilai *transverse compressive strength* composite menggunakan persamaan berikut:

$$F_{2c} = \frac{F_{mc} + \sigma_{rm}}{k_{\sigma}}$$

Dengan nilai k_{σ} adalah sebagai berikut:

$$k_{\sigma} = \frac{1 - V_f \left(1 - \frac{E_m}{E_f}\right)}{1 - \left(\frac{4V_f}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{E_m}{E_f}\right)}$$

Keterangan:

F_{2c} = transverse compressive strength composite

F_{mc} = compressive strength of matrix

σ_{rm} = residual stress

k_{σ} = stress concentration factor

Untuk menghitung nilai *In-plane Shear Strength Composite* menggunakan persamaan berikut:

$$F_6 = \frac{F_{ms}}{k_{\tau}}$$

Dengan nilai k_{τ} adalah sebagai berikut:

$$k_{\tau} = \frac{1 - V_f \left(1 - \frac{G_m}{G_{12f}}\right)}{1 - \left(\frac{4V_f}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{G_m}{G_{12f}}\right)}$$

Keterangan:

F_6 = In plane Shear Strength of Composite

F_{ms} = shear strength of matrix

k_{τ} = shear stress concentration factor

G_m = shear modulus matriks

G_{12f} = In plane shear modulus fiber

2.10.2 Perhitungan Buku *Composite Structures: Design, Mechanics, Analysis, Manufacturing and Testing*

Perhitungan didapatkan dari buku (Kumar, 2017), persamaan untuk mendapatkan *longitudinal tensile strength* pada komposit dibagi atas dua kondisi yaitu kondisi ketika nilai $\varepsilon_m > \varepsilon_f$ dan kondisi ketika $\varepsilon_m < \varepsilon_f$. Berikut ini adalah perumusan yang digunakan:

Untuk nilai $\varepsilon_m > \varepsilon_f$

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

Untuk nilai $\varepsilon_m < \varepsilon_f$

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

Selanjutnya didapatkan persamaan untuk *tranverse tensile strength* pada komposit sebagai berikut:

$$(\sigma_{y_c}^T)_{ult} = (\sigma_m^T)_{ult} \left(1 - 2 \sqrt{\frac{V_f}{\pi}} \right)$$

Setelah itu untuk mendapatkan *longitudinal compressive strength* dan *transverse compressive strength* adalah sebagai berikut:

Untuk *longitudinal compressive strength*

$$(\sigma_{x_c}^c)_{ult} = 2(\tau_f)_{ult} \left[V_f + \frac{E_m}{E_{2_f}} (1 - V_f) \right]$$

Untuk *transverse compressive strength*

$$(\sigma_{y_c}^c)_{ult} = (\sigma_m^c)_{ult} \left(1 - 2 \sqrt{\frac{V_f}{\pi}} \right)$$

Kemudian untuk persamaan yang akan digunakan untuk mendapatkan *longitudinal shear strength* (*In-Plane Shear*) dan *transverse shear strength* (*Out-Plane Shear*) adalah sebagai berikut:

Untuk *longitudinal compressive strength*

$$(\tau_{xy_c})_{ult} = G_{12_c} \left[1 + \left(\frac{G_m}{G_{12_f}} - 1 \right) V_f \right] (Y_m)_{ult}$$

Untuk *transverse compressive strength*

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

2.11 Teori Kegagalan

Kegagalan komposit dengan konfigurasi lamina orthotropic dapat ditentukan dengan menggunakan berbagai macam teori kegagalan yang dimiliki untuk menentukan kegagalan materialnya. Terdapat berbagai macam teori kegagalan seperti Von-Misses *criterion*, Tsai-Hill, Tsai-Wu, dan sebagainya. Masing-masing teori kegagalan memiliki keunggulan yang bisa membantu untuk menyelesaikan suatu permasalahan perhitungan. Berdasarkan permasalahan yang ada, teori kegagalan Tsai-Wu cocok untuk penelitian yang belum memiliki data percobaan.

2.11.1 Von-Misses Criterion

Von-Misses *criterion* adalah teori kegagalan yang pada umumnya digunakan untuk material ulet atau *ductile*. Teori Von-Misses *criterion* ini digunakan untuk memperkirakan bahwa material akan gagal bila tegangan yang terjadi (σ') lebih besar dibandingkan dengan kekuatan luluh atau *yield strength* (S_y) dari sebuah material.

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

Kegagalan akan terjadi apabila

$$\sigma' \geq S_y$$

2.11.2 Tsai-Wu Failure Criterion

Kegagalan dalam laminasi *orthotropic* dapat ditentukan dengan menggunakan berbagai macam teori kegagalan yang dimiliki untuk menentukan kegagalan material *orthotropic*. Terdapat berbagai macam, salah satu contohnya adalah Tsai-Wu *Failure Criterion*. Teori kegagalan Tsai-Wu adalah teori kegagalan yang dapat memprediksi kekuatan dari material tanpa adanya data eksperimen yang dapat digunakan. Selain itu terdapat juga keunggulan yang dimiliki dalam penggunaan dari teori kegagalan Tsai-Wu, dimana teori ini operasionalnya sangat mudah dibaca untuk prosedur komputasi. Dimana untuk teori Tsai-Wu dapat ditentukan nilai faktor kegagalannya melalui rumus:

$$f_1\sigma_1 + f_2\sigma_2 + f_{11}\sigma_1^2 + f_{22}\sigma_2^2 + f_{66}\tau_6^2 + 2f_{12}\sigma_1\sigma_2 = 1$$

dengan f_{ij} adalah konstanta *strength tensor*:

$$f_1 = \frac{1}{F_{1t}} - \frac{1}{F_{1c}} \quad f_{11} = \frac{1}{F_{1t}F_{1c}} \quad f_2 = \frac{1}{F_{2t}} - \frac{1}{F_{2c}}$$

$$f_{22} = \frac{1}{F_{2t}F_{2c}} \quad f_{66} = \frac{1}{F_6^2} \quad f_{12} = -\frac{0.5}{\sqrt{f_{1t}f_{1c}f_{2t}f_{2c}}}$$

Dengan:

F_{1t} : longitudinal tensile strength

F_{1c} : longitudinal compressive strength

F_{2t} : transverse tensile strength

F_{2c} : transverse compressive strength

F_6^2 : ultimate transverse shear strength.

σ_1^T : material tensile strength laminasi sepanjang arah serat

σ_1^C : material compressive strength laminasi sepanjang arah serat

σ_2^T : material tensile strength laminasi melintang dari arah serat

σ_2^C : material compressive strength laminasi melintang dari arah serat

τ_{12}^F : shear stress laminasi

2.12 Safety factor

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

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

$$F. S. = \frac{\sigma_{fail}}{\sigma_{allow}}$$

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

yang diberikan ($\sigma_1, \sigma_2, \tau_6$), keadaan stres pada kegagalan adalah ($S_f\sigma_1, S_f\sigma_2, S_f\tau_6$). Substitusi tegangan kritis dalam kriteria Tsai-Wu dalam persamaan (2.41) mendapatkan (Daniel & Ishai, 2006).

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

Atau,

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

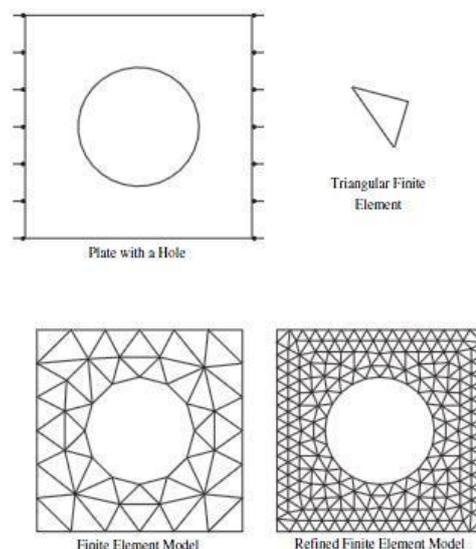
Dimana,

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

$$b = F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2$$

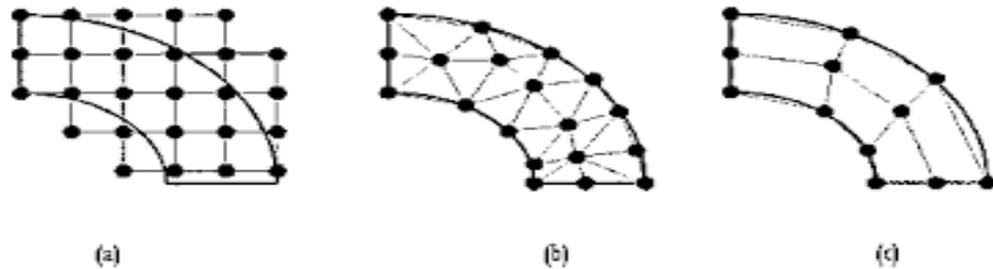
2.13 Metode Elemen Hingga (Finite Element Method)

Metode elemen hingga adalah metode yang digunakan untuk mendapatkan solusi permasalahan diferensial. Pada metode elemen hingga, seluruh masalah kompleks seperti geometri specimen, kondisi batas, kondisi beban dan sifat material. Cara kerja pada metode elemen hingga sendiri adalah dengan membagi problem yang kompleks menjadi bagian-bagian lebih kecil yang disebut dengan elemen. Sehingga dengan elemen tersebut dapat diselesaikan dengan persamaan yang lebih sederhana. Metode ini memiliki kelebihan dalam waktu pengerjaan yang lebih singkat dan dapat menyelesaikan masalah pada benda yang memiliki geometri kompleks dengan perhitungan yang mudah. Pada akhirnya, metode elemen hingga sendiri digunakan untuk memecahkan problem di seluruh bidang *engineering*.



Gambar 2. 9 Penggunaan Metode Elemen Hingga Pada Plat Dengan Lubang di Tengah (Fish et al., 2007)

Pada simulasi, metode mengubah suatu bidang pada bentuk semula menjadi potongan-potongan elemen yang lebih kecil disebut *meshing*. *Meshing* digunakan untuk mengubah suatu bidang yang luas dengan dimensi yang disesuaikan sehingga menghasilkan bentuk potongan-potongan elemen segi tiga atau segi empat yang beraturan. Dimana semakin kompleks bentuk *mesh* yang dibuat maka akan berpengaruh pada keakuratan dari hasil keseluruhan.

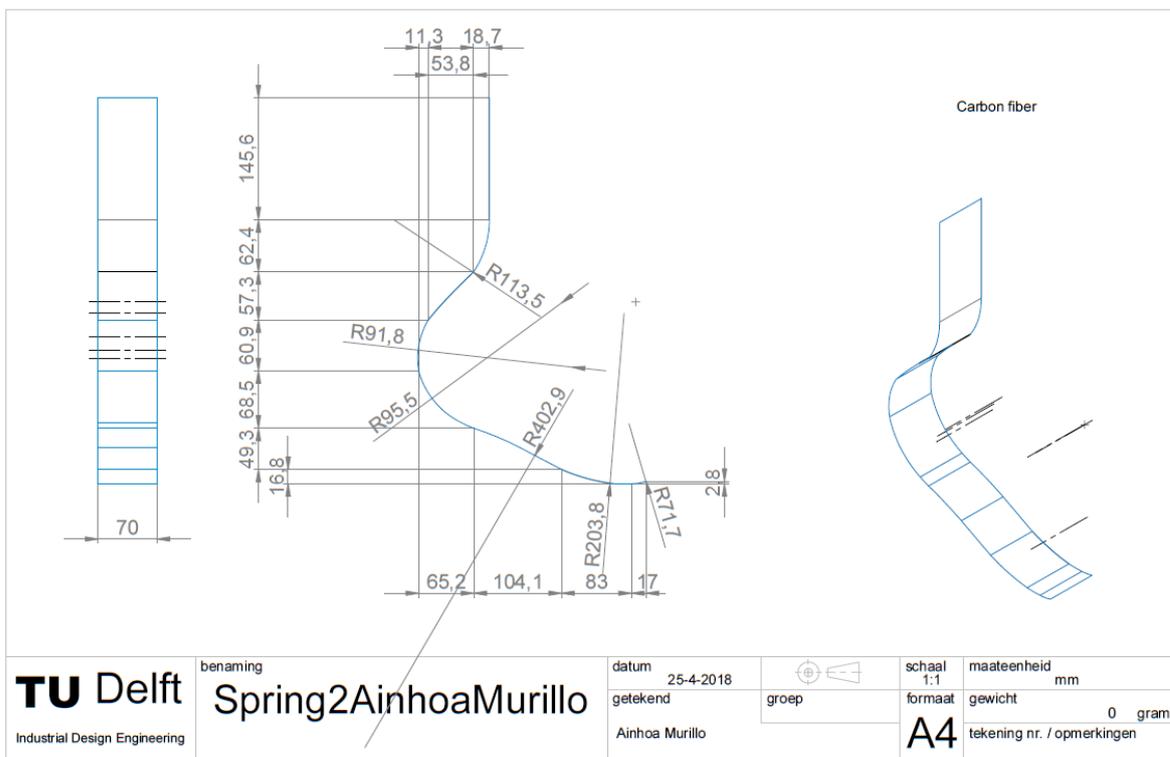


Gambar 2. 10 (a) Mesh Metode Elemen Hingga, (b) Elemen Segitiga, (c) Elemen Segi empat (Isworo & Ansyah, 2018)

2.14 Tinjauan Pustaka

Suatu penelitian dilakukan oleh Ainhoa Murillo Iraola pada tahun 2018 dengan judul “Design and Characterization of a Variable Stiffness Prosthesis for Bilateral Transtibial Amputee Sprinters”. Penelitian ini menjelaskan metode mengenai desain optimasi untuk *sprinting prosthesis* model 1E90 yang terbuat dari material komposit carbon/epoxy.

Penelitian ini memiliki dua tujuan yaitu merancang kekakuan pada *sprinting prosthesis* dengan variabel baru dan membuat metodologi baru untuk karakterisasi pada *sprinting prosthesis*. Untuk desain dari *sprinting prosthesis* model 1E90 ini dapat dilihat pada Gambar 2.11 dibawah ini.



Gambar 2. 11 Desain *Sprinting Prosthesis* model 1E90 (Ainhoa Murillo I, 2018)

Setelah menggunakan desain tersebut, selanjutnya *material properties* dari komposit carbon/epoxy dimasukkan kedalam *engineering data*. Untuk *properties orthotropic* dari komposit carbon fiber dapat dilihat pada Gambar 2.12.

E1 [MPa]	E2 [MPa]	E3 [MPa]	G12 [MPa]	G13 [MPa]	G23 [MPa]	U12	U13	U23
138000	9500	9500	5200	5200	1450	0.28	0.28	0.4

Gambar 2. 12 Material Properties Carbon/Epoxy (Ainhoa Murillo I, 2018)

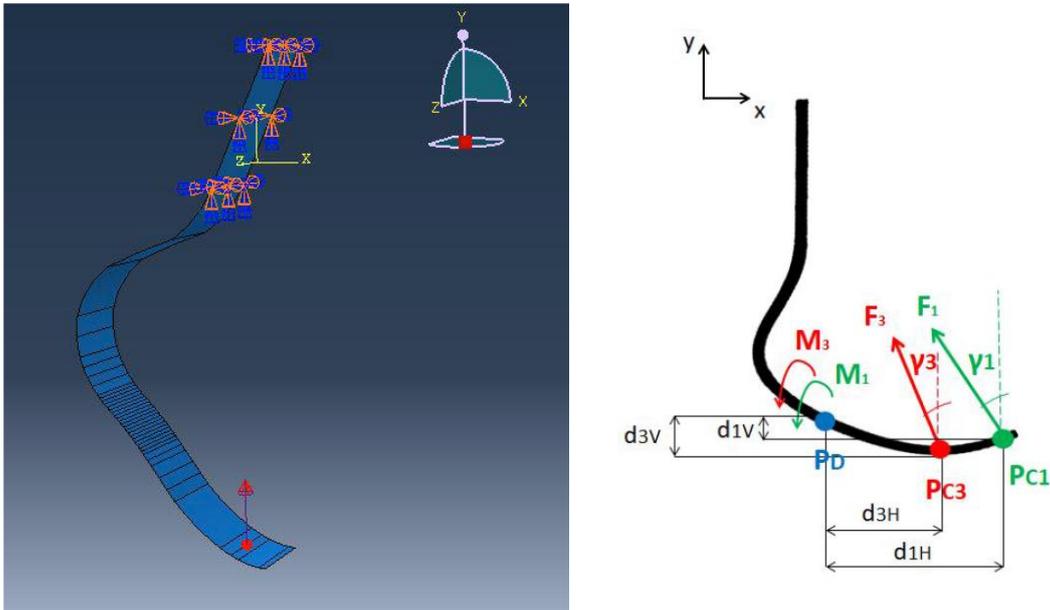
Lalu dilakukan input parameter yang akan diberlakukan yaitu orientasi sudut serat berupa 0°, 45° dan -45° dengan jumlah total layer sebanyak 57. Untuk keterangan pada tiap layer dapat dilihat pada Gambar 2.13 dibawah ini.

Prosthesis	Direction (°)	Length (mm)	Width (mm)	Layers	Thickness (mm)	Area (mm ²)
Model 1E90	45	682	70	1	0,16	47740
	0	682	70	1	0,16	47740
	-45	682	70	1	0,16	47740
	0	682	70	1	0,16	47740
	45	682	70	1	0,16	47740
	0	682	70	1	0,16	47740
	-45	682	70	1	0,16	47740
	0	682	70	1	0,16	47740
	45	682	70	1	0,16	47740
	0	682	70	1	0,16	47740
	-45	682	70	1	0,16	47740
	0	682	70	4	0,16	190960
	0	461,5	70	1	0,16	32305
	0	456,5	70	1	0,16	31955
	0	451,5	70	1	0,16	31605
	0	446,5	70	1	0,16	31255
	0	441,5	70	1	0,16	30905
	0	436,5	70	1	0,16	30555
	0	431,5	70	1	0,16	30205
	0	426,5	70	1	0,16	29855
	0	421,5	70	1	0,16	29505
	0	416,5	70	1	0,16	29155
	0	411,5	70	1	0,16	28805
	0	406,5	70	1	0,16	28455
	0	401,5	70	1	0,16	28105
	0	396,5	70	1	0,16	27755
	0	391,5	70	1	0,16	27405
	0	386,5	70	1	0,16	27055
	0	381,5	70	1	0,16	26705
	0	376,5	70	1	0,16	26355
	0	371,5	70	1	0,16	26005
	0	366,5	70	1	0,16	25655
	0	361,5	70	1	0,16	25305
	0	356,5	70	1	0,16	24955
	0	376,5	70	1	0,16	26355
	0	371,5	70	1	0,16	26005
	0	366,5	70	1	0,16	25655
	0	361,5	70	1	0,16	25305
	0	356,5	70	1	0,16	24955
	0	682	70	4	0,16	190960
	-45	682	70	1	0,16	47740
	0	682	70	1	0,16	47740
	45	682	70	1	0,16	47740
	0	682	70	1	0,16	47740
	-45	682	70	1	0,16	47740
	0	682	70	1	0,16	47740
	45	682	70	1	0,16	47740
	0	682	70	1	0,16	47740
	-45	682	70	1	0,16	47740
	0	682	70	1	0,16	47740
	45	682	70	1	0,16	47740
	57				9,12	2190335

Gambar 2. 13 Penyusunan Layer Carbon/Epoxy (Ainhoa Murillo I, 2018)

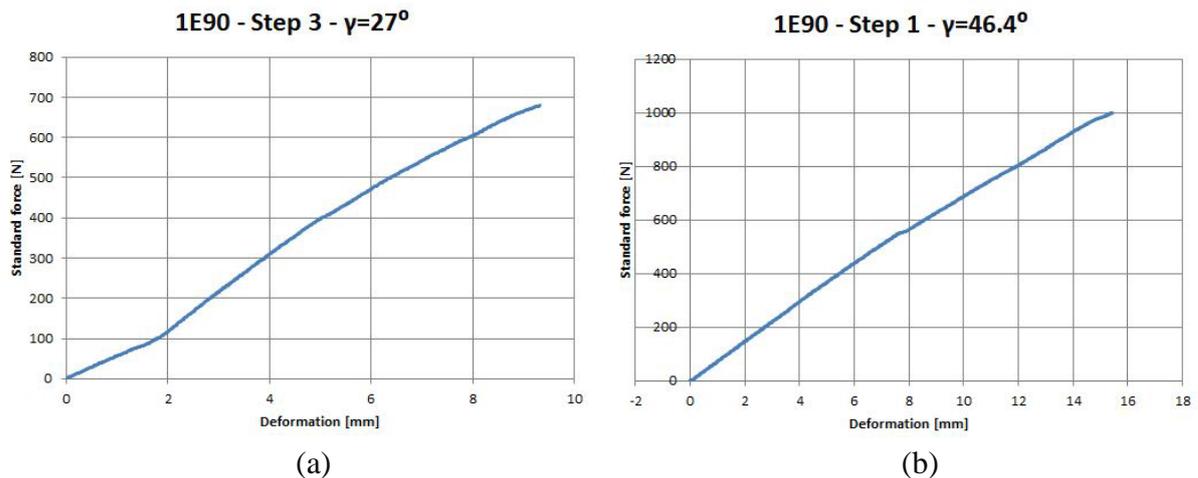
Setelah selesai penyusunan layer pada carbon/epoxy *sprinting prosthesis* model 1E90, dilakukan pemberian *boundary condition* dengan force kearah vertical keatas dengan bagian atas dari *sprinter prosthesis* menjadi tumpuan atau fixed support. Hal tersebut dilakukan akan

penelitian ini memiliki hasil deformasi. Seperti Gambar 2.14 dibawah ini merupakan *boundary condition* pada jenis pengujian *forefoot*.



Gambar 2. 14 Boundary Condition Carbon/Epoxy Running Blade Prosthetic (Ainhoa Murillo I, 2018)

Setelah dilakukan setiap tahap diatas, didapatkan hasil pada pengujian *midstance* dan *forefoot* dengan variasi sudut pembebanan yang berbeda. Hal tersebut dilakukan akan dapat melihat nilai stiffness pada tiap lekukan yang terjadi pada desain *running blade prosthetic*. Dan berikut merupakan hasil dari *running blade prosthetic* model 1E90 pada sudut pembebanan 27° untuk pengujian *midstance* dan sudut pembebanan $46,4^\circ$ untuk pengujian *forefoot* seperti pada Gambar dibawah ini.



Gambar 2. 15 Hasil Carbon/Epoxy Running Blade Prosthetic: (a) *Midstance*, (b) *Forefoot* (Ainhoa Murillo I, 2018)

Berdasarkan Gambar 2.15 diatas pada pengujian *midstance* dilakukan pembebanan 0 sampai 700 N dengan hasil nilai deformasi pada beban 600 adalah 8 mm. Lalu pada pengujian *forefoot* dilakukan pembebanan 0 sampai 1000 N dengan hasil nilai deformasi pada beban 1000 N adalah 15,3 mm.

Penelitian kedua yang dilakukan oleh (Parmiggiani et al., n.d.) dengan judul penelitian “Effect of the fiber orientation on the tensile and flexural behavior of continuous carbon fiber composites made via fused filament fabrication”. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis hambatan mekanik dari komponen yang dibuat dengan bahan thermoplastik seat karbon kontinu (CCF) melalui fabrikasi filamen fusi (FFF), dengan fokus pada pengaruh arah orientasi serat. Salah satu metode yang dilakukan pada penelitian ini adalah pengujian pada material continuous carbon fiber dengan metode uji bending. Adapun kombinasi sudut serat yang digunakan pada pengujian uji bending dapat dilihat pada Tabel 2.5 berikut.

Tabel 2. 5 Variasi sudut serat pada Pengujian Bending (Parmiggiani et al., n.d.)

Jenis Material	Variasi orientasi sudut serat
Continous carbon fiber	0°
	45°
	90°
	[0°/90°] ₁₂
	[45°/-45°] ₁₂
	[0°/90°/45°/-45°] ₆
	[0°/45°/-45°/-45°] ₆

Selanjutnya dilakukan analisa dari hasil pengujian bending terhadap variasi kombinasi sudut serat berdasarkan metode yang telah ditentukan. Berdasarkan hasil pengujian bending diperoleh pengaruh sudut orientasi terhadap flexural strength dan flexural modulus. Yang akan dituangkan dalam Tabel 2.6 dibawah ini.

Tabel 2. 6 Hasil pengujian bending berdasarkan arah orientasi sudut serat (Parmiggiani et al., n.d.)

Jenis Material	Variasi orientasi sudut serat	Maximum flexural strength (MPa)	Flexural modulus (GPa)
Continous carbon fiber	0°	340,7	24,39
	45°	92	3,32
	90°	51,8	2,13
	[0°/90°] ₁₂	241,2	14,62
	[45°/-45°] ₁₂	101,8	3,25
	[0°/90°/45°/-45°] ₆	223,7	10,29
	[0°/45°/-45°/-45°] ₆	212,9	10,3

Berdasarkan hasil pengujian bending diperoleh sudut orientasi terbaik dengan nilai flexural strength dan flexural modulus terbaik. Berdasarkan data dari Tabel 2.6 diperoleh bahwa sudut orientasi terbaik pada pengujian bending adalah 0° dengan nilai flexural strength yaitu 340,7 MPa dan nilai flexural modulus sebesar 24,39. Pada orientasi sudut tersebut dihasilkan kondisi material yang kaku. Selanjutnya pada sudut orientasi 45° diperoleh nilai flexural strength sebesar 92 Mpa dan flexural modulus sebesar 3,32 MPa. Hal tersebut terjadi dikarenakan diagonal pada CCF menyebabkan disposisi yang berakibat tidak seimbang nya spesimen uji. Dan membuat spesimen hanya berputar pada sumbu longitudinal selama pembengkokan dan berakibat spesimen meluncur dari tiba-tiba dari posisi awal dan terjadi gangguan pada saat pengujian berlangsung. Berdasarkan nilai flexural modulusnya sudut 45° menunjukkan perilaku lentur yang hampir mirip dengan kondisi sudut 90°. Untuk sudut 90° diperoleh nilai

flexural strength sebesar 51,8 MPa dan nilai modulus elastisitas sebesar 2,13 GPa. Dengan kondisi tersebut menandakan bahwa sudut 90° menunjukkan perilaku ulet. Kedua sudut 45° dan 90° menunjukkan perilaku belum gagal setelah tekukan terjadi. Sehingga perlu ditekuk sampai dengan 180°. Untuk sudut [0°/90°] membuat spesimen menjadi lebih kaku dan ketahanan yang tinggi, dibuktikan dengan hasil flexural strength yaitu 241,2 MPa dan flexural modulus yaitu 14,62 GPa. Berdasarkan pembebanan yang sama kegagalan terjadi adalah akibat dari patahan tipe campuran. Berdasarkan pengamatan bahwa kombinasi sudut serat searah longitudinal lebih mempengaruhi ketahanan lentur dari spesimen. Kemudian untuk kombinasi sudut [45°/-45°]₁₂ bahwa nilai flexural strength berkurang 57,8% dari kombinasi sudut [0°/90°] sehingga sifat material menjadi lebih ductil atau ulet dengan nilai flexural modulus sebesar 3,25 GPa. Kombinasi sudut ini memebrrikan dampak sulitnya dibengkokkan dan tidak ada terjadi kegagalan walaupun sudah ditekuk sampai dengan 180°. Dapat disimpulkan bahwa diagonal campuran pada fiber berkinerja dengan sangat baik dibandingkan dengan diagonal tunggal. Selanjutnya kombinasi sudut [0°/90°/45°/-45°] diuji pada pengujian bending diperoleh nilai flexural strength sebesar 223,7 MPa dan memberikan deformasi yang lebih tinggi dibandingkan kombinasi sebelumnya yaitu [0°/90°]. Hal ini bisa terjaid dikarenakan kontribusi dari kombinasi sudut [45°/-45°]. Kemudian dilakukan modifikasi sudut menjadi [0°/45°/90°/-45°], berdasarkan hasil uji bending tidak terjadi perubahan yang signifikan dan menghasilkan nilai flexural strength dan flexural modulus yang hampir sebanding nilainya dengan keadaan sudut sebelumnya.

Penelitian ketiga yang dilakukan oleh (Kusumastuti et al., 2009) dengan judul penelitian yaitu “aplikasi serat sebagai komposit polimer”. Diketahui bahwa serat sisal merupakan penguat yang menjanjikan untuk digunakan sebagai komposit karena harganya yang murah, densitas yang rendah, kekuatan spesifik dan modulusnya yang tinggi. Serat sisal secara konvensional, serat sisal sering digunakan sebagai bahan baku pembuatan tali, tikar, karpet, kerajinan, dan lain-lainnya. Secara teknis serat sisal memiliki potensi untuk digunakan sebagai komposit bagi bahan bangunan, kendaraan, rel kereta api, geotekstil hingga kemasan. Dikarenakan sisal memiliki potensi sebagai bahan penguat komposit, dapat dibuktikan dengan sifat mekanik dari serat sisal yaitu dapat dilihat pada Tabel 2.7.

Tabel 2. 7 Sifat mekanik dari serat sisal (Kusumastuti et al., 2009)

Densitas (kg/m ³)	Moisture Content (%)	Kekuatan Tarik (MPa)	Modulus (GPa)	Maximum Strain (%)	Diamete r (µm)
1450	11	604	9.4-15.8	-	50-200
1450	-	530-640	9.4-22	3-7	50-300
-	-	347	14	5	-
1030	-	500-600	16-21	3.6-5.1	-
1410	-	400-700	9-20	5-14	100-300
1400	-	450-700	7-13	4-9	-
-	-	530-630	17-22	3.64-5.12	100-300
1450	-	450-700	7-13	4-9	-

Kemudian potensi dari serat sisal jika dijadikan komposit dengan matriks polyester dan epoxy diperoleh sifat mekanik yang lebih baik jika dilakukan dengan treatment yang tepat. Apabila serat sisal dilakukan treatment dengan sangat baik maka akan memperoleh sifat mekanik dari komposit yang lebih baik. Sebagai contoh pada Tabel 2.8 dibawah ini beberapa

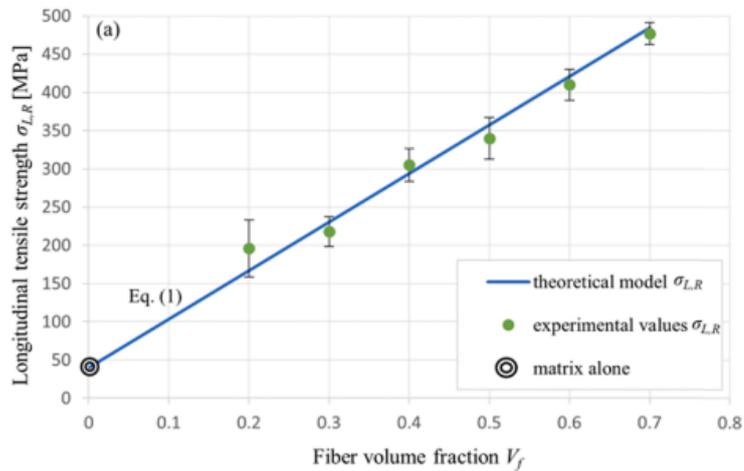
perlakuan serat sisal yang memberikan efek yang sangat baik. Yang mana treatment yang dilakukan yaitu dengan perlakuan 0,06 M NAOH. Sehingga diperoleh hasil sebagai berikut:

Tabel 2. 8 Sifat mekanik serat sisal dengan *treatment* dan tanpa *treatment* (Kusumastuti et al., 2009)

Jenis Komposit	Kekuatan (MPa)
Sisal-polyester tanpa <i>treatment</i>	222.6
Sisal-polyester dengan <i>treatment</i>	286.0
Sisal-epoxy tanpa <i>treatment</i>	329.8
Sisal-epoxy dengan <i>treatment</i>	335.4

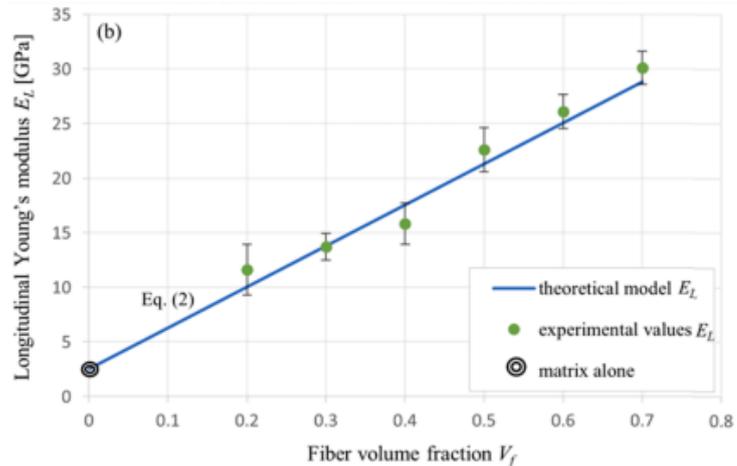
Berdasarkan Tabel 2.8 diatas bahwa apabila serat sisal dilakukan treatment atau tanpa treatment menunjukkan perbedaan sifat mekanik. Yang mana pada tabel di atas menunjukkan bahwa perlakuan serat sisal dengan treatment menunjukkan kekuatan tarik yang lebih tinggi dibandingkan dengan tanpa perlakuan. Berdasarkan nilai kekuatan komposit dari serat sisal menunjukkan potensi sebagai bahan baku dalam aplikasi struktur.

Penelitian keempat dilakukan oleh Bernado Zucarello, Carmello Militello, dan Franscesco Bongiorno dengan judul “*Influence of the anisotropy of sisal fibers on the mechanical properties of high performance unidirectional biocomposite lamina and micromechanical models*”. Penelitian ini dilakuan terhadap serat Sisal sebagai penguat di dalam matriks *green resin* dan mengevaluasi properti mekanis dari komposit. Penelitian ini melakukan variasi berupa fraksi volume dari 20% sampai 70% dengan menggunakan lima specimen. Penelitian ini melakukan analisis dari perilaku anisotropik yang dimiliki oleh serat sisal dalam hal sifat elastis dan kekuatan mekanik, telah dilakukan melalui pengujian eksperimental lengkap dari lamina searah yang diperkuat dilakukan dengan mempertimbangkan kondisi pembebanan utama yaitu pembebanan tarik longitudinal, pembebanan tarik transversal, pembebanan geser, pembebanan tekan longitudinal dan pembebanan tekan transversal. Untuk setiap kondisi pembebanan lima spesimen telah digunakan untuk setiap fraksi volume serat yang dipertimbangkan. Hasil yang didapatkan dari penelitian ini dimulai dari *Longitudinal Tensile Strength* dimana dari eksperimen yang dilakukan, nilai *Longitudinal Tensile Strength* meningkat seiring dengan penambahan fraksi volume.



Gambar 2. 16 Grafik Longitudinal Tensile Strength (Zuccarello et al., 2021)

Hasil eksperimen yang dilakukan mendekati dengan pendekatan perhitungan tangan secara teoritis. Mekanisme kerusakan yang terjadi di bawah pembebanan tarik longitudinal, bukti eksperimental telah menunjukkan bahwa kegagalan tarik selalu terjadi tanpa fenomena *debonding* atau *fiber pull-out* yang cukup prematur; ini menegaskan adhesi serat / matriks yang baik yang terjadi meskipun tidak ada perawatan permukaan yang telah dilakukan, dan tidak adanya rongga internal yang cukup besar yang dapat menyebabkan *debonding* sekunder karena pertumbuhan cacat matriks di sepanjang serat matriks antarmuka. Selanjutnya hasil dari *Longitudinal Young Modulus* juga menunjukkan trend yang sama dengan *Longitudinal Tensile Strength* dimana hasil young modulus akan meningkat seiring dengan penambahan fraksi volume.



Gambar 2. 17 Grafik Longitudinal Young's Modulus (Zuccarello et al., 2021)

Hasil selanjutnya yang didapatkan adalah Transversal Tensile Strength, dimana hasilnya merupakan kebalikan dari Longitudinal Tensile Strength. Seiring penambahan fraksi volume terdapat penurunan nilai *Transversal tensile strength* dengan pembebanan tarik. Hal ini terjadi kerusakan serat yang terbelah karena besarnya *stress* ke arah transversal.

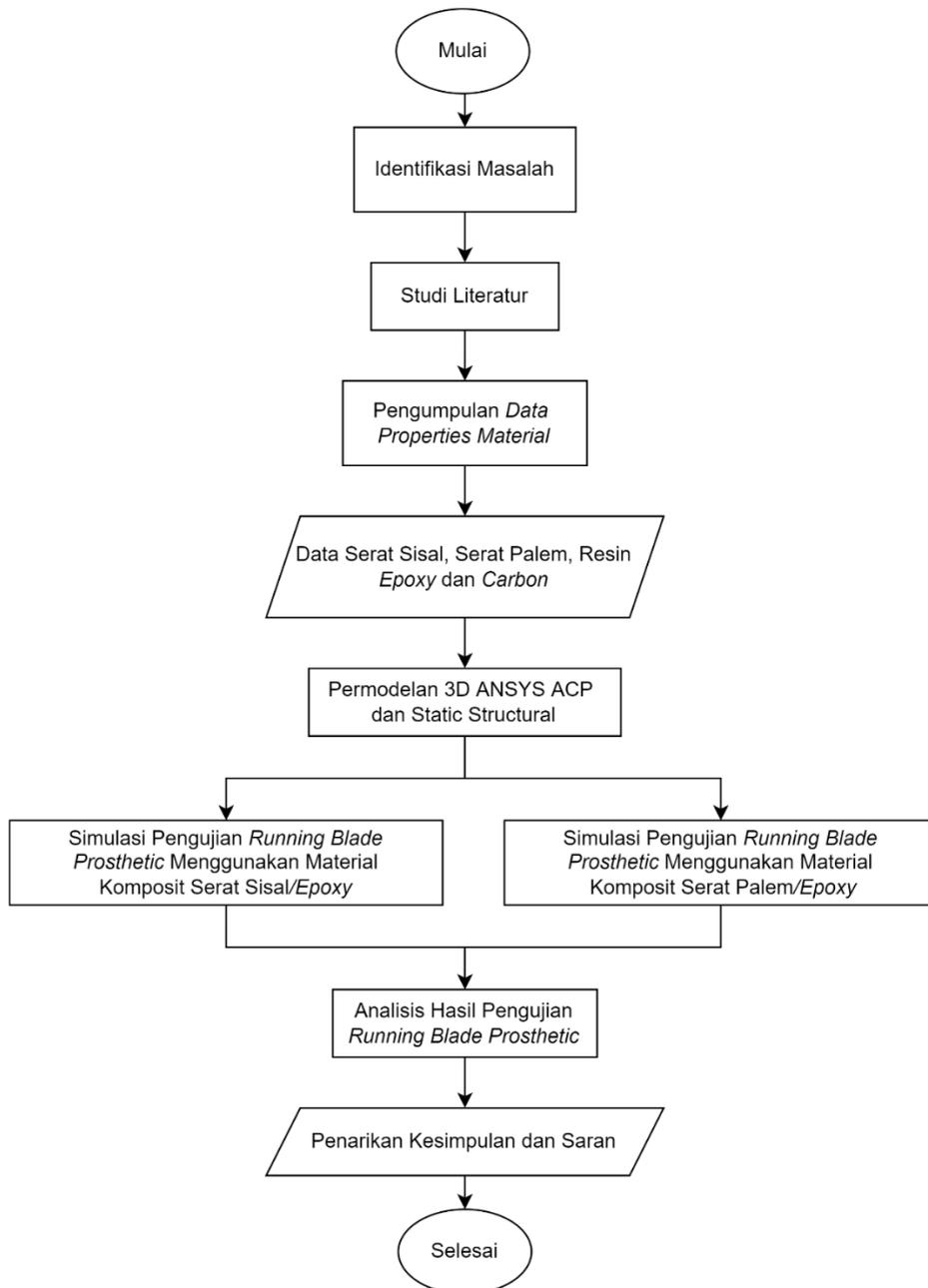
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

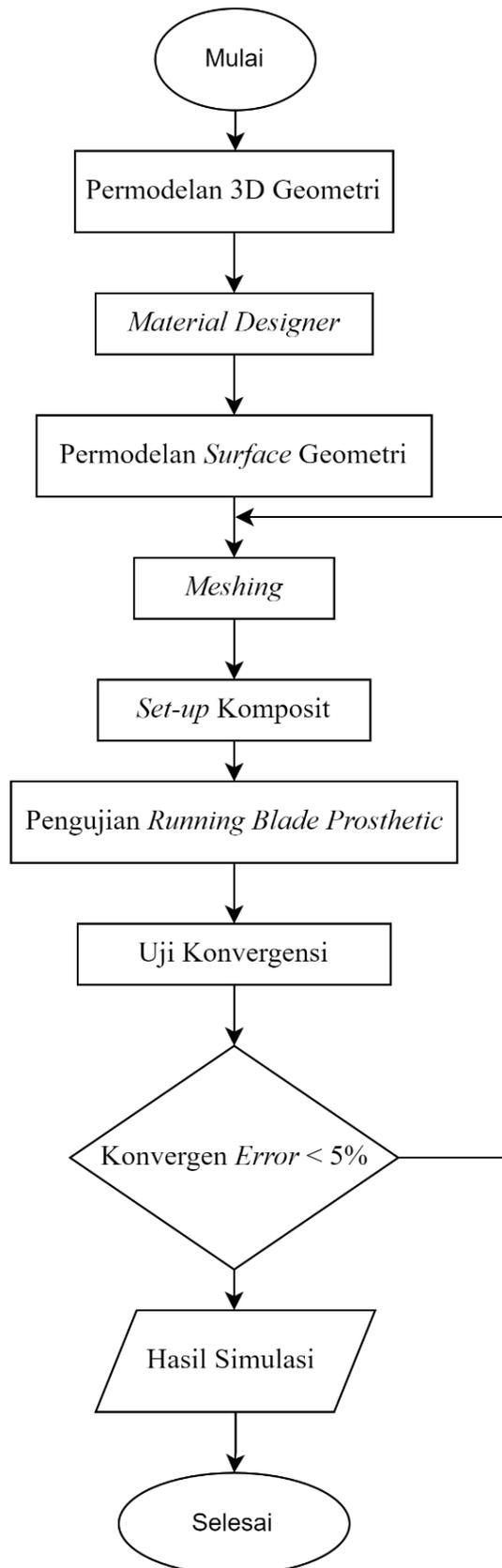
Pada BAB III ini akan dijelaskan mengenai metodologi yang digunakan pada penelitian tugas akhir. Metodologi penelitian merupakan suatu tahapan sistematis yang dilakukan selama penelitian dilakukan.

3.1 Diagram Alir Tugas Akhir

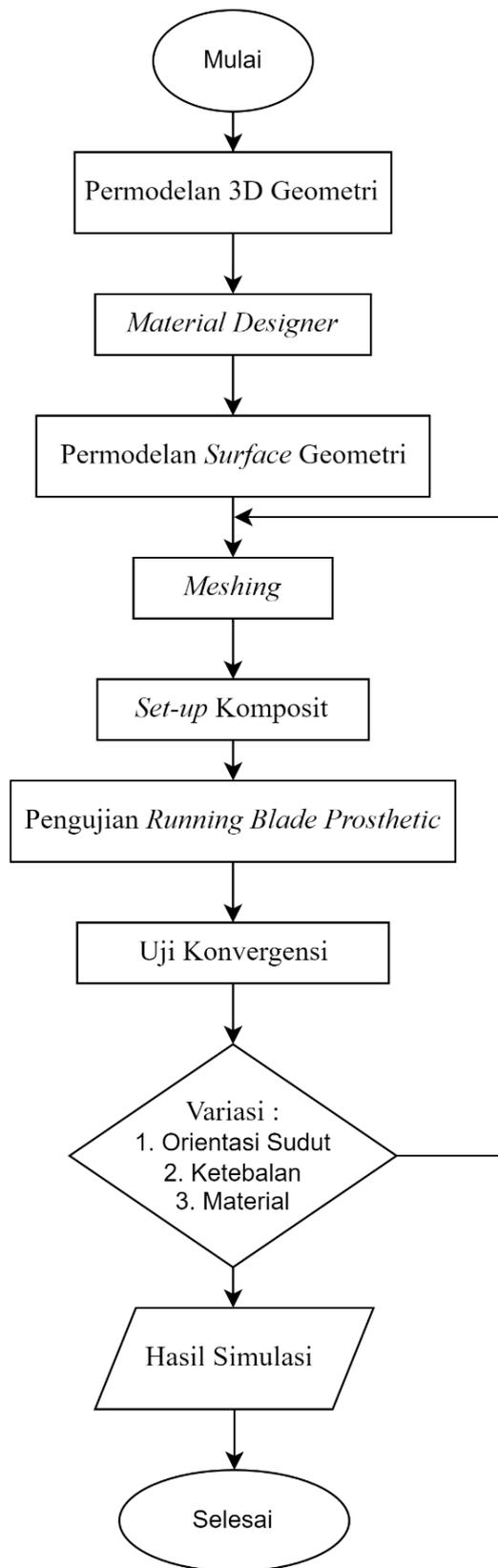
Metodologi penelitian ini dibuat agar dapat menggambarkan langkah kerja yang akan dilakukan pada penelitian kali ini. Berikut diagram flowchart yang dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 3. 1 Flowchart Penelitian



Gambar 3. 2 Flowchart Simulasi



Gambar 3. 3 Flowchart pengujian *Running Blade Prosthetic*

3.2 Identifikasi Masalah

Masalah yang akan dianalisa pada penelitian kali ini adalah pengaruh orientasi sudut serat dan ketebalan terhadap kekuatan desain *running blade prothetic* menggunakan material sisal/epoxy dan palem/epoxy. Kemudian akan dianalisa terkait kombinasi sudut, ketebalan, serta material yang paling optimal dalam memberikan pengaruh pada kekuatan desain *running blade prothetic*. Standar pengujian untuk desain *running blade prothetic* ini menggunakan standar ISO 10328.

3.3 Studi Literatur

Pada tahapan ini dilakukan studi literatur dengan pendalaman ilmu dan materi-materi penopang yang dibutuhkan dalam penelitian. Pedalaman ilmu ini diambil dari berbagai artikel, buku, jurnal ilmiah, serta laporan penelitian sebelumnya. Laporan penelitian tersebut berhubungan dengan pengujian yang terkait dengan analisa pengaruh arah orientasi sudut, variasi ketebalan dan jenis material yang digunakan pada penelitian ini.

3.4 Pengumpulan Data Sifat Material

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan berupa properties material dari serat sisal, serat palem, dan resin epoxy. Adapun *material properties* yang dapat diambil dari BAB II seperti pada Tabel 3.1, Tabel 3.2 dan Tabel 3.3 sebagai berikut:

Tabel 3. 1 Data *Material Properties* Sisal *Single Fiber* (Kusumastuti et al., 2009)

Mechanical Properties	
Diameter (μm)	121,6
Density (g/cm^3)	1,45
Modulus Young (GPa)	7
Poisson Ratio	0,44
Tensile Strength (MPa)	450
Shear Modulus (GPa)	2,5

Tabel 3. 2 Data *Material Properties* Palembang *Single Fiber*

Mechanical properties	
Diameter (μm)	100
Modulus Young (GPa)	23,424
Poisson Ratio	0,3
Tensile Strength (MPa)	485,78
Shear Modulus (GPa)	9,0092

Tabel 3. 3 *Material Properties* Resin Epoxy (Daniel & Ishai, 2006)

Mechanical properties	
Density (g/cm^3)	1,16
Modulus Young (GPa)	3,4
Poisson Ratio	0,36
Tensile Strength (MPa)	80
Shear Modulus (GPa)	1,25

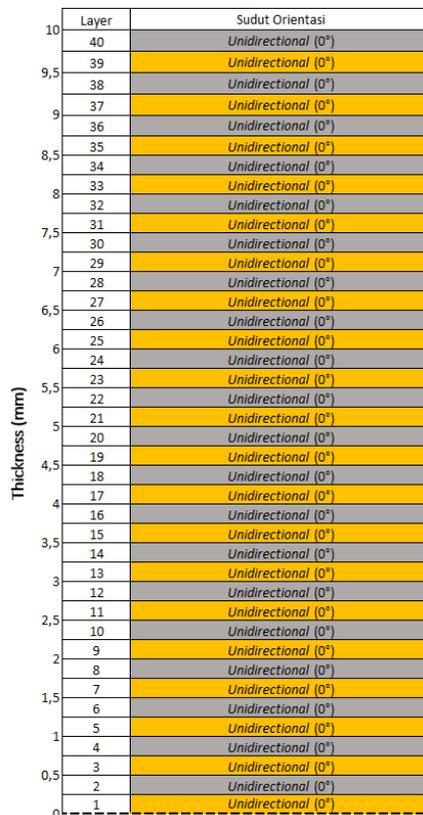
3.5 Variasi Penelitian

Dalam menyusun komposit pada *running blade prothetics* ini menggunakan bentuk penguat *continuous-fiber composites* dengan jenis *unidirectional laminate lay-up* dan *crossply laminate lay-up* dikarenakan memiliki kekuatan dan kekakuan yang efisien. Pada penelitian ini akan diberikan lima variasi arah orientasi serat penguat komposit berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Parmiggiani et al., n.d.). Kelima variasi ini digunakan karena memiliki nilai *maximum flexural strength* yang tinggi dalam metode uji bending. Kemudian dari kelima variasi tersebut akan dipilih variasi dengan kekuatan terbaik dalam penelitian ini agar dapat memperoleh desain *running blade prothetic* yang optimal. Dapat dilihat pada Tabel 3.5 merupakan kelima variasi penelitian yang akan digunakan selama penelitian kali ini:

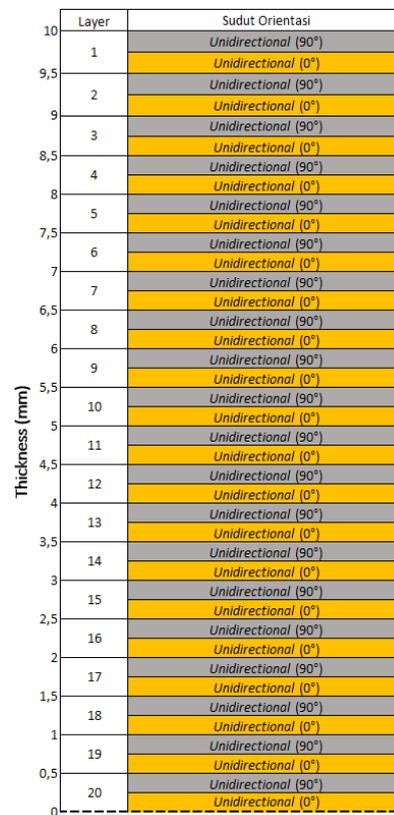
Tabel 3. 4 Tabel Variasi Penyusunan Orientasi Sudut

Material	Material	Variasi Sudut	Ketebalan Tiap Layer (mm)	Ketebalan Total (mm)
Sisal/Epoxy	Palem/Epoxy	$[0^\circ]_{40}$	0,25 mm	10 mm
		$[0^\circ/90^\circ]_{20}$		
		$[45^\circ/-45^\circ]_{20}$		
		$[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]_{10}$		
		$[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{10}$		

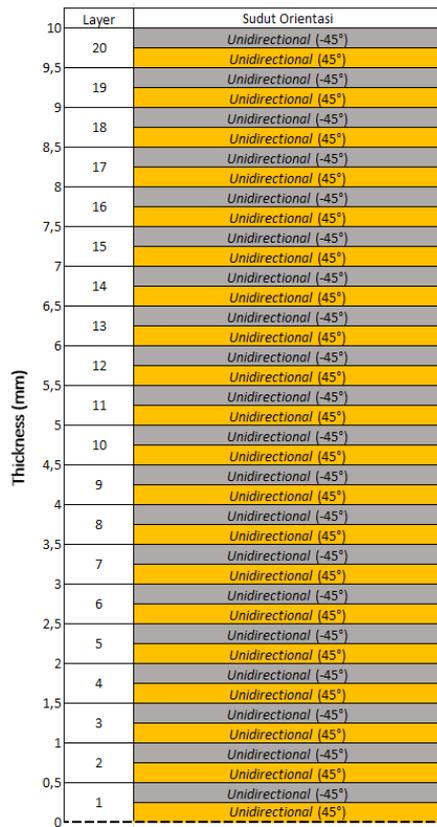
Adapun penjelasan dari *stacking sequence* dari tumpukan masing variasi orientasi sudut komposit dari tiap variasi seperti Gambar 3.4 dibawah.



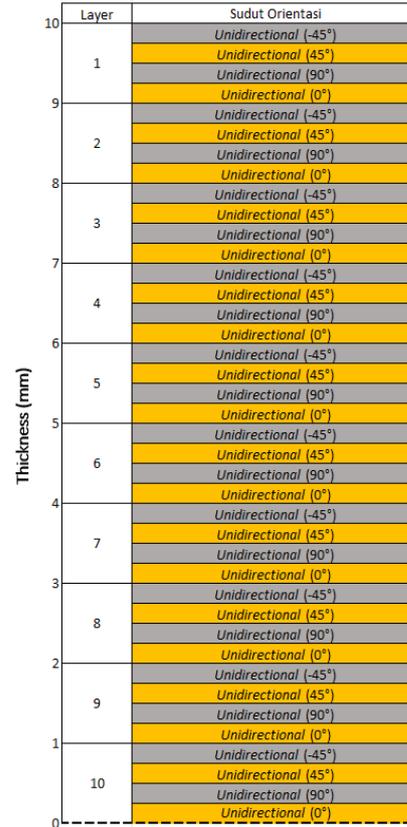
(a)



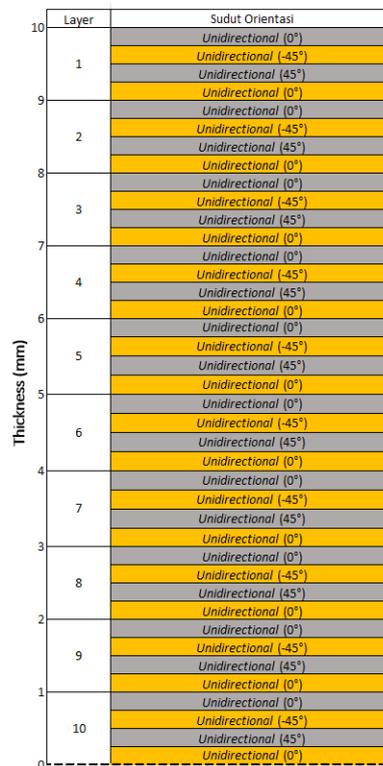
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 3. 4 Stacking sequence untuk masing-masing variasi orientasi sudut: (a) $[0^\circ]_{40}$, (b) $[0^\circ/90^\circ]_{20}$, (c) $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$, (d) $[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]_{10}$, dan (e) $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{10}$

Setelah mengetahui kombinasi arah serat yang memiliki kekuatan yang terbaik, maka selanjutnya akan diberikan variasi ketebalan pada plat komposit *running blade prosthetic* agar memperoleh batas nilai keamanan atau *safety factor* yang aman pada desain tersebut dalam menggunakan kedua material. Berikut tabel variasi ketebalan pada desain yang akan digunakan:

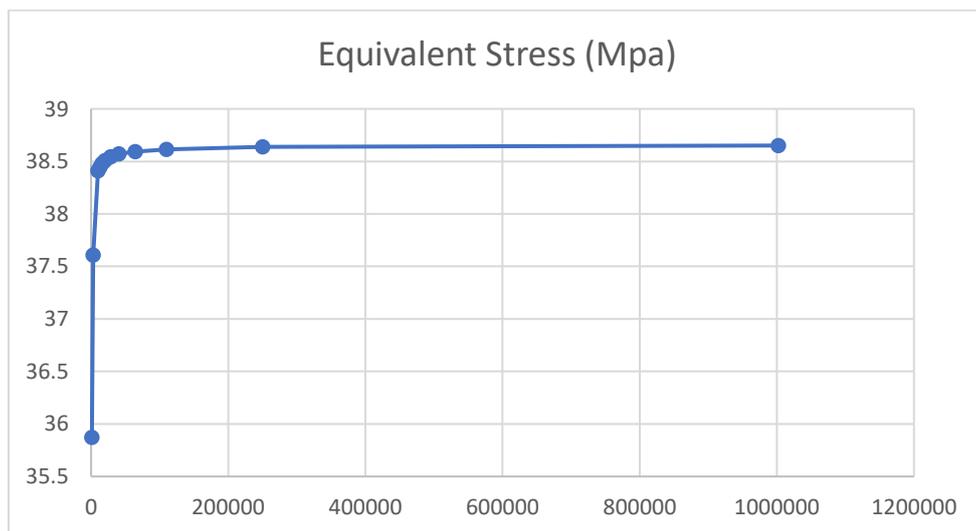
Tabel 3. 5 Variasi Ketebalan Desain *Running Blade Prosthetic*

NO	Material	Material	Ketebalan (mm)
1	Sisal/Epoxy	Palem/Epoxy	10
2	Sisal/Epoxy	Palem/Epoxy	15
3	Sisal/Epoxy	Palem/Epoxy	20
4	Sisal/Epoxy	Palem/Epoxy	25
5	Sisal/Epoxy	Palem/Epoxy	30
6	Sisal/Epoxy	Palem/Epoxy	35
7	Sisal/Epoxy	Palem/Epoxy	40

Setelah mengetahui hasil dari setiap variasi maka dilakukan perbandingan terhadap kedua material yaitu sisal/epoxy dan palem/epoxy dengan kombinasi arah serat terbaik agar dapat mengetahui material yang terbaik diantara kedua material tersebut sebagai material penyusun plat komposit pada *running blade prosthetic*.

3.6 Uji Konvergensi Meshing

Dalam melakukan simulasi, dilakukan uji konvergensi untuk menentukan ukuran meshing yang digunakan untuk simulasi. Uji konvergensi dilakukan secara manual dengan melakukan variasi ukuran elemen pada desain. Pengecilan ukuran dari meshing ini dimaksudkan untuk meningkatkan jumlah elemen agar hasilnya diharapkan mendekati nilai sebenarnya. Nilai *equivalent stress maximum* digunakan sebagai acuan uji konvergensi ini. Dimana hasil dapat dilihat pada tabel dan grafik dan dibawah ini.



Gambar 3. 5 Grafik Hasil Uji Konvergensi Simulasi

Tabel 3. 6 Hasil Uji Konvergensi Simulasi

Uji Konvergensi					
No.	Element Size (mm)	Nodes	Element	Equivalent Stress (MPa)	Relative Error
1	40	1722	1160	35,871	-
2	20	4074	3060	37,607	4,62%
3	10	12432	10240	38,411	2,09%
4	9	15372	12900	38,445	0,09%
5	8	19236	16360	38,48	0,09%
6	7	23856	20500	38,508	0,07%
7	6	32949	28780	38,543	0,09%
8	5	45990	40660	38,573	0,08%
9	4	71694	64380	38,593	0,05%
10	3	120729	109840	38,615	0,06%
11	2	270837	250200	38,638	0,06%
12	1	1069026	1002580	38,661	0,06%

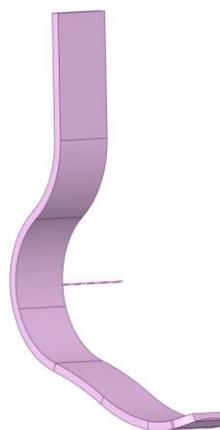
Dari hasil uji konvergensi yang dapat dilihat dalam grafik pada Tabel 3.6 dan Gambar 3.5 didapatkan ukuran meshing dengan nilai *error* terkecil pada ukuran element sebesar 4 mm dengan *relative error* sebesar 0.05%.

3.7 Simulasi Uji Kekuatan *Running Blade Prosthetic* Dengan *Finite Element Method*

Simulasi uji kekuatan *running blade prosthetic* ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi dari orientasi sudut pada komposit serat sisal/*epoxy* dan palem/*epoxy* menggunakan matriks resin *epoxy*. Setelah mendapatkan variasi terbaik dari orientasi sudut, dilanjutkan dengan mencari ketebalan yang optimum untuk penelitian ini. Dalam menjalankan simulasi ini, digunakan fitur *material designer*, *ACP (pre)*, dan *static structural* dalam *software* Ansys.

3.7.1 Pembuatan 3D Geometri

Sebelum melakukan analisis menggunakan *software* Ansys, dilakukan pembuatan bentuk *running blade prosthetic* menggunakan *software* CAD dalam mendesain geometri pada specimen. Model ini dibuat berupa 3D geometri seperti gambar yang dapat dilihat pada Gambar 3.6 dibawah ini:



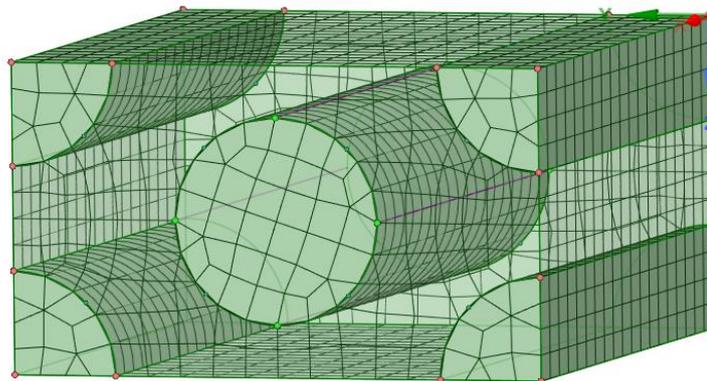
Gambar 3. 6 Permodelan 3D *Running Blade Prosthetic*

3.7.2 Material Designer

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

Proses homogenisasi dimulai dengan pemodelan RVE. Proses ini membutuhkan pembuatan geometri yang disederhanakan, serta definisi sifat-sifat bahan dari bahan-bahan penyusun. Selanjutnya, geometri serat dan matriks disatukan untuk analisis elemen hingga. Model RVE yang telah dimodelkan kemudian diberi beberapa kasus beban makroskopis, dan responsnya dihitung. Data material yang dihomogenisasi dihitung dari hasil respon regangan. Dari properti mikrostruktur, kita dapat memperoleh data material rata-rata kekakuan atau elastisitas linier yang dapat digunakan pada simulasi makrostruktur. Data sifat mekanik komponen penyusun material komposit ditentukan, lalu dimodelkan dan dianalisis berdasarkan fraksi volumenya, dan sifat material yang dihomogenisasi akan didapatkan dan dapat diimpor ke *engineering data* untuk analisis makromekanik.

Pada penelitian ini, komposit yang digunakan adalah serat sisal dan palem dengan matriks resin *Epoxy*. Pada Gambar 3.7 dibawah merupakan contoh model mikrostruktur dari gabungan serat sisal dan matriks resin epoxy.



Gambar 3. 7 Model Mikrostruktur Komposit Serat/Resin UD

Tahap selanjutnya pemilihan bentuk geometri komposit yang akan digunakan. Pemilihan model RVE yang digunakan adalah *unidirectional*. RVE yang akan dipakai pada penelitian ini menggunakan ketebalan *fabric* sebesar 0.25 mm. Diameter yang digunakan adalah 121,6 μm untuk serat sisal dan 100 μm untuk serat palem. Adapun fraksi volume serat yang digunakan pada kedua serat ini yaitu 40% untuk serat sisal dan 30% untuk serat palem. Kemudian

menginput data-data *material properties* dari *reinforcement* dan *matrix*. Untuk *mesh* yang digunakan sendiri berukuran 20 μm . Tahap terakhir pada *material designer* ini adalah menentukan *settings* komposit, dimana pada tahap ini dipilih orthotropic dan penentuan temperature awal sebesar 22 derajat Celsius. Sehingga hasil dari material designer ini dapat dilihat pada Gambar 3.8 dan Gambar 3.9 dibawah ini:

Engineering Coi			
E1	4841.6	MPa	<input type="checkbox"/>
E2	4460.2	MPa	<input type="checkbox"/>
E3	4460.2	MPa	<input type="checkbox"/>
G12	1634.6	MPa	<input type="checkbox"/>
G23	1618.1	MPa	<input type="checkbox"/>
G31	1634.6	MPa	<input type="checkbox"/>
nu12	0.37747		<input type="checkbox"/>
nu13	0.37748		<input type="checkbox"/>
nu23	0.37823		<input type="checkbox"/>

Gambar 3. 8 Hasil Material Designer Sisal/Epoxy

Name	Value	Unit	P
Engineering Coi			
E1	9410.3	MPa	<input type="checkbox"/>
E2	5412.7	MPa	<input type="checkbox"/>
E3	5412.7	MPa	<input type="checkbox"/>
G12	1983.7	MPa	<input type="checkbox"/>
G23	1896	MPa	<input type="checkbox"/>
G31	1983.7	MPa	<input type="checkbox"/>
nu12	0.33948		<input type="checkbox"/>
nu13	0.33949		<input type="checkbox"/>
nu23	0.42742		<input type="checkbox"/>

Gambar 3. 9 Hasil Material Designer Palem/Epoxy

3.7.3 Input Engineering Data Material

Pada tahapan ini dilakukan *input data properties* dalam *engineering data* pada fitur ACP (*pre*) dari hasil material designer yang akan digunakan sebagai material pada *running blade prosthetic*. Dapat dilihat kedua data material pada Tabel 3.7 dan Tabel 3.8 yaitu komposit sisal/epoxy dan komposit palem/epoxy pada tabel berikut:

Tabel 3. 7 Data Material Properties Sisal/Epoxy

Orthotropic Elasticity	value
Modulus X Direction (MPa)	4841,6
Modulus Y Direction (MPa)	4460,2
Modulus Z Direction (MPa)	4460,3
Poisson Ratio XY	0,37747
Poisson Ratio YZ	0,37823
Poisson Ratio XZ	0,37748
Shear Modulus XY (MPa)	1634,6
Shear Modulus YZ (MPa)	1618,1
Shear Modulus XZ (MPa)	1634,4
Tensile X Direction	113,88
Tensile Y Direction	22,893
Tensile Z Direction	22,893
Compressive X Direction	-26,412
Compressive Y Direction	-29,761
Compressive Z Direction	-29,761
Shear XY	41,84
Shear YZ	20,92
Shear XZ	41,84

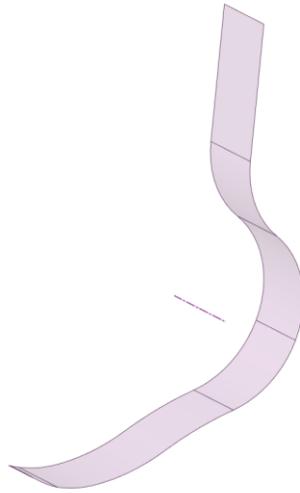
Tabel 3. 8 Data Material Properties Palem/Epoxy

Orthotropic Elasticity	value
Modulus X Direction (MPa)	9409,6
Modulus Y Direction (MPa)	5412,7
Modulus Z Direction (MPa)	5412,7
Poisson Ratio XY	0,33948
Poisson Ratio YZ	0,42742
Poisson Ratio XZ	0,33949
Shear Modulus XY (MPa)	1983,7
Shear Modulus YZ (MPa)	1896
Shear Modulus XZ (MPa)	1983,7
Tensile X Direction	195,09
Tensile Y Direction	30,54
Tensile Z Direction	30,54
Compressive X Direction	-23,95
Compressive Y Direction	-39,7
Compressive Z Direction	-39,7
Shear XY	47,07
Shear YZ	23,535
Shear XZ	47,07

3.7.4 Permodelan Surface Geometry

Untuk tahap permodelan *surface geometry* ini, dilakukan pengambilan bagian-bagian *surface* pada desain 3D *running blade prosthetic* yang dapat digunakan sebagai sebuah cetakan

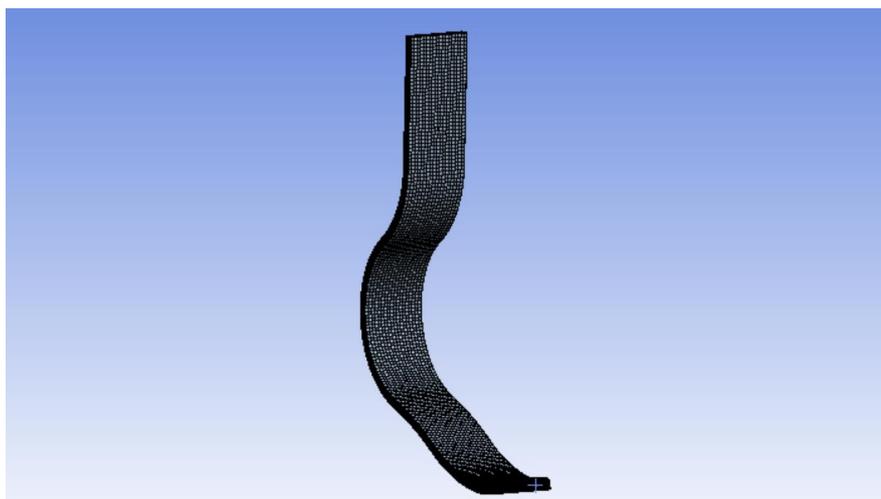
dalam penyusunan komposit pada tahap *lay-up* lapisan komposit. Adapun permodelan *surface geometry* yang terdapat pada Gambar 3.10 seperti berikut:



Gambar 3. 10 Permodelan Surface Geometri dari *Running Blade Prosthetic*

3.7.5 Meshing

Meshing merupakan inti dari metode elemen hingga yang berfungsi untuk membagi model 3D menjadi model diskrit atau *nodes*. Elemen *meshing* yang digunakan mempengaruhi hasil dari simulasi yang akan dilakukan, semakin banyak elemen *meshing*, maka akan semakin baik dan hasilnya lebih *detail* atau mendekati dengan hasil yang sebenarnya. Pada pengujian ini, dilakukan proses *meshing* pada bagian *model* dalam fitur ACP (*pre*). Selanjutnya, dilakukan uji konvergensi untuk menentukan ukuran *meshing* yang akan digunakan pada simulasi. Setelah melakukan uji konvergensi, didapatkan ukuran *meshing* pada seluruh geometri *running blade prosthetic* ini sebesar 4 mm. Hal tersebut dikarenakan ukuran *meshing* 4 mm memiliki nilai *relative error* yang paling rendah dibanding ukuran *meshing* yang lain. Gambar 3.11 dibawah merupakan hasil geometri dari *running blade prosthetic* setelah dilakukan proses *meshing*.



Gambar 3. 11 Meshing 4mm dari Desain *Running Blade Prosthetic*

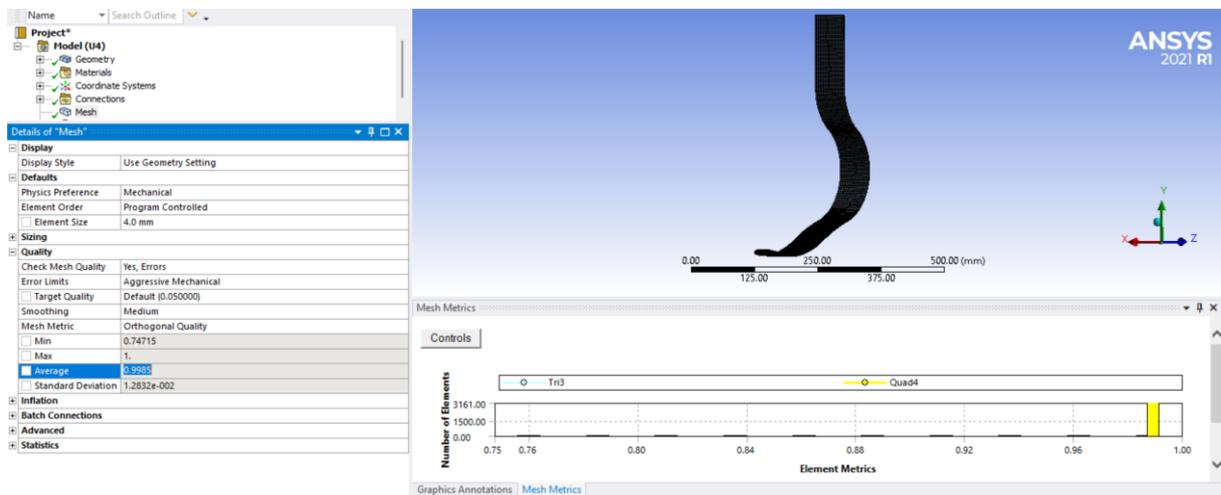
Setelah proses *meshing* selesai, selanjutnya masuk ke tahap pengecekan kualitas *meshing* dengan metode *mesh quality*. Tahap ini berfungsi untuk melihat apakah mesh yang

digunakan. karena apabila mesh yang dilakukan tidak cukup baik, maka hasil simulasi tidak cukup akurat. Oleh karena itu digunakan parameter *orthogonal quality* untuk melihat kualitas meshing. Untuk kualitas meshing berdasarkan parameter orthogonal quality nilai mesh average akan mendekati angka 1 atau tergolong excellent.

					
Unacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

Gambar 3. 12 *Orthogonal Quality Parameter*

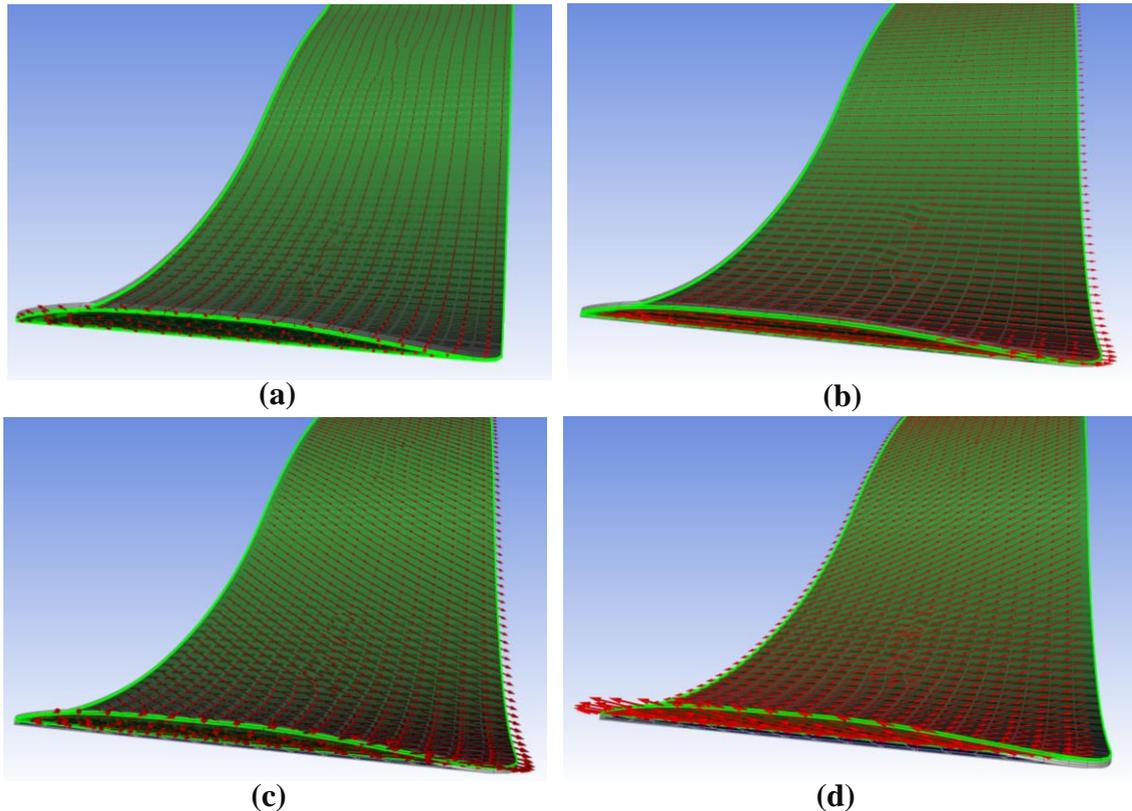
Nilai kualitas rata-rata *meshing* pada model geometri *running blade prosthetic* ini sebesar 0,9985. Dengan angka tersebut nilai kualitas *meshing* dari *running blade prosthetic* tergolong dalam parameter *excellent*.



Gambar 3. 13 *Orthogonal Quality dari meshing Running Blade Prosthetic*

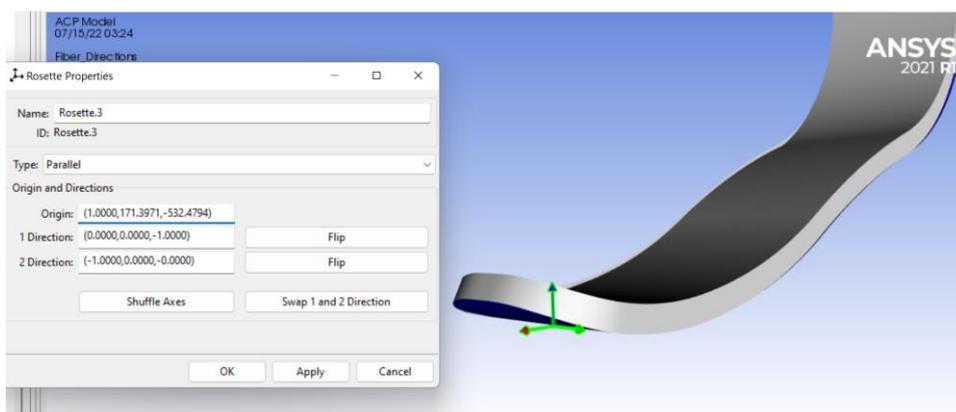
3.7.6 Set-up Komposit

Untuk menyusun lapisan komposit ini diperlukan *set-up* material dalam fitur ACP (*pre*). Pada fitur ini, material komposit yang sudah di desain akan dibagi menjadi beberapa lapisan surface dan ditentukan arah orientasi seratnya pada setiap lapisan. Set-up komposit hanya dilakukan pada geometri yang menggunakan material komposit seperti geometri pada *running blade prosthetic*. Dalam melakukan *set-up* material komposit terdapat beberapa tahap. Tahap pertama adalah mendefinisikan material komposit yang akan diaplikasikan pada model serta menentukan ketebalan awal material. Pada penelitian ini digunakan material komposit sisal/epoxy dan palem/epoxy dengan ketebalan awal setiap lapisan sebesar 0.25 mm seperti pada Gambar 3.14 dibawah ini.



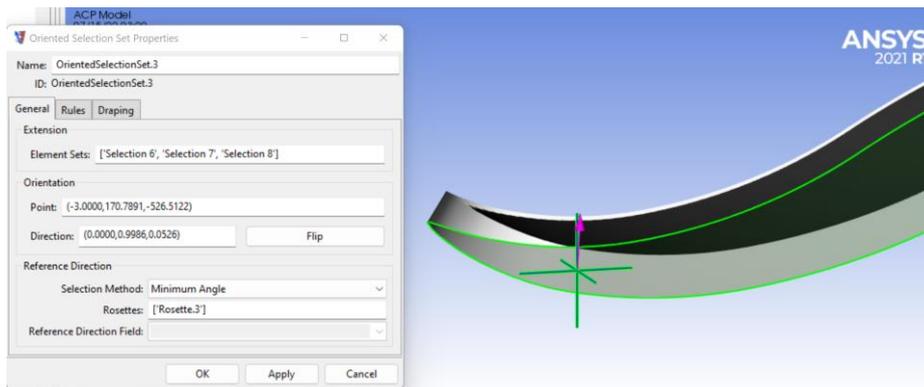
Gambar 3. 16 Arah Orientasi Sudut: (a) 0° , (b) 90° , (c) 45° , dan (d) -45°

Tahap selanjutnya adalah menentukan sumbu *rosettes* yang akan digunakan. Rosettes sendiri digunakan untuk menentukan arah orientasi komposit dan arah *set-up* komposit. Dimana terdapat sumbu x pada *rosettes* yang berfungsi sebagai acuan orientasi 0° dari material komposit dan sumbu z yang berfungsi sebagai acuan dalam *set-up* lapisan komposit seperti Gambar 3.17 dibawah ini.



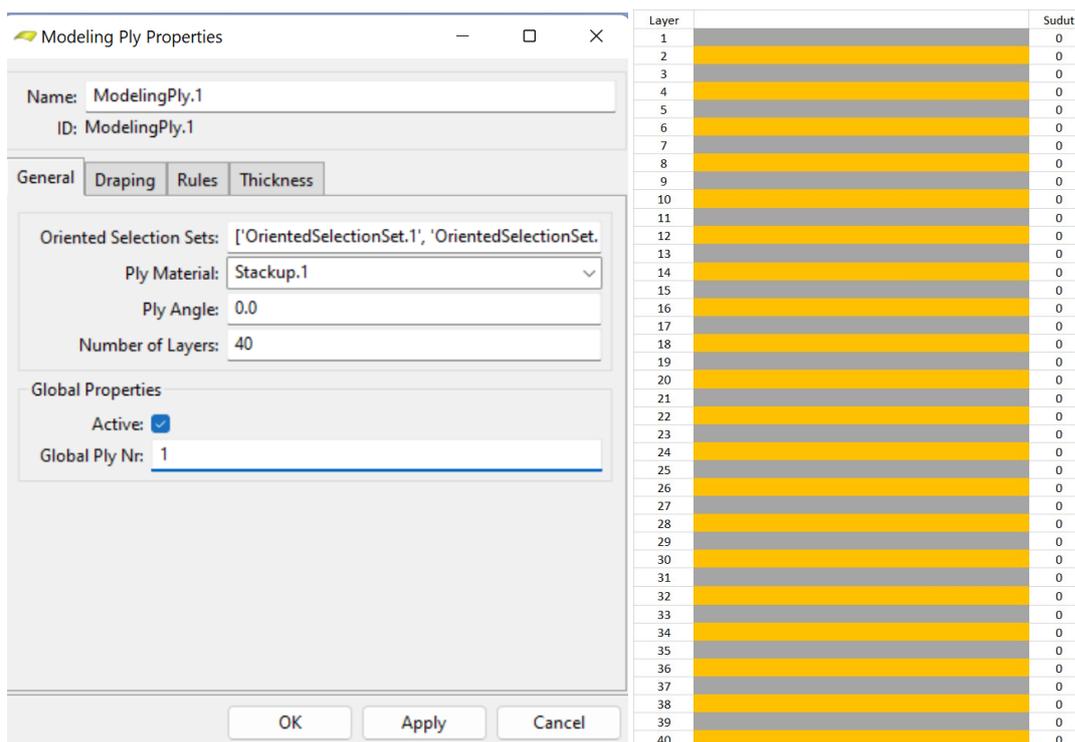
Gambar 3. 17 Menentukan salah satu Sumbu *Rosettes*

Kemudian, dilanjutkan dengan menentukan *Oriented Selection Sets* atau umumnya disingkat dengan sebutan OSS. OSS sendiri digunakan untuk menentukan arah dalam *set-up* lapisan komposit. Perlu dipastikan bahwa arah *set-up* tersebut searah dengan arah sumbu z pada *rosettes* seperti Gambar 3.18 dibawah ini.



Gambar 3. 18 Menentukan salah satu Sumbu *Oriented Selection Sets* (OSS)

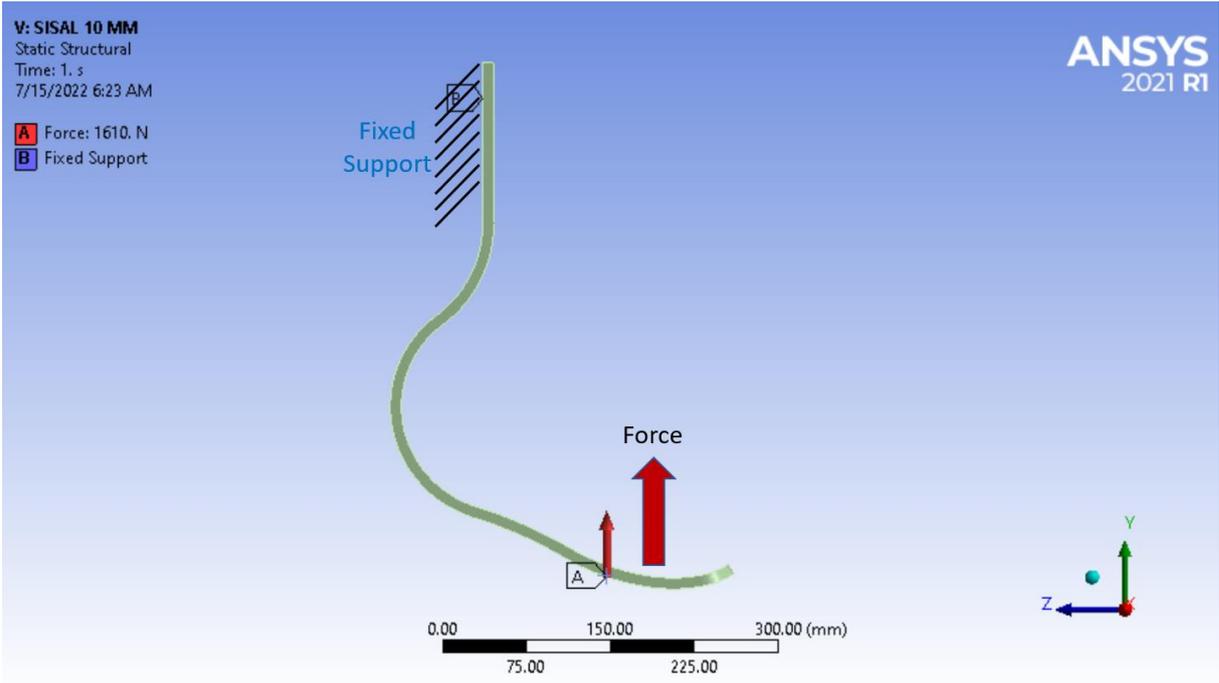
Selanjutnya, menentukan *modelling group*. Pada tahap ini, jumlah lapisan yang digunakan pada ketebalan 10 mm sebanyak 40 lapisan. Setiap lapisan terdiri dari lamina dengan ketebalan sebesar 0,25. Lapisan ini dapat digunakan dalam menyusun komposit pada surface model yang telah dibuat seperti Gambar 3.19 dibawah ini.



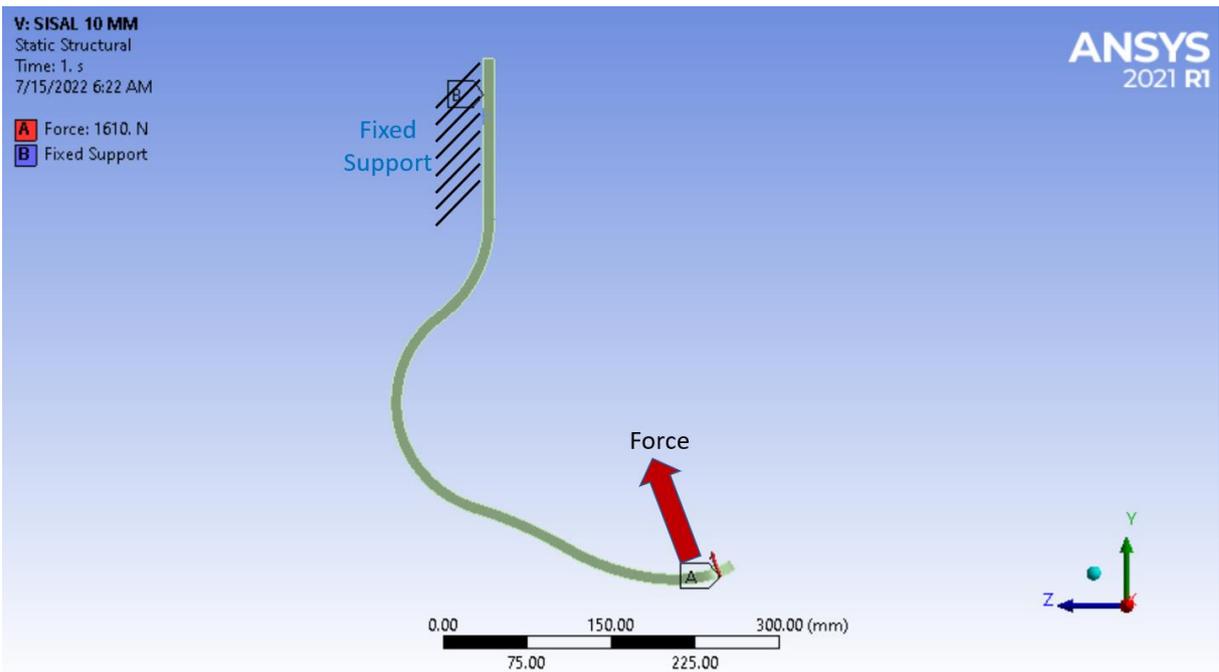
Gambar 3. 19 Menentukan jumlah layer yang digunakan pada *modelling group*

3.7.7 Pengujian *Running Blade Prosthetic*

Pengujian statik dilakukan menggunakan ANSYS Static Structural. Pada proses ini *running blade prosthetic* akan diberikan *fixed support* pada plat bagian atas dan plat bagian bawah akan diberikan gaya normal terhadap sumbu z yang dimana deformasinya akan mengarah pada arah sumbu y. Berikut gambar dari *boundary condition* pada *set-up* pembebanan yang diberikan pada *running blade prosthetic*.



Gambar 3. 20 *Boundary Condition Midstance*



Gambar 3. 21 *Boundary Condition Forefoot*

3.8 Validasi Simulasi

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

3.8.1 Rules of Mixture

Berdasarkan perumusan yang terdapat pada buku *Engineering Mechanics of Composite Materials* (M.Daniel & Ishai, 2006), perumusan *Rule of Mixture* merupakan sebuah metode untuk mengetahui nilai properties dari massa jenis, *shear modulus*, *young modulus*, dan *poisons ratio* yang dimiliki oleh sebuah komposit. Perumusan ini akan dijadikan dasaran validasi bagi Penulis guna mendapatkan nilai properties dari material komposit dan dibandingkan dengan hasil simulasi mikrostruktur komposit dari *software ANSYS Material Designer*. Pada contoh perhitungan, material yang digunakan adalah komposit Serat Kenaf-Polyester Resin menggunakan fraksi volume 30%. Nilai massa jenis akan didapatkan dengan perhitungan berikut ini.

$$\rho_c = v_f \rho_f + v_m \rho_m$$

$$\rho_c = (0,4 \times 1450) + (0,6 \times 1160)$$

$$\rho_c = 1276 \text{ kg/mm}^3$$

Setelah didapatkan nilai dari massa jenis, maka nilai *longitudinal young modulus* dapat dihitung menggunakan perumusan berikut ini.

$$E_1 = v_f E_f + v_m E_m$$

$$E_1 = (0,4 \times 7) + (0,6 \times 3,4)$$

$$E_1 = 4,84 \text{ GPa} = 4840 \text{ MPa}$$

Setelah mendapatkan nilai *longitudinal young modulus*, nilai *transverse young modulus* dapat dihitung dengan menggunakan perumusan sebagai berikut.

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

$$E_2 = \frac{3,4(1 + (1)(0,34615)(0,4))}{(1 - (0,34615)(0,4))}$$

$$E_2 = 4,493 \text{ GPa} = 4493 \text{ MPa}$$

Lalu untuk nilai *longitudinal shear modulus* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut.

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

$$G_{12} = 1,25 \frac{(1 + 0,4) \times 2,5 + 0,6 \times 1,25}{0,6 \times 2,5 + (1 + 0,4) \times 1,25}$$

$$G_{12} = 1,6346 \text{ GPa} = 1634,6 \text{ MPa}$$

Setelah mendapatkan nilai *longitudinal shear modulus*, nilai dari *transverse shear modulus* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut ini.

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

$$G_{23} = \frac{1,25 \times 4,0476 \times (1,25 + 2,5) + 2 \times 1,25 \times 2,5 + 4,0476 \times (2,5 - 1,25) \times 0,4}{4,0476 \times (1,25 + 2,5) + 2 \times 2,5 \times 1,25 - (4,0476 + 2 \times 1,25) (2,5 - 1,25) \times 0,4}$$

$$G_{23} = 1,6147 \text{ GPa} = 1614,7 \text{ MPa}$$

Lalu untuk mendapatkan nilai dari *longitudinal poissons ratio* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut ini.

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

$$v_{12} = 0,4 \times 0,4 + 0,6 \times 0,36$$

$$v_{12} = 0,376$$

Dan untuk mendapatkan nilai *transverse poissons ratio* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini.

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

$$v_{23} = \frac{4460,2}{2 \times 1618,2} - 1$$

$$v_{23} = 0,3912$$

Dari hasil perhitungan yang telah didapatkan, maka dapat dibandingkan dengan hasil dari *software ANSYS Material Designer*. Berikut ini adalah hasil dari perbandingan hasil perhitungan ROM dengan Hasil *Material Designer*.

Tabel 3. 9 Perbandingan Nilai Elastic Properties Perhitungan ROM dengan Hasil *Material Designer*

Parameter	Hasil <i>Material Designer</i>	Hasil Perhitungan ROM	Error
ρ	1276	1276	0 %
E1	4841,6	4840	0,03%
E2	4460,2	4493	0,73%
G12	1634,6	1634,6	0,00%
G23	1618,1	1614,7	0,21%
v_{12}	0,37747	0,376	0,39%
v_{23}	0,37823	0,3912	3,43%

Berdasarkan hasil yang didapatkan dan dihitung nilai errornya maka dapat ditarik kesimpulan bahwa data yang didapatkan dari *ANSYS Material Designer* dapat digunakan dalam proses simulasi.

3.8.2 Perhitungan *Orthotropic Stress Limit*

Setelah mendapatkan nilai dari *orthotropic elasticity* dari gabungan serat alami dan matriks dengan menggunakan *ANSYS Material Designer*, Langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan *orthotropic stress limit* atau *stress* izin untuk ke setiap arah agar dapat memprediksi atau melakukan pendekatan kekuatan dari komposit yang dilakukan simulasi untuk berbagai arah. Perhitungannya *orthotropic stress limit* meliputi *tensile* ($x y z$), *compressive* ($x y z$), dan *shear* ($x y z$). Pada perhitungan *orthotropic stress limit*, referensi yang digunakan berasal dari dua buku yaitu “*Engineering Mechanics of Composite Materials*” (M.Daniel & Ishai, 2006), dan “*Composite Structures : Design, Mechanics, Analysis, Manufacturing, and Testing*” (Kumar, 2017). Setelah melakukan perhitungan menggunakan dua perumusan yang ada pada kedua buku tersebut, hasil perhitungan dicocokkan dengan material serat sisal dengan fraksi volume serat 30% pada penelitian “*Influence of the anisotropy of sisal fibers on the mechanical properties of high performance unidirectional biocomposite*”

lamina and micromechanical models” (Zuccarello et al., 2021) digunakan untuk mendapatkan acuan secara eksperimental. Setelah membandingkan kedua perhitungan dari buku yang digunakan maka akan dapat ditarik kesimpulan bahwa perumusan mana yang dianggap valid untuk digunakan untuk melanjutkan simulasi menggunakan *software* ANSYS

Tabel 3. 10 Material Properties dari Sisal/Green Epoxy (Zuccarello et al., 2021)

Sisal/ Green Resin		
Properties	Sisal	Green Resin
Tensile Strength (MPa)	675	45
Young Modulus (GPa)	40100	2500
Poisson's Ratio	0.38	0.61
Shear Modulus (GPa)	905.8	1840

3.8.2.1 Perhitungan Buku Engineering Mechanics of Composite Materials

Perumusan yang terdapat pada buku *Engineering Mechanics of Composite Materials*, (Daniel & Ishai, 2006) memiliki persamaan untuk masing-masing *orthotropic stress limit* yang ada. Untuk mendapatkan nilai dari *longitudinal tensile* maka akan digunakan perumusan sebagai berikut.

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

$$\varepsilon_m = \frac{45}{2500} \quad \varepsilon_f = \frac{675}{40100}$$

$$\varepsilon_m = 0,018 > \varepsilon_f = 0,01683$$

Jika $\varepsilon_m^u > \varepsilon_f^u$, maka persamaan tensile longitudinal X direction yang akan digunakan adalah:

$$F_{1t} = F_{ft} \left(V_f + V_m \frac{E_m}{E_f} \right)$$

$$F_{1t} = 675 \left(0,3 + 0,7 \frac{2500}{40100} \right)$$

$$F_{1t} = 231,957 \text{ MPa}$$

Setelah mendapatkan hasil *longitudinal tensile x direction*, maka nilai *tensile transverse strength* akan menggunakan perumusan sebagai berikut:

$$k_\sigma = \frac{1 - V_f \left(1 - \frac{E_m}{E_f} \right)}{1 - \left(\frac{4V_f}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{E_m}{E_f} \right)}$$

$$k_\sigma = \frac{1 - 0,3 \left(1 - \frac{2500}{40100} \right)}{1 - \left(\frac{4 \times 0,3}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{2500}{40100} \right)}$$

$$k_\sigma = 1,7097$$

$$F_{2t} = \frac{1 - v_m}{k_\sigma (1 + v_m) (1 - 2v_m)} (F_{mt} - \varepsilon_{rm} E_m)$$

$$F_{2t} = \frac{1 - 0,38}{1,54(1 + 0,38)(1 - (2 \times 0,38))} (45 - (1 \times 2500))$$

$$F_{2t} = 48,17 \text{ MPa}$$

Setelah itu untuk mendapatkan nilai dari *compressive strength longitudinal* maka dapat dihitung dengan perumusan sebagai berikut:

$$F_{1c} = 2F_{fs} \left[V_f + (1 - V_f) \frac{E_m}{E_f} \right]$$

$$F_{1c} = 2 \times 19,1 \left[0,3 + (1 - 0,3) \frac{2500}{40100} \right]$$

$$F_{1c} = 13,127 \text{ MPa}$$

Dan untuk mendapatkan *compressive strength transverse* digunakan perumusan sebagai berikut:

$$F_{2c} = \frac{F_{mc} + \sigma_{rm}}{k_\sigma}$$

$$F_{2c} = \frac{78,1 + 1}{1,7079}$$

$$F_{2c} = 46,26 \text{ MPa}$$

Lalu untuk mendapatkan nilai *In-Plane Shear Strength* akan menggunakan persamaan berikut ini:

$$k_\tau = \frac{1 - V_f \left(1 - \frac{G_m}{G_{12f}}\right)}{1 - \left(\frac{4V_f}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{G_m}{G_{12f}}\right)}$$

$$k_\tau = \frac{1 - 0,3 \left(1 - \frac{905,8}{1840}\right)}{1 - \left(\frac{4 \times 0,3}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{905,8}{1840}\right)}$$

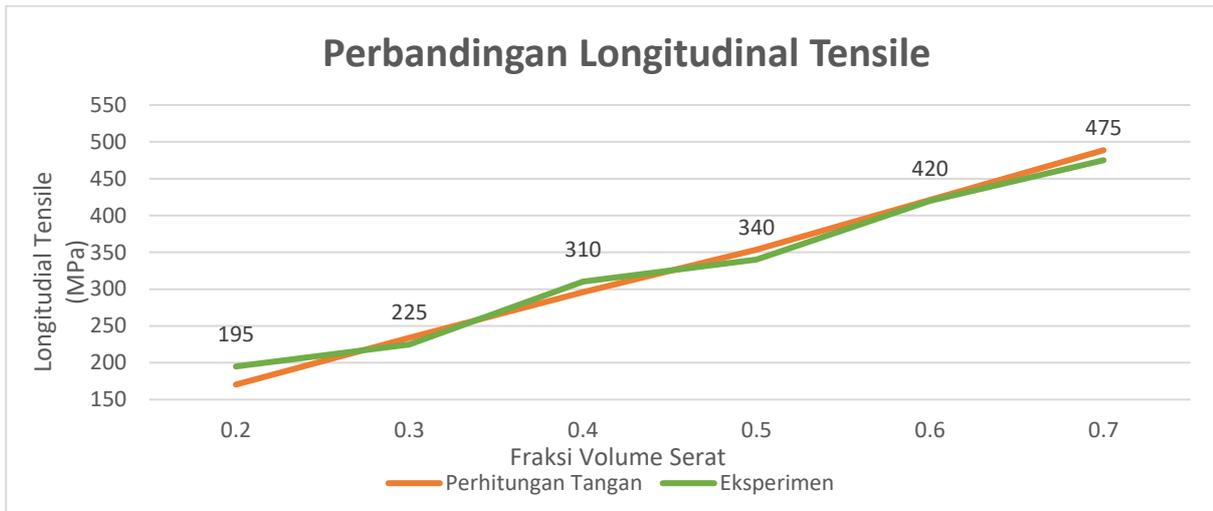
$$k_\tau = 1,235$$

$$F_6 = \frac{F_{ms}}{k_\tau}$$

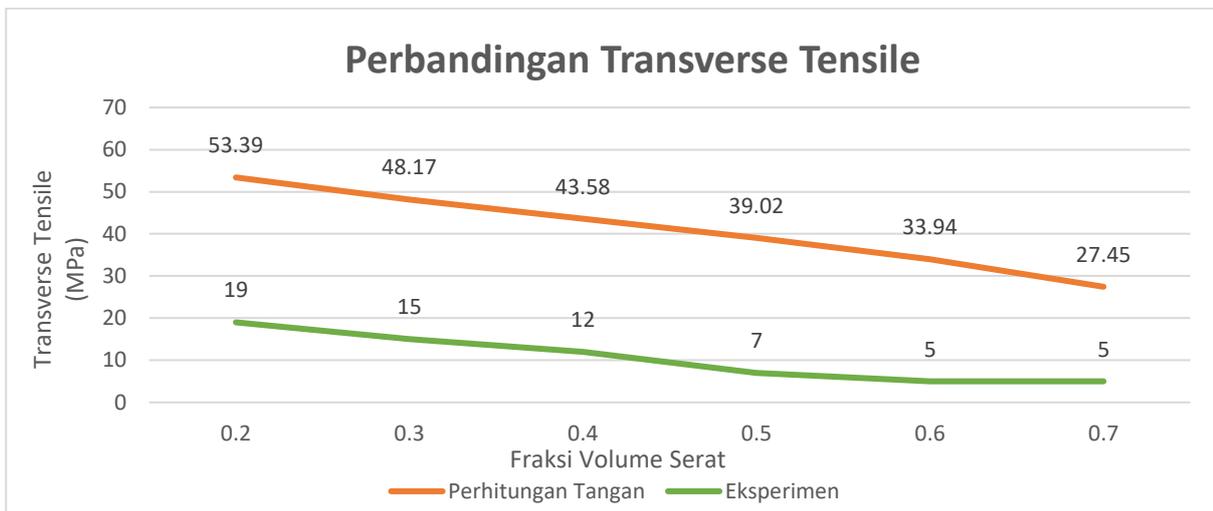
$$F_6 = \frac{25}{1,235}$$

$$F_6 = 20,2354 \text{ MPa}$$

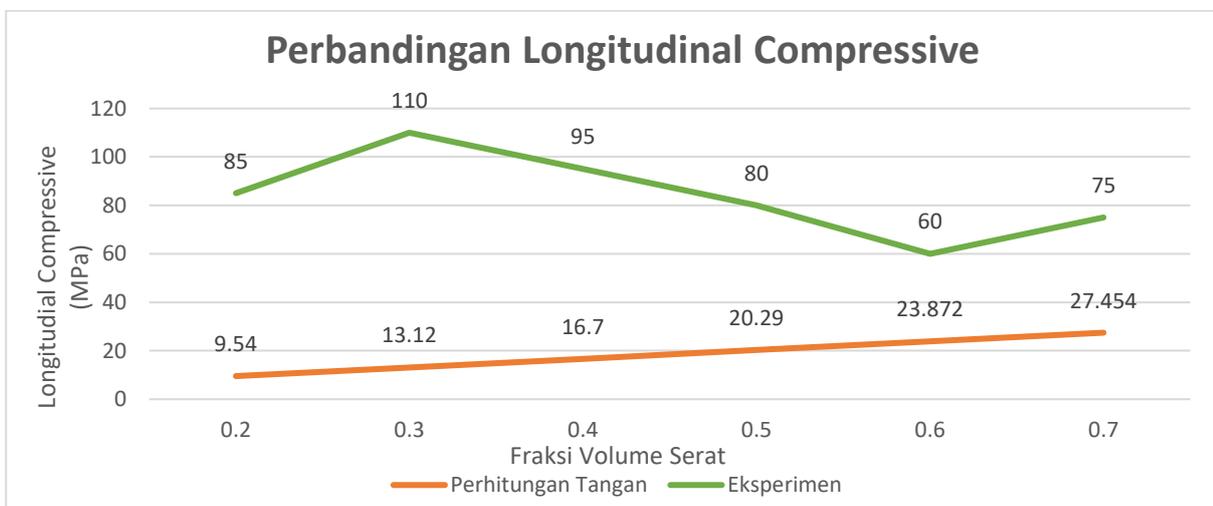
Setelah mendapatkan hasil dari masing-masing *orthotropic stress limit*, maka hasil tersebut dapat dibandingkan dengan penelitian eksperimen. Berikut ini adalah grafik dari perbandingan perhitungan buku *Engineering Mechanics of Composite Materials* dengan penelitian *Influence of the anisotropy of sisal fibers on the mechanical properties of high performance unidirectional biocomposite lamina and micromechanical models*.



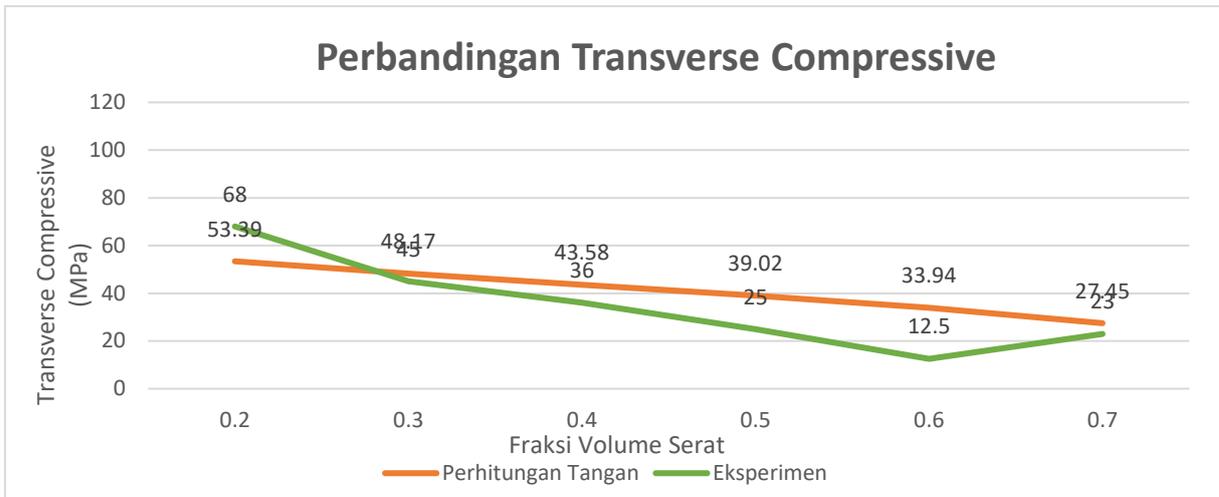
Gambar 3. 22 Grafik Perbandingan Longitudinal Tensile dengan Eksperimen



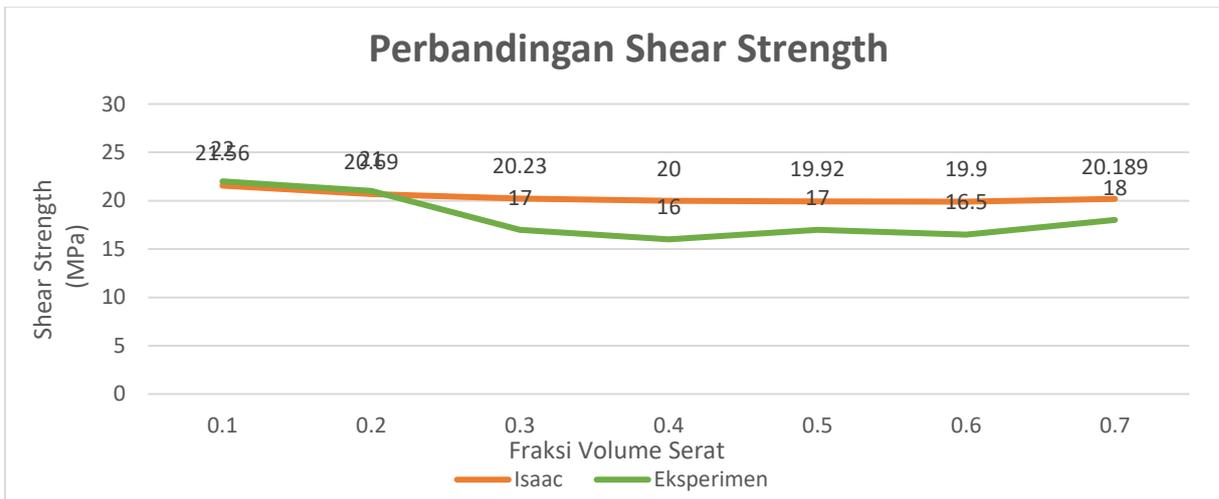
Gambar 3. 23 Grafik Perbandingan Transverse Tensile dengan Eksperimen



Gambar 3. 24 Grafik perbandingan Longitudinal Compressive dengan Eksperimen



Gambar 3. 25 Grafik perbandingan Transverse Compressive dengan Eksperimen



Gambar 3. 26 Grafik Perbandingan In Plane Shear dengan Eksperimen

Berdasarkan hasil perhitungan yang sudah dilakukan untuk setiap fraksi volume yang terdapat pada eksperimen, dilakukan plot pada grafik maka didapatkan kesimpulan bahwa trend hasil grafik yang cukup mengikuti trend yang dihasilkan oleh eksperimen. Perbedaan nilai dapat dilihat pada nilai *longitudinal compressive* yang dimana memiliki tren yang berbeda dengan hasil eksperimen

3.8.2.2 Perhitungan Buku Composites Structures: Design, Mechanics Analysis, Manufacturing, and Testing

Perumusan yang terdapat pada buku *Composites Structures: Design, Mechanics Analysis, Manufacturing, and Testing* ((Kumar, 2017) digunakan untuk menjadi perbandingan perumusan untuk mencari *orthotropic stress limit*. Nilai pertama yang akan dicari adalah nilai dari *longitudinal tensile strength* yang dimana akan didapatkan melalui perumusan berikut ini.

$$\epsilon_m = \frac{\sigma_m}{E_m} \quad \epsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f}$$

$$\varepsilon_m = \frac{45}{2500} \quad \varepsilon_f = \frac{675}{40100}$$

$$\varepsilon_m = 0,018 > \varepsilon_f = 0,01683$$

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

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

$$(\sigma_{x_c}^T)_{ult} = (675) 0,3 + (0,016832) 2500 (1 - 0,3)$$

$$(\sigma_{x_c}^T)_{ult} = 232,77 \text{ MPa}$$

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

$$(\sigma_{y_c}^T)_{ult} = (\sigma_m^T)_{ult} \left(1 - 2 \sqrt{\frac{V_f}{\pi}} \right)$$

$$(\sigma_{y_c}^T)_{ult} = 45 \left(1 - 2 \sqrt{\frac{0,3}{\pi}} \right)$$

$$(\sigma_{y_c}^T)_{ult} = 17,18 \text{ MPa}$$

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

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

$$= 2 \times 19,1 \left[0,3 + \frac{2500}{40100} (1 - 0,3) \right]$$

$$(\sigma_{x_c}^C)_{ult} = 13,12 \text{ MPa}$$

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

$$(\sigma_{y_c}^C)_{ult} = (\sigma_m^C)_{ult} \left(1 - 2 \sqrt{\frac{V_f}{\pi}} \right)$$

$$(\sigma_{y_c}^C)_{ult} = 78,1 \left(1 - 2 \sqrt{\frac{0,3}{\pi}} \right)$$

$$(\sigma_{y_c}^C)_{ult} = 29,81 \text{ MPa}$$

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

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

$$(\tau_{xy_c})_{ult} = 1111,8 \left[1 + \left(\frac{905,8}{1840} - 1 \right) 0,3 \right] 0,027599$$

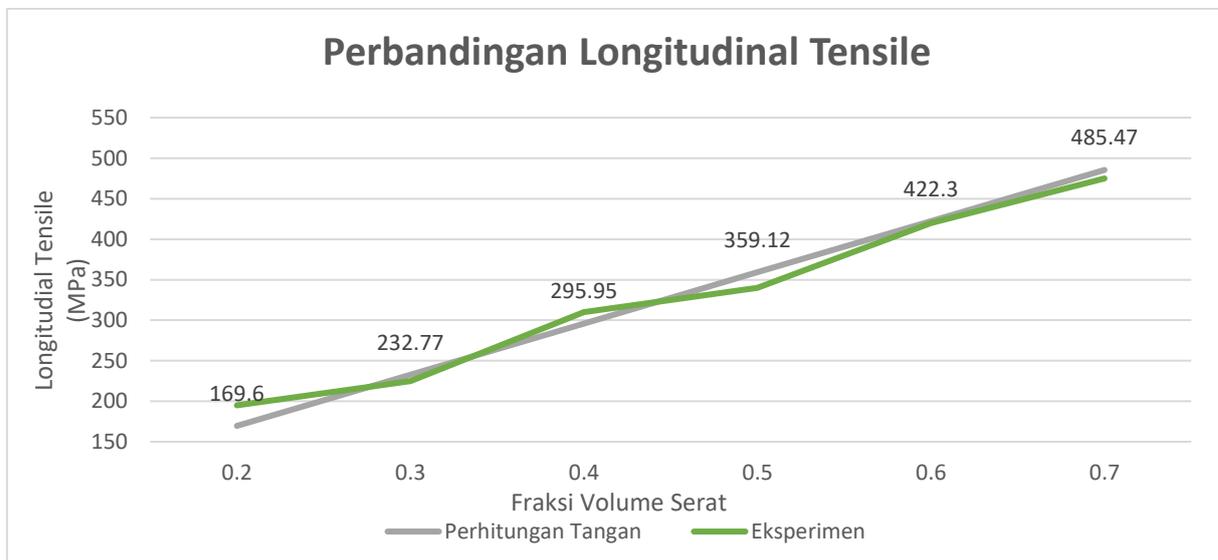
$$(\tau_{xy_c})_{ult} = 26,011$$

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

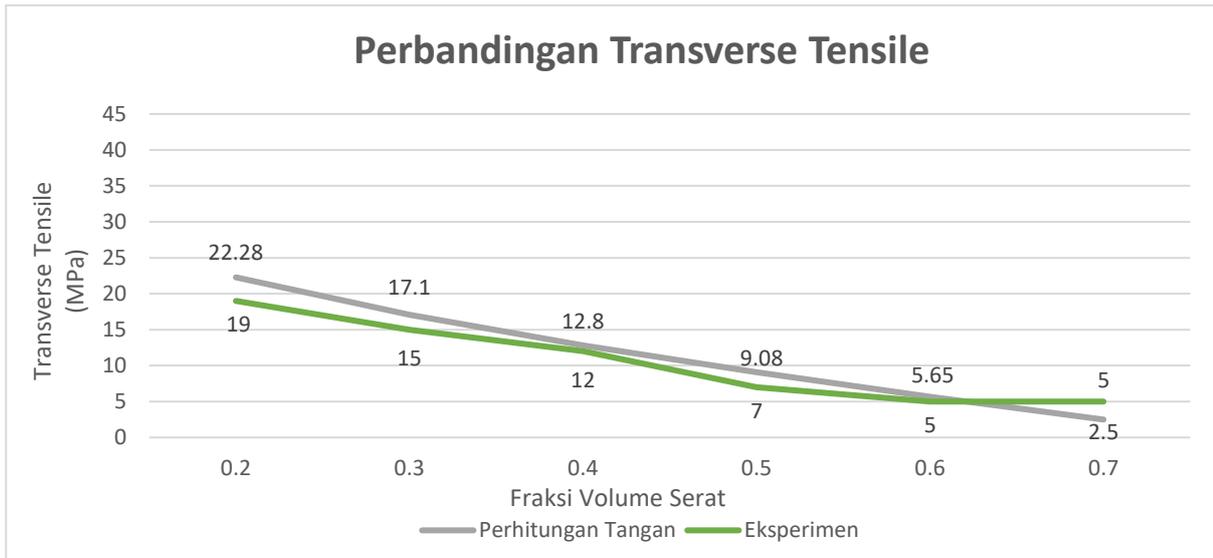
$$(\tau_{yz_c})_{ult} = \frac{26,011}{2} = 13,0055 \text{ MPa}$$

Setelah mendapatkan hasil perhitungan dengan menggunakan perumusan yang terdapat pada buku *Composites Structures: Design, Mechanics Analysis, Manufacturing, and Testing*, hasil perhitungan akan dibandingkan dengan hasil eksperimen yang terdapat pada penelitian *Influence of the anisotropy of sisal fibers on the mechanical properties of high performance unidirectional biocomposite lamina and micromechanical models*.

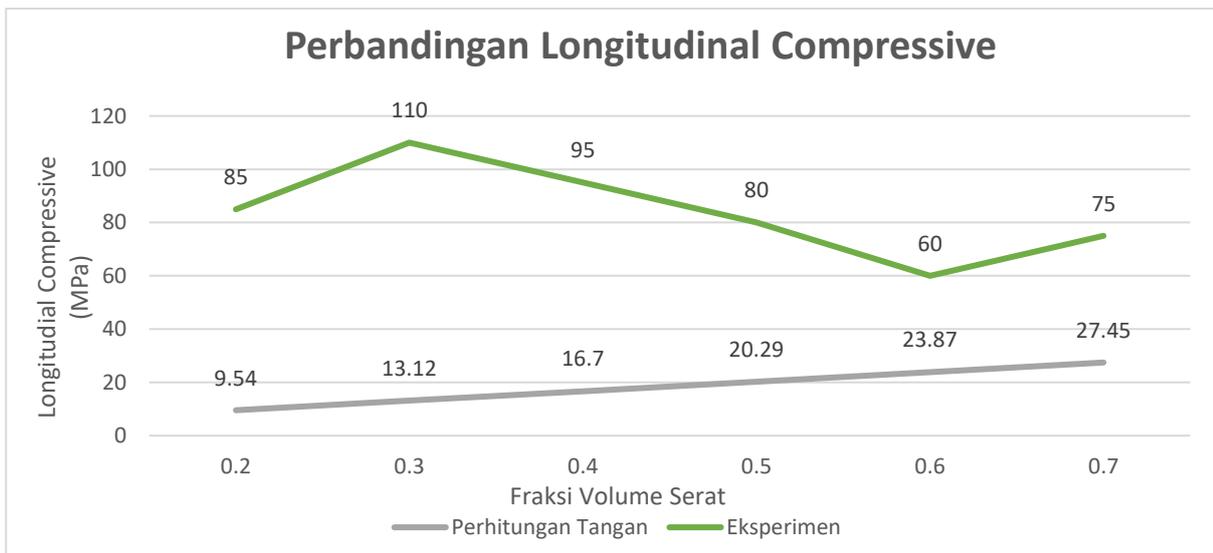
Berikut hasil perbandingan antara perumusan menggunakan buku *Composites Structures: Design, Mechanics Analysis, Manufacturing, and Testing* dengan hasil eksperimen berdasarkan penelitian *Influence of the anisotropy of sisal fibers on the mechanical properties of high performance unidirectional biocomposite lamina and micromechanical models*. Yang dituangkan dalam bentuk gambar berikut ini.



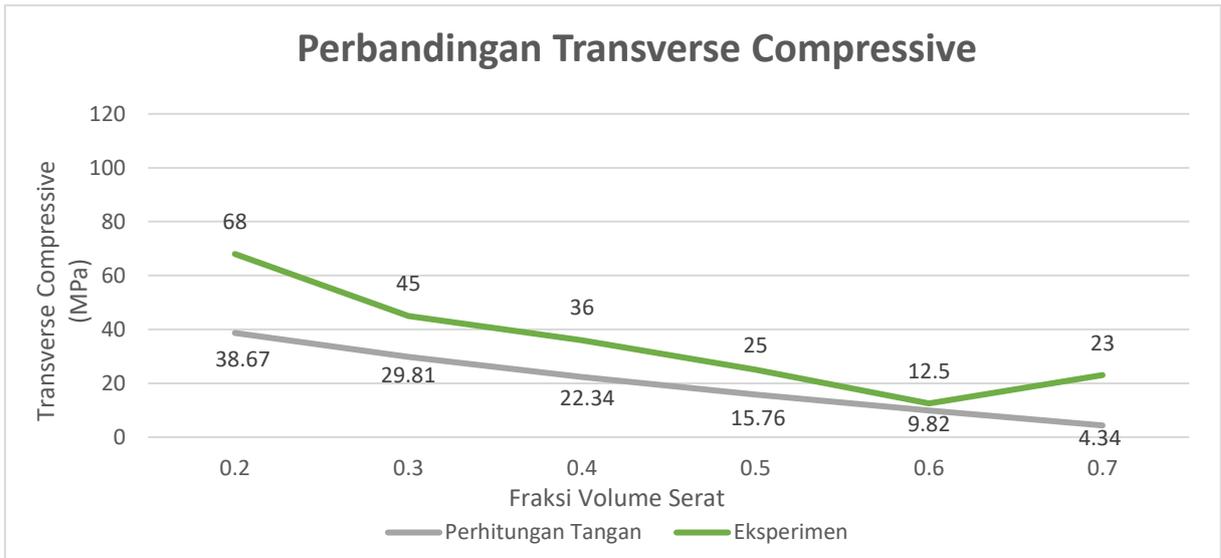
Gambar 3. 27 Grafik Perbandingan Longitudinal Tensile dengan Eksperimen



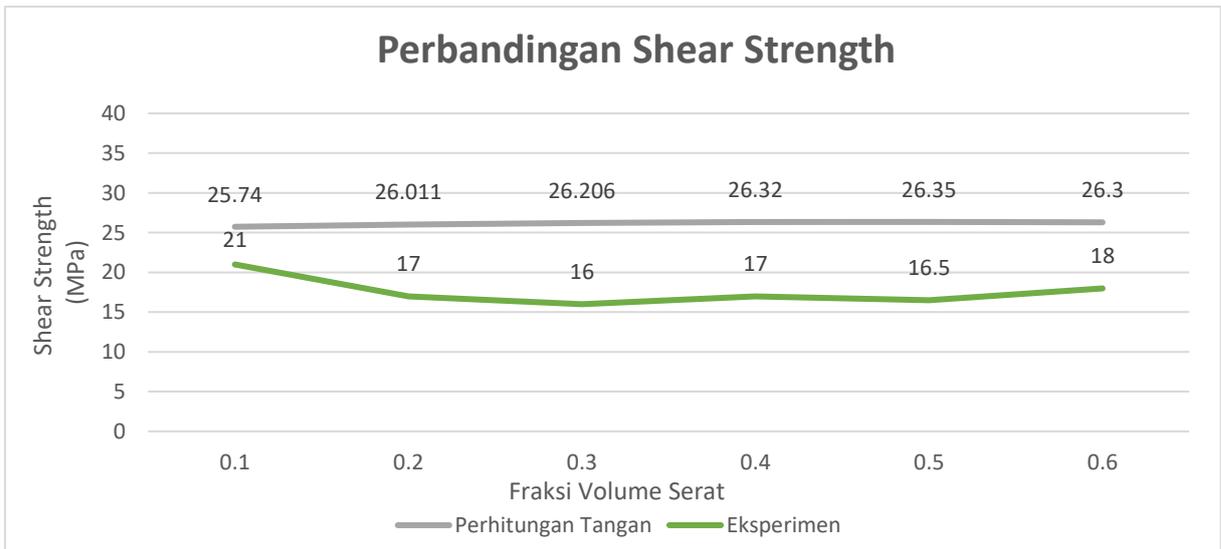
Gambar 3. 28 Grafik Perbandingan Transverse Tensile dengan Eksperimen



Gambar 3. 29 Grafik Perbandingan Longitudinal Compressive Strength dengan Eksperimen



Gambar 3.30 Grafik Perbandingan Transverse Compressive Strength dengan Eksperimen



Gambar 3.31 Grafik Perbandingan In Plane Shear Strength dengan Eksperimen

Setelah dilakukan perhitungan sesuai dengan variasi fraksi volume yang ada pada eksperimen maka dapat disimpulkan bahwa hasil perhitungan cukup mendekati hasil eksperimen. Terdapat perbedaan nilai *longitudinal compressive strength*, namun hasil nilai *orthotropic stress limit* yang lainnya memiliki tren yang sama bahkan hampir memiliki nilai yang mirip. Sehingga pada akhirnya akan dilakukan perbandingan antara kedua referensi buku yang digunakan sebagai rumus perhitungan *orthotropic stress limit*. Dikarenakan nilai hasil perhitungan dari referensi buku *Composites Structures: Design, Mechanics Analysis, Manufacturing, and Testing* ((Kumar, 2017)) lebih mendekati dengan hasil eksperimen yang dilakukan pada penelitian penelitian *Influence of the anisotropy of sisal fibers on the mechanical properties of high performance unidirectional biocomposite lamina and micromechanical models* ((Zuccarello et al., 2021)) maka referensi dari ((Kumar, 2017)) akan digunakan sebagai nilai *orthotropic stress limit* dari kedua material yang akan digunakan pada penelitian ini.

3.8.3 Desain *Running Blade Prosthetic*

Validasi Simulasi penelitian terdahulu menggunakan penelitian yang dilakukan oleh (Ainhoa Murillo L, 2018). Validasi tersebut dilakukan untuk memastikan langkah-langkah dari proses simulasi yang dilakukan telah sesuai dengan prosedur yang ada, sehingga menghasilkan hasil simulasi yang mendekati dari hasil penelitian sebelumnya. Adapun Penulis telah melakukan validasi dengan mengikuti prosedur yang mendekati seperti pada penelitian terdahulu. Pada validasi ini didapatkan hasil pada dua pengujian *running blade prosthetic* dengan pembebanan yang berbeda terhadap deformasi yang terjadi. Dapat dilihat pada Tabel 3.11 dan 3.12 merupakan perbandingan antara hasil simulasi dan hasil simulasi pada penelitian sebelumnya.

Tabel 3. 11 Perbandingan Hasil Simulasi dengan penelitian terdahulu pada pengujian *midstance*

Beban (N)	Deformasi (mm)	Deformasi berdasarkan penelitian terdahulu	Error
0	0	0	0%
100	1.2883	1.8	28%
200	2.5765	2.8	8%
300	3.8649	4	3%
400	5.1532	5	3%
500	6.4415	6.4	1%
600	7.7298	8	3%

Tabel 3. 12 Perbandingan Hasil simulasi dengan penelitian terdahulu pada pengujian *forefoot*

Beban (N)	Deformasi (mm)	Deformasi Berdasarkan penelitian terdahulu	Error
0	0	0	0
200	2,9591	2,8	6%
400	5,9182	5,7	4%
600	8,8773	8,7	2%
800	11,8364	11,9	1 %
1000	14,7955	15,3	3%

Berdasarkan Tabel 3.11 dan 3.12 pada pengujian *midstance dan forefoot* mengalami *error* atau perbedaan nilai yang tidak begitu signifikan. maka dapat disimpulkan bahwa langkah langkah yang dilakukan pada penelitian ini sudah ter-verifikasi dan dapat dilakukan pengambilan data.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada Bab ini terdapat pembahasan dan hasil analisa penelitian tentang kekuatan dari *running blade prosthetic* dengan variasi penyusunan berdasarkan orientasi sudut serat dan ketebalan serta material yang digunakan. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga pada ANSYS 2021 RI.

4.1 Hasil Simulasi Penelitian dan Pembahasan

Penelitian ini dilakukan untuk menemukan orientasi sudut dan ketebalan yang terbaik dalam mendesain *running blade prosthetic* dengan menggunakan material komposit sisal/epoxy dan palem/epoxy agar memperoleh kekuatan yang baik berdasarkan standar pembebanan dari ISO 10328 dengan dua jenis pengujian yaitu *midstance* dan *forefoot*. Dimana dalam penelitian ini dilakukan simulasi untuk tiap variasi kombinasi sudut yaitu $[0/90/45/-45]_{10}$, $[0/90]_{20}$, $[0/45/-45/0]_{10}$, $[0]_{40}$, $[45/-45]_{20}$. Kemudian dengan kombinasi sudut yang terbaik akan dilakukan simulasi pada variasi ketebalan. Selanjutnya hasil simulasi dari variasi kombinasi sudut dan variasi ketebalan akan diperoleh data berupa *safety factor*, maksimum tegangan Von-Misses, total deformasi yang terjadi pada desain *running blade prosthetic*. Selanjutnya akan dilakukan analisa terhadap pengujian *running blade prosthetic* menggunakan material komposit Serat Sisal/Epoxy dan Serat Palem/Epoxy.

4.2 Simulasi *Running Blade Prosthetic* Menggunakan Material Komposit Sisal/Epoxy

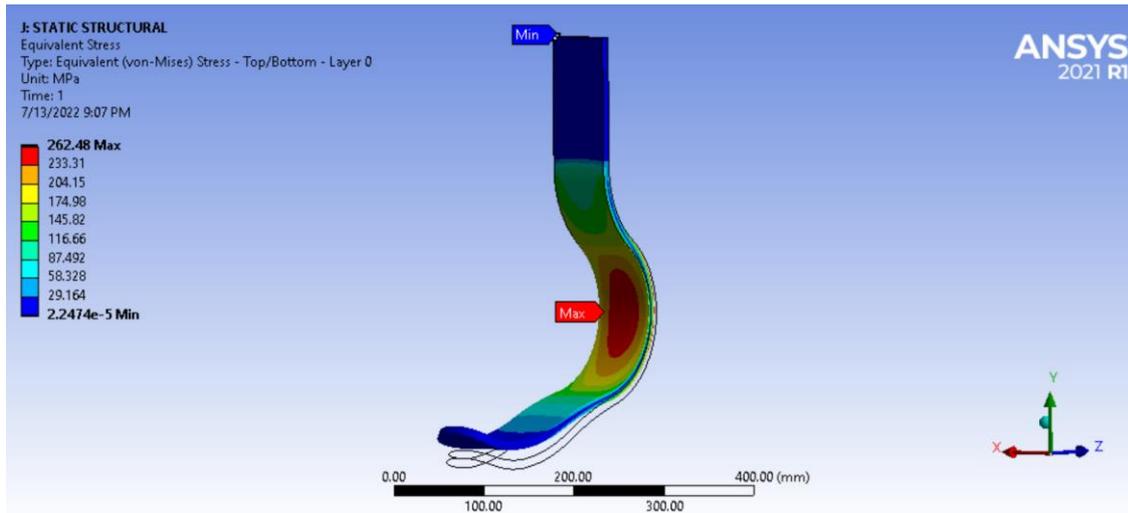
Pada simulasi ini akan dilakukan pengujian *running blade prosthetic* menggunakan material komposit sisal/epoxy dengan dua metode pengujian yaitu *midstance* dan *forefoot*. Kemudian simulasi ini akan diperoleh kombinasi sudut serat terbaik dan variasi ketebalan untuk menunjang desain dari *running blade prosthetic* yang aman.

4.2.1 Hasil Simulasi Pengujian *Midstance*

Hasil kombinasi sudut dan variasi ketebalan pengujian *midstance* pada desain *running blade prosthetic* ini akan dibandingkan dengan nilai tegangan maksimum Von-Misses *stress*, total deformasi, dan *safety factor*.

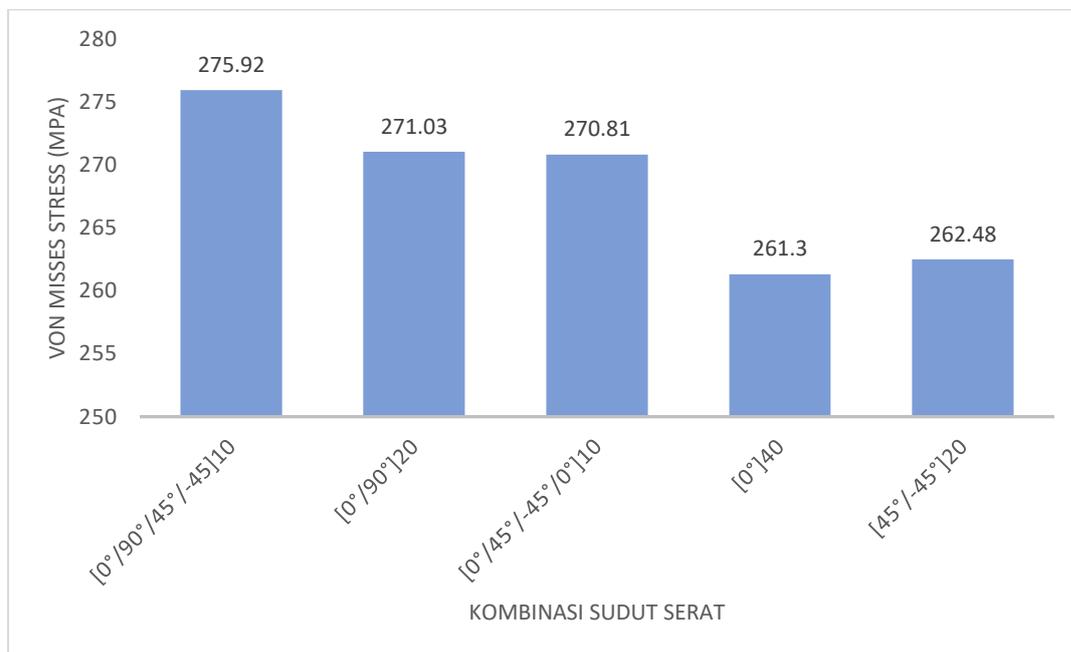
4.2.1.1 Pembahasan Nilai Equivalent *Stress*

Hasil yang didapatkan pada simulasi ini terhadap komposit serat sisal/epoxy yaitu tegangan Von-Misses. Tegangan Von-Misses digunakan untuk mencari nilai faktor keamanan struktur, dari nilai tegangan Von-Misses dapat diprediksi bahwa struktur akan mengalami kegalan atau tidak. Pada tiap variasi, nilai tegangan terbesar terdapat pada layer pertama atau layer terluar. Berdasarkan hasil simulasi untuk salah satu kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ dapat dilihat pada gambar 4. 1.



Gambar 4. 1 Hasil simulasi *running blade prosthetic* menggunakan material komposit sisal/epoxy dengan kombinasi sudut serat $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_{20}$ terhadap tegangan maksimum Von-Misses pada pengujian *midstance*

Berikut merupakan hasil keseluruhan dari variasi orientasi sudut $[0^{\circ}/90^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}]_{10}$, $[0^{\circ}/90^{\circ}]_{20}$, $[0^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/0^{\circ}]_{10}$, $[0^{\circ}]_{40}$, dan $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_{20}$ berdasarkan nilai tegangan maksimum von misses *stress* seperti gambar 4.2



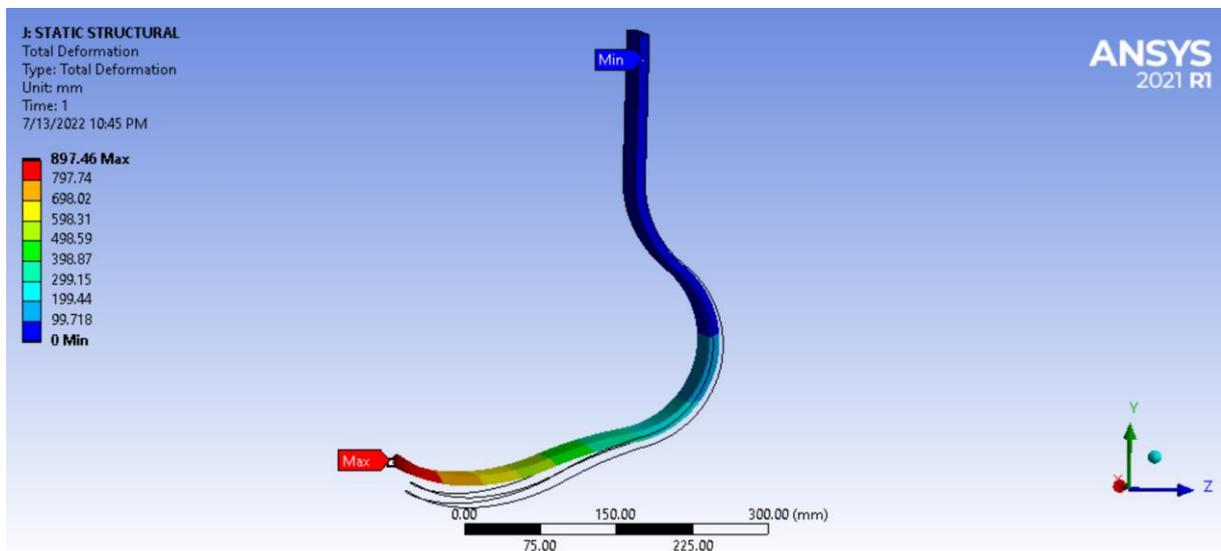
Gambar 4. 2 Grafik hasil simulasi pengujian *running blade prosthetic* menggunakan material sisal/epoxy dengan kombinasi sudut serat terhadap tegangan maksimum Von-Misses pada pengujian *midstance*

Dari data hasil simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.2 di atas, diketahui *running blade prosthetic* dengan penyusunan plat komposit menggunakan material komposit pada pengujian *midstance* dengan pemberian beban maksimal berdasarkan standar ISO 10328 pada level P3 yaitu 1610 N. Diperoleh bahwa untuk kombinasi sudut $[0^{\circ}/90^{\circ}/-45^{\circ}/-45^{\circ}]_{10}$ nilai

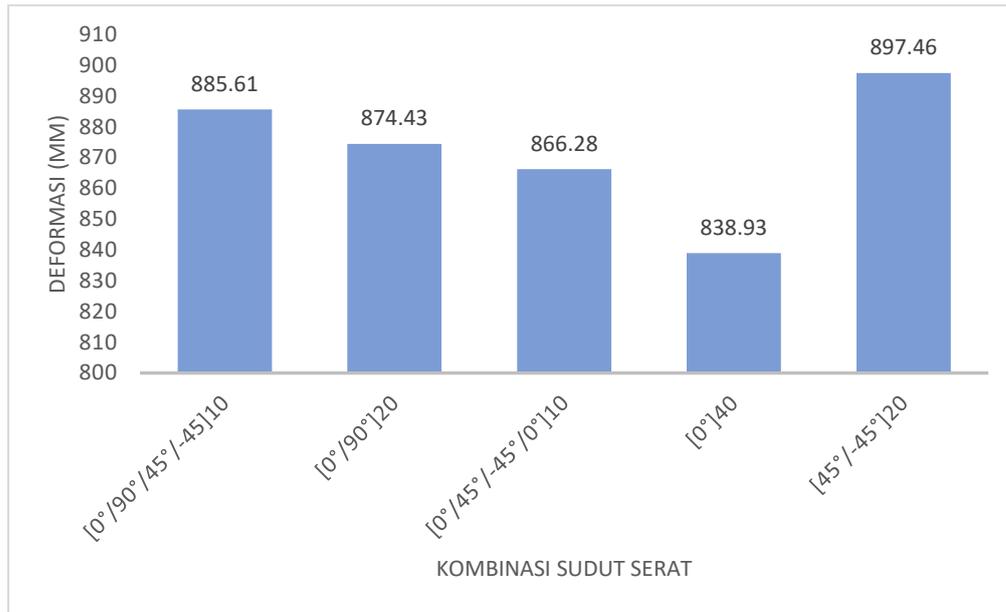
maksimum tegangan yang dialami oleh *running blade prosthetic* sebesar 275,92 MPa, dan untuk kombinasi sudut $[0^\circ/90^\circ]_{20}$ didapatkan nilai maksimum tegangan Von-Misses sebesar 271,03 MPa. Untuk penyusunan plat komposit dengan kombinasi sudut $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{10}$ diperoleh nilai tegangan maksimum yang dialami *running blade prosthetic* yaitu sebesar 270,81 MPa, dan untuk kombinasi sudut $[0^\circ]_{40}$ didapatkan nilai maksimum tegangan Von-Misses sebesar 261,3 MPa. Kemudian untuk kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ nilai tegangan maksimum yang dialami oleh *running blade prosthetic* yaitu sebesar 262,48 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 – Misses tertinggi. Secara keseluruhan nilai tegangan maksimum Von-Misses tertinggi berada pada kombinasi sudut $[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]_{10}$ dengan nilai sebesar 275,92 MPa. Kemudian untuk tegangan Von-Misses terendah terjadi pada kombinasi sudut serate $[0^\circ]_{40}$ dengan nilai tegangan sebesar 261,3 MPa. Pada teorinya, tegangan Von-Misses akan dibandingkan dengan *strength* dari material tersebut. Apabila tegangan yang dialami pada material semakin besar maka material tersebut semakin tidak aman. Sebaliknya jika tegangan yang dialami kecil maka tingkat keamanan material semakin baik. Berdasarkan grafik diatas bahwa kombinasi sudut $[0^\circ]_{40}$ memiliki tingkat keamanan yang paling baik dibandingkan versi kombinasi sudut lainnya.

4.2.1.2 Pembahasan Nilai Deformasi

Hasil simulasi deformasi yang terjadi pada *running blade prosthetic* dapat dilihat pada Gambar 4.3 merupakan hasil simulasi dari kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ dengan jenis pengujian *midstance*. Nilai deformasi terbesar berada pada ujung atau *tip*. Untuk hasil keseluruhan akan dipaparkan pada gambar 4.4.



Gambar 4. 3 Hasil Pengujian *running blade prosthetic* menggunakan material sisal/epoxy dengan kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ terhadap Deformasi pada pengujian *midstance*

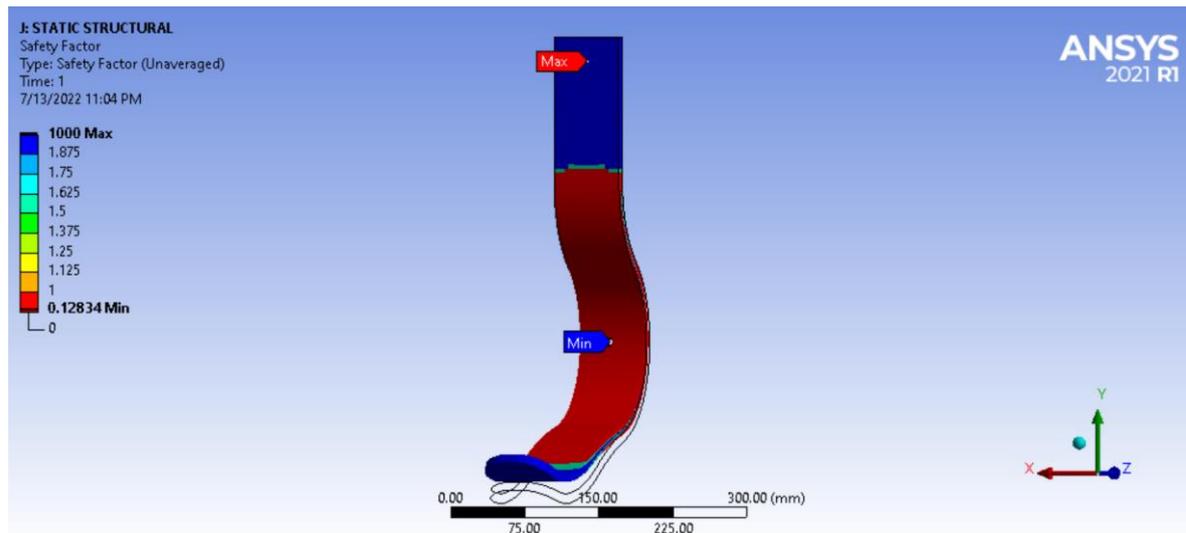


Gambar 4. 4 Grafik hasil pengujian *running blade prosthetic* menggunakan material sisal/epoxy dengan kombinasi sudut serat terhadap total deformasi pada pengujian *midstance*

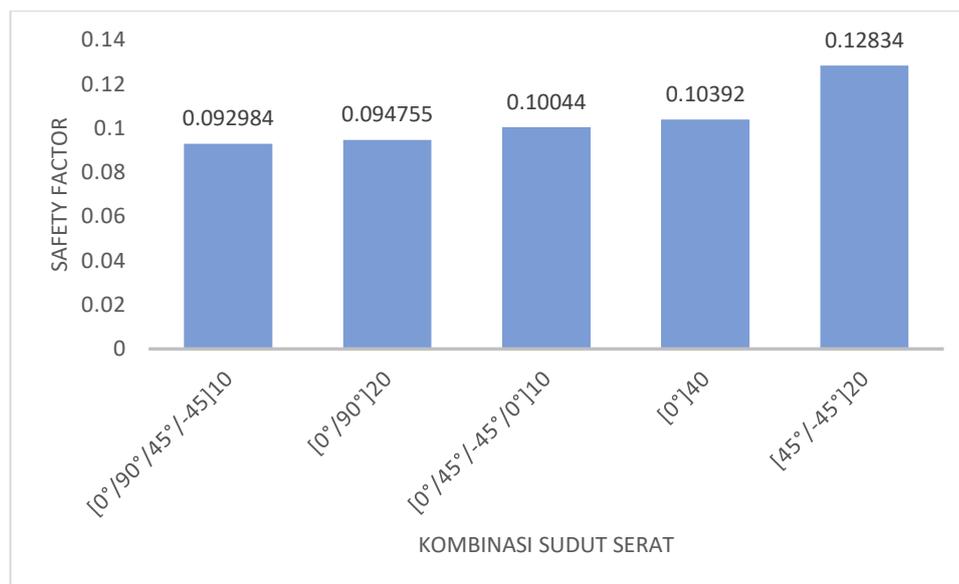
Berdasarkan Gambar 4.4 merupakan hasil simulasi variasi kombinasi sudut terhadap *Deformasi* pada pengujian *midstance* untuk desain *running blade prosthetic* menggunakan standar pengujian ISO 10328 pada level P3 dengan pembebanan 1610 N. Diperoleh nilai deformasi maksimum pada penyusunan material plat komposit untuk desain *running blade prosthetic* dengan kombinasi sudut $[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]_{10}$ yaitu sebesar 885,61 mm, dan untuk kombinasi sudut $[0^\circ/90^\circ]_{20}$ didapatkan nilai deformasi maksimum sebesar 874,43 mm. Untuk penyusunan material komposit dengan kombinasi sudut $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{10}$, nilai deformasi maksimum yang dialami oleh *running blade prosthetic* yaitu sebesar 866,28 mm. Dan untuk kombinasi sudut $[0^\circ]_{40}$ dan $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ didapatkan nilai deformasi maksimum sebesar 838,93 mm dan 897,46 mm. Berdasarkan gambar 4.4 menunjukkan nilai deformasi terbesar terjadi pada kombinasi sudut serat $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ dengan nilai sebesar 897,46 mm. Kemudian diperoleh nilai deformasi terkecil dengan kombinasi sudut serat yaitu $[0^\circ]_{40}$ dengan nilai deformasi sebesar 838,93 mm. Berdasarkan teori yaitu apabila deformasi yang dialami pada material semakin besar maka penyusunan material komposit tersebut semakin tidak kaku alias lentur. Sebaliknya, jika deformasi yang dialami kecil maka tingkat penyusunan material komposit tersebut akan semakin kaku. Berdasarkan data grafik diatas didapat bahwa kombinasi sudut $[0^\circ]_{40}$ memiliki tingkat kekakuan yang paling rendah dan kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ memiliki nilai kekakuan paling tinggi.

4.2.1.3 Pembahasan Nilai *Safety factor*

Nilai *safety factor* adalah nilai yang menjadi dasar untuk menentukan material komposit yang bersifat *orthotropic* ini mengalami kegagalan atau tidak. Jika material komposit mengalami kegagalan maka hal ini mendefinisikan bahwa desain *running blade prosthetic* mengalami kegagalan, dimana artinya *running blade prosthetic* tersebut tidak memiliki kekuatan untuk menahan pembebanan yang ada. Berikut hasil simulasi nilai *safety factor* dengan kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ dengan jenis pengujian *midstance* yang ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4. 5 Hasil pengujian *running blade prosthetic* menggunakan material komposit sisal/epoxy dengan kombinasi sudut $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_{20}$ terhadap *safety factor* pada pengujian *midstance*



Gambar 4. 6 Grafik pengujian *running blade prosthetic* menggunakan material sisal/epoxy dengan kombinasi orientasi sudut serat terhadap *safety factor* pada pengujian *midstance*

Berdasarkan Gambar 4.6 merupakan hasil simulasi variasi kombinasi sudut terhadap *safety factor* pada pengujian *midstance* untuk desain *running blade prosthetic* menggunakan standar pengujian ISO 10328 pada level P3 dengan pembebanan 1610 N. Diperoleh nilai *safety factor* pada penyusunan material plat komposit untuk desain *running blade prosthetic* dengan kombinasi sudut $[0^{\circ}/90^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}]_{10}$ yaitu sebesar 0,092984, dan untuk kombinasi sudut $[0^{\circ}/90^{\circ}]_{20}$ diperoleh nilai *safety factor* yaitu sebesar 0,094755. Untuk penyusunan material komposit dengan kombinasi sudut $[0^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/0^{\circ}]_{10}$, nilai *safety factor* yang diperoleh yaitu sebesar 0,10044. Dan untuk kombinasi sudut $[0^{\circ}]_{40}$ dan $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_{20}$ didapatkan nilai *safety factor* berturut-turut sebesar 0,10392 dan 0,12834. Berdasarkan Gambar 4.2 diatas menunjukkan nilai *safety factor* terbesar didapat pada kombinasi $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_{20}$ dengan nilai sebesar 0,12834 dan nilai *safety factor* terendah didapat pada kombinasi $[0^{\circ}/90^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}]_{10}$ dengan nilai sebesar 0,092984. Berdasarkan teori, apabila nilai *safety*

factor yang dialami pada desain *running blade prosthetic* semakin besar maka penyusunan material komposit tersebut semakin aman dikarenakan *strength* yang dimiliki oleh susunan komposit tersebut lebih kuat meskipun *stress* yang dialami lebih besar. Sebaliknya jika nilai *safety factor* yang dialami pada desain *running blade prosthetic* rendah maka penyusunan material komposit tersebut semakin tidak aman. Batas aman dari nilai *safety factor* adalah kurang dari atau sama dengan 1, apabila nilai *safety factor* kurang dari 1 maka bisa dikatakan bahwa desain dari *running blade prosthetic* tidak aman atau gagal. Berdasarkan hasil simulasi dari grafik diatas bahwa untuk semua kombinasi sudut orientasi terhadap nilai *safety factor* menghasilkan nilai *safety factor* yang dibawah 1, sehingga dikatakan bahwa seluruh kombinasi sudut dalam ketebalan 10 mm masih belum mampu menahan beban yang diberikan pada desain *running blade prosthetic* dan dapat dikatakan bahwa desain dari *running blade prosthetic* masih dikatakan tidak aman. Namun berdasarkan Gambar 4.6 diatas dapat diperoleh secara keseluruhan nilai *safety factor* terbaik dari kombinasi sudut yang ada. Berdasarkan Gambar 4.6 nilai *safety factor* tertinggi didapat pada kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$.

4.2.1.4 Orientasi Sudut Terbaik

Dalam sub subbab ini akan dijelaskan mengenai orientasi sudut terbaik yang bisa diaplikasikan terhadap *running blade prosthetic* pada pengujian *midstance* menggunakan material sisal/epoxy. Untuk tabel perbandingan orientasi sudut dapat dilihat pada Tabel 4.1

Tabel 4. 1 Hasil Data Kumulatif Simulasi Pengujian *Midstance* Material Sisal/Epoxi

Jenis Pengujian <i>Midstance</i>			
Sudut Serat	Equivalent Stress	Deformasi	<i>Safety factor</i>
$[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]_{10}$	275.92	885.61	0.092984
$[0^\circ/90^\circ]_{20}$	271.03	874.43	0.094755
$[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{10}$	270.81	866.28	0.10044
$[0^\circ]_{40}$	261.3	838.93	0.10392
$[45^\circ/-45^\circ]_{20}$	262.48	897.46	0.12834

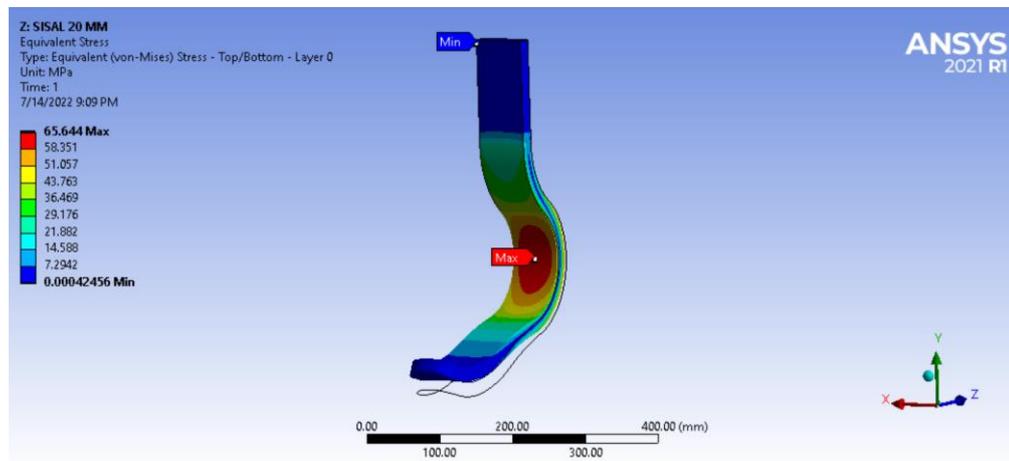
Orientasi sudut $[0^\circ]_{40}$ memiliki nilai terbaik untuk kategori *equivalent stress* karena memiliki nilai terendah sehingga dianggap memiliki nilai keamanan struktur yang paling aman untuk digunakan. Sementara untuk kategori nilai Deformasi terbaik didapatkan oleh orientasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ sehingga dianggap memiliki nilai kelenturan yang baik dibandingkan dengan orientasi sudut lain. Untuk kategori nilai Tsai – Wu *safety factor*, orientasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ memiliki nilai tertinggi dibanding dengan orientasi sudut yang lainnya. Oleh karena itu dianggap orientasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ memiliki nilai kekuatan yang terbaik dalam menahan beban yang diberikan.

Dari hasil kumulatif dapat disimpulkan bahwa orientasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ merupakan orientasi sudut terbaik dalam jenis pengujian *midstance* pada material sisal/epoxy dikarenakan memiliki nilai Deformasi yang tertinggi, nilai Tsai – Wu *safety factor* yang tertinggi, serta memiliki *equivalent stress* kedua terendah setelah orientasi $[0^\circ]_{40}$.

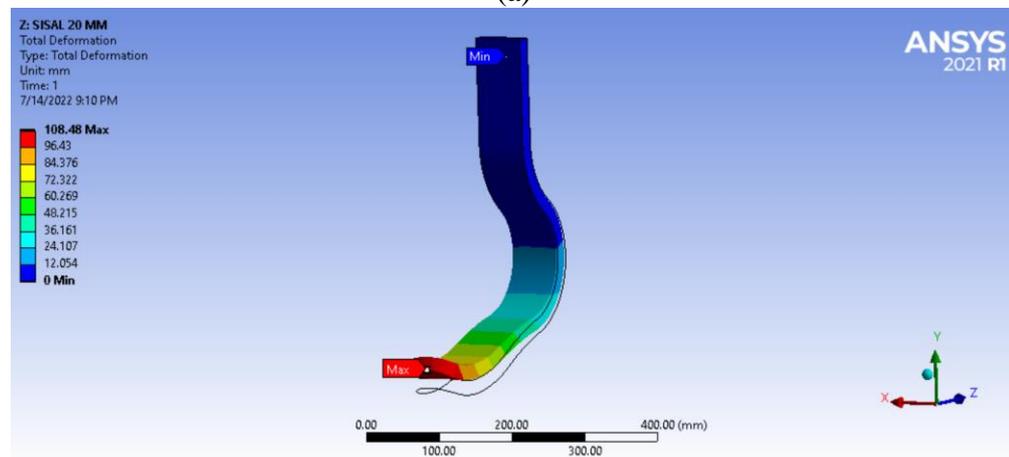
4.2.1.5 Pembahasan Pengaruh Ketebalan

Pengaruh ketebalan pada penelitian ini dilakukan untuk memperoleh desain *running blade prosthetic* yang lebih aman dari kombinasi sudut terbaik yaitu sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$. Penambahan ketebalan yang dilakukan pada simulasi ini yaitu 10 mm sampai dengan 40 mm dengan kenaikan 5 mm pada tiap ketebalan. Tujuannya ialah mencari ketebalan total komposit yang optimum dan sanggup dalam menahan pembebanan level P3 sesuai standar ISO 10328

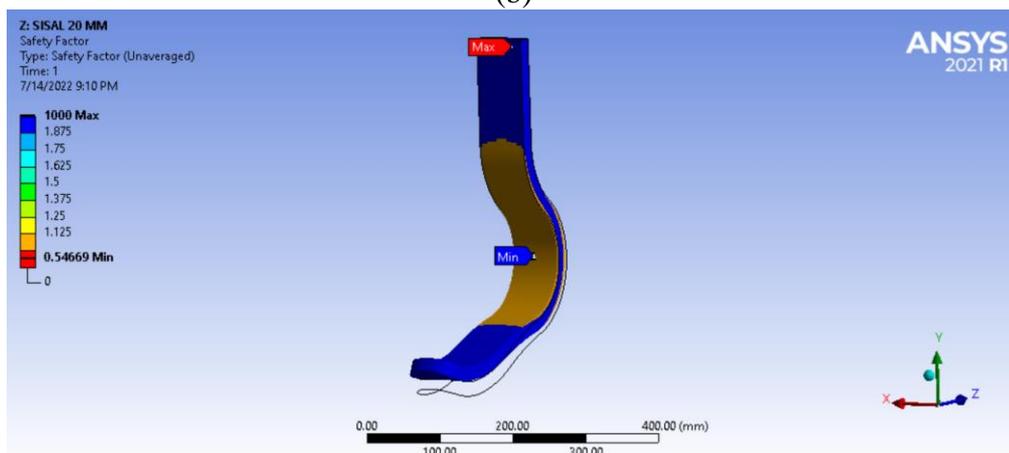
(2016). Berdasarkan hasil simulasi pada pengujian *midstance* dengan variasi ketebalan 20 mm dapat dilihat pada Gambar 4.7.



(a)



(b)



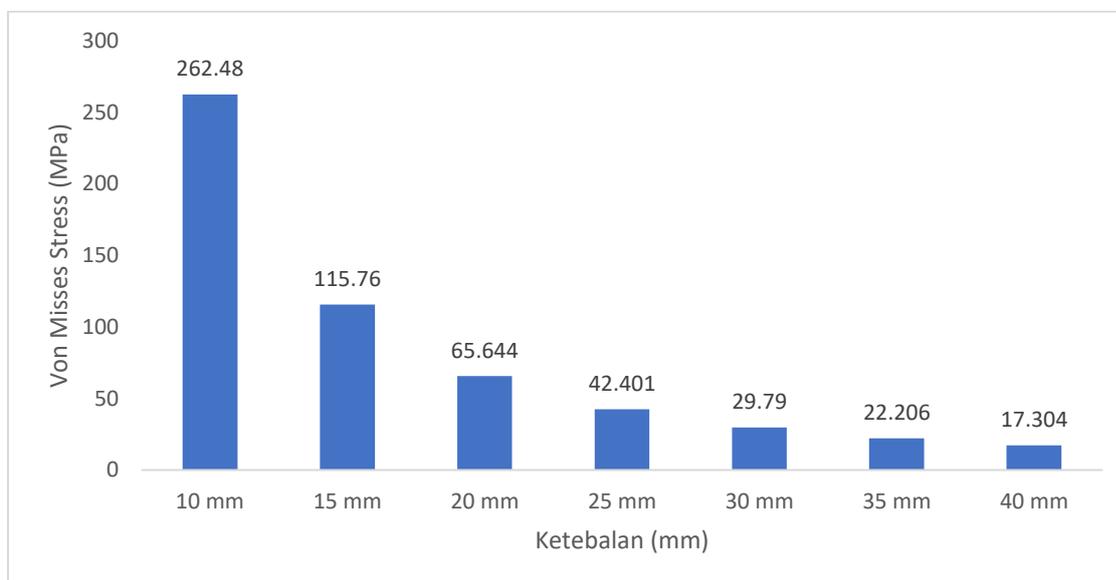
(c)

Gambar 4. 7 Hasil pengujian *running blade prosthetic* menggunakan material komposit sisal/epoxy dengan kombinasi sudut $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_{20}$ dan ketebalan 10 mm pada pengujian *midstance* terhadap: (a) Tegangan Maksimum Von-Misses Stress, (b) Deformasi, (c) *Safety factor*

Tabel 4. 2 Hasil pengujian running blade prosthetic menggunakan material komposit sisal/epoxy dengan kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ terhadap variasi ketebalan, dengan nilai tegangan maksimum Von-Misses stress, deformasi, dan safety factor yang dihasilkan.

Beban (N)	Orientasi Sudut	Ketebalan (mm)	Von Misses Stress (Mpa)	Deformasi (mm)	Safety factor
1610	$[45^\circ/-45^\circ]_{20}$	10 mm	262,48	897,46	0,12834
1610	$[45^\circ/-45^\circ]_{20}$	15 mm	115,76	262,4	0,3188
1610	$[45^\circ/-45^\circ]_{20}$	20 mm	65,644	108,48	0,54669
1610	$[45^\circ/-45^\circ]_{20}$	25 mm	42,401	54,272	0,854
1610	$[45^\circ/-45^\circ]_{20}$	30 mm	29,79	30,644	1,2283
1610	$[45^\circ/-45^\circ]_{20}$	35 mm	22,206	18,814	1,652
1610	$[45^\circ/-45^\circ]_{20}$	40 mm	17,304	12,282	2,1224

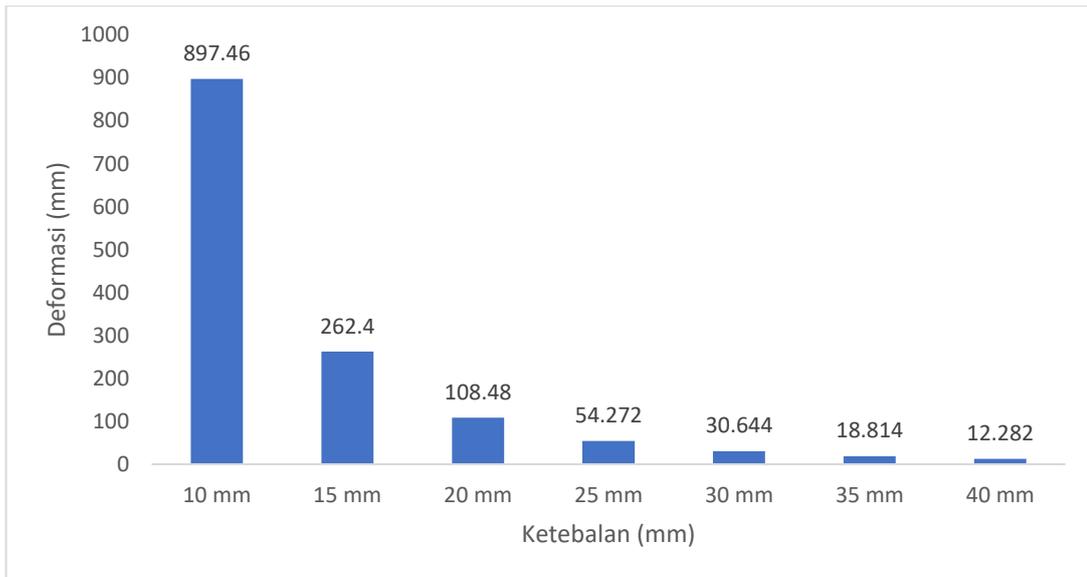
Berdasarkan Tabel 4.2 merupakan hasil simulasi pengujian *midstance* pada *running blade prosthetic* dengan pembebanan 1610 N menggunakan kombinasi sudut terbaik berdasarkan nilai *safety factor* tertinggi yaitu $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ dengan penambahan ketebalan. Ketebalan awal desain *running blade prosthetic* yang digunakan yaitu 10 mm, dengan hasil simulasi diperoleh bahwa nilai tegangan maksimum Von-Misses, total deformasi, dan *safety factor* yang dihasilkan berturut-turut sebesar 262,48 MPa, 897,46 mm dan 0,12834. Kemudian dilakukan penambahan ketebalan akhir sampai dengan 40 mm. Pada ketebalan 40 mm, diperoleh nilai tegangan maksimum Von-Misses, total deformasi, dan *safety factor* yang dihasilkan berturut-turut sebesar 17,304 MPa, 12,282 mm dan 2.1224. Dapat dilihat bahwa setelah dilakukan penambahan ketebalan, diperoleh nilai *safety factor* yang lebih baik dan meningkat.



Gambar 4. 8 Grafik Simulasi Variasi Ketebalan dari Material Komposit Sisal/Epoxi terhadap Tegangan Von-Misses Stress pada pengujian *Midstance*

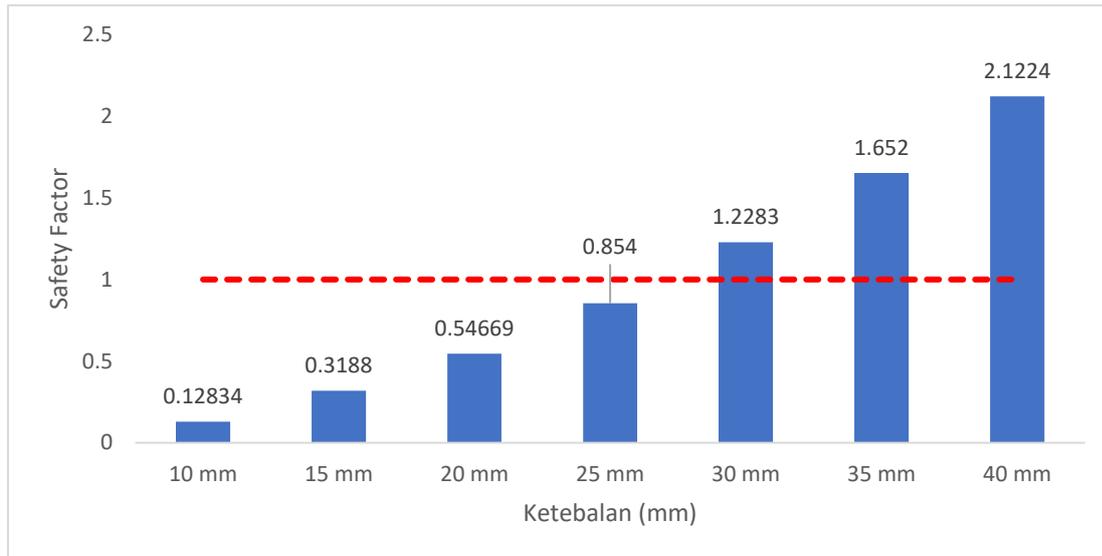
Berdasarkan Gambar 4.8 Diperoleh grafik hubungan antara variasi ketebalan dan tegangan Von-Misses yang dialami oleh desain *running blade prosthetic*. Pada gambar grafik diatas grafik tren mengalami penurunan, dimana grafik mengalami penurunan dari ketebalan 10 mm sampai dengan ketebalan 40 mm. Titik maksimum nilai dari tegangan Von-Misses yang

dialami oleh *running blade prosthetic* berada pada tebal 10 mm dengan nilai tegangan sebesar 262,48 MPa. Sedangkan titik minimum berada pada ketebalan 40 mm dengan nilai tegangan sebesar 17,304 MPa. Dapat dilihat dari grafik diatas bahwa terjadi penurunan tegangan Von-Misses seiring dengan bertambahnya ketebalan. Hal tersebut bisa terjadi dikarenakan setiap melakukan penambahan ketebalan maka jumlah lamina atau tumpukan dari komposit juga semakin bertambah, sehingga ketika pembebanan yang diberikan kepada *running blade prosthetic* dapat didistribusikan pada setiap lamina yang menyebabkan tegangan Von-Misses semakin menurun nilainya.



Gambar 4. 9 Grafik Hasil Simulasi Variasi Ketebalan dari Material Komposit Sisal/Epoxy dan *Deformasi* pada pengujian *midstance*

Berdasarkan gambar 4.9 Diperoleh grafik hubungan antara variasi ketebalan dan total defomasi yang dialami oleh desain *running blade prosthetic*. Pada gambar diatas grafik tren mengalami penurunan penurunan dari ketebalan 10 mm sampai dengan ketebalan 40 mm. Titik maksimum nilai dari total deformasi maksimum yang dialami oleh *running blade prosthetic* berada pada tebal 10 mm dengan nilai total deformasi sebesar 897,46 mm. Sedangkan titik minimum berada pada ketebalan 40 mm dengan nilai total deformasi sebesar 12,282 mm. Dapat dilihat dari grafik diatas bahwa terjadi penurunan total deformasi seiring dengan bertambahnya ketebalan. Hal tersebut bisa terjadi dikarenakan setiap melakukan penambahan ketebalan maka jumlah lamina atau tumpukan dari komposit juga semakin bertambah. Sehingga menyebabkan material komposit menjadi lebih kaku. Apabila material komposit lebih kaku maka akan menghasilkan nilai deformasi yang lebih kecil.



Gambar 4. 10 Hasil Simulasi Variasi Ketebalan dari Material Sisal/Epoxy terhadap *Safety factor* pada pengujian *midstance*

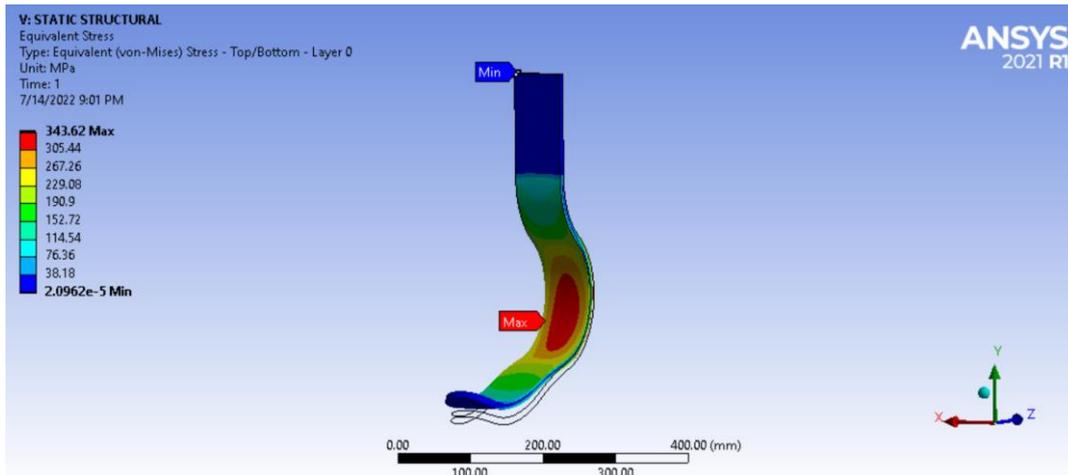
Berdasarkan gambar 4.10 diperoleh grafik hubungan antara variasi ketebalan dan *safety factor* yang dialami oleh desain *running blade prosthetic*. Pada gambar diatas grafik tren mengalami kenaikan dari ketebalan 10 mm sampai dengan ketebalan 40 mm. Titik maksimum nilai dari *safety factor* yang dialami oleh *running blade prosthetic* berada pada tebal 40 mm dengan *safety factor* sebesar 2,1224. Sedangkan titik minimum berada pada ketebalan 10 mm dengan nilai *safety factor* sebesar 0,12834. Dapat dilihat dari grafik diatas bahwa terjadi kenaikan nilai *safety factor* seiring dengan bertambahnya ketebalan. Hal tersebut bisa terjadi dikarenakan setiap melakukan penambahan ketebalan maka jumlah lamina atau tumpukan dari komposit juga semakin bertambah. Sehingga dampak dari fenomena tersebut menyebabkan *safety factor* meningkat dan desain dari *running blade prosthetic* menjadi lebih aman. Dan dapat dilihat pada grafik pengujian *midstance* diatas, dari ketebalan 30 mm, 35 mm dan 40 mm nilai *safety factor* yang dihasilkan berturut-turut yaitu 1,2283, 1,652 dan 2,1224. Dapat dinyatakan bahwa hasil *safety factor* pada ketebalan 30 mm, 35 mm, dan 40 mm sudah melebihi angka 1 dan tergolong aman.

4.2.2 Hasil Simulasi Pengujian *Forefoot*

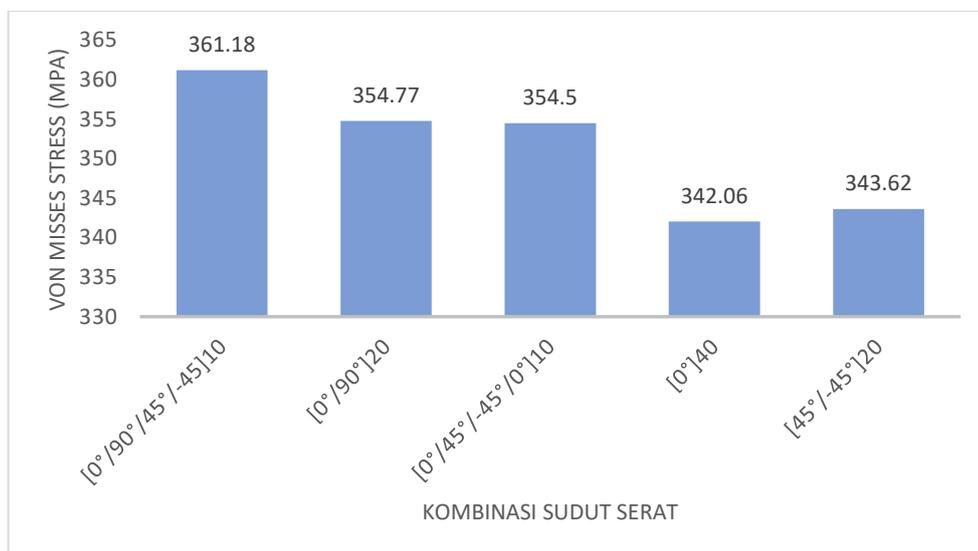
Pada tahap ini dilakukan pengujian *forefoot* pada desain *running blade prosthetic* dengan menghasilkan kombinasi sudut dan variasi ketebalan yang akan dibandingkan dengan nilai tegangan maksimum Von-Misses *stress*, total deformasi, dan *safety factor*.

4.2.2.1 Pembahasan Nilai Equivalent *Stress*

Hasil simulasi Von-Misses yang terjadi pada *running blade prosthetic* dapat dilihat pada Gambar 4.11. Merupakan hasil simulasi dari kombinasi sudut $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_{20}$ dengan jenis pengujian *forefoot*. Letak tegangan terbesar sama seperti pada pengujian *midstance* yaitu pada layer pertama atau layer terluar.



Gambar 4. 11 Hasil pengujian *running blade prosthetic* menggunakan material sisal/epoxy dengan kombinasi sudut $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_{20}$ terhadap tegangan maksimum Von-Misses pada pengujian *forefoot*



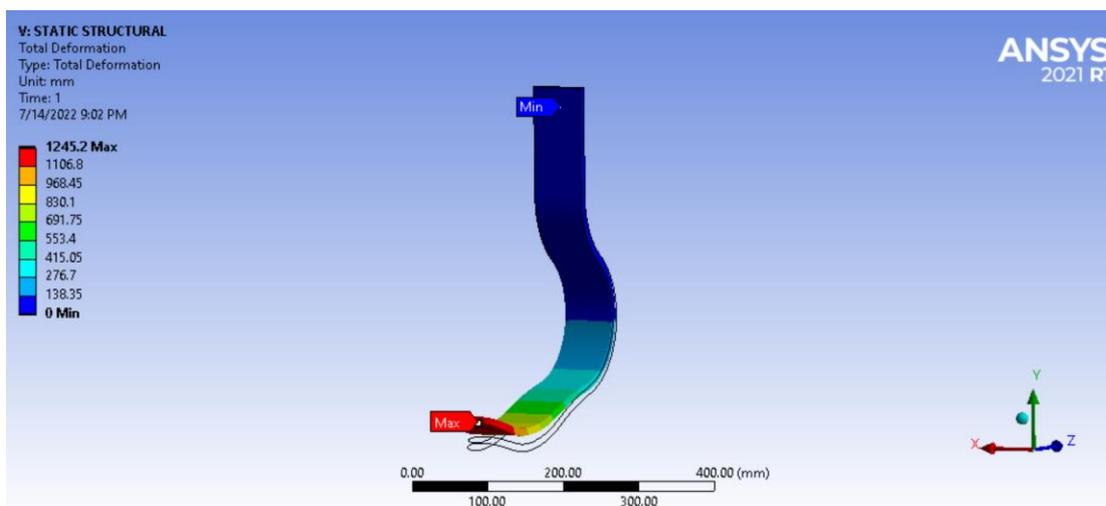
Gambar 4. 12 Grafik hasil pengujian *running blade prosthetic* menggunakan material sisal/epoxy dengan kombinasi sudut serat terhadap Von-Misses *stress* pada pengujian *forefoot*

Dari data hasil simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.12 diatas , diketahui *running blade prosthetic* dengan penyusunan plat komposit menggunakan material komposit pada pengujian *midstance* dengan pemberian beban maksimal berdasarkan standar ISO 10328 pada level P3 yaitu 1610 N. Diperoleh bahwa untuk kombinasi sudut $[0^{\circ}/90^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}]_{10}$ nilai maksimum tegangan yang dialami oleh *running blade prosthetic* sebesar 361,18 MPa, dan untuk kombinasi sudut $[0^{\circ}/90^{\circ}]_{20}$ didapatkan nilai maksimum tegangan Von-Misses sebesar 354,77 MPa. Untuk penyusunan plat komposit dengan kombinasi sudut $[0^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/0^{\circ}]_{10}$ diperoleh nilai tegangan maksimum yang dialami *running blade prosthetic* yaitu sebesar 354,5 MPa, dan untuk kombinasi sudut $[0^{\circ}]_{40}$ didapatkan nilai maksimum tegangan Von-Misses sebesar 342,06 MPa. Kemudian untuk kombinasi sudut $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_{20}$ nilai tegangan maksimum yang dialami oleh *running blade prosthetic* yaitu sebesar 342,62 MPa. Secara keseluruhan nilai tegangan maksimum Von-Misses tertinggi berada pada kombinasi sudut $[0^{\circ}/90^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}]_{10}$ dengan nilai sebesar 361,18 MPa. Kemudian untuk tegangan Von-Misses terendah terjadi pada kombinasi sudut serat $[0^{\circ}]_{40}$ dengan nilai tegangan sebesar 342,06 MPa. Pada teorinya,

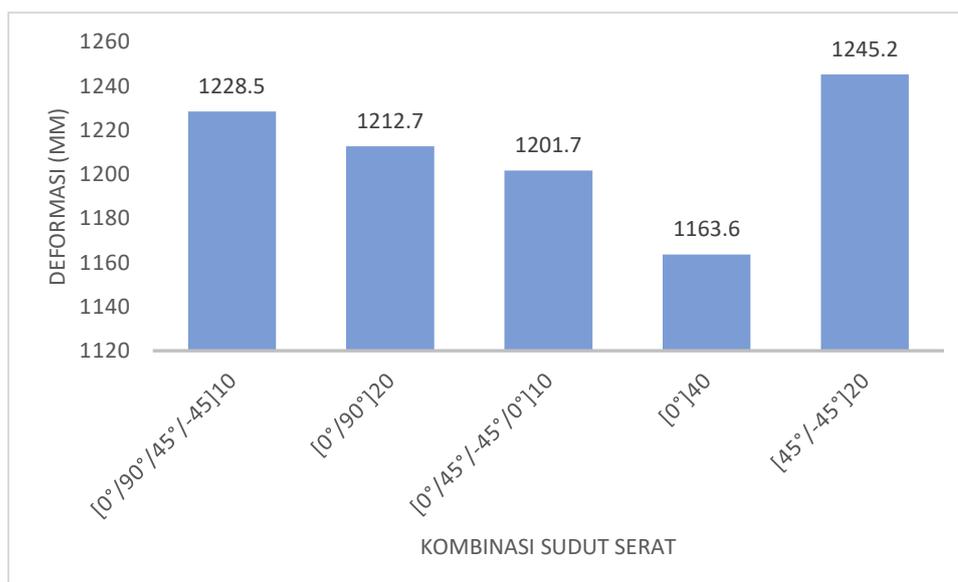
tegangan Von-Misses akan dibandingkan dengan *strength* dari material tersebut. Apabila tegangan yang dialami pada material semakin besar maka material tersebut semakin tidak aman. Sebaliknya jika tegangan yang dialami kecil maka tingkat keamanan material semakin baik. Berdasarkan grafik diatas bahwa kombinasi sudut $[0^\circ]_{40}$ memiliki tingkat keamanan yang paling baik dibandingkan versi kombinasi sudut lainnya.

4.2.2.2 Pembahasan Nilai Deformasi

Hasil simulasi deformasi yang terjadi pada *running blade prosthetic* dapat dilihat pada Gambar 4.13 merupakan hasil simulasi dari kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ dengan jenis pengujian *midstance*. Nilai deformasi terbesar berada pada ujung atau *tip*. Untuk hasil keseluruhan akan dipaparkan pada Gambar 4.14



Gambar 4. 13 Hasil pengujian *running blade prosthetic* menggunakan material komposit sisal/epoxy dengan kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ terhadap *Deformasi* pada pengujian *forefoot*

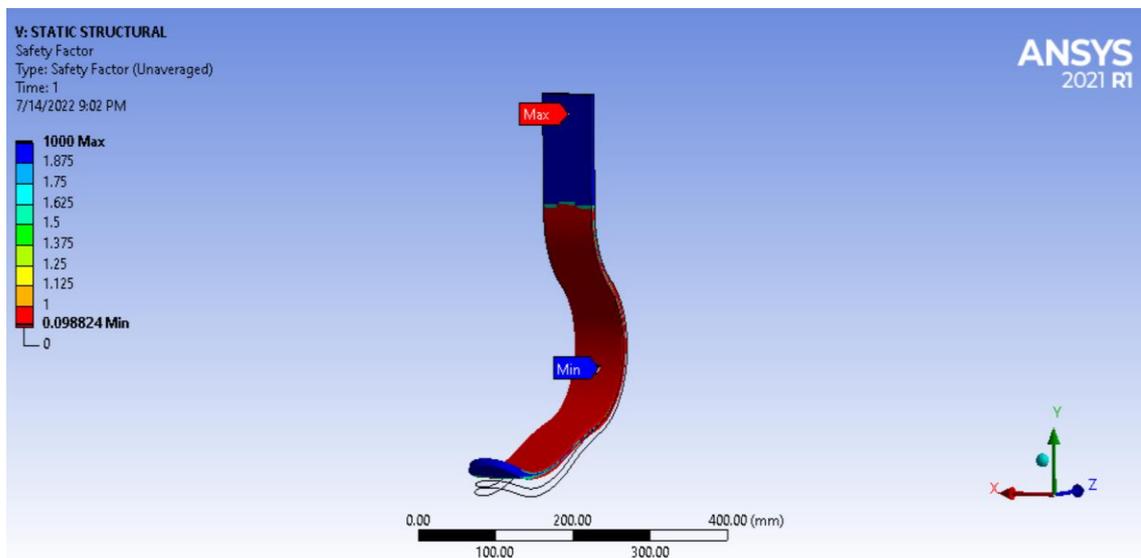


Gambar 4. 14 Grafik hasil pengujian *running blade prosthetic* menggunakan material komposit sisal/epoxy dengan kombinasi sudut serat terhadap *Deformasi* pada pengujian *forefoot*

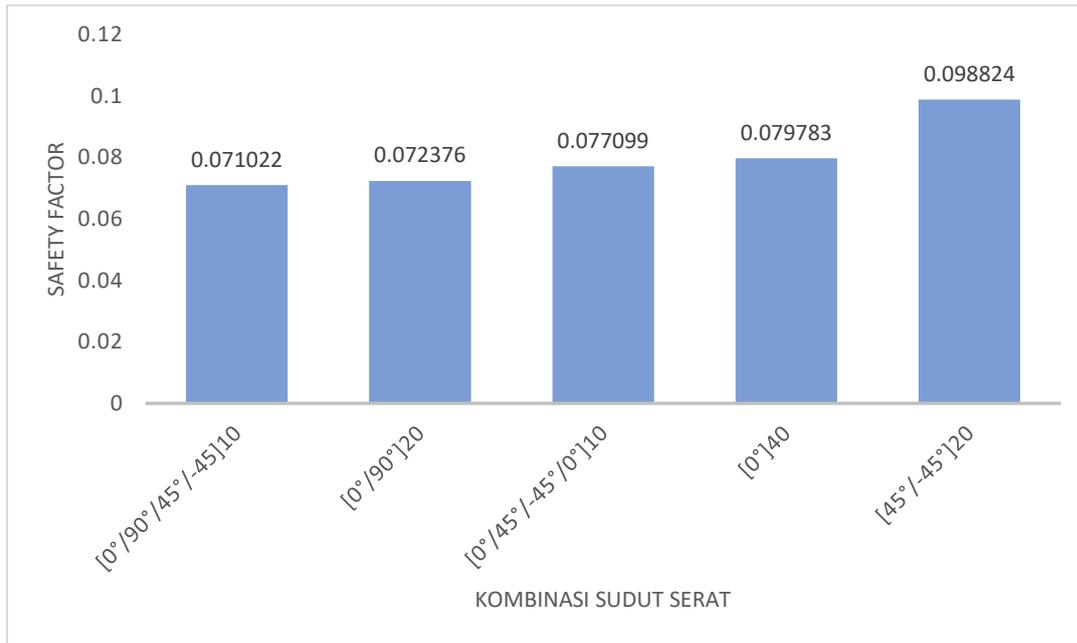
Berdasarkan Gambar 4.14 merupakan hasil simulasi variasi kombinasi sudut terhadap *Deformasi* pada pengujian *midstance* untuk desain *running blade prosthetic* menggunakan standar pengujian ISO 10328 pada level P3 dengan pembebanan 1610 N. Diperoleh nilai deformasi maksimum pada penyusunan material plat komposit untuk desain *running blade prosthetic* dengan kombinasi sudut $[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]_{10}$ yaitu sebesar 1228,5 mm, dan untuk kombinasi sudut $[0^\circ/90^\circ]_{20}$ didapatkan nilai deformasi maksimum sebesar 1212,7 mm. Untuk penyusunan material komposit dengan kombinasi sudut $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{10}$, nilai deformasi maksimum yang dialami oleh *running blade prosthetic* yaitu sebesar 1201,7 mm. Dan untuk kombinasi sudut $[0^\circ]_{40}$ dan $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ didapatkan nilai deformasi maksimum sebesar 1163,6 mm dan 1245,2 mm. Berdasarkan gambar 4.14 menunjukkan nilai deformasi terbesar terjadi pada kombinasi sudut serat $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ dengan nilai sebesar 1245,2 mm. Kemudian diperoleh nilai deformasi terkecil dengan kombinasi sudut serat yaitu $[0^\circ]_{40}$ dengan nilai deformasi sebesar 1163,6 mm. Berdasarkan teori yaitu apabila deformasi yang dialami pada material semakin besar maka penyusunan material komposit tersebut semakin tidak kaku alias lentur. Sebaliknya jika deformasi yang dialami kecil maka tingkat penyusunan material komposit tersebut semakin kaku. Berdasarkan data grafik diatas didapat didapat bahwa kombinasi $[0^\circ]_{40}$ memiliki tingkat kekakuan yang paling rendah dibandingkan variasi lainnya.

4.2.2.3 Pembahasan Nilai *Safety factor*

Hasil *safety factor* yang terjadi pada *running blade prosthetic* dapat dilihat pada Gambar 4.13 merupakan hasil simulasi dari kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ dengan jenis pengujian *forefoot*.



Gambar 4. 15 Hasil pengujian *running blade prosthetic* menggunakan material komposit sisal/epoxy dengan kombinasi sudut serat terhadap nilai *safety factor* pada pengujian *forefoot*



Gambar 4. 16 Hasil pengujian *running blade prosthetic* material komposit sisal/epoxy dengan kombinasi sudut serat terhadap *safety factor* setiap variasi pada pengujian *forefoot*

Berdasarkan Gambar 4.16 merupakan hasil simulasi variasi kombinasi sudut terhadap *safety factor* pada pengujian *forefoot* untuk desain *running blade prosthetic* menggunakan standar pengujian ISO 10328 pada level P3 dengan pembebanan 1610 N. Diperoleh nilai *safety factor* pada penyusunan material plat komposit untuk desain *running blade prosthetic* dengan kombinasi sudut $[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]_{10}$ yaitu sebesar 0,071022, dan untuk kombinasi sudut $[0^\circ/90^\circ]_{20}$ diperoleh nilai *safety factor* yaitu sebesar 0,072376. Untuk penyusunan material komposit dengan kombinasi sudut $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{10}$, nilai *safety factor* yang diperoleh yaitu sebesar 0,77099. Dan untuk kombinasi sudut $[0^\circ]_{40}$ dan $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ didapatkan nilai *safety factor* berturut-turut sebesar 0,079783 dan 0,098824. Berdasarkan Gambar 4.16 diatas menunjukkan nilai *safety factor* terbesar didapat pada kombinasi $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ dengan nilai sebesar 0,098824 dan nilai *safety factor* terendah didapat pada kombinasi $[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]_{10}$ dengan nilai sebesar 0,071022. Berdasarkan teori, apabila nilai *safety factor* yang dialami pada desain *running blade prosthetic* semakin besar maka penyusunan material komposit tersebut semakin aman dikarenakan *strength* yang dimiliki oleh susunan komposit tersebut lebih kuat meskipun *stress* yang dialami lebih besar. Sebaliknya jika nilai *safety factor* yang dialami pada desain *running blade prosthetic* rendah maka penyusunan material komposit tersebut semakin tidak aman. Batas aman dari nilai *safety factor* adalah 1, jika nilai *safety factor* kurang dari 1 maka bisa dikatakan bahwa desain dari *running blade prosthetic* tidak aman. Berdasarkan hasil simulasi dari grafik diatas bahwa untuk semua kombinasi sudut orientasi terhadap nilai *safety factor* menghasilkan nilai *safety factor* yang dibawah 1, sehingga dikatakan bahwa seluruh kombinasi sudut masih belum mampu untuk menahan beban yang diberikan pada desain *running blade prosthetic* dan dapat dikatakan bahwa desain dari *running blade prosthetic* masih dikatakan tidak aman. Namun berdasarkan grafik diatas dapat diperoleh secara keseluruhan nilai *safety factor* terbaik dari kombinasi sudut yang ada. Berdasarkan hasil dari simulasi dengan kombinasi sudut terbaik yaitu pada kombinasi $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ dan kombinasi tersebut akan dijadikan acuan dalam melakukan variasi ketebalan untuk memperoleh nilai *safety factor* yang lebih aman.

4.2.2.4 Pembahasan Orientasi Sudut Terbaik

Dalam sub subbab ini akan dijelaskan mengenai orientasi sudut terbaik yang bisa diaplikasikan terhadap *running blade prosthetic* pada pengujian *forefoot* menggunakan material sisal/epoxy. Untuk tabel perbandingan orientasi sudut dapat dilihat pada Tabel 4.3

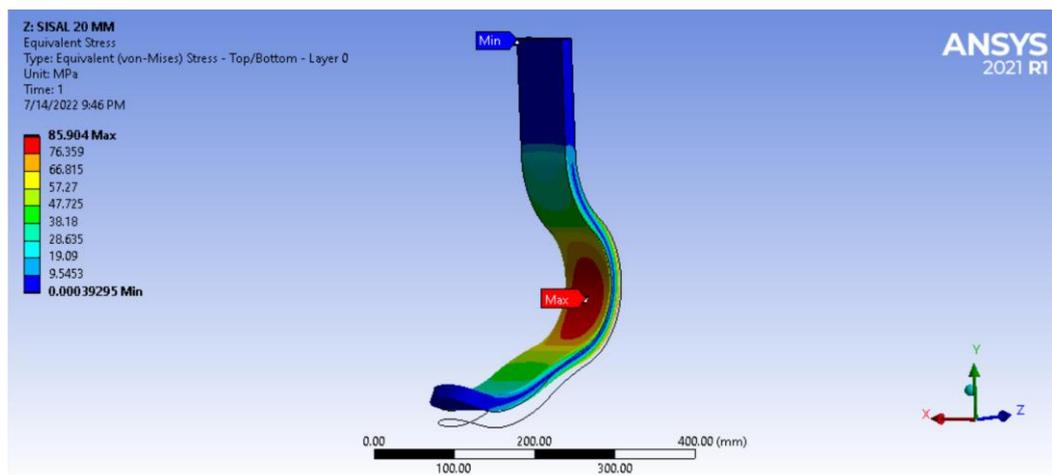
Tabel 4.3 Hasil Data Kumulatif Simulasi Pengujian *Forefoot* Material Sisal/Epoxy

Jenis Pengujian Forefoot			
Sudut Serat	Equivalent Stress	Deformasi	Safety factor
$[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]_{10}$	361.18	1228.5	0.071022
$[0^\circ/90^\circ]_{20}$	354.77	1212.7	0.072376
$[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{10}$	354.5	1201.7	0.077099
$[0^\circ]_{40}$	342.06	1163.6	0.079783
$[45^\circ/-45^\circ]_{20}$	343.62	1245.2	0.098824

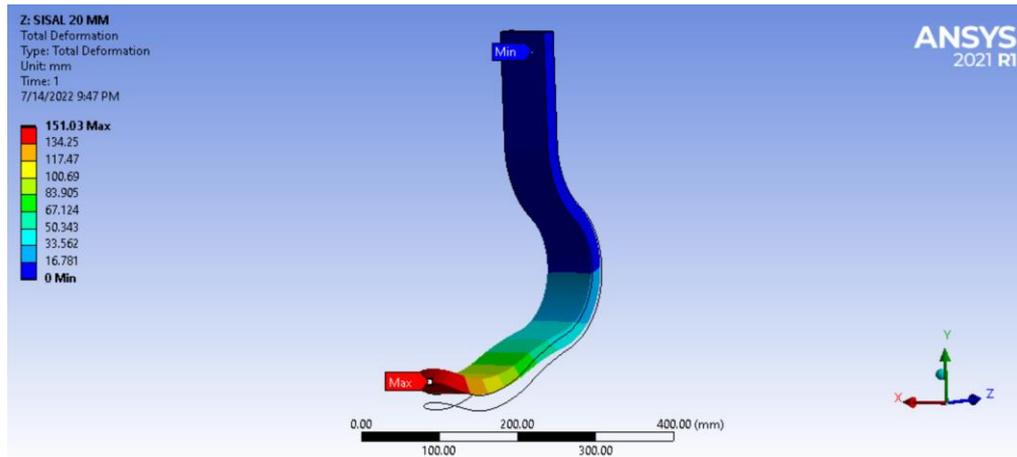
Berdasarkan Tabel 4.3 diatas, pengujian *forefoot* ini memiliki sudut orientasi terbaik yang sama seperti pada pengujian *midstance*. Dapat disimpulkan bahwa orientasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ merupakan orientasi sudut terbaik dalam jenis pengujian *forefoot* pada material sisal/epoxy dikarenakan memiliki nilai Deformasi yang tertinggi, nilai Tsai – Wu *safety factor* yang tertinggi, serta memiliki *equivalent stress* kedua terendah setelah orientasi $[0^\circ]_{40}$.

4.2.2.5 Pembahasan Pengaruh Ketebalan

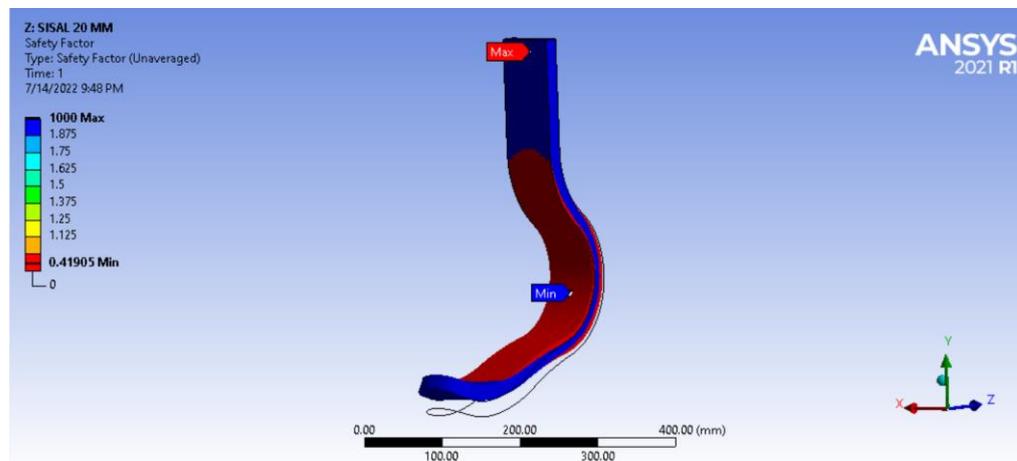
Pengaruh ketebalan pada menggunakan kombinasi sudut terbaik yaitu sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ pada desain *running blade prosthetic*. Penambahan ketebalan yang dilakukan pada simulasi ini yaitu 10 mm sampai dengan 40 mm dengan kenaikan 5 mm pada tiap ketebalan. Tujuannya ialah mencari ketebalan total komposit yang optimum dan sanggup dalam menahan pembebanan level P3 sesuai standar ISO 10328 (2016). Berdasarkan hasil simulasi pada pengujian *midstance* dengan ketebalan 20 mm dapat dilihat pada Gambar 4.17.



(a)



(b)



(c)

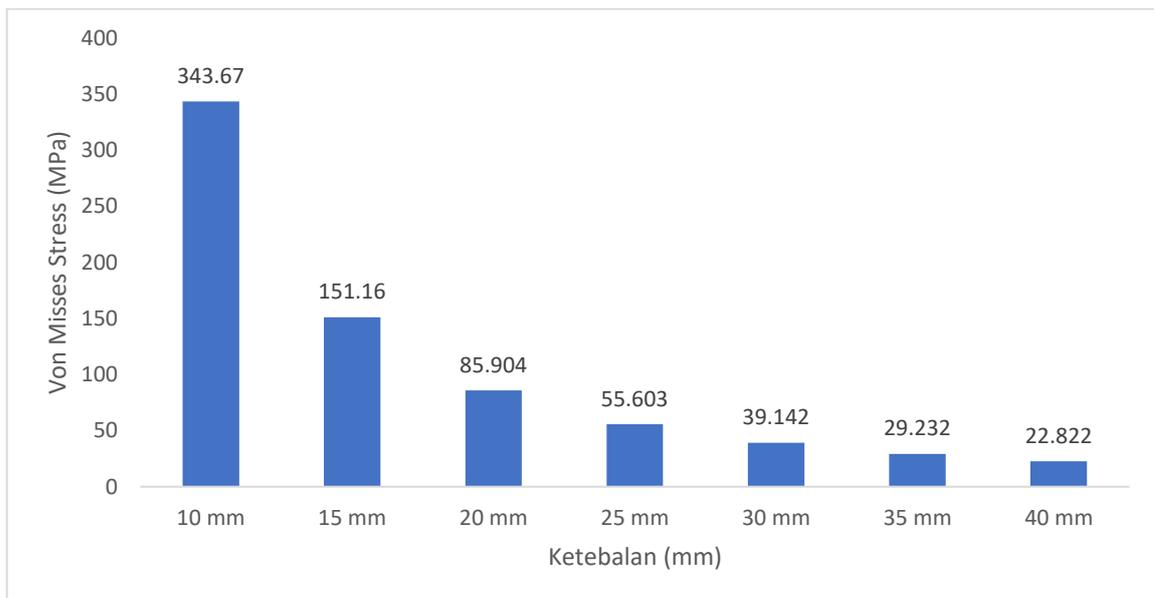
Gambar 4. 17 Hasil pengujian *running blade prosthetic* menggunakan material komposit sisal/epoxy dengan kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_5$ dan ketebalan 9 mm pada pengujian *forefoot* terhadap: (a) tegangan maksimum Von-Misses, (b) deformasi, (c) *safety factor*

Tabel 4. 4 Hasil pengujian *running blade prosthetic* menggunakan material komposit sisal/epoxy dengan kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_5$ pada pengujian *forefoot* terhadap variasi ketebalan, dengan nilai tegangan maksimum Von-Misses, deformasi, dan *safety factor* yang dihasilkan.

Beban (N)	Orientasi Sudut	Ketebalan (mm)	Von Misses Stress (Mpa)	Deformasi (mm)	<i>Safety factor</i>
1610	$[45^\circ/-45^\circ]_{20}$	10 mm	343,67	1245,1	0,098878
1610	$[45^\circ/-45^\circ]_{20}$	15 mm	151,16	364,63	0,23191
1610	$[45^\circ/-45^\circ]_{20}$	20 mm	85,904	151,03	0,41905
1610	$[45^\circ/-45^\circ]_{20}$	25 mm	55,603	75,709	0,65592
1610	$[45^\circ/-45^\circ]_{20}$	30 mm	39,142	42,839	0,93758
1610	$[45^\circ/-45^\circ]_{20}$	35 mm	29,232	26,359	1,2584
1610	$[45^\circ/-45^\circ]_{20}$	40 mm	22,822	17,247	1,6121

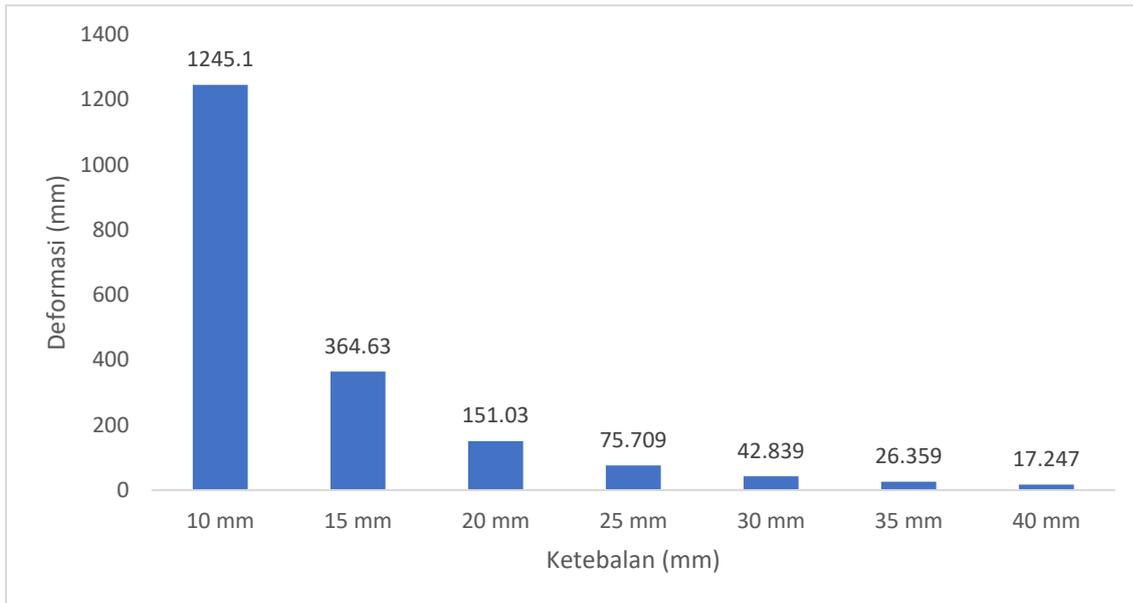
Berdasarkan Tabel 4.4 merupakan hasil simulasi pengujian *midstance* pada *running blade prosthetic* dengan pembebanan 1610 N menggunakan kombinasi sudut terbaik yaitu

$[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ dengan variasi ketebalan. Ketebalan awal desain *running blade prosthetic* yang digunakan yaitu 10 mm, dengan hasil simulasi diperoleh bahwa nilai tegangan maksimum Von-Misses, total deformasi, dan *safety factor* yang dihasilkan berturut-turut sebesar 343,67 MPa, 1245,1 mm dan 0,098878. Kemudian dilakukan penambahan ketebalan akhir sampai dengan 40 mm. Pada ketebalan 40 mm, diperoleh nilai tegangan maksimum Von-Misses, deformasi, dan *safety factor* yang dihasilkan berturut-turut sebesar 22,822 MPa, 17,247 mm dan 1,6121. Dapat dilihat bahwa setelah dilakukan penambahan ketebalan, diperoleh nilai *safety factor* yang lebih baik dan meningkat. Pada ketebalan 35 mm dan 40 mm nilai *safety factor* yang dihasilkan berturut-turut yaitu 1,2584 dan 1,6121. Dapat dinyatakan bahwa hasil *safety factor* pada ketebalan 35 mm dan 40 mm sudah melebihi angka 1 dan tergolong aman.



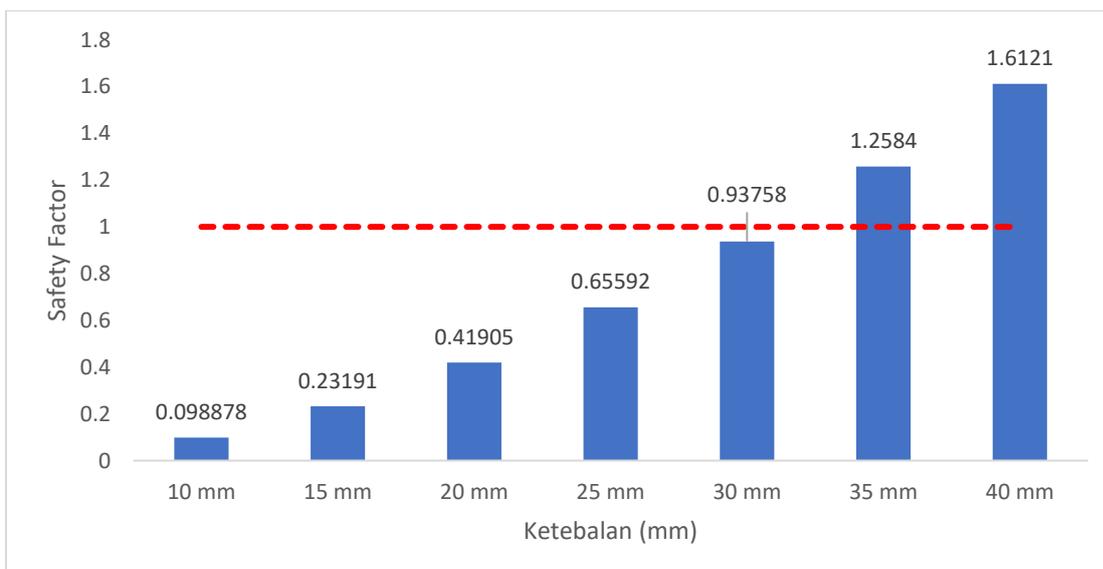
Gambar 4. 18 Hasil Simulasi Variasi Ketebalan dari Material sisal/epoxy terhadap tegangan maksimum Von-Misses

Berdasarkan Gambar 4.18 Diperoleh grafik hubungan antara variasi ketebalan dan tegangan Von-Misses yang dialami oleh desain *running blade prosthetic*. Pada gambar grafik diatas grafik tren mengalami penurunan, dimana grafik mengalami penurunan dari ketebalan 10 mm sampai dengan ketebalan 40 mm. Titik maksimum nilai dari tegangan Von-Misses yang dialami oleh *running blade prosthetic* berada pada tebal 10 mm dengan nilai tegangan sebesar 343,67 MPa. Sedangkan titik minimum berada pada ketebalan 40 mm dengan nilai tegangan sebesar 22,822 MPa. Dapat dilihat dari grafik diatas bahwa terjadi penurunan tegangan Von-Misses seiring dengan bertambahnya ketebalan. Hal tersebut bisa terjadi dikarenakan setiap melakukan penambahan ketebalan maka jumlah lamina atau tumpukan dari komposit juga semakin bertambah, sehingga ketika pembebanan yang diberikan kepada *running blade prosthetic* dapat didistribusikan pada setiap lamina yang menyebabkan tegangan Von-Misses semakin menurun nilainya.



Gambar 4. 19 Hasil Simulasi variasi ketebalan dari material komposit sisal/epoxy terhadap Deformasi

Berdasarkan gambar 4.19 Diperoleh grafik hubungan antara variasi ketebalan dan total defomasi yang dialami oleh desain *running blade prosthetic*. Pada gambar diatas grafik tren mengalami penurunan penurunan dari ketebalan 10 mm sampai dengan ketebalan 40 mm. Titik maksimum nilai dari total deformasi maksimum yang dialami oleh *running blade prosthetic* berada pada tebal 10 mm dengan nilai total deformasi sebesar 1245,1 mm. Sedangkan titik minimum berada pada ketebalan 40 mm dengan nilai total deformasi sebesar 17,247 mm. Dapat dilihat dari grafik diatas bahwa terjadi penurunan total deformasi seiring dengan bertambahnya ketebalan. Hal tersebut bisa terjadi dikarenakan setiap melakukan penambahan ketebalan maka jumlah lamina atau tumpukan dari komposit juga semakin bertambah. Sehingga menyebabkan material komposit menjadi lebih kaku. Apabila material komposit lebih kaku maka akan menghasilkan nilai deformasi yang lebih kecil.



Gambar 4. 20 Hasil simulasi variasi ketebalan dari material komposit sisal/epoxy terhadap *Safety factor*

Berdasarkan gambar 4.20 diperoleh grafik hubungan antara variasi ketebalan dan *safety factor* yang dialami oleh desain *running blade prosthetic*. Pada gambar diatas grafik tren mengalami kenaikan dari ketebalan 10 mm sampai dengan ketebalan 40 mm. Titik maksimum nilai dari *safety factor* yang dialami oleh *running blade prosthetic* berada pada tebal 40 mm dengan *safety factor* sebesar 1,6121. Sedangkan titik minimum berada pada ketebalan 10 mm dengan nilai *safety factor* sebesar 0,098878. Dapat dilihat pada grafik pengujian *forefoot* diatas, dari ketebalan 35 mm dan 40 mm nilai *safety factor* yang dihasilkan berturut-turut yaitu 1,2584 dan 1,6121. Dan dapat dinyatakan bahwa hasil *safety factor* pada ketebalan 35 mm, dan 40 mm sudah melebihi angka 1 dan tergolong aman.

4.3 Simulasi *Running Blade Prosthetic* Menggunakan Material Komposit Palem/Epoxy

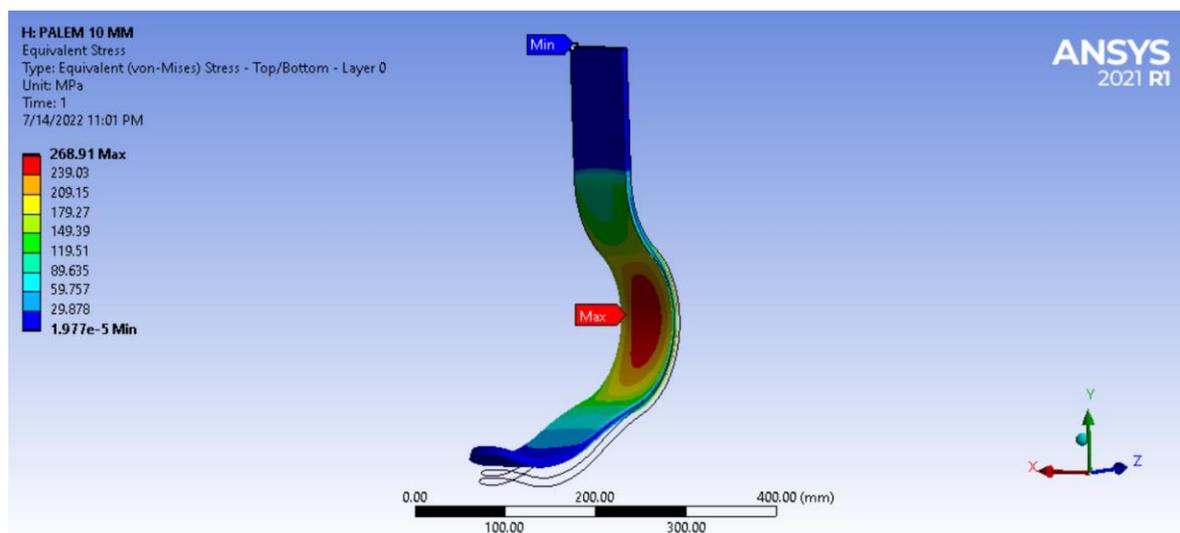
Pada simulasi ini akan dilakukan pengujian *running blade prosthetic* menggunakan material komposit palem/epoxy dengan dua metode pengujian yaitu *midstance* dan *forefoot*. Kemudian simulasi ini akan diperoleh kombinasi sudut serat terbaik dan variasi ketebalan untuk menunjang desain dari *running blade prosthetic* yang aman.

4.3.1 Hasil Simulasi Pengujian *Midstance*

Hasil kombinasi sudut dan variasi ketebalan pengujian *midstance* pada desain *running blade prosthetic* ini akan dibandingkan dengan nilai tegangan maksimum Von-Misses stress, total deformasi, dan *safety factor*.

4.3.1.1 Pembahasan Nilai Equivalent Stress

Hasil yang didapatkan pada simulasi ini terhadap komposit serat sisal/epoxy yaitu tegangan Von-Misses. Tegangan Von-Misses digunakan untuk mencari nilai faktor keamanan struktur, dari nilai tegangan Von-Misses dapat diprediksi bahwa struktur akan mengalami kegalan atau tidak. Pada tiap variasi, nilai tegangan terbesar terdapat pada layer pertama atau layer terluar. Berdasarkan hasil simulasi untuk salah satu kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ dapat dilihat pada gambar 4. 21.



Gambar 4. 21 Hasil simulasi *running blade prosthetic* menggunakan material komposit palem/epoxy dengan kombinasi sudut serat $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ terhadap tegangan maksimum Von-Misses pada pengujian *midstance*

Berikut merupakan hasil keseluruhan dari variasi orientasi sudut $[0/90/45/-45]_{10}$, $[0/90]_{20}$, $[0/45/-45/0]_{10}$, $[0]_{40}$, dan $[45/-45]_{20}$ berdasarkan nilai tegangan maksimum Von-Misses seperti gambar 4.22

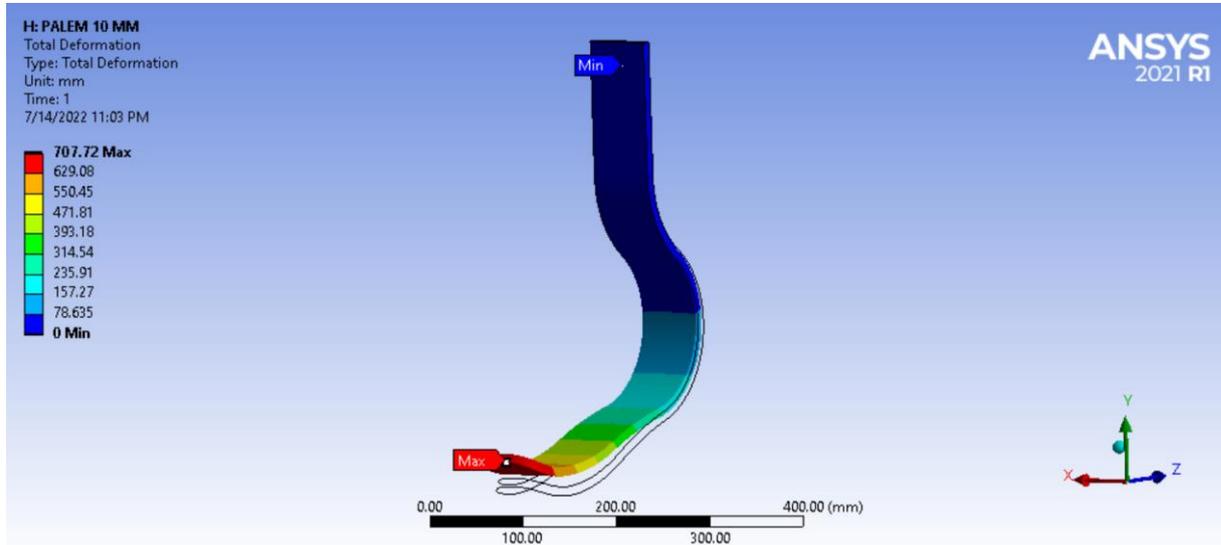


Gambar 4. 22 Grafik hasil simulasi pengujian *running blade prosthetic* menggunakan material palem/epoxy dengan kombinasi sudut serat terhadap tegangan maksimum Von-Misses pada pengujian *midstance*

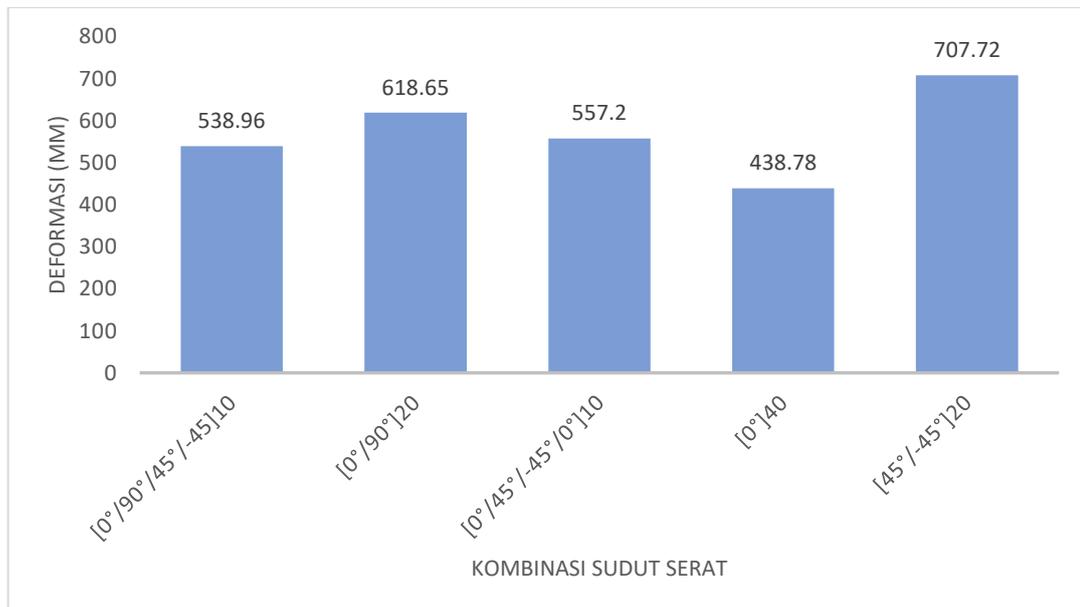
Dari data hasil simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.22 di atas, diketahui *running blade prosthetic* dengan penyusunan plat komposit menggunakan material komposit pada pengujian *midstance* dengan pemberian beban maksimal berdasarkan standar ISO 10328 pada level P3 yaitu 1610 N. Diperoleh bahwa untuk kombinasi sudut $[0^\circ/90^\circ/-45^\circ/-45^\circ]_{10}$ nilai maksimum tegangan yang dialami oleh *running blade prosthetic* sebesar 324,23 MPa, dan untuk kombinasi sudut $[0^\circ/90^\circ]_{20}$ didapatkan nilai maksimum tegangan Von-Misses sebesar 363,96 MPa. Untuk penyusunan plat komposit dengan kombinasi sudut $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{10}$ diperoleh nilai tegangan maksimum yang dialami *running blade prosthetic* yaitu sebesar 313,92 MPa, dan untuk kombinasi sudut $[0^\circ]_{40}$ didapatkan nilai maksimum tegangan Von-Misses sebesar 253,27 MPa. Kemudian untuk kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ nilai tegangan maksimum yang dialami oleh *running blade prosthetic* yaitu sebesar 268,91 MPa. Secara keseluruhan nilai tegangan maksimum Von-Misses tertinggi berada pada kombinasi sudut $[0^\circ/90^\circ]_{20}$ dengan nilai sebesar 363,96 MPa. Kemudian untuk tegangan Von-Misses terendah terjadi pada kombinasi sudut serat $[0^\circ]_{40}$ dengan nilai tegangan sebesar 253,27 MPa. Pada teorinya, tegangan Von-Misses akan dibandingkan dengan *strength* dari material tersebut. Apabila tegangan yang dialami pada material semakin besar maka material tersebut semakin tidak aman. Sebaliknya jika tegangan yang dialami kecil maka tingkat keamanan material semakin baik. Berdasarkan grafik diatas bahwa kombinasi sudut $[0^\circ]_{40}$ memiliki tingkat keamanan yang paling baik dibandingkan versi kombinasi sudut lainnya.

4.3.1.2 Pembahasan Nilai Deformation

Hasil Simulasi deformasi yang terjadi pada *running blade prosthetic* dapat dilihat pada Gambar 4.13 merupakan hasil simulasi dari kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ dengan jenis pengujian *midstance*. Untuk hasil keseluruhan akan dipaparkan pada gambar 4.23



Gambar 4. 23 Hasil Pengujian *running blade prosthetic* menggunakan material palem/epoxy dengan kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ terhadap deformasi pada pengujian *midstance*



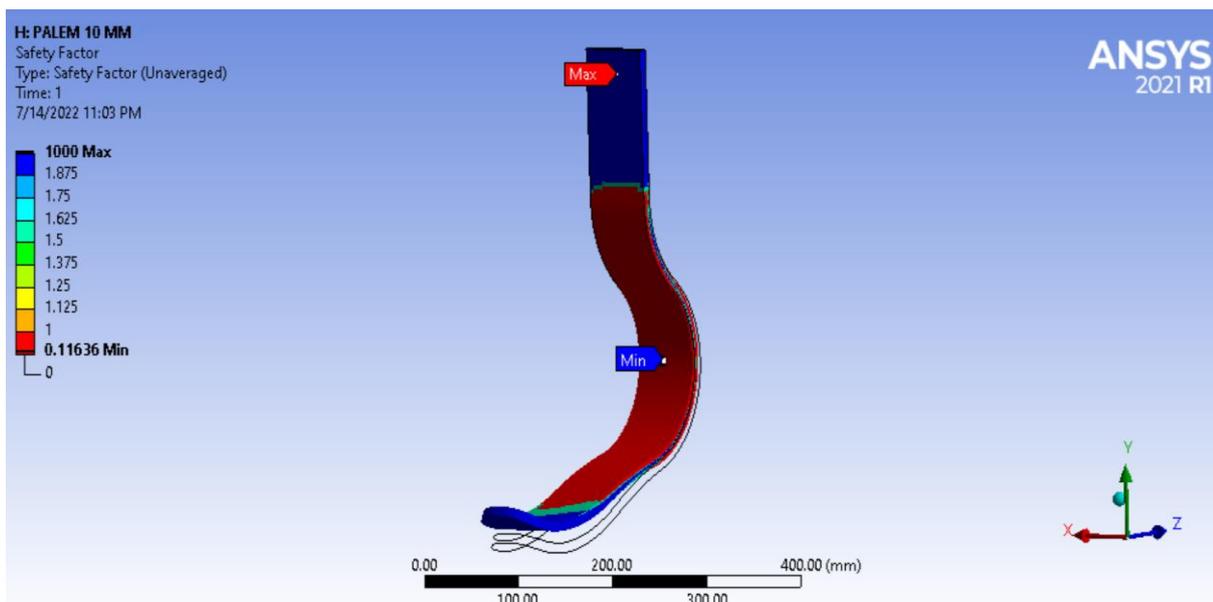
Gambar 4. 24 Grafik hasil pengujian *running blade prosthetic* menggunakan material palem/epoxy dengan kombinasi sudut serat terhadap total deformasi pada pengujian *midstance*

Berdasarkan Gambar 4.14 merupakan hasil simulasi variasi kombinasi sudut terhadap Deformasi pada pengujian *midstance* untuk desain *running blade prosthetic* menggunakan standar pengujian ISO 10328 pada level P3 dengan pembebanan 1610 N. Diperoleh nilai deformasi maksimum pada penyusunan material plat komposit untuk desain *running blade prosthetic* dengan kombinasi sudut $[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]_{10}$ yaitu sebesar 538,96 mm, dan untuk kombinasi sudut $[0^\circ/90^\circ]_{20}$ didapatkan nilai deformasi maksimum sebesar 618,65 mm. Untuk

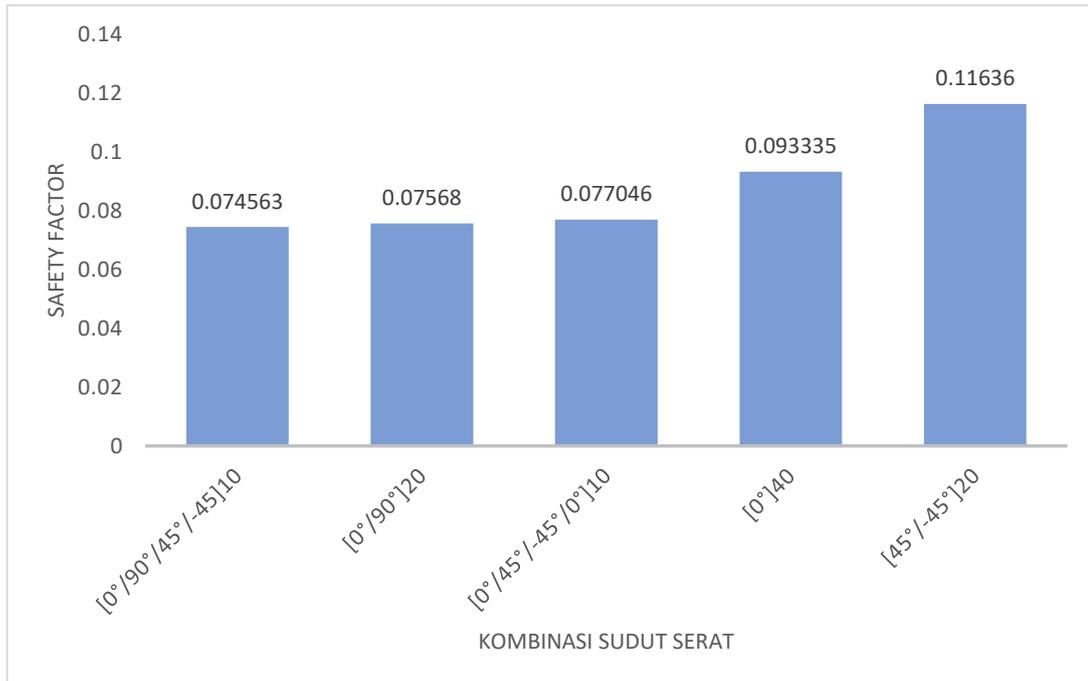
penyusunan material komposit dengan kombinasi sudut $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{10}$, nilai deformasi maksimum yang dialami oleh *running blade prosthetic* yaitu sebesar 557,2 mm. Dan untuk kombinasi sudut $[0^\circ]_{40}$ dan $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ didapatkan nilai deformasi maksimum berturut-turut sebesar 438,78 mm dan 707,72 mm. Berdasarkan gambar 4.14 menunjukkan nilai deformasi terbesar terjadi pada kombinasi sudut serat $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ dengan nilai sebesar 707,72 mm. Kemudian diperoleh nilai deformasi terkecil dengan kombinasi sudut serat yaitu $[0^\circ]_{40}$ dengan nilai deformasi sebesar 438,78 mm. Berdasarkan teori yaitu apabila deformasi yang dialami pada material semakin besar maka penyusunan material komposit tersebut semakin tidak kaku alias lentur. Sebaliknya jika deformasi yang dialami kecil maka tingkat penyusunan material komposit tersebut semakin kaku. Berdasarkan data grafik diatas didapat didapat bahwa kombinasi $[0^\circ]_{40}$ memiliki tingkat kekakuan yang paling rendah dibandingkan variasi lainnya.

4.3.1.3 Pembahasan Nilai *Safety factor*

Nilai *safety factor* adalah nilai yang menjadi dasar untuk menentukan material komposit yang bersifat *orthotropic* ini mengalami kegagalan atau tidak. Jika material komposit mengalami kegagalan maka hal ini mendefinisikan bahwa desain *running blade prosthetic* mengalami kegagalan, dimana artinya *running blade prosthetic* tersebut tidak memiliki kekuatan untuk menahan pembebanan yang ada. Berikut hasil simulasi nilai *safety factor* dengan kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ dengan jenis pengujian *midstance* yang ditunjukkan pada Gambar 4.15.



Gambar 4. 25 Hasil pengujian *running blade prosthetic* menggunakan material komposit palem/epoxy dengan kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ terhadap *safety factor* pada pengujian *midstance*



Gambar 4. 26 Grafik pengujian *running blade prosthetic* menggunakan material palem/epoxy dengan kombinasi orientasi sudut serat terhadap *safety factor* pada pengujian *midstance*

Berdasarkan Gambar 4.26 merupakan hasil simulasi variasi kombinasi sudut terhadap *safety factor* pada pengujian *midstance* untuk desain *running blade prosthetic* menggunakan standar pengujian ISO 10328 pada level P3 dengan pembebanan 1610 N. Diperoleh nilai *safety factor* pada penyusunan material plat komposit untuk desain *running blade prosthetic* dengan kombinasi sudut $[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]_{10}$ yaitu sebesar 0,074563. Dan untuk kombinasi sudut $[0^\circ/90^\circ]_{20}$ diperoleh nilai *safety factor* yaitu sebesar 0,07568. Untuk penyusunan material komposit dengan kombinasi sudut $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{10}$, nilai *safety factor* yang diperoleh yaitu sebesar 0,077046. Dan untuk kombinasi sudut $[0^\circ]_{40}$ dan $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ didapatkan nilai *safety factor* berturut-turut sebesar 0,093335 dan 0,11636. Berdasarkan Gambar 4.26 diatas menunjukkan nilai *safety factor* terbesar didapat pada kombinasi $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ dengan nilai sebesar 0,11636 dan nilai *safety factor* terendah didapat pada kombinasi $[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]_{10}$ dengan nilai sebesar 0,074563. Berdasarkan teori, apabila nilai *safety factor* yang dialami pada desain *running blade prosthetic* semakin besar maka penyusunan material komposit tersebut semakin aman dikarenakan *strength* yang dimiliki oleh susunan komposit tersebut lebih kuat meskipun *stress* yang dialami lebih besar. Sebaliknya jika nilai *safety factor* yang dialami pada desain *running blade prosthetic* rendah maka penyusunan material komposit tersebut semakin tidak aman. Batas aman dari nilai *safety factor* adalah 1, jika nilai *safety factor* < 1 maka bisa dikatakan bahwa desain dari *running blade prosthetic* tidak aman. Berdasarkan hasil simulasi dari grafik diatas bahwa untuk semua kombinasi sudut orientasi terhadap nilai *safety factor* menghasilkan nilai *safety factor* yang dibawah 1, sehingga dikatakan bahwa seluruh kombinasi sudut masih belum mampu untuk menahan beban yang diberikan pada desain *running blade prosthetic* dan dapat dikatakan bahwa desain dari *running blade prosthetic* masih dikatakan tidak aman. Namun berdasarkan grafik diatas dapat diperoleh secara keseluruhan nilai *safety factor* terbaik dari kombinasi sudut yang ada. Berdasarkan hasil dari simulasi dengan kombinasi sudut terbaik yaitu pada kombinasi $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ yang akan

dijadikan acuan dalam melakukan variasi ketebalan untuk memperoleh nilai *safety factor* yang lebih aman.

4.3.1.4 Pembahasan Orientasi Sudut Terbaik

Dalam sub subbab ini akan dijelaskan mengenai orientasi sudut terbaik yang bisa diaplikasikan terhadap *running blade prosthetic* pada pengujian *midstance* menggunakan material palem/epoxy. Untuk tabel perbandingan orientasi sudut dapat dilihat pada Tabel 4.5

Tabel 4. 5 Hasil Data Kumulatif Simulasi Pengujian *Midstance* Material Palem/Epoxy

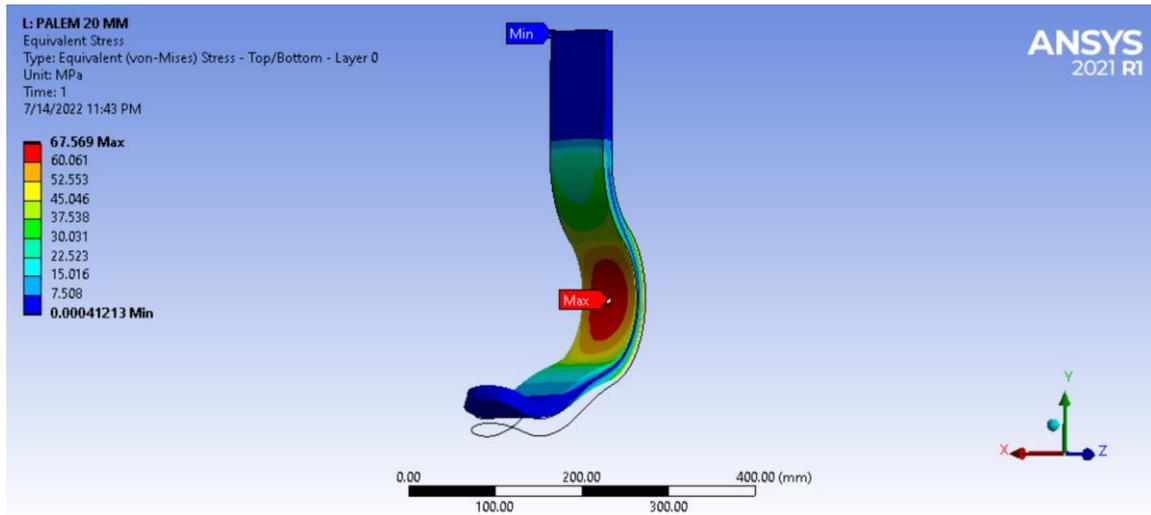
Jenis Pengujian <i>Midstance</i>			
Sudut Serat	Equivalent <i>Stress</i>	Deformasi	<i>Safety factor</i>
$[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]_{10}$	324.23	538.96	0.074563
$[0^\circ/90^\circ]_{20}$	363.96	618.65	0.07568
$[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{10}$	313.92	557.2	0.077046
$[0^\circ]_{40}$	253.27	438.78	0.093335
$[45^\circ/-45^\circ]_{20}$	268.91	707.72	0.11636

Orientasi sudut $[0^\circ]_{40}$ memiliki nilai terbaik untuk kategori *equivalent stress* karena memiliki nilai terendah sehingga dianggap memiliki nilai keamanan struktur yang paling aman untuk digunakan. Sementara untuk kategori nilai Deformasi terbaik didapatkan oleh orientasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ sehingga dianggap memiliki nilai kelenturan yang baik dibandingkan dengan orientasi sudut lain. Untuk kategori nilai Tsai – Wu *safety factor*, orientasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ memiliki nilai tertinggi dibanding dengan orientasi sudut yang lainnya. Oleh karena itu dianggap orientasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ memiliki nilai kekuatan yang terbaik dalam menahan beban yang diberikan.

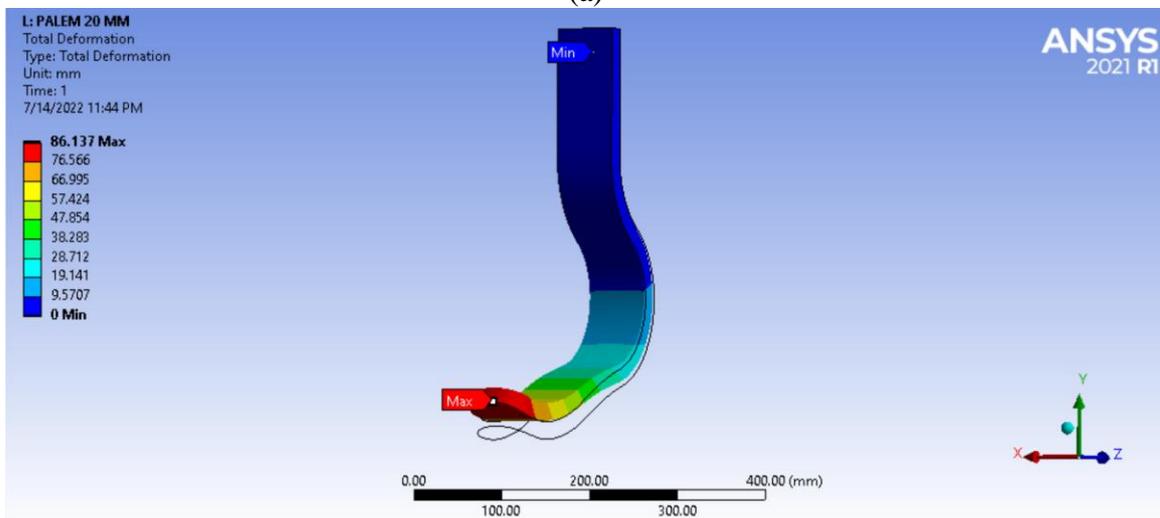
Dari hasil kumulatif dapat disimpulkan bahwa orientasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ merupakan orientasi sudut terbaik dalam jenis pengujian *midstance* pada material sisal/epoxy dikarenakan memiliki nilai Deformasi yang tertinggi, nilai Tsai – Wu *safety factor* yang tertinggi, serta memiliki *equivalent stress* kedua terendah setelah orientasi $[0^\circ]_{40}$.

4.3.1.5 Pembahasan Pengaruh Ketebalan

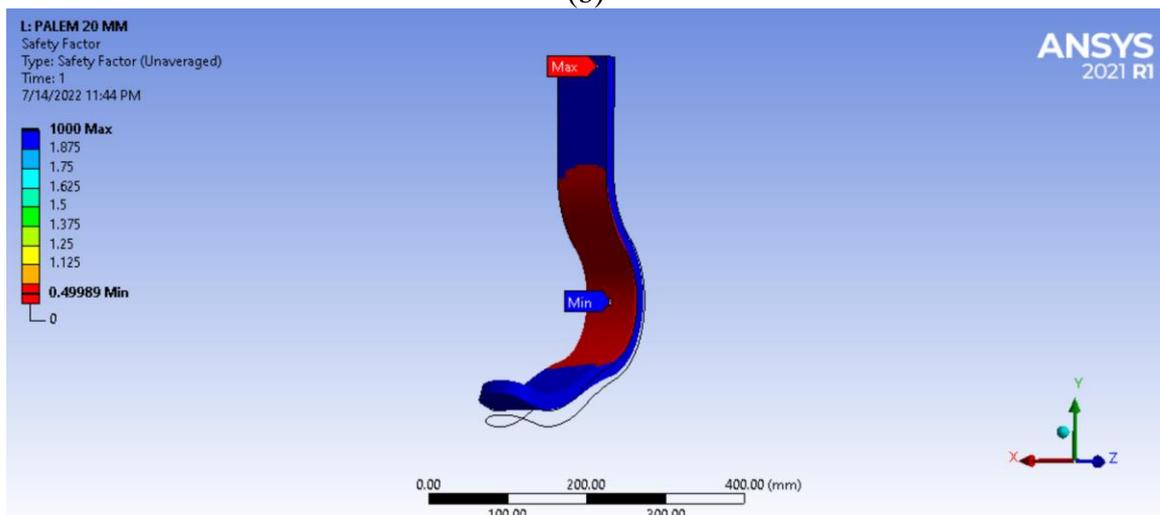
Pengaruh ketebalan pada penelitian ini dilakukan untuk memperoleh desain *running blade prosthetic* yang lebih aman dari kombinasi sudut terbaik yaitu sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$. Penambahan ketebalan yang dilakukan pada simulasi ini yaitu 10 mm sampai dengan 40 mm dengan kenaikan 5 mm pada tiap ketebalan. Tujuannya ialah mencari ketebalan total komposit yang optimum dan sanggup dalam menahan pembebanan level P3 sesuai standar ISO 10328 (2016). Berdasarkan hasil simulasi pada pengujian *midstance* dengan variasi ketebalan 20 mm dapat dilihat pada Gambar 4.27.



(a)



(b)



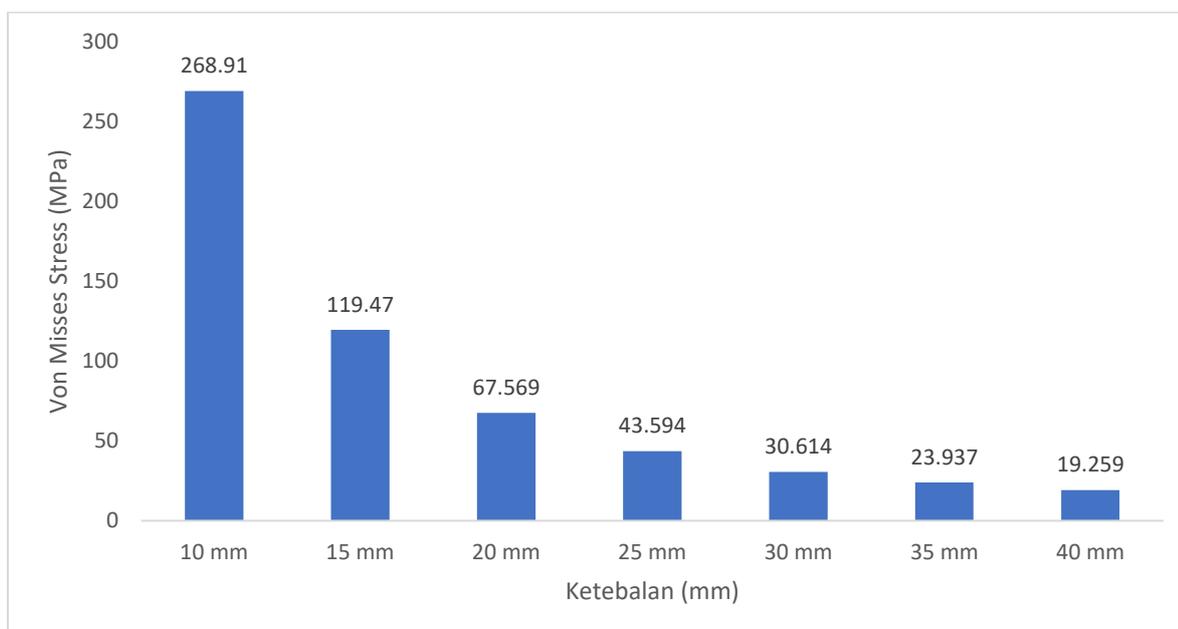
(c)

Gambar 4. 27 Hasil pengujian *running blade prosthetic* menggunakan material komposit palem/epoxy dengan kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ dan ketebalan 10 mm pada pengujian *midstance* terhadap: (a) Tegangan Maksimum Von-Misses Stress, (b) Deformasi, (c) *Safety factor*

Tabel 4. 6 Hasil pengujian *running blade prosthetic* menggunakan material komposit palem/epoxy dengan kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ terhadap variasi ketebalan, dengan nilai tegangan maksimum Von-Misses *stress*, deformasi, dan *safety factor* yang dihasilkan.

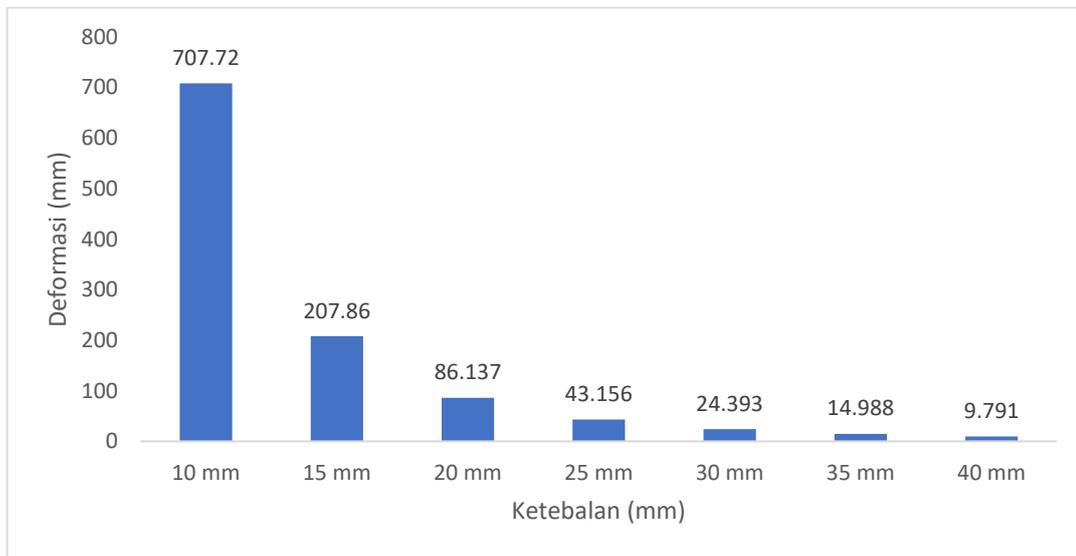
Beban (N)	Orientasi Sudut	Ketebalan (mm)	Von Misses Stress (Mpa)	Deformasi (mm)	<i>Safety factor</i>
1610	$[45^\circ/-45^\circ]_{20}$	10 mm	268,91	707,72	0,11636
1610	$[45^\circ/-45^\circ]_{20}$	15 mm	119,47	207,86	0,27533
1610	$[45^\circ/-45^\circ]_{20}$	20 mm	67,569	86,137	0,49989
1610	$[45^\circ/-45^\circ]_{20}$	25 mm	43,594	43,156	0,78449
1610	$[45^\circ/-45^\circ]_{20}$	30 mm	30,614	24,393	1,1228
1610	$[45^\circ/-45^\circ]_{20}$	35 mm	23,937	14,988	1,5078
1610	$[45^\circ/-45^\circ]_{20}$	40 mm	19,259	9,791	1,9312

Berdasarkan Tabel 4.3 merupakan hasil simulasi pengujian *midstance* pada *running blade prosthetic* dengan pembebanan 1610 N menggunakan kombinasi sudut terbaik yaitu $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ dengan variasi ketebalan. Ketebalan awal desain *running blade prosthetic* yang digunakan yaitu 10 mm, dengan hasil simulasi diperoleh bahwa nilai tegangan maksimum Von-Misses, total deformasi, dan *safety factor* yang dihasilkan berturut-turut sebesar 268,91 MPa, 707,72 mm dan 0,11636. Kemudian dilakukan penambahan ketebalan akhir sampai dengan 40 mm. Pada ketebalan 40 mm, diperoleh nilai tegangan maksimum Von-Misses, total deformasi, dan *safety factor* yang dihasilkan berturut-turut sebesar 19,259 MPa, 9,791 mm dan 1,9312. Dapat dilihat bahwa setelah dilakukan penambahan ketebalan, diperoleh nilai *safety factor* yang lebih baik dan meningkat.



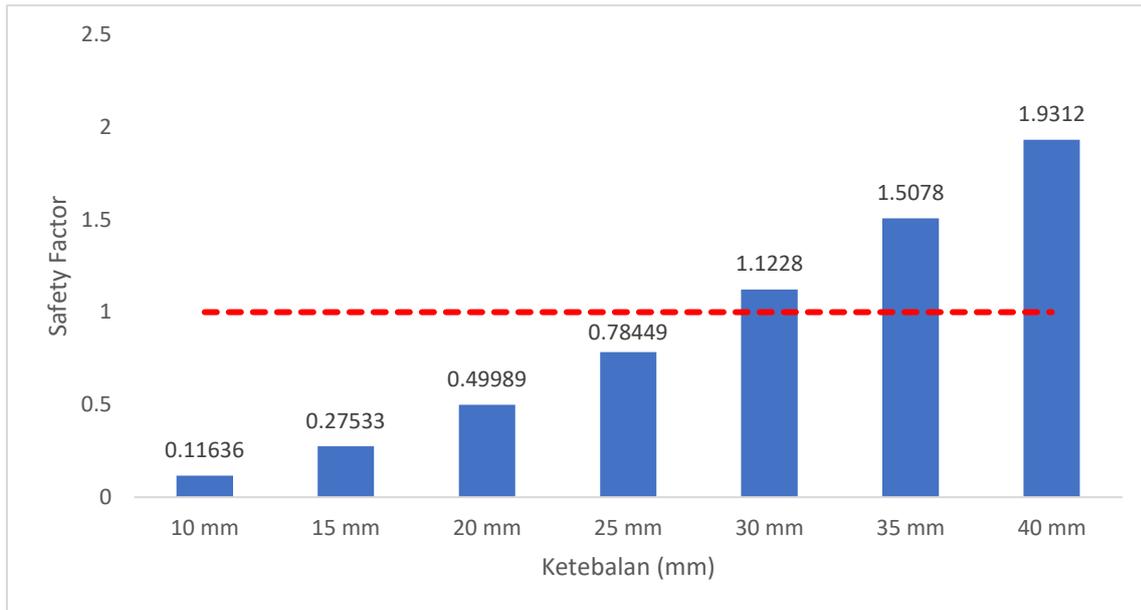
Gambar 4. 28 Grafik Simulasi Variasi Ketebalan dari Material Komposit Palem/Epoxi terhadap Tegangan Von-Misses *Stress* pada pengujian *Midstance*

Berdasarkan Gambar 4.28 Diperoleh grafik hubungan antara variasi ketebalan dan tegangan Von-Misses yang dialami oleh desain *running blade prosthetic*. Pada gambar grafik diatas grafik tren mengalami penurunan, dimana grafik mengalami penurunan dari ketebalan 10 mm sampai dengan ketebalan 40 mm. Titik maksimum nilai dari tegangan Von-Misses yang dialami oleh *running blade prosthetic* berada pada tebal 10 mm dengan nilai tegangan sebesar 268,91MPa. Sedangkan titik minimum berada pada ketebalan 40 mm dengan nilai tegangan sebesar 19,259 MPa. Dapat dilihat dari grafik diatas bahwa terjadi penurunan tegangan Von-Misses seiring dengan bertambahnya ketebalan. Hal tersebut bisa terjadi dikarenakan setiap melakukan penambahan ketebalan maka jumlah lamina atau tumpukan dari komposit juga semakin bertambah, sehingga ketika pembebanan yang diberikan kepada *running blade prosthetic* dapat didistribusikan pada setiap lamina yang menyebabkan tegangan Von-Misses semakin menurun nilainya.



Gambar 4. 29 Grafik Hasil Simulasi Variasi Ketebalan dari Material Komposit Palem/Epoxy dan *Deformasi* pada pengujian *midstance*

Berdasarkan gambar 4.29 Diperoleh grafik hubungan antara variasi ketebalan dan total defomasi yang dialami oleh desain *running blade prosthetic*. Pada gambar diatas grafik tren mengalami penurunan penurunan dari ketebalan 10 mm sampai dengan ketebalan 40 mm. Titik maksimum nilai dari total deformasi maksimum yang dialami oleh *running blade prosthetic* berada pada tebal 10 mm dengan nilai total deformasi sebesar 707,72 mm. Sedangkan titik minimum berada pada ketebalan 40 mm dengan nilai total deformasi sebesar 9,791 mm. Dapat dilihat dari grafik diatas bahwa terjadi penurunan deformasi seiring dengan bertambahnya ketebalan. Hal tersebut bisa terjadi dikarenakan setiap melakukan penambahan ketebalan maka jumlah lamina atau tumpukan dari komposit juga semakin bertambah. Sehingga menyebabkan material komposit menjadi lebih kaku. Apabila material komposit lebih kaku maka akan menghasilkan nilai deformasi yang lebih kecil.



Gambar 4. 30 Hasil Simulasi Variasi Ketebalan dari Material Palem/Epoxy terhadap *Safety factor* pada pengujian *midstance*

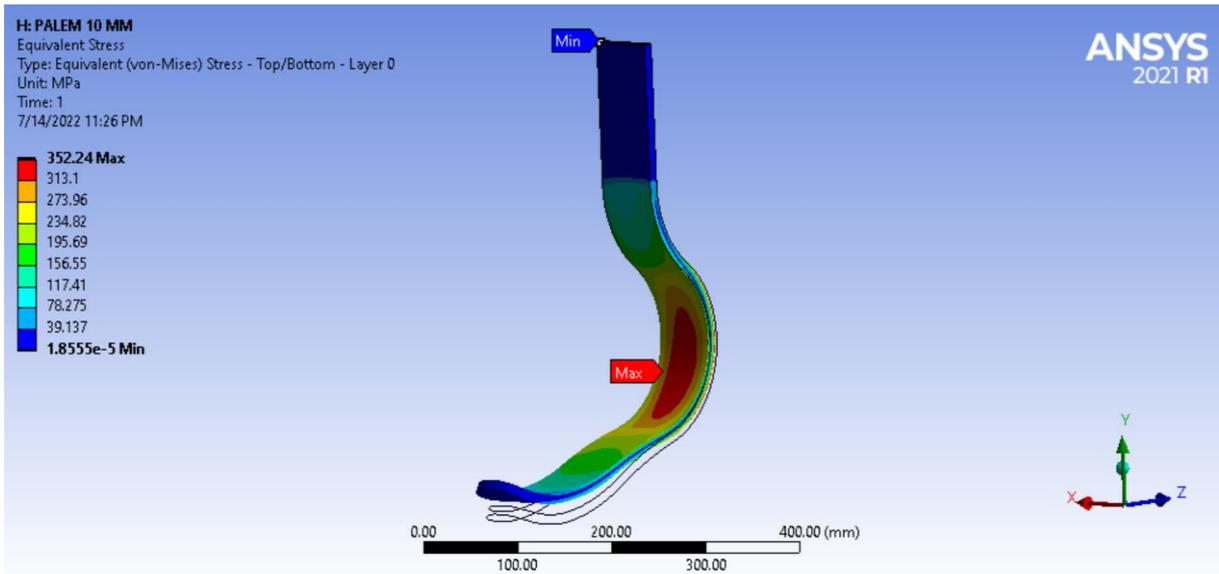
Berdasarkan gambar 4.30 diperoleh grafik hubungan antara variasi ketebalan dan *safety factor* yang dialami oleh desain *running blade prosthetic*. Pada gambar diatas grafik tren mengalami kenaikan dari ketebalan 10 mm sampai dengan ketebalan 40 mm. Titik maksimum nilai dari *safety factor* yang dialami oleh *running blade prosthetic* berada pada tebal 40 mm dengan *safety factor* sebesar 1,9312. Sedangkan titik minimum berada pada ketebalan 10 mm dengan nilai *safety factor* sebesar 0,11636. Dapat dilihat dari grafik diatas bahwa terjadi kenaikan nilai *safety factor* seiring dengan bertambahnya ketebalan. Hal tersebut bisa terjadi dikarenakan setiap melakukan penambahan ketebalan maka jumlah lamina atau tumpukan dari komposit juga semakin bertambah. Sehingga dampak dari fenomena tersebut menyebabkan *safety factor* meningkat dan desain dari *running blade prosthetic* menjadi lebih aman. Dan dapat dilihat pada grafik pengujian *midstance* diatas, dari ketebalan 30 mm, 35 mm dan 40 mm nilai *safety factor* yang dihasilkan berturut-turut yaitu 1,1228, 1,5078 dan 1,9312. Dapat dinyatakan bahwa hasil *safety factor* pada ketebalan 30 mm, 35 mm, dan 40 mm sudah melebihi angka 1 dan tergolong aman.

4.3.2 Hasil Simulasi Pengujian *Forefoot*

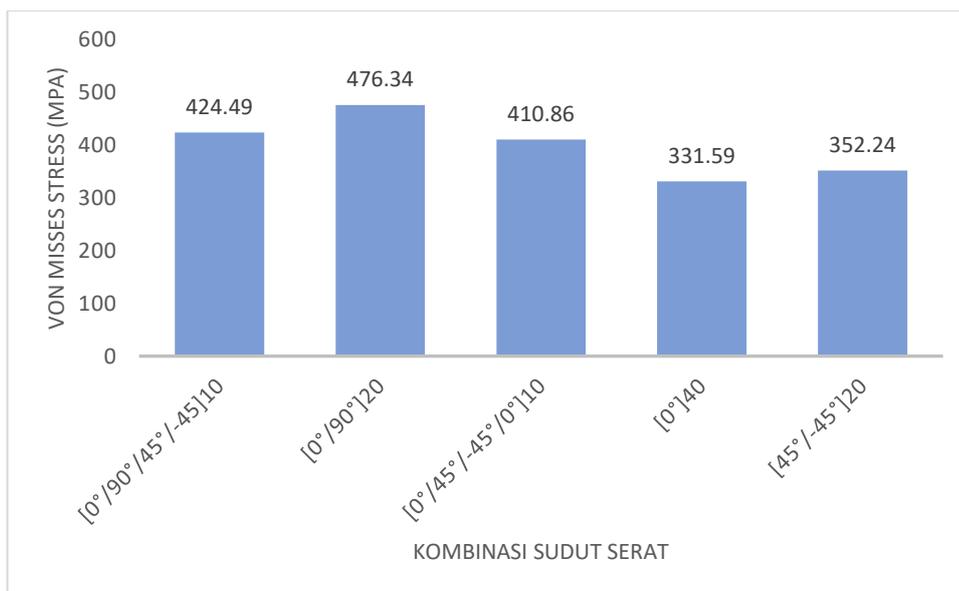
Pada tahap ini dilakukan pengujian *forefoot* pada desain *running blade prosthetic* dengan menghasilkan kombinasi sudut dan variasi ketebalan yang akan dibandingkan dengan nilai tegangan maksimum Von-Misses *stress*, total deformasi, dan *safety factor*.

4.3.2.1 Pembahasan Nilai Equivalent *Stress*

Hasil simulasi Von-Misses yang terjadi pada *running blade prosthetic* dapat dilihat pada Gambar 4.31. Merupakan hasil simulasi dari kombinasi sudut $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_{20}$ dengan jenis pengujian *forefoot*. Letak tegangan terbesar sama seperti pada pengujian *midstance* yaitu pada layer pertama atau layer terluar.



Gambar 4. 31 Hasil pengujian *running blade prosthetic* menggunakan material palem/epoxy dengan kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ terhadap tegangan maksimum Von-Misses pada pengujian *forefoot*



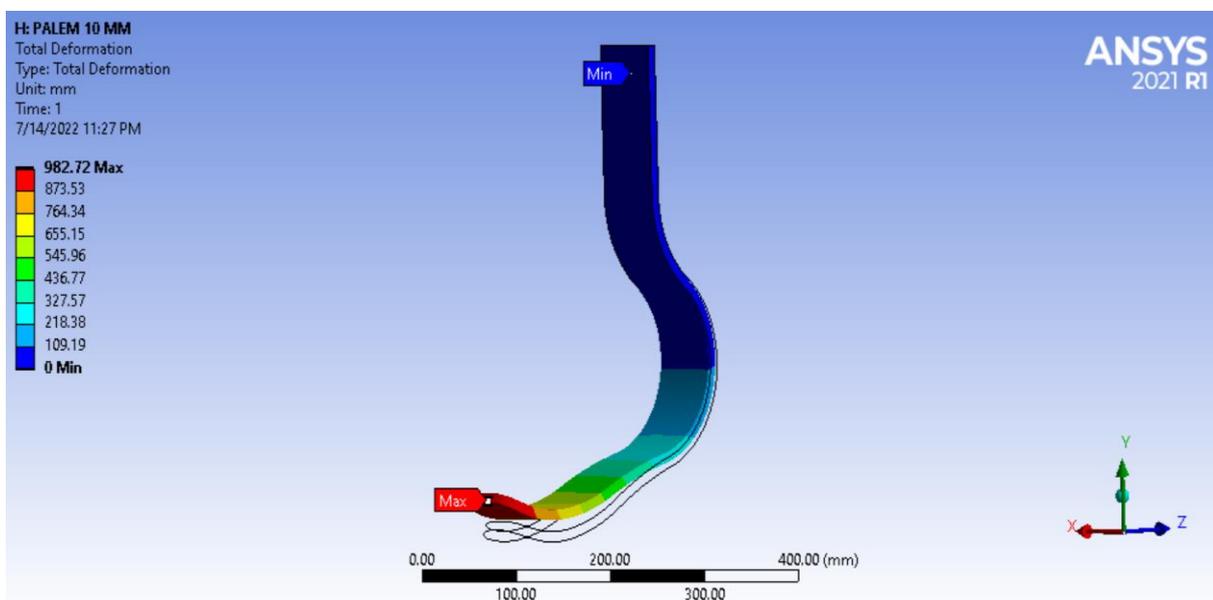
Gambar 4. 32 Grafik hasil pengujian *running blade prosthetic* menggunakan material palem/epoxy dengan kombinasi sudut serat terhadap Von-Misses *stress* pada pengujian *forefoot*

Dari data hasil simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.32 di atas, diketahui *running blade prosthetic* dengan penyusunan plat komposit menggunakan material komposit pada pengujian *midstance* dengan pemberian beban maksimal berdasarkan standar ISO 10328 pada level P3 yaitu 1610 N. Diperoleh bahwa untuk kombinasi sudut $[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]_{10}$ nilai maksimum tegangan yang dialami oleh *running blade prosthetic* sebesar 424,49 MPa, dan untuk kombinasi sudut $[0^\circ/90^\circ]_{20}$ didapatkan nilai maksimum tegangan Von-Misses sebesar 476,34 MPa. Untuk penyusunan plat komposit dengan kombinasi sudut $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{10}$ diperoleh nilai tegangan maksimum yang dialami *running blade prosthetic* yaitu sebesar 410,86 MPa, dan untuk kombinasi sudut $[0^\circ]_{40}$ didapatkan nilai maksimum tegangan Von-Misses sebesar 331,59

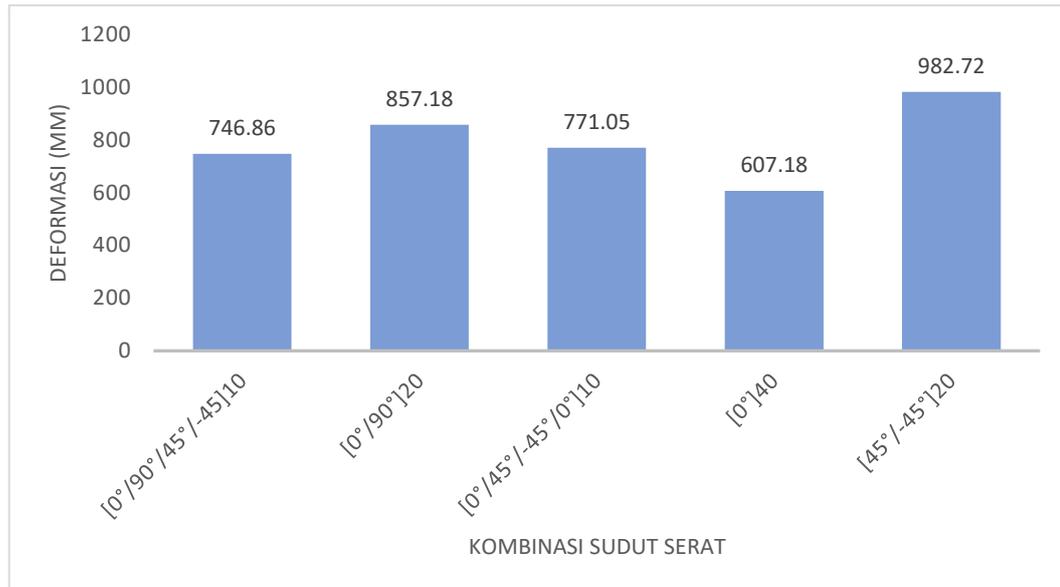
MPa. Kemudian untuk kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ nilai tegangan maksimum yang dialami oleh *running blade prosthetic* yaitu sebesar 352,24 MPa. Secara keseluruhan nilai tegangan maksimum Von-Misses tertinggi berada pada kombinasi sudut $[0^\circ/90^\circ]_{10}$ dengan nilai sebesar 476,34 MPa. Kemudian untuk tegangan Von-Misses terendah terjadi pada kombinasi sudut serut $[0^\circ]_{40}$ dengan nilai tegangan sebesar 331,59 MPa. Pada teorinya, tegangan Von-Misses akan dibandingkan dengan *strength* dari material tersebut. Apabila tegangan yang dialami pada material semakin besar maka material tersebut semakin tidak aman. Sebaliknya jika tegangan yang dialami kecil maka tingkat keamanan material semakin baik. Berdasarkan grafik diatas bahwa kombinasi sudut $[0^\circ]_{40}$ memiliki tingkat keamanan yang paling baik dibandingkan versi kombinasi sudut lainnya.

4.3.2.2 Pembahasan Nilai Deformasi

Hasil Simulasi deformasi yang terjadi pada *running blade prosthetic* dapat dilihat pada Gambar 4.33 merupakan hasil simulasi dari kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ dengan jenis pengujian *forefoot*. Untuk hasil keseluruhan akan dipaparkan pada Gambar 4.33



Gambar 4. 33 Hasil pengujian *running blade prosthetic* menggunakan material komposit palem/epoxy dengan kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ terhadap *Deformasi* pada pengujian *forefoot*

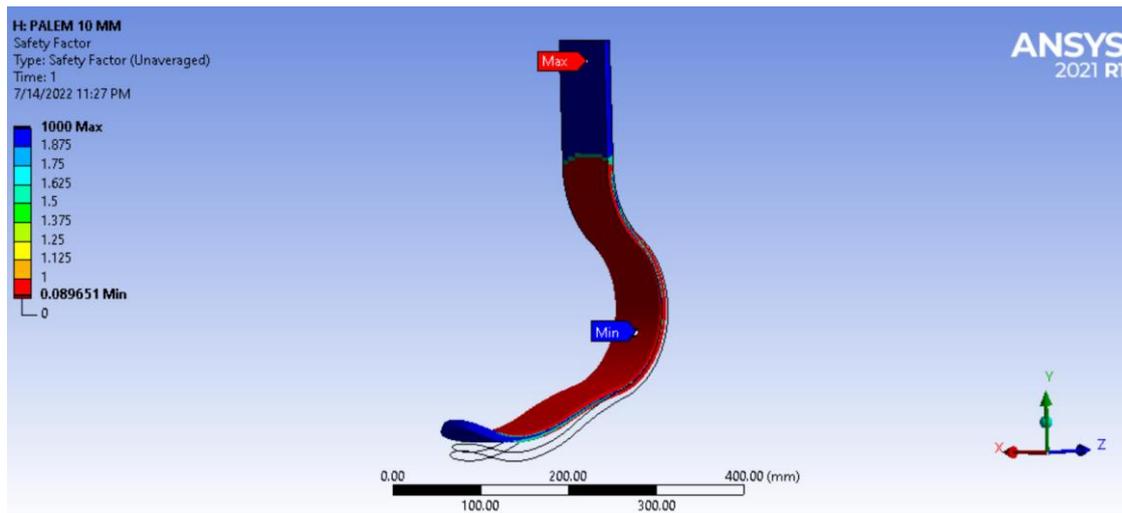


Gambar 4. 34 Grafik hasil pengujian *running blade prosthetic* menggunakan material komposit palem/epoxy dengan kombinasi sudut serat terhadap *Deformasi* pada pengujian *forefoot*

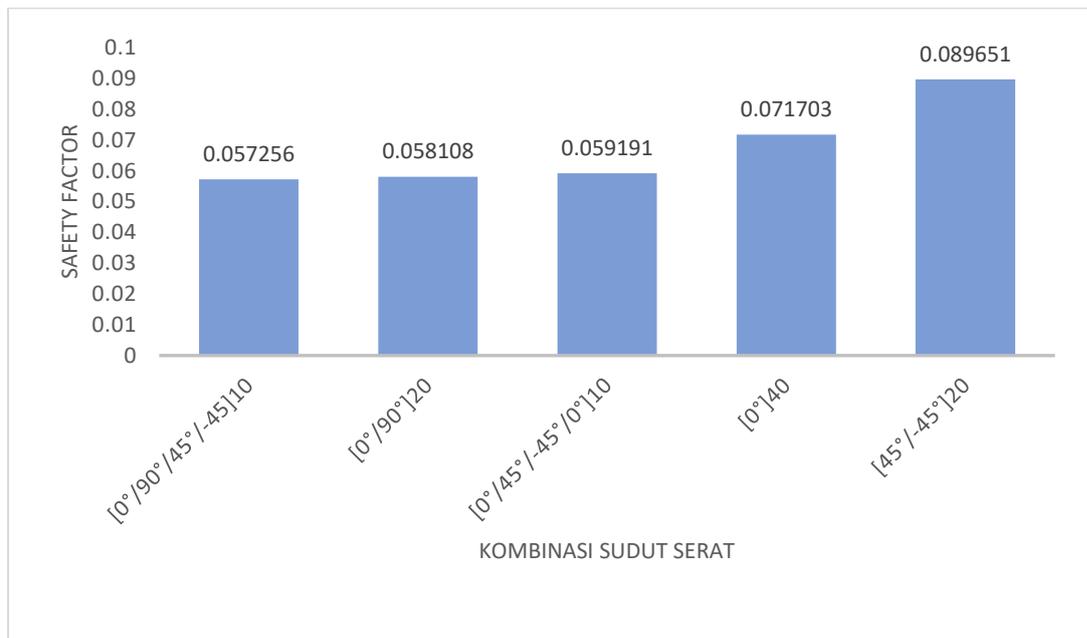
Berdasarkan Gambar 4.34 merupakan hasil simulasi variasi kombinasi sudut terhadap *Deformasi* pada pengujian *midstance* untuk desain *running blade prosthetic* menggunakan standar pengujian ISO 10328 pada level P3 dengan pembebanan 1610 N. Diperoleh nilai deformasi maksimum pada penyusunan material plat komposit untuk desain *running blade prosthetic* dengan kombinasi sudut $[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]_{10}$ yaitu sebesar 746,86 mm, dan untuk kombinasi sudut $[0^\circ/90^\circ]_{20}$ didapatkan nilai deformasi maksimum sebesar 857,18 mm. Untuk penyusunan material komposit dengan kombinasi sudut $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{10}$, nilai deformasi maksimum yang dialami oleh *running blade prosthetic* yaitu sebesar 771,05 mm. Dan untuk kombinasi sudut $[0^\circ]_{40}$ dan $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ didapatkan nilai deformasi maksimum sebesar 607,18 mm dan 982,72 mm. Berdasarkan gambar 4.34 menunjukkan nilai deformasi terbesar terjadi pada kombinasi sudut serat $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ dengan nilai sebesar 982,72 mm. Kemudian diperoleh nilai deformasi terkecil dengan kombinasi sudut serat yaitu $[0^\circ]_{40}$ dengan nilai deformasi sebesar 607,18 mm. Berdasarkan teori yaitu apabila deformasi yang dialami pada material semakin besar maka penyusunan material komposit tersebut semakin tidak kaku alias lentur. Sebaliknya jika deformasi yang dialami kecil maka tingkat penyusunan material komposit tersebut semakin kaku. Berdasarkan data grafik diatas didapat didapat bahwa kombinasi $[0^\circ]_{40}$ memiliki tingkat kekakuan yang paling rendah dibandingkan variasi lainnya.

4.3.2.3 Pembahasan Nilai *Safety factor*

Hasil *safety factor* yang terjadi pada *running blade prosthetic* dapat dilihat pada Gambar 4.13 merupakan hasil simulasi dari kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ dengan jenis pengujian *forefoot*.



Gambar 4. 35 Hasil pengujian *running blade prosthetic* menggunakan material komposit palem/epoxy dengan kombinasi sudut serat terhadap nilai *safety factor* pada pengujian *forefoot*



Gambar 4. 36 Hasil pengujian *running blade prosthetic* material komposit palem/epoxy dengan kombinasi sudut serat terhadap *safety factor* setiap variasi pada pengujian *forefoot*

Berdasarkan Gambar 4.36 merupakan hasil simulasi variasi kombinasi sudut terhadap *safety factor* pada pengujian *forefoot* untuk desain *running blade prosthetic* menggunakan standar pengujian ISO 10328 pada level P3 dengan pembebanan 1610 N. Diperoleh nilai *safety factor* pada penyusunan material plat komposit untuk desain *running blade prosthetic* dengan kombinasi sudut $[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]_{10}$ yaitu sebesar 0,057256, dan untuk kombinasi sudut $[0^\circ/90^\circ]_{20}$ diperoleh nilai *safety factor* yaitu sebesar 0,058108. Untuk penyusunan material komposit dengan kombinasi sudut $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{10}$, nilai *safety factor* yang diperoleh yaitu sebesar 0,059191. Dan untuk kombinasi sudut $[0^\circ]_{40}$ dan $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ didapatkan nilai *safety factor* berturut-turut sebesar 0,071703 dan 0,089651. Berdasarkan Gambar 4.36 diatas menunjukkan nilai *safety factor* terbesar didapat pada kombinasi $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ dengan nilai sebesar 0,089651 dan nilai *safety factor* terendah didapat pada kombinasi $[0^\circ/90^\circ/45^\circ/$

$-45^\circ]_{10}$ dengan nilai sebesar 0,057256. Berdasarkan teori, apabila nilai *safety factor* yang dialami pada desain *running blade prosthetic* semakin besar maka penyusunan material komposit tersebut semakin aman dikarenakan *strength* yang dimiliki oleh susunan komposit tersebut lebih kuat meskipun *stress* yang dialami lebih besar. Sebaliknya jika nilai *safety factor* yang dialami pada desain *running blade prosthetic* rendah maka penyusunan material komposit tersebut semakin tidak aman. Batas aman dari nilai *safety factor* adalah 1, jika nilai *safety factor* < 1 maka bisa dikatakan bahwa desain dari *running blade prosthetic* tidak aman. Berdasarkan hasil simulasi dari grafik diatas bahwa untuk semua kombinasi sudut orientasi terhadap nilai *safety factor* menghasilkan nilai *safety factor* yang dibawah 1, sehingga dikatakan bahwa seluruh kombinasi sudut masih belum mampu untuk menahan beban yang diberikan pada desain *running blade prosthetic* dan dapat dikatakan bahwa desain dari *running blade prosthetic* masih dikatakan tidak aman. Namun berdasarkan grafik diatas dapat diperoleh secara keseluruhan nilai *safety factor* terbaik dari kombinasi sudut yang ada. Berdasarkan hasil dari simulasi dengan kombinasi sudut terbaik yaitu pada kombinasi $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ yang akan dijadikan acuan dalam melakukan variasi ketebalan untuk memperoleh nilai *safety factor* yang lebih aman.

4.3.2.4 Pembahasan Orientasi Sudut Terbaik

Dalam sub subbab ini akan dijelaskan mengenai orientasi sudut terbaik yang bisa diaplikasikan terhadap *running blade prosthetic* pada pengujian *forefoot* menggunakan material palem/epoxy. Untuk tabel perbandingan orientasi sudut dapat dilihat pada Tabel 4.3

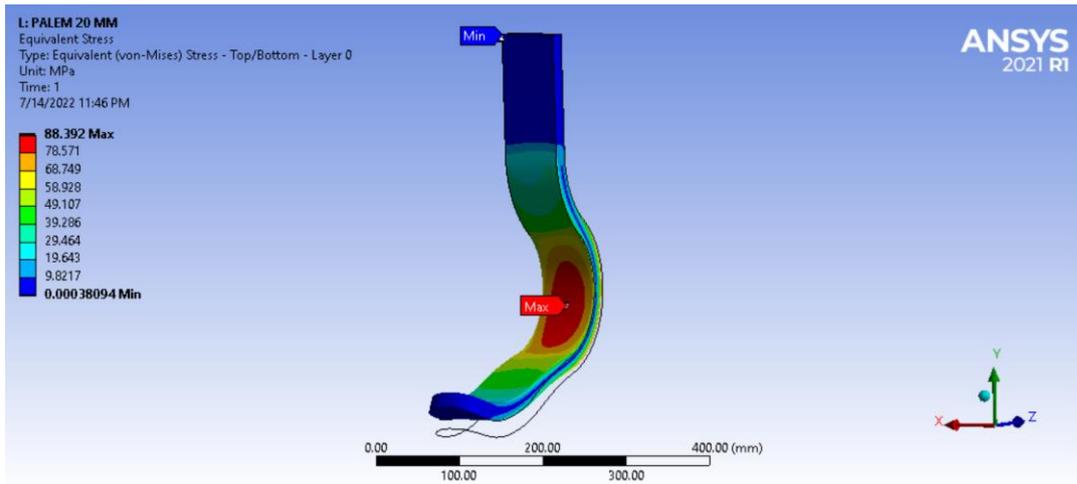
Tabel 4. 7 Hasil Data Kumulatif Simulasi Pengujian Forefoot Material Palem/Epoxy

Jenis Pengujian Forefoot			
Sudut Serat	Equivalent Stress	Deformasi	Safety factor
$[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]_{10}$	424.49	746.86	0.057256
$[0^\circ/90^\circ]_{20}$	476.34	857.18	0.058108
$[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{10}$	410.86	771.05	0.059191
$[0^\circ]_{40}$	331.59	607.18	0.071703
$[45^\circ/-45^\circ]_{20}$	352.24	982.72	0.089651

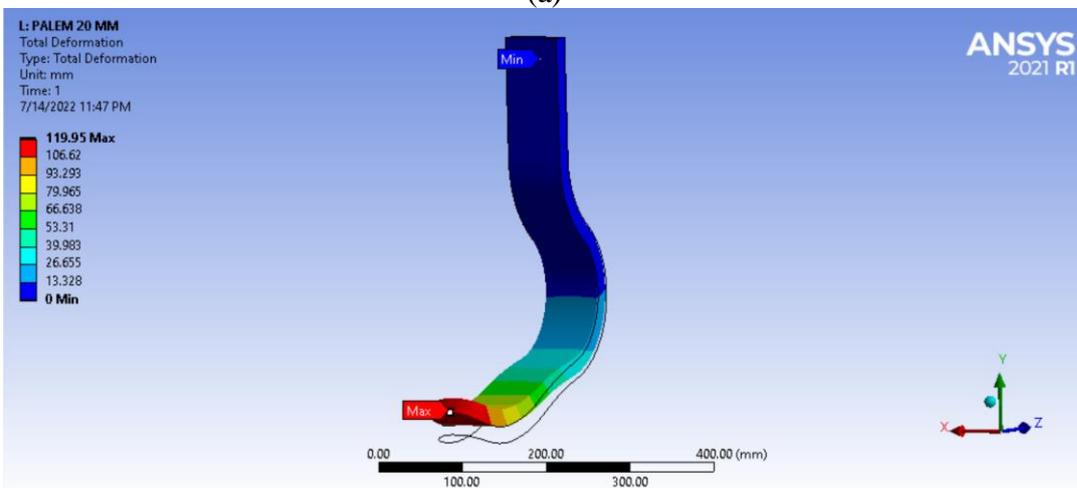
Berdasarkan Tabel 4.7 diatas, pengujian *forefoot* ini memiliki sudut orientasi terbaik yang sama seperti pada pengujian *midstance*. Dapat disimpulkan bahwa orientasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ merupakan orientasi sudut terbaik dalam jenis pengujian *forefoot* pada material sisal/epoxy dikarenakan memiliki nilai Deformasi yang tertinggi, nilai Tsai – Wu *safety factor* yang tertinggi, serta memiliki *equivalent stress* kedua terendah setelah orientasi $[0^\circ]_{40}$.

4.3.2.5 Pembahasan Pengaruh Ketebalan

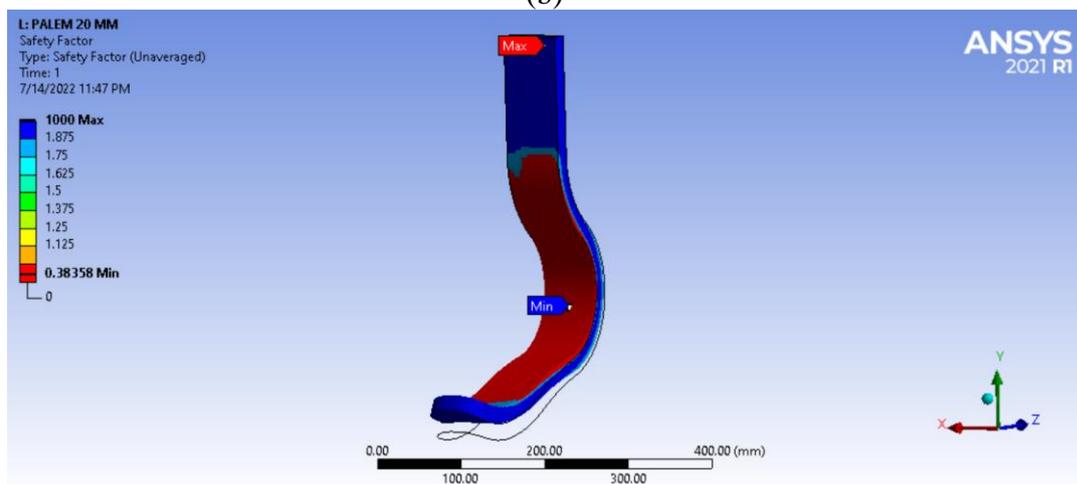
Pengaruh ketebalan pada penelitian ini dilakukan untuk memperoleh desain *running blade prosthetic* yang lebih aman dari kombinasi sudut terbaik yaitu sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$. Penambahan ketebalan yang dilakukan pada simulasi ini yaitu 10 mm sampai dengan 40 mm dengan kenaikan 5 mm pada tiap ketebalan. Tujuannya ialah mencari ketebalan total komposit yang optimum dan sanggup dalam menahan pembebanan level P3 sesuai standar ISO 10328 (2016). Berdasarkan hasil simulasi pada pengujian *midstance* dengan variasi ketebalan 20 mm dapat dilihat pada Gambar 4.37



(a)



(b)



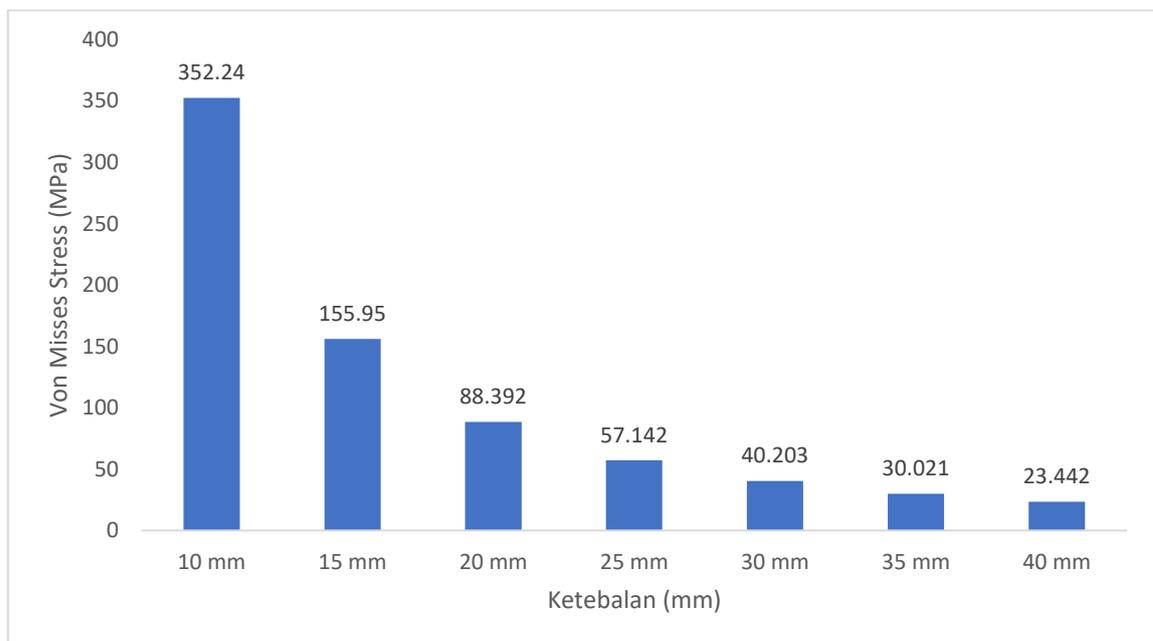
(c)

Gambar 4. 37 Hasil pengujian *running blade prosthetic* menggunakan material komposit palem/epoxy dengan kombinasi sudut $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_5$ dan ketebalan 9 mm pada pengujian *forefoot* terhadap: (a) tegangan maksimum Von-Misses, (b) total deformasi, (c) *safety factor*

Tabel 4. 8 Hasil pengujian *running blade prosthetic* menggunakan material komposit palem/epoxy dengan kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]_5$ pada pengujian *forefoot* terhadap variasi ketebalan, dengan nilai tegangan maksimum Von-Misses, total deformasi, dan *safety factor* yang dihasilkan.

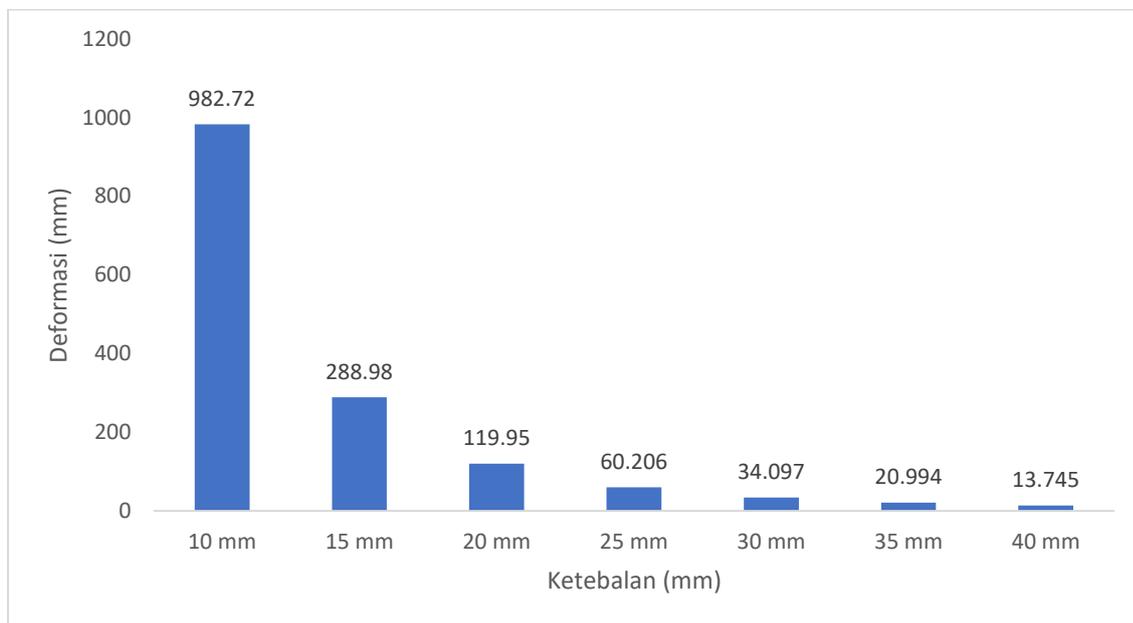
Beban (N)	Orientasi Sudut	Ketebalan (mm)	Von Misses Stress (Mpa)	Deformasi (mm)	<i>Safety factor</i>
1610	$[45^\circ/-45^\circ]_{20}$	10 mm	352,24	982,72	0,089651
1610	$[45^\circ/-45^\circ]_{20}$	15 mm	155,95	288,98	0,21172
1610	$[45^\circ/-45^\circ]_{20}$	20 mm	88,392	119,95	0,38358
1610	$[45^\circ/-45^\circ]_{20}$	25 mm	57,142	60,206	0,60064
1610	$[45^\circ/-45^\circ]_{20}$	30 mm	40,203	34,097	0,85791
1610	$[45^\circ/-45^\circ]_{20}$	35 mm	30,021	20,994	1,1499
1610	$[45^\circ/-45^\circ]_{20}$	40 mm	23,442	13,745	1,4702

Berdasarkan Tabel 4.4 merupakan hasil simulasi pengujian *midstance* pada *running blade prosthetic* dengan pembebanan 1610 N menggunakan kombinasi sudut terbaik yaitu $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$ dengan variasi ketebalan. Ketebalan awal desain *running blade prosthetic* yang digunakan yaitu 10 mm, dengan hasil simulasi diperoleh bahwa nilai tegangan maksimum Von-Misses, total deformasi, dan *safety factor* yang dihasilkan berturut-turut sebesar 352,24 MPa, 982,72 mm dan 0,089651. Kemudian dilakukan penambahan ketebalan akhir sampai dengan 40 mm. Pada ketebalan 40 mm, diperoleh nilai tegangan maksimum Von-Misses, total deformasi, dan *safety factor* yang dihasilkan berturut-turut sebesar 23,442 MPa, 13,745 mm dan 1,4702. Dapat dilihat bahwa setelah dilakukan penambahan ketebalan, diperoleh nilai *safety factor* yang lebih baik dan meningkat. Pada ketebalan 35 mm dan 40 mm nilai *safety factor* yang dihasilkan berturut-turut yaitu 1,1499 dan 1,4702. Dapat dinyatakan bahwa hasil *safety factor* pada ketebalan 35 mm dan 40 mm sudah melebihi angka 1 dan tergolong aman.



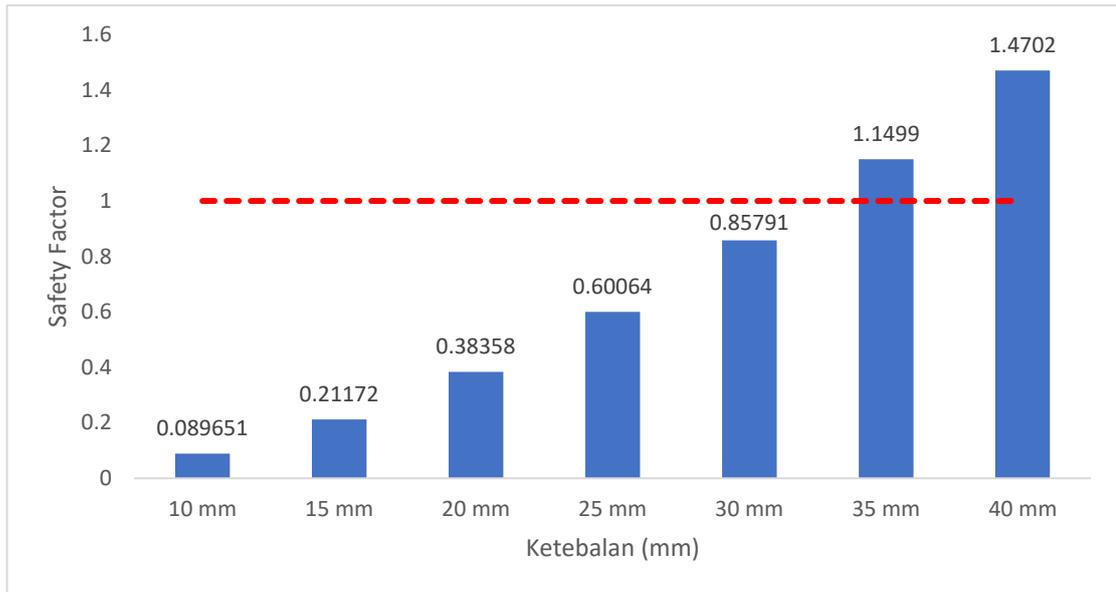
Gambar 4. 38 Hasil Simulasi Variasi Ketebalan dari Material palem/epoxy terhadap tegangan maksimum Von-Misses

Berdasarkan Gambar 4.38 Diperoleh grafik hubungan antara variasi ketebalan dan tegangan Von-Misses yang dialami oleh desain *running blade prosthetic*. Pada gambar grafik diatas grafik tren mengalami penurunan, dimana grafik mengalami penurunan dari ketebalan 10 mm sampai dengan ketebalan 40 mm. Titik maksimum nilai dari tegangan Von-Misses yang dialami oleh *running blade prosthetic* berada pada tebal 10 mm dengan nilai tegangan sebesar 52,24 MPa. Sedangkan titik minimum berada pada ketebalan 40 mm dengan nilai tegangan sebesar 23,442 MPa. Dapat dilihat dari grafik diatas bahwa terjadi penurunan tegangan Von-Misses seiring dengan bertambahnya ketebalan. Hal tersebut bisa terjadi dikarenakan setiap melakukan penambahan ketebalan maka jumlah lamina atau tumpukan dari komposit juga semakin bertambah, sehingga ketika pembebanan yang diberikan kepada *running blade prosthetic* dapat didistribusikan pada setiap lamina yang menyebabkan tegangan Von-Misses semakin menurun nilainya.



Gambar 4. 39 Hasil Simulasi variasi ketebalan dari material komposit palem/epoxy terhadap *Deformasi*

Berdasarkan gambar 4.39 Diperoleh grafik hubungan antara variasi ketebalan dan total defomasi yang dialami oleh desain *running blade prosthetic*. Pada gambar diatas grafik tren mengalami penurunan penurunan dari ketebalan 10 mm sampai dengan ketebalan 40 mm. Titik maksimum nilai dari total deformasi maksimum yang dialami oleh *running blade prosthetic* berada pada tebal 10 mm dengan nilai total deformasi sebesar 982,72 mm. Sedangkan titik minimum berada pada ketebalan 40 mm dengan nilai total deformasi sebesar 13,745 mm. Dapat dilihat dari grafik diatas bahwa terjadi penurunan total deformasi seiring dengan bertambahnya ketebalan. Hal tersebut bisa terjadi dikarenakan setiap melakukan penambahan ketebalan maka jumlah lamina atau tumpukan dari komposit juga semakin bertambah. Sehingga menyebabkan material komposit menjadi lebih kaku. Apabila material komposit lebih kaku maka akan menghasilkan nilai deformasi yang lebih kecil.



Gambar 4. 40 Hasil simulasi variasi ketebalan dari material komposit palem/epoxy terhadap *Safety factor*

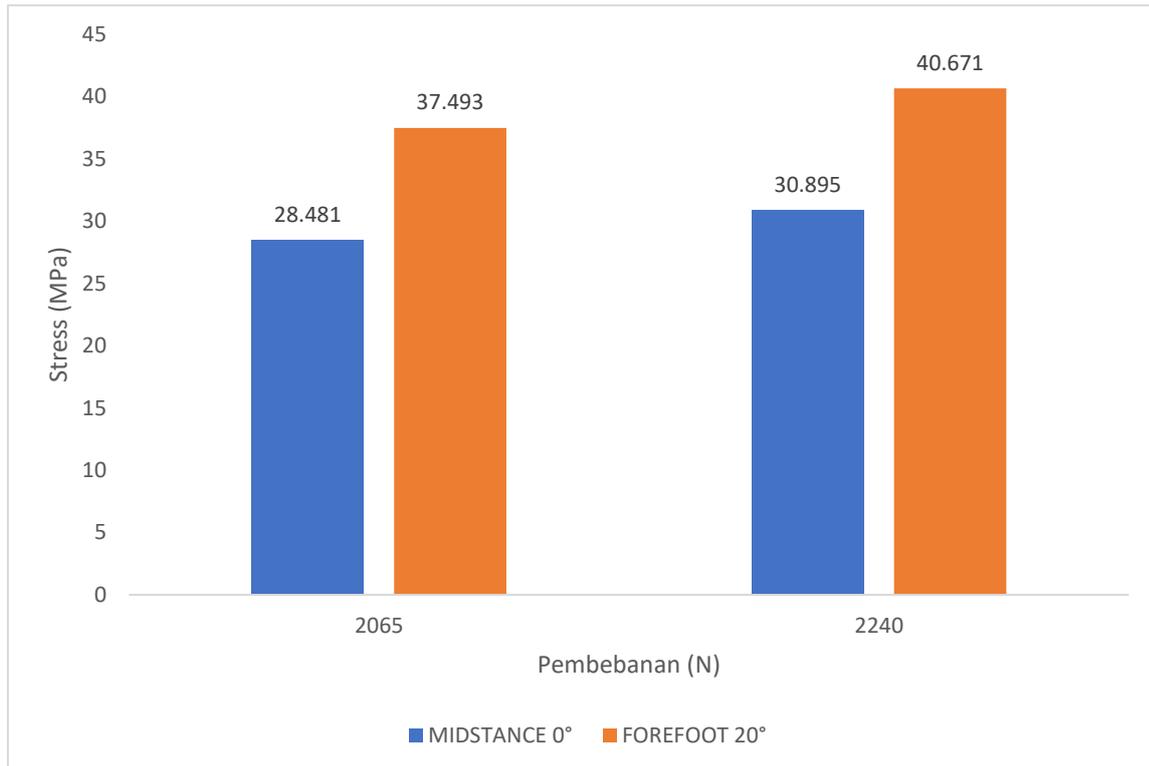
Berdasarkan gambar 4.40 diperoleh grafik hubungan antara variasi ketebalan dan *safety factor* yang dialami oleh desain *running blade prosthetic*. Pada gambar diatas grafik tren mengalami kenaikan dari ketebalan 10 mm sampai dengan ketebalan 40 mm. Titik maksimum nilai dari *safety factor* yang dialami oleh *running blade prosthetic* berada pada tebal 40 mm dengan *safety factor* sebesar 1,4702. Sedangkan titik minimum berada pada ketebalan 10 mm dengan nilai *safety factor* sebesar 0,089651. Dapat dilihat pada grafik pengujian *forefoot* diatas, dari ketebalan 35 mm dan 40 mm nilai *safety factor* yang dihasilkan berturut-turut yaitu 0,089651 dan 1,4702. Dan dapat dinyatakan bahwa hasil *safety factor* pada ketebalan 35 mm, dan 40 mm sudah melebihi angka 1 dan tergolong aman.

4.4 Hasil Simulasi Pengujian *Running Blade Prosthetic* pada peningkatan Level Pembebanan

Pada tahap ini akan dilakukan pengujian *midtance* dan *forefoot* berdasarkan standar ISO 10328 dengan perbandingan peningkatan level pembebanan yaitu 2065 N dan 2240 N menggunakan material sisal/epoxy dan palem/epoxy. Peningkatan ini dilakukan dengan menggunakan kombinasi sudut $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_{40}$ pada ketebalan plat 35 mm dan 40 mm. Kedua material tersebut akan dibandingkan dengan masing-masing nilai tegangan Von-Misses *stress*, total deformasi, dan *safety factor*.

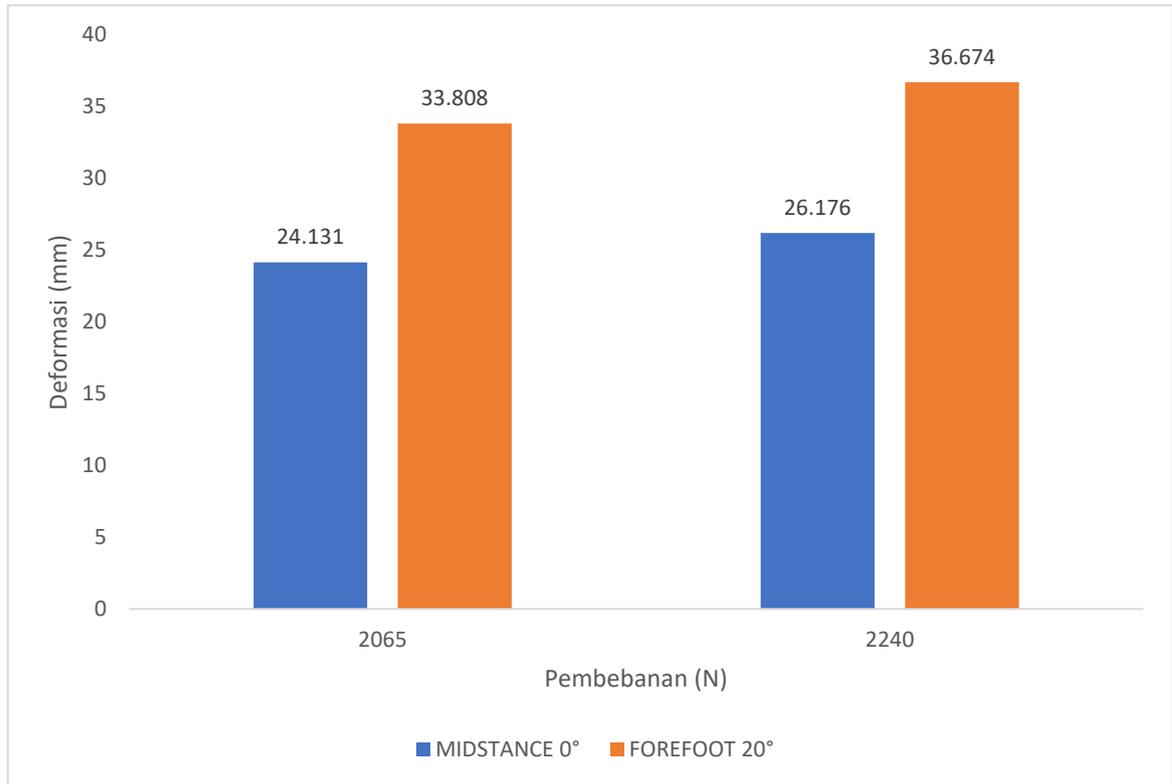
4.4.1 Hasil Simulasi dengan Ketebalan 35 mm pada Peningkatan Level Pembebanan

Hasil pengujian *running blade prosthetic* dengan ketebalan 35 mm pada peningkatan level pembebanan ini akan dibandingkan dengan nilai tegangan maksimum Von-Misses *stress*, total deformasi, dan *safety factor*.



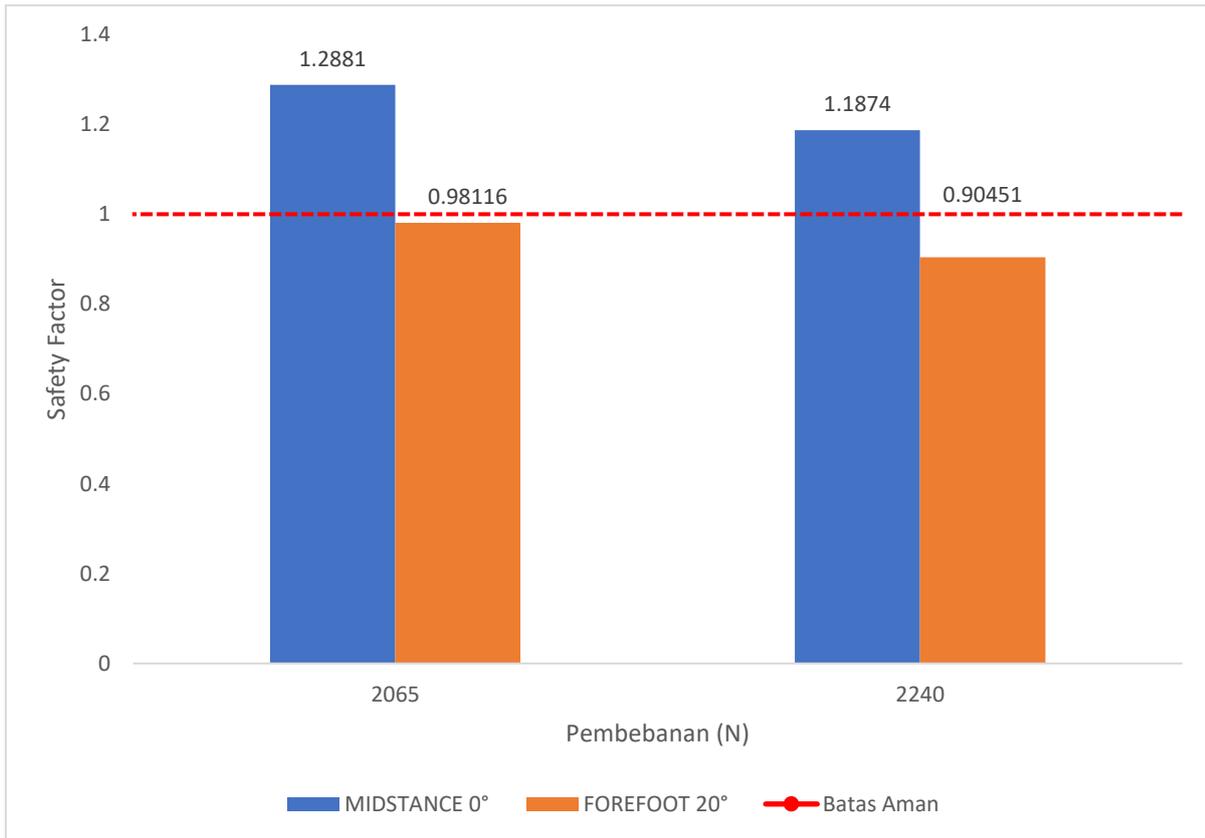
Gambar 4. 41 Grafik Perbandingan antara Pembebanan 2065 N dan 2240 N menggunakan material Sisal/Epoxy pada ketebalan 35 mm terhadap tegangan Von-Misses *stress*

Berdasarkan Gambar 4.41 diatas merupakan material sisal/epoxy dengan perbandingan peningkatan level pembebanan 2065 N dan 2240 N pada ketebalan 35 mm terhadap tegangan Von-Misses *stress* dengan kedua pengujian *running blade prosthetic* yaitu *midstance* dan *forefoot*. Dapat dilihat pada Gambar 4.51 Bahwa pada material Sisal/Epoxy dengan pembebanan 2065 N menghasilkan nilai tegangan Von-Misses sebesar 28,481 MPa untuk pengujian *midstance* dan nilai tegangan maksimum Von-Misses sebesar 37,493 MPa untuk pengujian *forefoot*. Kemudian untuk material yang sama dengan pembebanan 2240 N menghasilkan nilai tegangan maksimum Von-Misses *stress* sebesar 30,895 MPa untuk pengujian *midstance* dan nilai maksimum tegangan Von-Misses 40,671 MPa untuk pengujian *forefoot*. Jika kedua pembebanan dibandingkan, pembebanan 2065 N menghasilkan nilai maksimum tegangan Von-Misses lebih kecil pada kedua pengujian *running blade prosthetic* dibandingkan pembebanan 2240 N. Hal tersebut bisa terjadi dikarenakan ketika melakukan penambahan pembebanan, tegangan pada tumpukan dari komposit juga semakin bertambah. Sehingga ketika penambahan pembebanan yang diberikan kepada *running blade prosthetic* menyebabkan tegangan Von-Misses semakin meningkat nilainya.



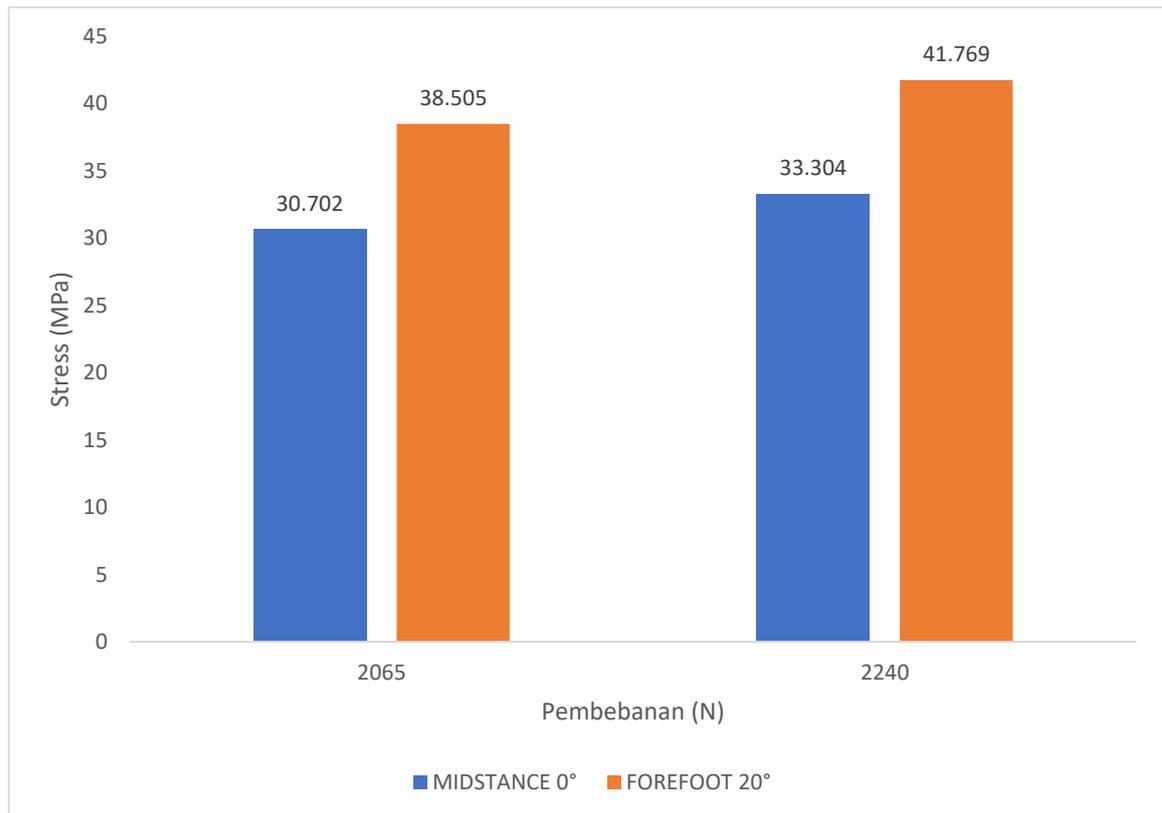
Gambar 4. 42 Grafik Perbandingan antara Pembebanan 2065 N dan 2240 N menggunakan material Sisal/Epoxy pada ketebalan 35 mm terhadap deformasi

Berdasarkan Gambar 4.42 diatas merupakan material sisal/epoxy dengan perbandingan peningkatan level pembebanan 2065 N dan 2240 N pada ketebalan 35 mm terhadap deformasi dengan kedua pengujian *running blade prosthetic* yaitu *midstance* dan *forefoot*. Dapat dilihat pada Gambar 4.51 Bahwa pada material Sisal/Epoxy dengan pembebanan 2065 N menghasilkan nilai deformasi sebesar 24.131 mm untuk pengujian *midstance* dan nilai deformasi sebesar 33,808 mm untuk pengujian *forefoot*. Kemudian untuk material yang sama dengan pembebanan 2240 N menghasilkan nilai deformasi sebesar 26,176 mm untuk pengujian *midstance* dan nilai deformasi sebesar 36,674 mm untuk pengujian *forefoot*. Jika kedua pembebanan dibandingkan, pembebanan 2065 N menghasilkan nilai deformasi lebih kecil pada kedua pengujian *running blade prosthetic* dibandingkan pembebanan 2240 N. Hal tersebut bisa terjadi dikarenakan ketika melakukan penambahan pembebanan, deformasi pada pengujian *running blade prosthetic* juga semakin bertambah. Sehingga ketika penambahan pembebanan yang diberikan kepada *running blade prosthetic* menyebabkan nilai deformasi semakin meningkat.



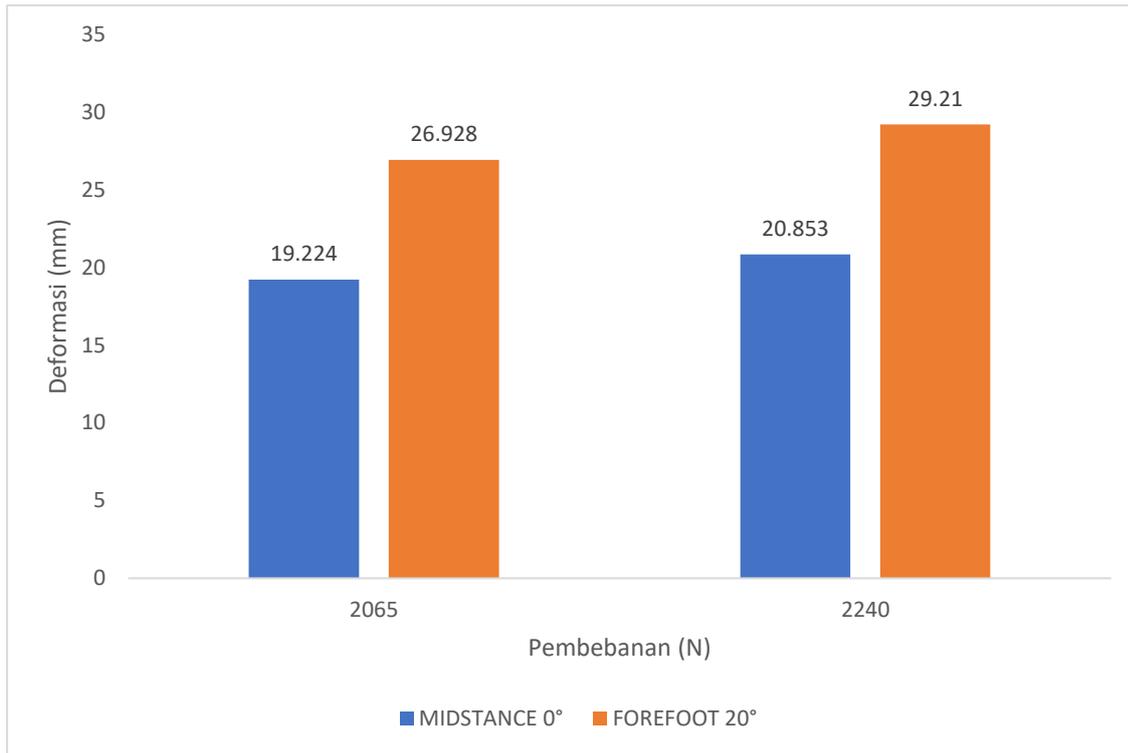
Gambar 4. 43 Grafik Perbandingan antara Pembebanan 2065 N dan 2240 N menggunakan material Sisal/Epoxy pada ketebalan 35 mm terhadap *safety factor*

Berdasarkan Gambar 4.43 diatas merupakan material sisal/epoxy dengan perbandingan peningkatan level pembebanan 2065 N dan 2240 N pada ketebalan 35 mm terhadap deformasi dengan kedua pengujian *running blade prosthetic* yaitu *midstance* dan *forefoot*. Dapat dilihat pada Gambar 4.51 Bahwa pada material Sisal/Epoxy dengan pembebanan 2065 N menghasilkan nilai *safety factor* sebesar 1,2881 untuk pengujian *midstance* dan nilai *safety factor* sebesar 0,98116 untuk pengujian *forefoot*. Kemudian untuk material yang sama dengan pembebanan 2240 N menghasilkan nilai *safety factor* sebesar 1,1874 untuk pengujian *midstance* dan nilai *safety factor* sebesar 0,90451 untuk pengujian *forefoot*. Dapat disimpulkan bahwa material sisal/epoxy dengan peningkatan level pembebanan pada ketebalan 35 mm, jenis pengujian *running blade prosthetic* yang tergolong aman hanya pada pengujian *midstance* dikarenakan hasil dari pengujian *midstance* melebihi angka 1. Sedangkan pada pengujian *forefoot* tergolong tidak aman karena nilai *safety factor* tidak mencapai angka 1.



Gambar 4. 44 Grafik Perbandingan antara Pembebanan 2065 N dan 2240 N menggunakan material Palem/Epoxy pada ketebalan 35 mm terhadap tegangan Von-Misses *stress*

Berdasarkan Gambar 4.44 diatas merupakan material palem/epoxy dengan perbandingan peningkatan level pembebanan 2065 N dan 2240 N pada ketebalan 35 mm terhadap tegangan Von-Misses *stress* dengan kedua pengujian *running blade prosthetic* yaitu *midstance* dan *forefoot*. Dapat dilihat pada Gambar 4.44 Bahwa pada material Sisal/Epoxy dengan pembebanan 2065 N menghasilkan nilai tegangan Von-Misses sebesar 30,702 MPa untuk pengujian *midstance* dan nilai tegangan maksimum Von-Misses sebesar 38,505 MPa untuk pengujian *forefoot*. Kemudian untuk material yang sama dengan pembebanan 2240 N menghasilkan nilai tegangan maksimum Von-Misses *stress* sebesar 33,304 MPa untuk pengujian *midstance* dan nilai maksimum tegangan Von-Misses 41,769 MPa untuk pengujian *forefoot*. Jika kedua pembebanan dibandingkan, pembebanan 2065 N menghasilkan nilai maksimum tegangan Von-Misses lebih kecil pada kedua pengujian *running blade prosthetic* dibandingkan pembebanan 2240 N. Hal tersebut bisa terjadi dikarenakan ketika melakukan penambahan pembebanan, tegangan pada tumpukan dari komposit juga semakin bertambah. Sehingga ketika penambahan pembebanan yang diberikan kepada *running blade prosthetic* menyebabkan tegangan Von-Misses semakin meningkat nilainya.



Gambar 4. 45 Grafik Perbandingan antara Pembebanan 2065 N dan 2240 N menggunakan material Palem/Epoxy pada ketebalan 35 mm terhadap deformasi

Berdasarkan Gambar 4.45 diatas merupakan material palem/epoxy dengan perbandingan peningkatan level pembebanan 2065 N dan 2240 N pada ketebalan 35 mm terhadap deformasi dengan kedua pengujian *running blade prosthetic* yaitu *midstance* dan *forefoot*. Dapat dilihat pada Gambar 4.45 bahwa pada material Sisal/Epoxy dengan pembebanan 2065 N menghasilkan nilai deformasi sebesar 19,224 mm untuk pengujian *midstance* dan nilai deformasi sebesar 26,928 mm untuk pengujian *forefoot*. Kemudian untuk material yang sama dengan pembebanan 2240 N menghasilkan nilai deformasi sebesar 20,853 mm untuk pengujian *midstance* dan nilai deformasi sebesar 29,21 mm untuk pengujian *forefoot*. Jika kedua pembebanan dibandingkan, pembebanan 2065 N menghasilkan nilai deformasi lebih kecil pada kedua pengujian *running blade prosthetic* dibandingkan pembebanan 2240 N. Hal tersebut bisa terjadi dikarenakan ketika melakukan penambahan pembebanan, deformasi pada pengujian *running blade prosthetic* juga semakin bertambah. Sehingga ketika penambahan pembebanan yang diberikan kepada *running blade prosthetic* menyebabkan nilai deformasi semakin meningkat.



Gambar 4. 46 Grafik Perbandingan antara Pembebanan 2065 N dan 2240 N menggunakan material Palem/Epoxy pada ketebalan 35 mm terhadap *safety factor*

Berdasarkan Gambar 4.46 di atas merupakan material palem/epoxy dengan perbandingan peningkatan level pembebanan 2065 N dan 2240 N pada ketebalan 35 mm terhadap deformasi dengan kedua pengujian *running blade prosthetic* yaitu *midstance* dan *forefoot*. Dapat dilihat pada Gambar 4.46 bahwa pada material Sisal/Epoxy dengan pembebanan 2065 N menghasilkan nilai *safety factor* sebesar 1,1756 untuk pengujian *midstance* dan nilai *safety factor* sebesar 0,89651 untuk pengujian *forefoot*. Kemudian untuk material yang sama dengan pembebanan 2240 N menghasilkan nilai *safety factor* sebesar 1,0837 untuk pengujian *midstance* dan nilai *safety factor* sebesar 0,82647 untuk pengujian *forefoot*. Dapat disimpulkan bahwa material palem/epoxy dengan peningkatan level pembebanan pada ketebalan 35 mm, jenis pengujian *running blade prosthetic* yang tergolong aman hanya pada pengujian *midstance* dikarenakan hasil dari pengujian *midstance* melebihi angka 1. Sedangkan pada pengujian *forefoot* tergolong tidak aman karena nilai *safety factor* tidak mencapai angka 1.

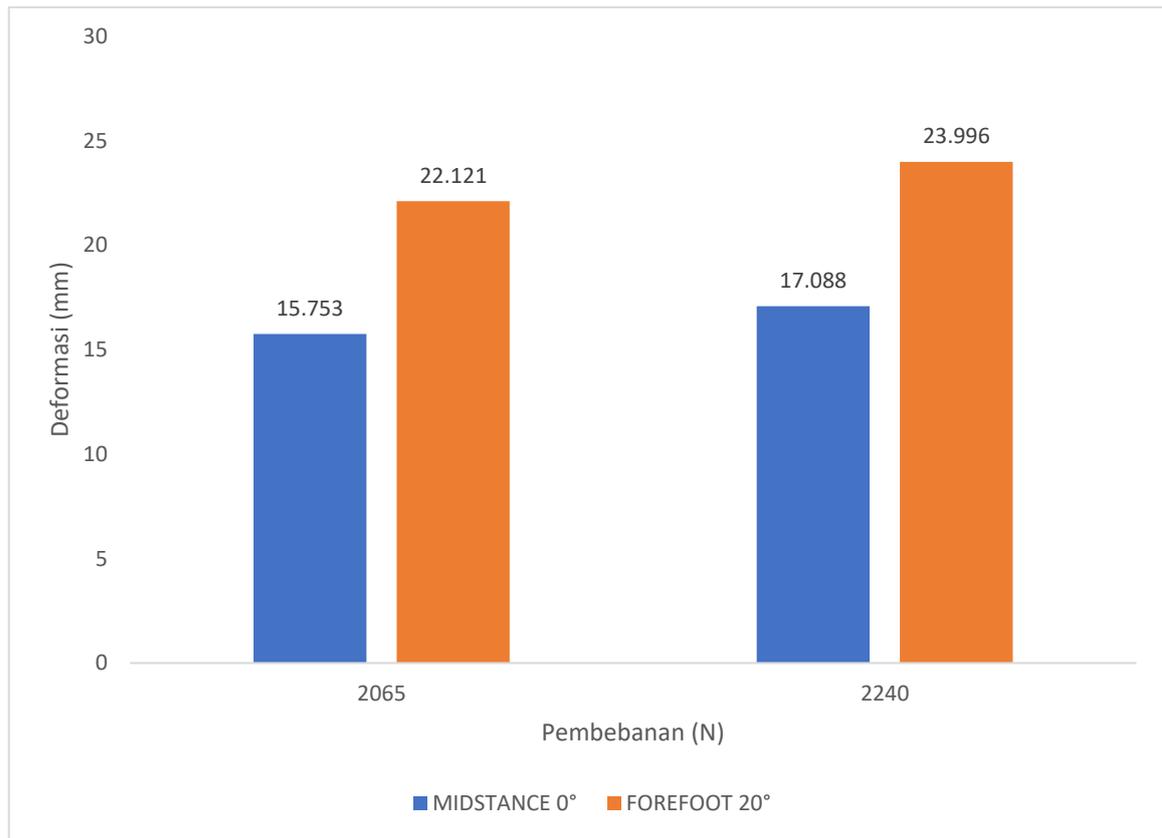
4.4.2 Hasil Simulasi dengan Ketebalan 40 mm pada Peningkatan Level Pembebanan

Hasil pengujian *running blade prosthetic* dengan ketebalan 40 mm pada peningkatan level pembebanan ini akan dibandingkan dengan nilai tegangan maksimum Von-Misses *stress*, total deformasi, dan *safety factor*.



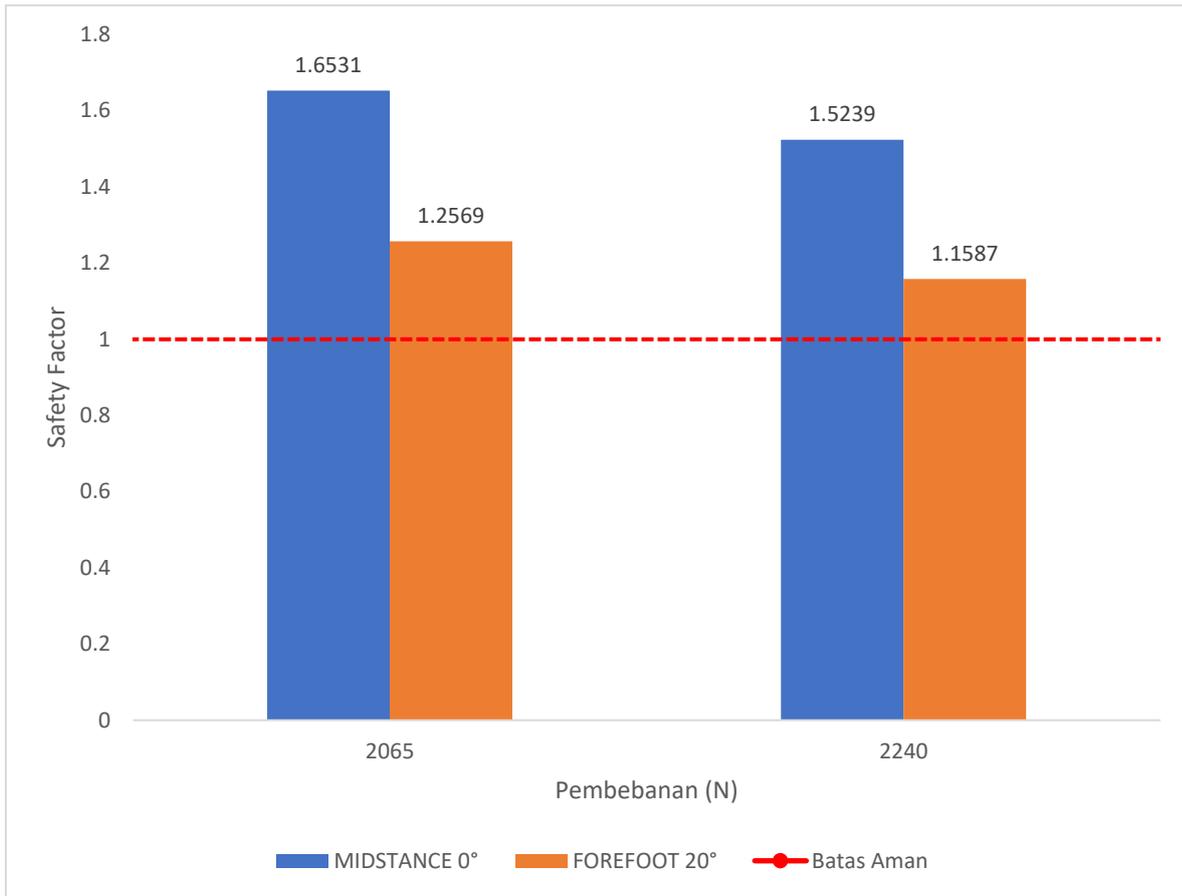
Gambar 4. 47 Grafik Perbandingan antara Pembebanan 2065 N dan 2240 N menggunakan material Sisal/Epoxy pada ketebalan 40 mm terhadap tegangan Von-Misses stress

Berdasarkan Gambar 4.47 di atas merupakan material sisal/epoxy dengan perbandingan peningkatan level pembebanan 2065 N dan 2240 N pada ketebalan 40 mm terhadap tegangan Von-Misses stress dengan kedua pengujian *running blade prosthetic* yaitu *midstance* dan *forefoot*. Dapat dilihat pada Gambar 4.47 Bahwa pada material Sisal/Epoxy dengan pembebanan 2065 N menghasilkan nilai tegangan Von-Misses sebesar 22,195 MPa untuk pengujian *midstance* dan nilai tegangan maksimum Von-Misses sebesar 29,272 MPa untuk pengujian *forefoot*. Kemudian untuk material yang sama dengan pembebanan 2240 N menghasilkan nilai tegangan maksimum Von-Misses stress sebesar 24,075 MPa untuk pengujian *midstance* dan nilai maksimum tegangan Von-Misses 31,752 MPa untuk pengujian *forefoot*. Jika kedua pembebanan dibandingkan, pembebanan 2065 N menghasilkan nilai maksimum tegangan Von-Misses lebih kecil pada kedua pengujian *running blade prosthetic* dibandingkan pembebanan 2240 N. Hal tersebut bisa terjadi dikarenakan ketika melakukan penambahan pembebanan tegangan pada tumpukan dari komposit juga semakin bertambah, sehingga ketika penambahan pembebanan yang diberikan kepada *running blade prosthetic* menyebabkan tegangan Von-Misses semakin meningkat nilainya.



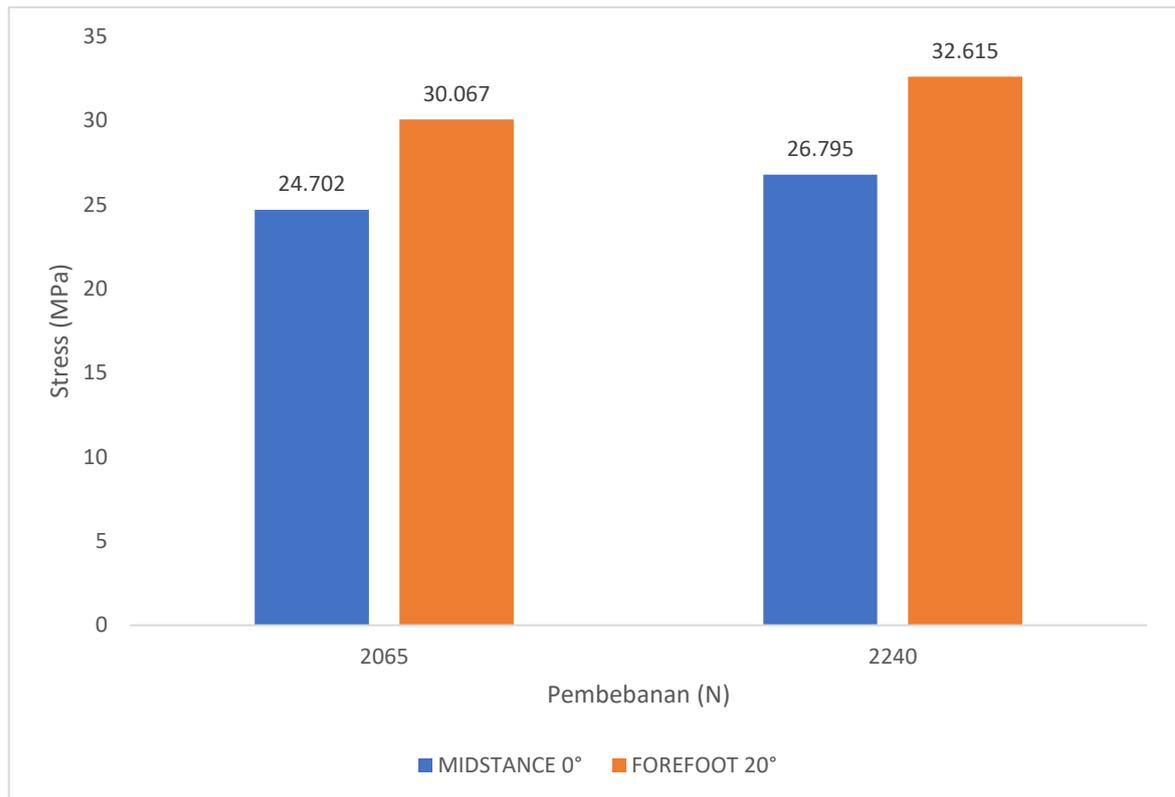
Gambar 4. 48 Grafik Perbandingan antara Pembebanan 2065 N dan 2240 N menggunakan material Sisal/Epoxy pada ketebalan 40 mm terhadap deformasi

Berdasarkan Gambar 4.48 diatas merupakan material sisal/epoxy dengan perbandingan peningkatan level pembebanan 2065 N dan 2240 N pada ketebalan 40 mm terhadap deformasi dengan kedua pengujian *running blade prosthetic* yaitu *midstance* dan *forefoot*. Dapat dilihat pada Gambar 4.48 Bahwa pada material Sisal/Epoxy dengan pembebanan 2065 N menghasilkan nilai deformasi sebesar 15,753 mm untuk pengujian *midstance* dan nilai deformasi sebesar 22,121 mm untuk pengujian *forefoot*. Kemudian untuk material yang sama dengan pembebanan 2240 N menghasilkan nilai deformasi sebesar 17,088 mm untuk pengujian *midstance* dan nilai deformasi sebesar 23,996 mm untuk pengujian *forefoot*. Jika kedua pembebanan dibandingkan, pembebanan 2065 N menghasilkan nilai deformasi lebih kecil pada kedua pengujian *running blade prosthetic* dibandingkan pembebanan 2240 N. Hal tersebut bisa terjadi dikarenakan ketika melakukan penambahan pembebanan, deformasi pada pengujian *running blade prosthetic* juga semakin bertambah. Sehingga ketika penambahan pembebanan yang diberikan kepada *running blade prosthetic* menyebabkan nilai deformasi semakin meningkat.



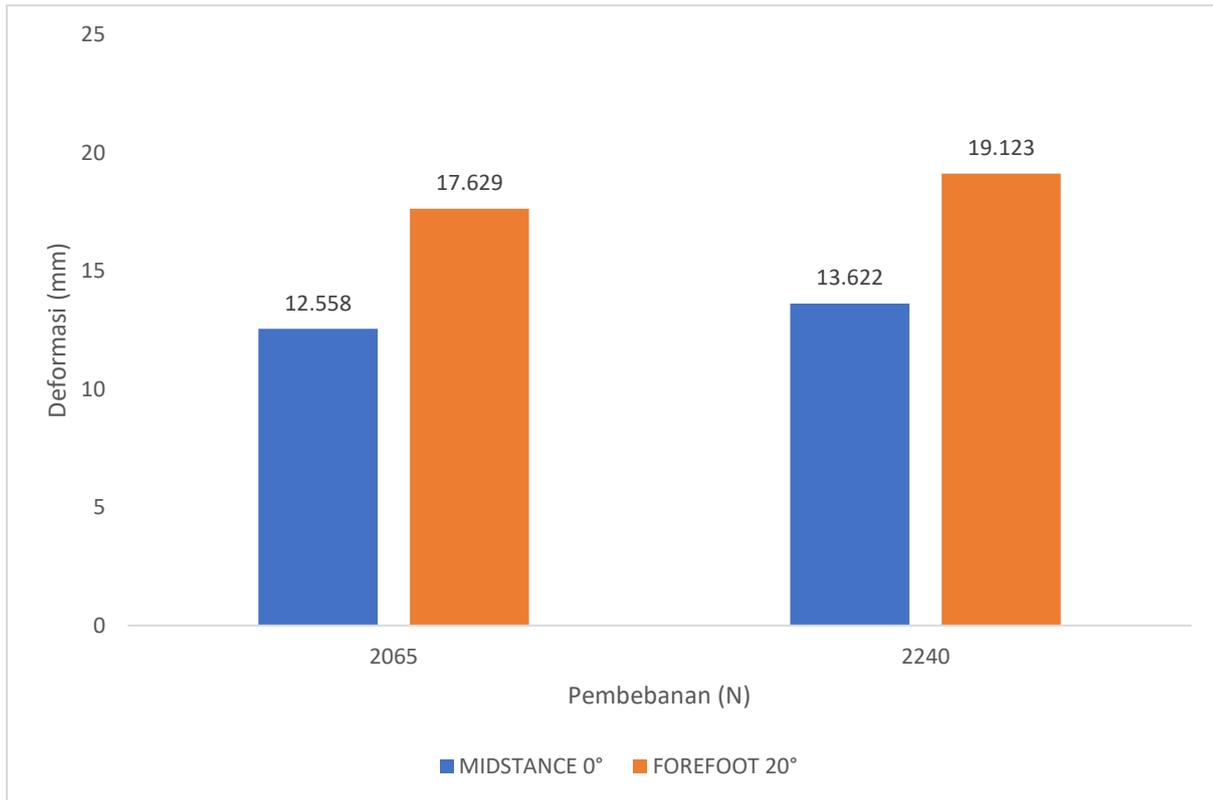
Gambar 4. 49 Grafik Perbandingan antara Pembebanan 2065 N dan 2240 N menggunakan material Sisal/Epoxy pada ketebalan 40 mm terhadap *safety factor*

Berdasarkan Gambar 4.49 diatas merupakan material sisal/epoxy dengan perbandingan peningkatan level pembebanan 2065 N dan 2240 N pada ketebalan 40 mm terhadap deformasi dengan kedua pengujian *running blade prosthetic* yaitu *midstance* dan *forefoot*. Dapat dilihat pada Gambar 4.49 Bahwa pada material Sisal/Epoxy dengan pembebanan 2065 N menghasilkan nilai *safety factor* sebesar 1,6531 untuk pengujian *midstance* dan nilai *safety factor* sebesar 1,2569 untuk pengujian *forefoot*. Kemudian untuk material yang sama dengan pembebanan 2240 N menghasilkan nilai *safety factor* sebesar 1,5239 untuk pengujian *midstance* dan nilai *safety factor* sebesar 1,1587 untuk pengujian *forefoot*. Dapat disimpulkan bahwa material sisal/epoxy dengan peningkatan level pembebanan pada ketebalan 40 mm tergolong aman pada kedua pengujian yaitu *midstance* dan *forefoot* dikarenakan hasil dari kedua pengujian melebihi angka 1.



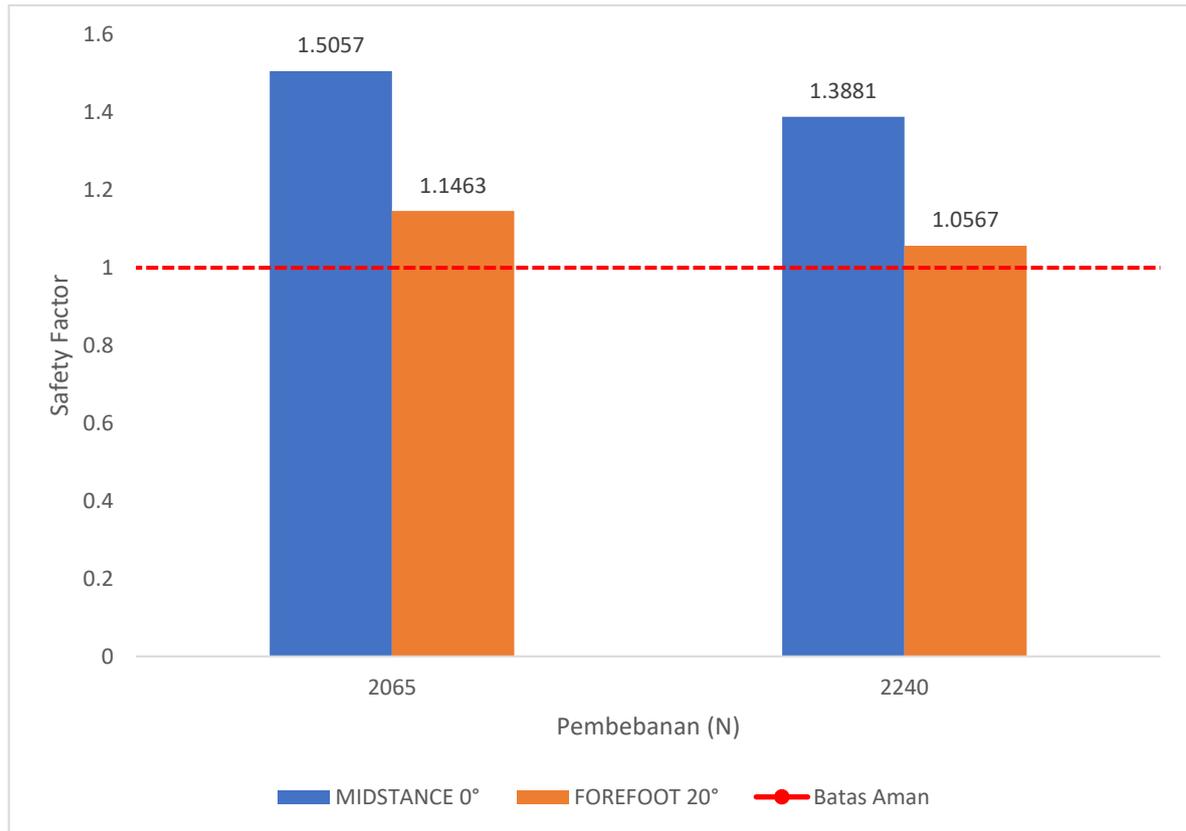
Gambar 4. 50 Grafik Perbandingan antara Pembebanan 2065 N dan 2240 N menggunakan material Palem/Epoxy pada ketebalan 40 mm terhadap tegangan Von-Misses *stress*

Berdasarkan Gambar 4.50 di atas merupakan material palem/epoxy dengan perbandingan peningkatan level pembebanan 2065 N dan 2240 N pada ketebalan 35 mm terhadap tegangan Von-Misses *stress* dengan kedua pengujian *running blade prosthetic* yaitu *midstance* dan *forefoot*. Dapat dilihat pada Gambar 4.50 Bahwa pada material Sisal/Epoxy dengan pembebanan 2065 N menghasilkan nilai tegangan Von-Misses sebesar 24,702 MPa untuk pengujian *midstance* dan nilai tegangan maksimum Von-Misses sebesar 30,067 MPa untuk pengujian *forefoot*. Kemudian untuk material yang sama dengan pembebanan 2240 N menghasilkan nilai tegangan maksimum Von-Misses *stress* sebesar 26,795 MPa untuk pengujian *midstance* dan nilai maksimum tegangan Von-Misses 32,615 MPa untuk pengujian *forefoot*. Jika kedua pembebanan dibandingkan, pembebanan 2065 N menghasilkan nilai maksimum tegangan Von-Misses lebih kecil pada kedua pengujian *running blade prosthetic* dibandingkan pembebanan 2240 N. Hal tersebut bisa terjadi dikarenakan ketika melakukan penambahan pembebanan tegangan pada tumpukan dari komposit juga semakin bertambah, sehingga ketika penambahan pembebanan yang diberikan kepada *running blade prosthetic* menyebabkan tegangan Von-Misses semakin meningkat nilainya.



Gambar 4. 51 Grafik Perbandingan antara Pembebanan 2065 N dan 2240 N menggunakan material Palem/Epoxy pada ketebalan 40 mm terhadap deformasi

Berdasarkan Gambar 4.51 diatas merupakan material palem/epoxy dengan perbandingan peningkatan level pembebanan 2065 N dan 2240 N pada ketebalan 35 mm terhadap deformasi dengan kedua pengujian *running blade prosthetic* yaitu *midstance* dan *forefoot*. Dapat dilihat pada Gambar 4.51 Bahwa pada material Sisal/Epoxy dengan pembebanan 2065 N menghasilkan nilai deformasi sebesar 12,558 mm untuk pengujian *midstance* dan nilai deformasi sebesar 17,629 mm untuk pengujian *forefoot*. Kemudian untuk material yang sama dengan pembebanan 2240 N menghasilkan nilai deformasi sebesar 13,622 mm untuk pengujian *midstance* dan nilai deformasi sebesar 19,123 mm untuk pengujian *forefoot*. Jika kedua pembebanan dibandingkan, pembebanan 2065 N menghasilkan nilai deformasi lebih kecil pada kedua pengujian *running blade prosthetic* dibandingkan pembebanan 2240 N. Hal tersebut bisa terjadi dikarenakan ketika melakukan penambahan pembebanan, deformasi pada pengujian *running blade prosthetic* juga semakin bertambah. Sehingga ketika penambahan pembebanan yang diberikan kepada *running blade prosthetic* menyebabkan nilai deformasi semakin meningkat.



Gambar 4. 52 Grafik Perbandingan antara Pembebanan 2065 N dan 2240 N menggunakan material Palem/Epoxy pada ketebalan 40 mm terhadap *Safety factor*

Berdasarkan Gambar 4.52 diatas merupakan material palem/epoxy dengan perbandingan peningkatan level pembebanan 2065 N dan 2240 N pada ketebalan 35 mm terhadap deformasi dengan kedua pengujian *running blade prosthetic* yaitu *midstance* dan *forefoot*. Dapat dilihat pada Gambar 4.52 Bahwa pada material Sisal/Epoxy dengan pembebanan 2065 N menghasilkan nilai *safety factor* sebesar 1,5057 untuk pengujian *midstance* dan nilai *safety factor* sebesar 1,1463 untuk pengujian *forefoot*. Kemudian untuk material yang sama dengan pembebanan 2240 N menghasilkan nilai *safety factor* sebesar 1,3881 untuk pengujian *midstance* dan nilai *safety factor* sebesar 1,0567 untuk pengujian *forefoot*. Dapat disimpulkan bahwa material palem/epoxy dengan peningkatan level pembebanan pada ketebalan 40 mm tergolong aman pada kedua pengujian yaitu *midstance* dan *forefoot* dikarenakan hasil dari kedua pengujian melebihi angka 1.

4.5 Perbandingan Material Komposit Sisal/Epoxy dan Palem/Epoxy Sebagai Material Penyusun *Running Blade Prosthetic*.

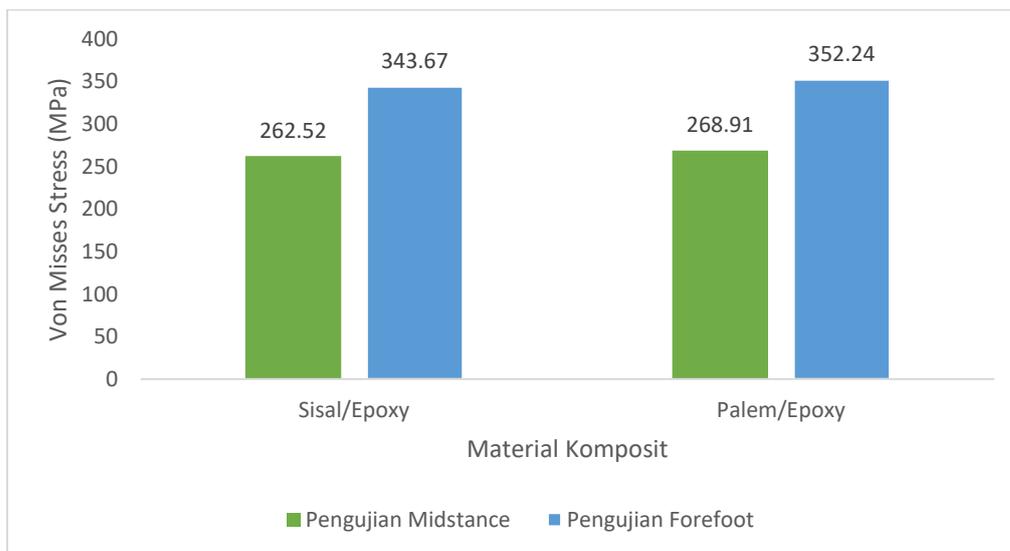
Pada tahap ini akan dilakukan perbandingan hasil simulasi pengujian *midstance* dan *forefoot* berdasarkan standar ISO 10328 dengan pembebanan 1610 N menggunakan material sisal/epoxy dan palem/epoxy. Perbandingan dilakukan dengan menggunakan salah satu kombinasi sudut terbaik yaitu [45°/-45°] dengan ketebalan plat mula-mula yaitu sebesar 10 mm. Kedua material tersebut akan dibandingkan dengan masing-masing nilai tegangan Von-Misses *stress*, deformasi, dan *safety factor* untuk masing-masing material yang digunakan.

Tabel 4. 9 Perbandingan Material yang digunakan berdasarkan pengujian *midstance* dan *forefoot* terhadap tegangan Von-Misses, total deformasi, dan *safety factor*

Jenis Pengujian	Jenis Material	Kombinasi Sudut Terbaik	Ketebalan plat (mm)	Von Misses (MPa)	Deformasi (mm)	<i>Safety factor</i>
<i>Midstance</i>	Komposit Sisal/Epoxy	[45°/-45°] ₂₀	10	262,52	897,39	0,12841
	Komposit Palem/Epoxy	[45°/-45°] ₂₀	10	268,91	707,72	0,11636

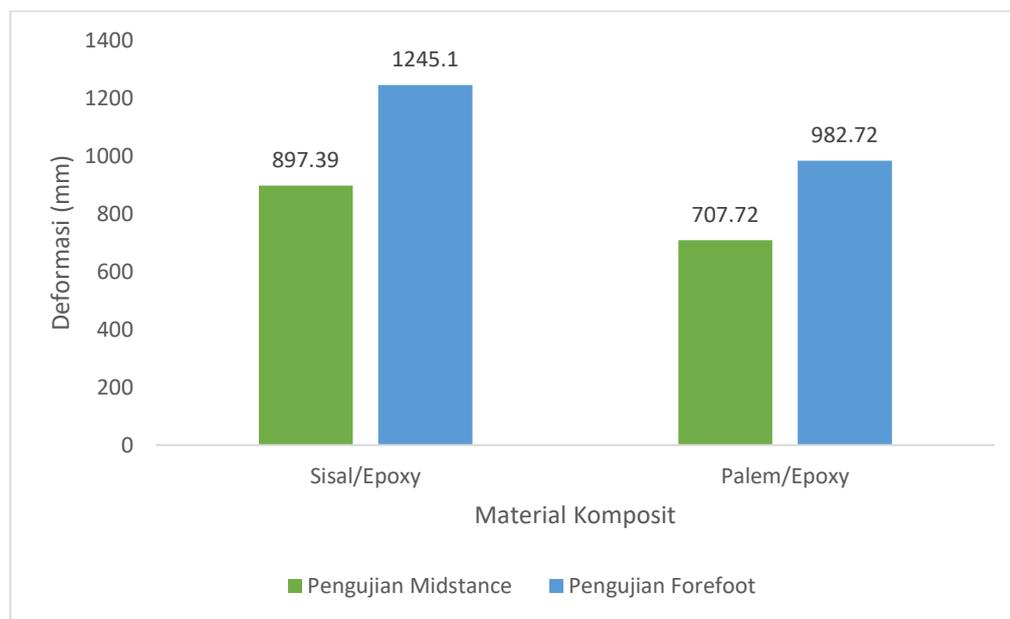
Jenis Pengujian	Jenis Material	Kombinasi Sudut Terbaik	Ketebalan plat (mm)	Von Misses (MPa)	Deformasi (mm)	<i>Safety factor</i>
<i>Forefoot</i>	Komposit Sisal/Epoxy	[45°/-45°] ₂₀	10	343,67	1245,1	0,098878
	Komposit Palem/Epoxy	[45°/-45°] ₂₀	10	352,24	982,72	0,089651

Berdasarkan tabel 4.9 diatas pada pengujian *midstance*, untuk material jenis komposit Sisal/Epoxy dengan kombinasi sudut serat [45°/-45°]₂₀ pada ketebalan 10 mm diperoleh nilai tegangan maksimum Von-Misses *stress*, total deformasi dan *safety factor* berturut-turut sebesar 262,52 MPa, 897,39 mm dan 0,12841. Untuk material jenis Palem/Epoxy dengan kombinasi sudut [45°/-45°]₂₀ pada ketebalan 10 mm diperoleh nilai tegangan maksimum Von-Misses *stress*, total deformasi dan *safety factor* berturut-turut sebesar 268,91 MPa, 707,72 mm dan 0,11636. Kemudian berdasarkan hasil pengujian *forefoot* menggunakan material Sisal/Epoxy dengan kombinasi sudut serat [45°/-45°]₂₀ pada ketebalan 10 mm diperoleh nilai tegangan maksimum Von-Misses *stress*, total deformasi dan *safety factor* berturut-turut sebesar 343,67 MPa, 1245,1 mm dan 0,098878. Untuk material jenis Palem/Epoxy dengan kombinasi sudut [45°/-45°]₂₀ pada ketebalan 10 mm diperoleh nilai tegangan maksimum Von-Misses *stress*, total deformasi dan *safety factor* berturut-turut sebesar 352,24 MPa, 982,72 mm dan 0,089651



Gambar 4. 53 Grafik Perbandingan Tegangan Von-Misses antara Material Sisal/Epoxy dengan Material Palem/Epoxy menggunakan kombinasi sudut [45°/-45°]₂₀

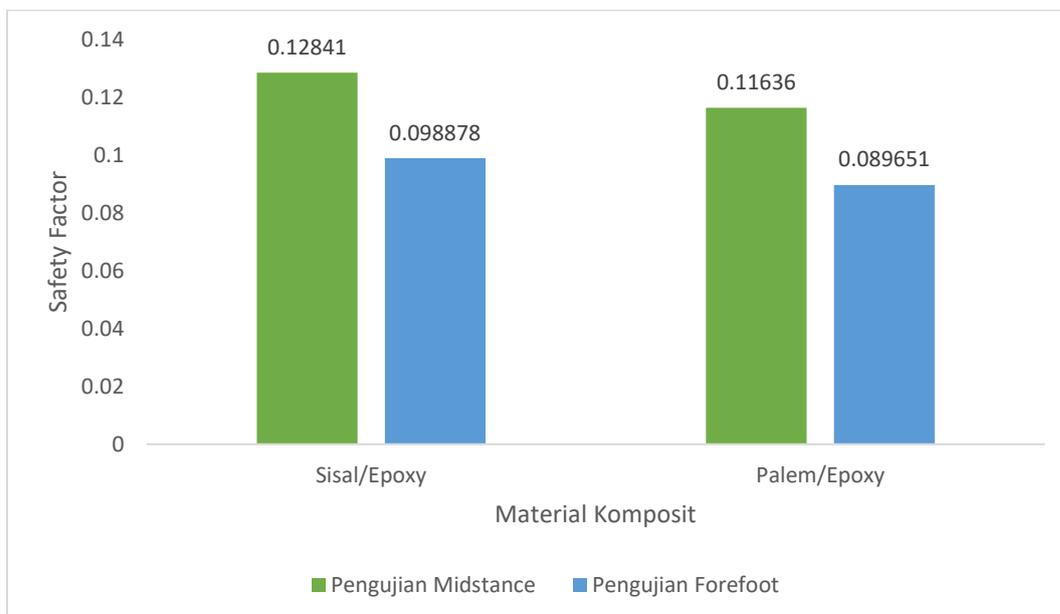
Berdasarkan Gambar 4.53 Merupakan perbandingan material sisal/epoxy dengan material palem/epoxy dengan membandingkan kombinasi sudut terbaik terhadap tegangan Von-Misses *stress* pada kedua pengujian *running blade prosthetic* yaitu *midstance* dan *forefoot*. Dapat dilihat pada Gambar 4.53 Bahwa pada material Sisal/Epoxy dengan kombinasi sudut $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_{20}$ menghasilkan nilai tegangan Von-Misses sebesar 262,52 MPa untuk pengujian *midstance* dan nilai tegangan maksimum Von-Misses sebesar 343,67 MPa untuk pengujian *forefoot*. Kemudian untuk material komposit Palem/Epoxy dengan kombinasi sudut serat $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_{20}$ menghasilkan nilai tegangan maksimum Von-Misses *stress* sebesar 268,91 untuk pengujian *midstance* dan nilai maksimum tegangan Von-Misses 352,24 MPa untuk pengujian *forefoot*. Jika kedua material dibandingkan, material sisal/epoxy menghasilkan nilai maksimum tegangan Von-Misses lebih kecil pada kedua pengujian *running blade prosthetic* dibandingkan dengan material komposit Palem/Epoxy. Hal tersebut bisa terjadi dikarenakan material properties yang dimiliki oleh material sisal/epoxy lebih baik dibandingkan dengan material palem/epoxy. Sehingga ketika material sisal/epoxy diaplikasikan pada *running blade prosthetic* dapat mampu memberikan tegangan yang lebih kecil dibandingkan dengan material palem/epoxy ketika diberikan pembebanan yang sama. Sehingga material sisal/epoxy lebih baik digunakan dibandingkan material palem/epoxy sebagai material penyusun *running blade prosthetic*.



Gambar 4. 54 Grafik Perbandingan Deformasi antara Material Sisal/Epoxy dengan Material Palem/Epoxy menggunakan kombinasi sudut $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_{20}$

Berdasarkan Gambar 4.54 Merupakan perbandingan material sisal/epoxy dengan material palem/epoxy dengan membandingkan kombinasi sudut terbaik terhadap total deformasi. Dapat dilihat pada Gambar 4.54 Bahwa pada material Sisal/Epoxy dengan kombinasi sudut $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_{20}$ menghasilkan nilai deformasi sebesar 897,39 mm untuk pengujian *midstance* dan nilai deformasi sebesar 1245,1 mm untuk pengujian *forefoot*. Kemudian untuk material komposit Palem/Epoxy dengan kombinasi sudut serat $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_{20}$ menghasilkan nilai deformasi sebesar 707,72 mm untuk pengujian *midstance* dan nilai deformasi sebesar 982,72 mm untuk pengujian *forefoot*. Jika kedua material dibandingkan, material komposit Sisal/Epoxy menghasilkan nilai deformasi lebih besar dibandingkan dengan material komposit Palem/Epoxy. Hal tersebut bisa terjadi dikarenakan material properties yang dimiliki oleh material sisal/epoxy lebih baik

dibandingkan dengan material palem/Epoxy. Sehingga ketika material Sisal/Epoxy diaplikasikan pada *running blade prosthetic*, material tersebut dapat memberikan deformasi yang lebih besar jika dibandingkan dengan material palem/epoxy pada pembebanan yang sama. Hal tersebut memberikan dampak kepada fleksibilitas dari desain *running blade prosthetic* nantinya. Kemudian material sisal/epoxy lebih elastis dibandingkan dengan material palem/epoxy. Sehingga material sisal/epoxy lebih baik digunakan dibandingkan material palem/epoxy sebagai material penyusun *running blade prosthetic*.



Gambar 4. 55 Grafik Perbandingan *Safety factor* antara Material Sisal/Epoxy dengan Material Palem/Epoxy menggunakan kombinasi sudut $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_{20}$

Berdasarkan gambar 4.55 Merupakan perbandingan material sisal/epoxy dengan material palem/epoxy dengan membandingkan kombinasi sudut terbaik terhadap *safety factor*. Dapat dilihat berdasarkan gambar 4.55 Bahwa pada material sisal/epoxy dengan kombinasi sudut $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_{20}$ menghasilkan nilai *safety factor* sebesar 0,12841 pada pengujian *midstance* dan nilai *safety factor* pada pengujian *forefoot* sebesar 0,098878. Kemudian untuk material komposit palem/epoxy dengan kombinasi sudut $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_{20}$ menghasilkan nilai *safety factor* sebesar 0,11636 pada pengujian *midstance* dan nilai *safety factor* pada pengujian *forefoot* sebesar 0,089651. Jika kedua material dibandingkan, material komposit sisal/epoxy menghasilkan nilai *safety factor* tertinggi pada kedua pengujian yaitu *midstance* dan *forefoot*. Hal tersebut bisa terjadi dikarenakan *material properties* yang dimiliki oleh material sisal/epoxy lebih baik dibandingkan dengan material palem/epoxy. Sehingga ketika material sisal/epoxy diaplikasikan pada *running blade prosthetic*, material tersebut mampu memberikan faktor keamanan yang lebih baik dibandingkan dengan material palem/epoxy pada pembebanan yang sama. Sehingga material sisal/epoxy lebih aman digunakan dibandingkan material palem/epoxy sebagai material penyusun *running blade prosthetic*.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, kesimpulan yang didapat untuk penelitian ini yaitu:

1. Pada penelitian ini didapatkan bahwa dari kelima variasi kombinasi sudut, kombinasi sudut paling optimal untuk *running blade prosthetic* menggunakan material sisal/epoxy dan palem/epoxy pada jenis pengujian *midstance* dan *forefoot* adalah kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]$. Hal ini dikarenakan penggunaan kombinasi sudut orientasi tersebut pada pembebanan standar ISO 10328 menghasilkan nilai nilai *safety factor* terbaik dari seluruh kombinasi sudut lainnya. Dari segi deformasi, kombinasi $[45^\circ/-45^\circ]$ juga memiliki nilai deformasi tertinggi sehingga memiliki sifat yang tidak terlalu kaku dan sesuai dengan kebutuhan *prosthetic*. Dari nilai tegangan Von – Misses, kombinasi sudut $[0^\circ]$ memang memiliki nilai yang terbaik namun orientasi $[45^\circ/-45^\circ]$ berhasil mencapai nilai terbaik urutan kedua dengan selisih yang tidak terlalu besar dengan orientasi $[0^\circ]$. Dari ketiga aspek tersebut, kombinasi sudut $[45^\circ/-45^\circ]$ dinilai sebagai kombinasi sudut terbaik yang dapat diaplikasikan kepada *running blade prosthetic* menggunakan material sisal/epoxy dan palem/epoxy.
2. Pada penambahan ketebalan dalam pengujian *running blade prosthetic*, diperoleh nilai *safety factor* yang meningkat. Ketebalan total komposit yang dapat menerima pembebanan pengujian level P3 ISO 10328(2016) atau 1610 N adalah pada ketebalan mulai dari 35 mm dalam jenis pengujian *midstance* dan *forefoot*. Namun, seiring penambahan ketebalan, dari segi kekakuan juga semakin berkurang yang dapat dilihat dari nilai deformasi yang semakin kecil. Tentu kedua hal tersebut harus dipertimbangkan karena dari segi geometri yang semakin tebal akan menyebabkan model yang semakin tidak sesuai dengan bentuk dari kaki aktual dan akan menyebabkan ketidaknyamanan penggunaannya.
3. Pada ketebalan 35 mm dan 40 mm dilakukan penambahan level pembebanan yaitu level P4 dan P5 atau 2065 N dan 2240 N. Hasil dari penambahan level pembebanan tersebut, dapat disimpulkan pada ketebalan 35 mm tidak dapat menerima kedua penambahan level pembebanan P4 dan P5 karena memiliki nilai *safety factor* kurang dari 1 pada kedua jenis pengujian yaitu *midstance* dan *forefoot*. Sedangkan 40 mm masih dinyatakan aman pada kedua penambahan level pembebanan tersebut karena memiliki nilai *safety factor* lebih dari 1 pada kedua jenis pengujian yaitu *midstance* dan *forefoot*.
4. Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan didapatkan bahwa material komposit sisal/epoxy lebih baik dibandingkan dengan komposit palem/epoxy sebagai material penyusun *running blade prosthetic* penelitian ini. Dikarenakan dengan kondisi batas yang sama, kombinasi sudut yang sama, ketebalan yang sama, dan pembebanan yang sama, diperoleh nilai tegangan maksimum von misses terkecil pada material sisal/epoxy dan nilai *safety factor* terbesar berada pada material sisal/epoxy.

5.2 Saran

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

1. Melakukan studi eksperimen dari komposit *running blade prosthetic* untuk membandingkan hasil eksperimen dengan hasil analisis menggunakan metode elemen hingga ini.
2. Melakukan pengujian *fatigue* pada komposit *running blade prosthetic*.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Ainhoa Murillo I. (2018) "Design and Characterization of a Variable Stiffness Prosthesis for Billateral Transtibial Amputee Sprinters"
- Kusumastuti, A., Jasa, J. T., & Produksi, D. (2009). Aplikasi Serat Sisal sebagai Komposit Polimer. In *Jurnal Kompetensi Teknik* (Vol. 1, Issue 1).
- ISO. (2016). *ISO 10328:2016 Prosthetics — Structural testing of lower-limb prostheses — Requirements and test methods*
- Zucarello, Carmello Militello, & Franscesco Bongiorno. "Influence of the anisotropy of sisal fibers on the mechanical properties of high performance unidirectional biocomposite lamina and micromechanical models"
- Childers, W. L., & Takahashi, K. Z. (2018). Increasing prosthetic foot energy return affects whole-body mechanics during walking on level ground and slopes. *Scientific Reports*, 8(1).
- Parmiggiani, A., Prato, M., & Pizzorni, M. (n.d.). *Effect of the fiber orientation on the tensile and flexural behavior of continuous carbon fiber composites made via fused filament fabrication*.
- Isaac M. Daniel, & Ishai, Ori. (2006). *Engineering mechanics of composite materials*. Oxford University Press.
- Kumar, M. (2017). *Composite Structures Design, Mechanics, Analysis, Manufacturing, and Testing*.
- Jones, R. M. (1999). *Mechanics Of Composite Materials Second Edition*. In *Taylor & Francis, Inc.* (p. 507). Taylor & Francis.
- Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P., & Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. In *Progress in Polymer Science* (Vol. 37, Issue 11, pp. 1552–1596).
- Jonathan D. Mar, Efim Litovsky and Jacob Kleiman. (2008). *Journal of Building Physics*, Vol. 32, No.9,
- Fish, J., Belytschko, T., & Wiley, J. (2007). *A First Course in Finite Elements*.
- Willy Artha Wirawan, Sofyan Arief Setyabudi dan Teguh Dwi Widodo (2017). Pengaruh Jenis Matriks Terhadap Sifat Tarik Pada Natural Fiber Komposit.
- Mylsamy B, (2019). Impact of Nanoclay on Mechanical and Structural Properties of Treated *Coccinia Indica* Fibre Reinforced Epoxy Composites.
- Gapsari, F., Purnowidodo, A., Hidayatullah, S., & Suteja, S. (2021).
- Hibbeler, R. C. (2011). *MECHANICS OF MATERIALS* (8th ed.). Pearson Prentice Hall.
- Jin, F. L., Li, X., & Park, S. J. (2015). Synthesis and application of epoxy resins: A review. In *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* (Vol. 29, pp. 1–11). Korean Society of Industrial Engineering Chemistry.
- Khan, Z., Yousif, B. F., & Islam, M. (2017). Fracture behaviour of bamboo fiber reinforced epoxy composites. *Composites Part B: Engineering*, 116, 186–199.
- Klemens. (2009). Pengembangan Komposit Berbahan Dasar Serat Pisang Abaca Dan Resin Epoksi Dikombinasikan Dengan Keramik Untuk Panel Rombi Tahan Peluru Level IIIA. In Skripsi. Universitas Indonesia.

- Syahrul Salam. (2007). Studi Sifat Fisis dan Mekanis Komposit Matriks Resin Epoxy Yang Diperkuat Dengan Serbuk Titania (TiO_2)
- R. Ismail, D. F. Fitriyana, M. A. Habibi, Sugiyanto, and A. P. Bayuseno, "Computational Analysis of Running Prosthesis Design Using Finite Element Method," in *7th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering, ICITACEE 2020 - Proceedings*, Sep. 2020.
- Adji Widjayarto. (2007). Pengaruh Orientasi Serat Terhadap Sifat Fisis dan Mekanis Komposit (Serat Gelas-E, Resin Justus 157).
- Isworo, H., & Ansyah, P. R. (2018). Metode Elemen Hingga (Vol. 1).
- Mylsamy, B., Palaniappan, S. K., Pavayee Subramani, S., Pal, S. K., & Aruchamy, K. (2019). Impact of nanoclay on mechanical and structural properties of treated *Coccinia indica* fibre reinforced epoxy composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(6), 6021–6028.
- Setiadi, A. (2018). Desain, Simulasi dan Pembuatan Model Protesis Bawah Lutut Berdasarkan Antropometri Orang Indonesia. Universitas Islam Indonesia.

LAMPIRAN

Hasil Simulasi dipaparkan dalam bentuk tabel:

Material Sisal/Epoxy dengan kombinasi sudut serat:

- Pengujian *Midstance*:

Sudut Serat	Force (N)	Ketebalan (mm)	Equivalent Stress (MPa)	Deformasi (mm)	Safety Factor
[0°/90°/45°/-45°] ₁₀	1610	10	275,92	885,61	0,092984
[0°/90°] ₂₀			271,03	874,43	0,094755
[0°/45°/-45°/0°] ₁₀			270,81	866,28	0,10044
[0°] ₄₀			261,3	838,93	0,10392
[45°/-45°] ₂₀			262,48	897,46	0,12834

- Pengujian *Forefoot*:

Sudut Serat	Force (N)	Ketebalan (mm)	Equivalent Stress (MPa)	Deformasi (mm)	Safety Factor
[0°/90°/45°/-45°] ₁₀	1610	10	361,18	1228,5	0,071022
[0°/90°] ₂₀			354,77	1212,7	0,072376
[0°/45°/-45°/0°] ₁₀			354,5	1201,7	0,077099
[0°] ₄₀			342,06	1163,6	0,079783
[45°/-45°] ₂₀			343,62	1245,2	0,098824

Variasi Ketebalan:

- Pengujian *Midstance*:

Sudut Orientasi	Layer	Force (N)	Ketebalan (mm)	Equivalent Stress (Mpa)	Deformasi (mm)	Safety Factor
[45°/-45°]	40	1610	10	262,48	897,46	0,12834
	60		15	115,76	262,4	0,3188
	80		20	65,644	108,48	0,54669
	100		25	42,401	54,272	0,854
	120		30	29,79	30,644	1,2283
	140		35	22,206	18,814	1,652
	160		40	17,304	12,282	2,1224

- Pengujian *Forefoot*:

Sudut Orientasi	Layer	Force (N)	Ketebalan (mm)	Equivalent Stress (Mpa)	Deformasi (mm)	Safety Factor
[45°/-45°]	40	1610	10	343,67	1245,1	0,098878
	60		15	151,16	364,63	0,23191
	80		20	85,904	151,03	0,41905
	100		25	55,603	75,709	0,65592
	120		30	39,142	42,839	0,93758
	140		35	29,232	26,359	1,2584
	160		40	22,822	17,247	1,6121

Penambahan Level Pembebanan:

- Pengujian *Midstance*:

Sudut Orientasi	Force (N)	Ketebalan (mm)	Equivalent Stress (Mpa)	Deformasi (mm)	Safety Factor
[45°/-45°]	2065	35	28,481	24,131	1,2881
			30,895	26,176	1,1874
	2240	40	22,195	15,753	1,6531
			24,075	17,088	1,5239

- Pengujian *Forefoot*:

Sudut Orientasi	Force (N)	Ketebalan (mm)	Equivalent Stress (Mpa)	Deformasi (mm)	Safety Factor
[45°/-45°]	2065	35	37,493	33,808	0,98116
			40,671	36,674	0,90451
	2240	40	29,272	22,121	1,2569
			31,752	23,996	1,1587

Hasil Simulasi dipaparkan dalam bentuk tabel:

Material Palem/Epoxy dengan kombinasi sudut serat:

- Pengujian *Midstance*:

Sudut Serat	Force (N)	Ketebalan (mm)	Equivalent Stress (MPa)	Deformasi (mm)	Safety Factor
[0°/90°/45°/-45°] ₁₀	1610	10	324,23	538,96	0,074563
[0°/90°] ₂₀			363,96	618,65	0,07568
[0°/45°/-45°/0°] ₁₀			313,92	557,2	0,077046
[0°] ₄₀			253,27	438,78	0,093335
[45°/-45°] ₂₀			268,91	707,72	0,11636

- Pengujian *Forefoot*:

Sudut Serat	Force (N)	Ketebalan (mm)	Equivalent Stress (MPa)	Deformasi (mm)	Safety Factor
[0°/90°/45°/-45°] ₁₀	1610	10	424,49	746,86	0,057256
[0°/90°] ₂₀			476,34	857,18	0,058108
[0°/45°/-45°/0°] ₁₀			410,86	771,05	0,059191
[0°] ₄₀			331,59	607,18	0,071703
[45°/-45°] ₂₀			352,24	982,72	0,089651

Variasi Ketebalan:

- Pengujian *Midstance*:

Sudut Orientasi	Layer	Force (N)	Ketebalan (mm)	Equivalent Stress (Mpa)	Deformasi (mm)	Safety Factor
[45°/-45°]	40	1610	10	268,91	707,72	0,11636
	60		15	119,47	207,86	0,27533
	80		20	67,569	86,137	0,49989
	100		25	43,594	43,156	0,78449
	120		30	30,614	24,393	1,1228
	140		35	23,937	14,988	1,5078
	160		40	19,259	9,791	1,9312

- Pengujian *Forefoot*:

Sudut Orientasi	Layer	Force (N)	Ketebalan (mm)	Equivalent Stress (Mpa)	Deformasi (mm)	Safety Factor
[45°/-45°]	40	1610	10	352,24	982,72	0,089651
	60		15	155,95	288,98	0,21172
	80		20	88,392	119,95	0,38358
	100		25	57,142	60,206	0,60064
	120		30	40,203	34,097	0,85791
	140		35	30,021	20,994	1,1499
	160		40	23,442	13,745	1,4702

Penambahan Level Pembebanan:

- Pengujian *Midstance*:

Sudut Orientasi	Force (N)	Ketebalan (mm)	Equivalent Stress (Mpa)	Deformasi (mm)	Safety Factor
[45°/-45°]	2065	35	30,702	19,224	1,1756
			33,304	20,853	1,0837
	2240	40	24,702	12,558	1,5057
			26,795	13,622	1,3881

- Pengujian *Forefoot*:

Sudut Orientasi	Force (N)	Ketebalan (mm)	Equivalent Stress (Mpa)	Deformasi (mm)	Safety Factor
[45°/-45°]	2065	35	38,505	26,928	0,89651
			41,769	29,21	0,82647
	2240	40	30,067	17,629	1,1463
			32,615	19,123	1,0567

Hasil ABD matriks stiffness sisal/epoxy tiap variasi kombinasi sudut:

➤ Matriks *Stiffness* ABD untuk Orientasi Sudut [45°/-45°]₂₀

$$\begin{bmatrix} 52,78 & 20,08 & 0 & 0 & 0 & 0,2747 \\ 20,08 & 57,78 & 0 & 0 & 0 & 0,2747 \\ 0 & 0 & 17,08 & 0,2747 & 0,2747 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2747 & 439,8 & 167,3 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2747 & 167,3 & 439,8 & 0 \\ 0,2747 & 0,2747 & 0 & 0 & 0 & 142,4 \end{bmatrix}$$

➤ Matriks *Stiffness* ABD untuk Orientasi Sudut [0°]₄₀

$$\begin{bmatrix} 55,71 & 19,35 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 19,35 & 55,71 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 16,35 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 464,3 & 161,2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 161,2 & 427,7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 136,3 \end{bmatrix}$$

➤ Matriks *Stiffness* ABD untuk Orientasi Sudut [0°/45°/-45°/0°]₁₀

$$\begin{bmatrix} 54,25 & 19,71 & 0 & 0 & 0 & 0,1374 \\ 19,71 & 52,05 & 0 & 0 & 0 & 0,1374 \\ 0 & 0 & 16,72 & 0,1374 & 0,1374 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1374 & 452,4 & 164,2 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1374 & 164,2 & 433,6 & 0 \\ 0,1374 & 0,1374 & 0 & 0 & 0 & 139,2 \end{bmatrix}$$

➤ Matriks *Stiffness* ABD untuk Orientasi Sudut [0°/90°]₂₀

$$\begin{bmatrix} 53,52 & 19,35 & 0 & 0,5494 & 0 & 0 \\ 19,35 & 53,51 & 0 & 0 & -0,5494 & 0 \\ 0 & 0 & 16,35 & 0 & 0 & 0 \\ 0,5494 & 0 & 0 & 446,0 & 161,2 & 0 \\ 0 & -0,5494 & 0 & 161,2 & 446,0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 136,3 \end{bmatrix}$$

- Matriks *Stiffness* ABD untuk Orientasi Sudut $[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]_{10}$

$$\begin{bmatrix} 53,15 & 19,71 & 0 & 0,4583 & -0,18360 & 0,1374 \\ 19,71 & 53,15 & 0 & -0,1836 & -0,09108 & 0,1374 \\ 0 & 0 & 16,72 & 0,1374 & 0,1374 & -0,1836 \\ 0,4583 & -0,1836 & 0,1374 & 443,2 & 164,3 & -0,1374 \\ -0,1836 & -0,09108 & 0,1374 & 164,3 & 442,6 & -0,1374 \\ 0,1374 & 0,1374 & -0,1836 & -0,1374 & -0,1374 & 139,3 \end{bmatrix}$$

Hasil ABD matriks stiffness palem/epoxy tiap variasi kombinasi sudut:

- Matriks *Stiffness* ABD untuk Orientasi Sudut $[45^\circ/-45^\circ]_{20}$

$$\begin{bmatrix} 69,35 & 29,67 & 0 & 0 & 0 & 2,675 \\ 29,67 & 69,35 & 0 & 0 & 0 & 2,675 \\ 0 & 0 & 29,86 & 2,675 & 2,675 & 0 \\ 0 & 0 & 2,675 & 577,9 & 247,2 & 0 \\ 0 & 0 & 2,675 & 247,2 & 577,9 & 0 \\ 2,675 & 2,675 & 0 & 0 & 0 & 248,8 \end{bmatrix}$$

- Matriks *Stiffness* ABD untuk Orientasi Sudut $[0^\circ]_{40}$

$$\begin{bmatrix} 100,8 & 19,65 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 19,65 & 57,96 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 19,84 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 839,7 & 163,7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 163,7 & 483,0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 165,3 \end{bmatrix}$$

- Matriks *Stiffness* ABD untuk Orientasi Sudut $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{10}$

$$\begin{bmatrix} 85,05 & 24,66 & 0 & 0 & 0 & 1,337 \\ 24,66 & 63,65 & 0 & 0 & 0 & 1,337 \\ 0 & 0 & 24,85 & 1,337 & 1,337 & 0 \\ 0 & 0 & 1,337 & 712,7 & 204,2 & 0 \\ 0 & 0 & 1,337 & 204,2 & 529,0 & 0 \\ 1,337 & 1,337 & 0 & 0 & 0 & 205,8 \end{bmatrix}$$

- Matriks *Stiffness* ABD untuk Orientasi Sudut $[0^\circ/90^\circ]_{20}$

$$\begin{bmatrix} 79,36 & 19,65 & 0 & 5,350 & 0 & 0 \\ 19,65 & 79,36 & 0 & 0 & 5,350 & 0 \\ 0 & 0 & 19,84 & 0 & 0 & 0 \\ 5,350 & 0 & 0 & 661,3 & 163,7 & 0 \\ 0 & 5,350 & 0 & 163,7 & 661,3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 165,3 \end{bmatrix}$$

➤ Matriks *Stiffness* ABD untuk Orientasi Sudut $[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45]_{10}$

$$\begin{bmatrix} 74,35 & 24,66 & 0 & 5,179 & -2,504 & 1,337 \\ 24,66 & 74,35 & 0 & -2,504 & -0,1709 & 1,337 \\ 0 & 0 & 24,85 & 1,337 & 1,337 & -2,504 \\ 5,179 & -2,504 & 1,337 & 622,3 & 205,5 & -1,337 \\ -2,504 & -0,1709 & 1,337 & 205,5 & 616,9 & -1,337 \\ 1,337 & 1,337 & -2,504 & -1,337 & -1,337 & 207,1 \end{bmatrix}$$

BIODATA PENULIS



Ridho Taqillah adalah anak ketiga dari tiga bersaudara pasangan Pontjo Juni Atmo dan Fifi Eka Yanti yang lahir di Jakarta pada 30 April 2000. Penulis memulai Pendidikan di TK Al –Ukhuwah Jakarta selama 2 tahun, kemudian melanjutkan di SD Islam Terpadu A Ba Ta Jakarta selama 6 tahun, SMP Negeri 111 Jakarta selama 3 tahun, SMA Negeri 112 Jakarta selama 3 tahun dan mengambil gelar sarjana di Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dan terdaftar dengan NRP 02111840000158. Di masa perkuliahan, Penulis aktif mengikuti kegiatan akademik dan non-akademik. Dalam keorganisasian, Penulis pernah menjabat menjadi Ketua Biro *Entrepreneur Edocation* Departemen Kewirausahaan Himpunan Mahasiswa Mesin (HMM) FTIRS – ITS pada tahun 2020/2021. Selain aktif berorganisasi, Penulis aktif mempelajari bidang studi desain di laboratorium Mekanika Benda Padat. Untuk semua informasi dan masukan terkait tugas akhir ini dapat menghubungi Penulis melalui

email: r.taqillah@gmail.com