

TUGAS AKHIR - TM184835

ANALISIS PENGARUH ORIENTASI SUDUT DAN KETEBALAN TERHADAP KEKUATAN PYLON KOMPOSIT KENAF-EPOKSI PADA KAKI PALSU TRANSFEMORAL MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Ananda Ariwijaya
NRP. 0211184000114

Dosen Pembimbing
Ir. Julendra Bambang Ariatedja, M.T.
NIP. 19680706199931004

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 DAN KETEBALAN TERHADAP KEKUATAN PYLON KOMPOSIT KENAF-EPOKSI PADA KAKI PALSU TRANSFEMORAL MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Ananda Ariwijaya
NRP. 02111840000114

Dosen Pembimbing

Ir. Julendra Bambang Ariatedja, M.T.
NIP. 19680706199931004

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 ANGLE ORIENTATION
AND THICKNESS ON THE STRENGTH OF KENAF-EPOXY
COMPOSITE PYLON ON TRANSFEMORAL PROSTHETIC
USING FINITE ELEMENT METHOD**

Ananda Ariwijaya
NRP. 02111840000114

Advisor

Ir. Julendra Bambang Ariatedja, M.T.
NIP. 19680706199931004

Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2022

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS PENGARUH ORIENTASI SUDUT DAN KETEBALAN TERHADAP KEKUATAN PYLON KOMPOSIT KENAF-EPOKSI PADA KAKI PALSU TRANSFEMORAL 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: ANANDA ARIWIJAYA
NRP. 02111840000114

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Ir. Julendra B. Ariatedja, M. T. (Pembimbing)
NIP. 19680706199931004
2. Alief Wikarta S.T., M.Sc.Eng. (Penguji I)
NIP. 198202102006041002
3. Achmad Syaifudin, S.T., M.Eng. (Penguji II)
NIP. 197909262005011001
4. Ir. Yusuf Kaelani, M. Sc. (Penguji III)
NIP. 196511031990021001

SURABAYA

Juli, 2022

APPROVAL SHEET

ANALYSIS OF THE EFFECT OF ANGLE ORIENTATION AND THICKNESS ON THE STRENGTH OF KENAF-EPOXY COMPOSITE PYLON ON TRANSFEMORAL PROSTHETIC 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: **ANANDA ARIWIJAYA**
NRP. 02111840000114

Approved by Final Project Examiner Team:

1. Ir. Julendra B. Ariatedja, M. T.
NIP. 19680706199931004
(Advisor)
2. Alief Wikarta S.T., M.Sc. Eng., Ph.D.
NIP. 198202102006041002
(Examiner I)
3. Achmad Syaifudin, S.T., M.Eng., Ph.D.
NIP. 197909262005011001
(Examiner II)
4. Ir. Yusuf Kaelani, M. Sc.
NIP. 196511031990021001
(Examiner III)



SURABAYA

July, 2022

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Ananda Ariwijaya / 02111840000114

Departemen : Teknik Mesin

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

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Analisis Pengaruh Orientasi Sudut dan Ketebalan terhadap Kekuatan *Pylon* Komposit Kenaf-Epoksi pada Kaki Palsu Transfemoral Menggunakan Metode Elemen Hingga” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

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

Surabaya, 28 Juli 2022

Mengetahui
Dosen Pembimbing

Mahasiswa



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



(Ananda Ariwijaya)
NRP. 02111840000114

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Ananda Ariwijaya / 02111840000114
Department : Mechanical Engineering
Advisor / NIP : Ir. Julendra B. Ariatedja, M.T. / 196807061999031004

hereby declare that the Final Project with the title of "Analysis of the Effect of Angle Orientation and Thickness on the Strength of Kenaf-Epoxy Composite Pylon on Transfemoral Prosthetic using Finite Element Method" is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

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

Surabaya, 28th July 2022

Acknowledge
Advisor

Student



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



(Ananda Ariwijaya)
NRP. 02111840000114

ANALISIS PENGARUH ORIENTASI SUDUT DAN KETEBALAN TERHADAP KEKUATAN *PYLON* KOMPOSIT KENAF-EPOKSI PADA KAKI PALSU TRANSFEMORAL MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Nama Mahasiswa : Ananda Ariwijaya
NRP : 0211184000114
Jurusan : Teknik Mesin FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Julendra Bambang Ariatedja, M.T.

ABSTRAK

Pylon adalah komponen pada kaki prostetik yang menghubungkan sendi lutut ke kaki. Perkembangan modern di *pylon* adalah penggabungan serat karbon untuk memproduksi produk yang ringan. Perkembangan teknologi komposit tidak hanya pada komposit sintetis, akan tetapi juga mengarah pada komposit alam dikarenakan keistimewaan sifatnya yang dapat didaur ulang atau istilah lain terbarukan. Penelitian ini menargetkan aplikasi komposit alam dengan penguat serat kenaf dan matriks epoksi sebagai material alternatif *pylon* kaki prostetik yang umumnya terbuat dari aluminium. Struktur dari kekuatan komposit bisa dipengaruhi dari berbagai macam faktor, yaitu oleh orientasi sudut serat dan ketebalan dari komposit tersebut. Sehingga dari hal ini dilakukan penelitian untuk menentukan arah serat yang paling optimal dan ketebalan yang dapat digunakan dan diaplikasikan sebagai material alternatif untuk desain *pylon* kaki prostetik.

Penelitian analisis dan simulasi dengan metode elemen hingga ini dilakukan pengujian pada *pylon* kaki prostetik komposit menggunakan *software* ANSYS. Standar pengujian pembebanan yang diberikan pada spesimen *pylon* dengan mengacu standar ISO 10328 (2016): *Prosthetics — Structural testing of lower-limb prostheses — Requirements and test methods*. Variasi penelitian yang dilakukan menggunakan dua variasi yaitu arah orientasi sudut serat, dan variasi ketebalan *pylon* kaki prostetik komposit. Variasi orientasi sudut serat dilakukan dengan empat variasi yaitu: (0°/0°), (90°/90°), (0°/90°), (45°/-45°). Kemudian variasi ketebalan pada penelitian ini yaitu 3 mm sampai 14 mm dengan kenaikan 1 mm.

Hasil penelitian ini diperoleh orientasi sudut terbaik yaitu pada penyusunan orientasi sudut serat untuk *pylon* komposit yang paling optimal yaitu orientasi sudut (0°/90°). Hal ini dikarenakan penggunaan orientasi sudut (0°/90°) pada pembebanan standar ISO 10328(2016) menghasilkan nilai tegangan von-mises maksimum terendah, nilai kegagalan tsai-wu terendah, dan nilai *safety factor* tertinggi dibandingkan dengan orientasi sudut lainnya pada masing-masing pengujian saat kondisi *heel strike* dan *toe-off*. Meskipun nilai total deformasi pada penggunaan orientasi sudut (0°/90°) memiliki nilai terendah kedua setelah orientasi sudut (90°/90°). Dengan penyusunan sudut (0°/90°) untuk desain *pylon* dengan ketebalan 4 mm sudah aman untuk pengujian *heel strike* dan *toe-off* pada pembebanan level P3 untuk berat badan 60 kg dan dengan ketebalan 10 mm sudah aman untuk pengujian *heel strike* dan *toe-off* pada pembebanan level P4 untuk berat badan 80 kg.

Kata kunci: *serat kenaf, pylon kaki prostetik, serat alam, komposit, ISO 10328 (2016)*

ANALYSIS OF THE EFFECT OF ANGLE ORIENTATION AND THICKNESS ON THE STRENGTH OF KENAF-EPOXY COMPOSITE PYLON ON TRANSFEMORAL PROSTHETIC USING FINITE ELEMENT METHOD

Name : Ananda Ariwijaya
NRP : 02111840000114
Department : Mechanical Engineering, FTIRS-ITS
Supervisor : Ir. Julendra Bambang Ariatedja, M.T.

ABSTRACT

The pylon is the component in the prosthetic leg that connects the knee joint to the foot. The modern development in pylon is the incorporation of carbon fiber to produce lightweight products. The development of composite technology is not only in synthetic composites, but also leads to natural composites because of the properties that can be recycled or other terms are renewable. This study targets the application of natural composites with kenaf fiber reinforcement and an epoxy matrix as an alternative material for prosthetic leg pylons made of aluminum. The structure of the composite strength can be influenced by various factors, namely based on the fiber's direction and the composite's thickness. So from this, research was carried out to determine the most optimal fiber direction and thickness that could be used and applied as an alternative material for the design of prosthetic leg posts.

The analysis and simulation research using the finite element method was tested on the pylon of the composite prosthetic leg using ANSYS software. The standard of loading testing given to pylon specimens concerning the ISO 10328 (2016) standard: Prosthetics — Structural testing of lower limb prostheses — Testing requirements and methods. The variation of research was carried out using two variations, namely the direction of the orientation of the fiber angle, and variations in the thickness of the composite prosthetic leg. Variations in fiber angle orientation were carried out with four variations, namely: (0°/0°), (90°/90°), (0°/90°), (45°/-45°). Then the thickness variation in this study is 3 mm to 14 mm with an increase of 1 mm.

The results of this study obtained the best angle orientation, namely the arrangement of the fiber angle orientation for the most optimal composite pylon, namely the angle orientation (0°/90°). This is because the use of an angle orientation (0°/90°) in standard loading ISO 10328 (2016) produces the lowest maximum von-mises stress value, the lowest Tsai-wu failure value, and the highest safety factor value compared to other angle orientations in each test when the heel strike and toe-off conditions. However, the total deformation when using the angular orientation (0°/90°) has the second lowest value after the angular orientation (90°/90°). By setting the angle (0°/90°) for the pylon design with a thickness of 4 mm it is safe for heel strike and toe-off testing at P3 level loading for a weight of 60 kg and with a thickness of 10 mm it is safe for heel strike and toe-off testing under loading level P4 for body weight 80 kg.

Key words: *kenaf fiber, prosthetic leg pylon, natural fiber, composite, ISO 10328 (2016)*

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 Dan Ketebalan Terhadap Kekuatan *Pylon* Komposit Kenaf-Epoksi Pada Kaki Palsu Transfemoral Menggunakan Metode Elemen Hingga” dengan lancar dan sebaik-baiknya. Penelitian tugas akhir ini penulis gunakan sebagai wadah untuk menggali ilmu. Penulis menyadari bahwa keberhasilan dalam penulisan tugas akhir ini tidak lepas dukungan dan bantuan berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan rasa terimakasih yang sedalam-dalamnya kepada berbagai pihak yang telah memberikan bantuan serta dorongan selama penulisan, khususnya kepada:

1. Bapak Bahrudin dan Ibu Rita (Alm.) selaku orang tua penulis yang selalu memberikan doa-doanya, dan menjadi motivasi tersendiri untuk penulis menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Bapak Ir. Julendra. B Ariatedja, M.T. selaku dosen pembimbing penulis yang selalu memberikan pelajaran dan bimbingan kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Bapak Alief Wikarta S.T., M.Sc.Eng., PhD., Bapak Achmad Syaifudin, S.T., M.Eng., Ph.D., Bapak Ir. Yusuf Kaelani, M. Sc. selaku dosen penguji penulis yang telah memberikan banyak saran serta masukan yang berguna dalam menyempurnakan tugas akhir ini.
4. Bapak Dr. Eng. Sutikno, S.T., M.T., selaku dosen wali penulis yang selalu membantu dan membimbing penulis selama masa perkuliahan
5. Windy Mega Melani sosok suportif yang selalu memberikan semangat penulis.
6. Teman bimbingan tugas akhir (Kelpo, Faqih, Arighi, Aldi) yang selalu membantu penulis dalam hal motivasi, bantuan, dan ilmu diberikan selama menyelesaikan tugas akhir ini.
7. Warga Lab MBP (Fazhli, Ganes, Edo, Ajis, Vicky, Bang Jer) yang telah membantu dan menemani penulis dalam mengerjakan tugas akhir dengan penuh canda tawa dan motivasi yang sangat berarti bagi penulis.
8. Himpunan Mahasiswa Mesin ITS sebagai wadah pengembangan diri bagi penulis.
9. Seluruh teman-teman M61 yang telah menemani, membantu, dan menolong 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, 4 Juli 2022

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	VII
APPROVAL SHEET	IX
ABSTRAK	XV
ABSTRACT	XVII
KATA PENGANTAR	XIX
DAFTAR ISI	XXI
DAFTAR GAMBAR	XXV
DAFTAR TABEL	XXXIII
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Dasar Teori	5
2.1.1 Kaki Prostetik	5
2.1.2 Standarisasi Prostetik.....	6
2.1.3 Siklus Gaya Berjalan Manusia	11
2.1.4 Komposit	12
2.1.5 Rules of Mixtures	18
2.1.6 Fraksi Volume	20
2.1.7 Serat Alam	21
2.1.8 Epoksi	24
2.1.9 Failure Theory	24
2.1.10 Metode Elemen Hingga	26
2.1.11 <i>Safety factor</i>	28
2.2 Penelitian Terdahulu.....	28
BAB III METODOLOGI	39
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	39
3.2 Studi Literatur.....	42
3.3 Perumusan Masalah dan Tujuan Penelitian.....	43
3.4 Pengumpulan Data	43
3.4.1 Model Kaki Palsu Transfemoral.....	43
3.4.2 Standar Pengujian	44
3.4.3 Data Material	46
3.4.4 Variasi Penelitian.....	47
3.5 Pemodelan 3D dan Simulasi.....	48
3.5.1 Pemodelan 3D	48
3.5.2 Pemodelan Mikrostruktur Komposit	50
3.5.3 Meshing	51

3.5.4	Pemodelan Laminasi Komposit.....	51
3.5.5	Pengujian Statik.....	54
3.5.6	Uji Konvergensi.....	56
3.5.7	Hasil Simulasi.....	58
3.5.8	Validasi Model Simulasi	58
3.6	Perhitungan Data Material Orthotropic.....	60
3.6.1	Perhitungan Orthotropic Elasticity	60
3.6.2	Perhitungan Orthotropic Stress Limit.....	62
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		65
4.1	Hasil Simulasi Penelitian dan Pembahasan.....	65
4.1.1	Hasil Simulasi Pengujian <i>Pylon</i> Kaki Palsu pada Kondisi <i>Heel strike</i>	65
4.1.2	Hasil Simulasi Pengujian <i>Pylon</i> Kaki Palsu pada Kondisi <i>Toe-off</i>	80
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		95
5.1	Kesimpulan.....	95
5.2	Saran.....	95
DAFTAR PUSTAKA		XXXVII
LAMPIRAN		XXXIX
BIODATA PENULIS		XLVII

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Produksi serat alam di dunia pada tahun 2018 (Townsend, 2020)	2
Gambar 2.1 Bagian-bagian pada kaki prostetik.....	5
Gambar 2.2 <i>Pylon</i> pada kaki prostetik.....	6
Gambar 2.3 Struktur Kaki Prostetik secara keseluruhan (ISO 10328 (2016))	11
Gambar 2.4 Siklus Gaya Berjalan Manusia (Castermans et al., 2014)	12
Gambar 2.5 Representasi Skematis dari Komposit (Nair & Joseph, 2014)	12
Gambar 2.6 Komposit partikel (Schwartz, 1984).....	13
Gambar 2.7 Komposit serpih (Schwartz, 1984)	13
Gambar 2.8 Laminat composite (Schwartz, 1984).....	14
Gambar 2.9 Laminasi Multidirectional dengan Koordinat Referensinya (Daniel & Ishai, 2006)	14
Gambar 2.10 <i>Continous fiber composite</i> (Gibson, 1994).....	15
Gambar 2.11 <i>Woven fiber composite</i> (Gibson, 1994)	16
Gambar 2.12 Aligned discontinuous fiber (Gibson, 1994)	16
Gambar 2.13 Off-axis discintinuous fiber (Gibson, 1994).....	16
Gambar 2.14 Randomly oriented discontinuous fiber (Gibson, 1994).....	16
Gambar 2.15 Hybrid fiber composite (Gibson, 1994).....	17
Gambar 2.16 Orientasi letak serat (Schwartz, 1984).....	17
Gambar 2.17 Model Geometri Serat Hexagonal (Daniel & Ishai, 2006)	19
Gambar 2.18 Klasifikasi Jenis Serat Alam (Loan, 2006)	22
Gambar 2.19 Tanaman Kenaf (<i>Hibiscus sabdariffa</i>)	23
Gambar 2.20 Serat Kenaf (Fajrin et al., 2022)	24
Gambar 2.21 Pemetaan dari Teori Kegagalan Tsai-Wu (Voyiadjis & Kattan, 2005).....	26
Gambar 2.22 (a) Plat dengan sebuah lubang (model CAD) dan (b) diskritisasi metode elemen hingga(Liu & Chen, 2014).....	27
Gambar 2.23 Bahan yang digunakan dalam penelitian ini (a) Serat jute (b) Serat perlon (c) Resin PMMA (Jumaah & Oleiwi, 2016)	29
Gambar 2.24 Sampel spesimen uji tarik untuk <i>pylon</i> kaki prostetik (a) sebelum uji tarik (b) sesudah uji tarik (Jumaah & Oleiwi, 2016)	30
Gambar 2.25 Hubungan antara kekuatan tarik dengan jumlah lapisan serat (Jumaah & Oleiwi, 2016).....	30
Gambar 2.26 Hubungan antara modulus elastisitas dengan jumlah lapisan serat (Jumaah & Oleiwi, 2016).....	31
Gambar 2.27 Spesimen Komposit Kenaf-Epoksi.....	31
Gambar 2.28 Hasil Tensile Strength (Mahjoub et al., 2014).....	32
Gambar 2.29 Pengujian Tarik (Fajrin et al., 2022).....	32
Gambar 2.30 Hasil Pengujian Tarik (Fajrin et al., 2022)	33
Gambar 2.31 Model geometri <i>pylon</i> yang dirancang (Tahir & Kadhim, 2021).....	34
Gambar 2.32 Kondisi batas yang diterapkan pada <i>pylon</i> (Tahir & Kadhim, 2021)	34
Gambar 2.33 Hasil analisa (a) von misses stress (b) deformasi (c) <i>safety factor</i> (Tahir & Kadhim, 2021).....	35
Gambar 2.34 Kondisi Batas Pada Kaki Palsu Transfemoral dan Transtibial (a) <i>Condition 1</i> (b) <i>Condition 2</i>	36

Gambar 2.35 Hasil analisa pylon ellipse (a) deformasi (b) von-mises stress.....	38
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	40
Gambar 3.2 Diagram Alir Simulasi.....	41
Gambar 3.3 Diagram Alir Simulasi Pengujian Kaki Palsu Transfemoral.....	42
Gambar 3.4 Model Kaki Palsu Transfemoral <i>Polycentric Single Axis Ankle</i>	43
Gambar 3.5 Geometri <i>Pylon</i> Kaki Prostetik.....	44
Gambar 3.6 <i>Boundary condition</i> pada <i>condition 1</i>	45
Gambar 3.7 <i>Boundary condition</i> pada <i>condition 2</i>	45
Gambar 3.8 Pemodelan 3D Kaki Palsu Transfemoral.....	49
Gambar 3.9 Pemodelan 3D Permukaan luar dari <i>Pylon</i>	50
Gambar 3.10 Model Mikrostruktur Komposit Serat/Resin UD	50
Gambar 3.11 <i>Mesh</i> pada <i>Pylon</i>	51
Gambar 3.12 <i>Input</i> Material dan Ketebalan	52
Gambar 3.13 <i>Input</i> Arah Orientasi Sudut Serat.....	52
Gambar 3.14 Penyusunan Orientasi Sudut (a) 0° (b) 90° (c) 45° (d) -45°	53
Gambar 3.15 Penentuan Sumbu Rosettes.....	53
Gambar 3.16 Penentuan Sumbu <i>Oriented Selection Sets</i>	53
Gambar 3.17 <i>Modelling Group</i>	54
Gambar 3.18 Ketebalan <i>Pylon</i> Komposit.....	54
Gambar 3.19 Ilustrasi Penyusunan Arah Orientasi Sudut Komposit	54
Gambar 3.20 <i>Boundary condition</i> kondisi 1 simulasi kaki palsu pada ANSYS	55
Gambar 3.21 <i>Boundary condition</i> kondisi 2 simulasi kaki palsu pada ANSYS	55
Gambar 3.22 <i>Body contact</i> kaki palsu transfemoral.....	56
Gambar 3.23 <i>Mesh</i> pada kaki palsu.....	57
Gambar 3.24 Grafik Hasil Uji Konvergensi Simulasi.....	58
Gambar 3.25 Model pengujian berdasarkan referensi penelitian oleh Noori Kareem	59
Gambar 3.26 Hasil total deformasi maksimum	59
Gambar 3.27 Hasil tegangan von-mises maksimum	60
Gambar 4.1 Hasil Simulasi Tegangan Von-Mises Setiap Variasi Sudut pada Pengujian <i>Heel strike</i> (a) (0°/0°), (b) (90°/90°), (c) (0°/90°), (d) (45°/-45°).....	66
Gambar 4.2 Grafik Hasil Simulasi Orientasi Sudut Serat terhadap Tegangan Von-mises Maksimum pada Pengujian <i>Heel strike</i>	66
Gambar 4.3 Hasil Simulasi Total Deformasi Setiap Variasi Sudut pada Pengujian <i>Heel strike</i> (a) (0°/0°), (b) (90°/90°), (c) (0°/90°), (d) (45°/-45°).....	67
Gambar 4.4 Grafik Hasil Simulasi Orientasi Sudut Serat terhadap Total Deformasi Maksimum pada Pengujian <i>Heel strike</i>	68
Gambar 4.5 Hasil Simulasi Nilai Kegagalan Tsai-Wu Setiap Variasi Sudut pada Pengujian <i>Heel strike</i> (a) (0°/0°), (b) (90°/90°), (c) (0°/90°), (d) (45°/-45°)	69
Gambar 4.6 Grafik Hasil Simulasi Variasi Sudut Serat terhadap Nilai Tsai-Wu pada Pengujian <i>Heel strike</i>	69
Gambar 4.7 Hasil Simulasi Nilai <i>Safety factor</i> Setiap Variasi Sudut pada Pengujian <i>Heel strike</i> (a) (0°/0°), (b) (90°/90°), (c) (0°/90°), (d) (45°/-45°).....	71
Gambar 4.8 Grafik Hasil Simulasi Variasi Sudut Serat terhadap Nilai <i>Safety factor</i> pada Pengujian <i>Heel strike</i>	72

Gambar 4.9 Hasil Simulasi Nilai Tegangan Von-Mises Setiap Variasi Ketebalan pada Pengujian <i>Heel strike</i> (a) 4 mm, (b) 5 mm, (c) 6 mm, (d) 7 mm, (e) 8 mm, (f) 9 mm, (g) 10 mm, (h) 11 mm, (i) 12 mm, (j) 13 mm, (k) 14 mm	73
Gambar 4.10 Grafik Hasil Simulasi Variasi Ketebalan terhadap Tegangan Von-mises Maksimum pada Pengujian <i>Heel strike</i>	74
Gambar 4.11 Hasil Simulasi Nilai Total Deformasi Setiap Variasi Ketebalan pada Pengujian <i>Heel strike</i> (a) 4 mm, (b) 5 mm, (c) 6 mm, (d) 7 mm, (e) 8 mm, (f) 9 mm, (g) 10 mm, (h) 11 mm, (i) 12 mm, (j) 13 mm, (k) 14 mm	76
Gambar 4.12 Grafik Hasil Simulasi Variasi Ketebalan terhadap Nilai Total Deformasi Maksimum pada Pengujian <i>Heel strike</i>	76
Gambar 4.13 Hasil Simulasi Nilai <i>Safety factor</i> Setiap Variasi Ketebalan pada Pengujian <i>Heel strike</i> (a) 4 mm, (b) 5 mm, (c) 6 mm, (d) 7 mm, (e) 8 mm, (f) 9 mm, (g) 10 mm, (h) 11 mm, (i) 12 mm, (j) 13 mm, (k) 14 mm	78
Gambar 4.14 Grafik Hasil Simulasi Variasi Ketebalan terhadap Nilai <i>Safety factor</i> pada Pengujian <i>Heel strike</i>	78
Gambar 4.15 Grafik Hasil Simulasi Variasi Ketebalan terhadap Nilai <i>Safety factor</i> pada Pengujian <i>Heel strike</i> di Seluruh Level	79
Gambar 4.16 Hasil Simulasi Tegangan Von-Mises Setiap Variasi Sudut pada Pengujian <i>Toe-off</i> (a) (0°/0°), (b) (90°/90°), (c) (0°/90°), (d) (45°/-45°)	80
Gambar 4.17 Grafik Hasil Simulasi Variasi Sudut Serat terhadap Tegangan Von-mises Maksimum pada Pengujian <i>Toe-off</i>	81
Gambar 4.18 Hasil Simulasi Total Deformasi Setiap Variasi Sudut pada Pengujian <i>Toe-off</i> (a) (0°/0°), (b) (90°/90°), (c) (0°/90°), (d) (45°/-45°)	82
Gambar 4.19 Grafik Hasil Simulasi Variasi Sudut Serat terhadap Total Deformasi Maksimum pada Pengujian <i>Toe-off</i>	82
Gambar 4.20 Hasil Simulasi Nilai Kegagalan Tsai-Wu Setiap Variasi Sudut pada Pengujian <i>Toe-off</i> (a) (0°/0°), (b) (90°/90°), (c) (0°/90°), (d) (45°/-45°)	84
Gambar 4.21 Grafik Hasil Simulasi Variasi Sudut Serat terhadap Nilai Tsai-Wu pada Pengujian <i>Toe-off</i>	84
Gambar 4.22 Hasil Simulasi Nilai <i>Safety factor</i> Setiap Variasi Sudut pada Pengujian <i>Toe-off</i> (a) (0°/0°), (b) (90°/90°), (c) (0°/90°), (d) (45°/-45°)	85
Gambar 4.23 Grafik Hasil Simulasi Variasi Sudut Serat terhadap Nilai <i>Safety factor</i> pada Pengujian <i>Toe-off</i>	86
Gambar 4.24 Hasil Simulasi Nilai Tegangan Von-Mises Setiap Variasi Ketebalan pada Pengujian <i>Toe-off</i> (a) 4 mm, (b) 5 mm, (c) 6 mm, (d) 7 mm, (e) 8 mm, (f) 9 mm, (g) 10 mm, (h) 11 mm, (i) 12 mm, (j) 13 mm, (k) 14 mm	87
Gambar 4.25 Grafik Hasil Simulasi Variasi Ketebalan terhadap Nilai Tegangan von-mises pada Pengujian <i>Toe-off</i>	88
Gambar 4.26 Hasil Simulasi Nilai Total Deformasi Setiap Variasi Ketebalan pada Pengujian <i>Toe-off</i> (a) 4 mm, (b) 5 mm, (c) 6 mm, (d) 7 mm, (e) 8 mm, (f) 9 mm, (g) 10 mm, (h) 11 mm, (i) 12 mm, (j) 13 mm, (k) 14 mm	90
Gambar 4.27 Grafik Hasil Simulasi Variasi Ketebalan terhadap Nilai Total Deformasi pada Pengujian <i>Toe-off</i>	90
Gambar 4.28 Hasil Simulasi Nilai <i>Safety factor</i> Setiap Variasi Ketebalan pada Pengujian <i>Toe-off</i> (a) 4 mm, (b) 5 mm, (c) 6 mm, (d) 7 mm, (e) 8 mm, (f) 9 mm, (g) 10 mm, (h) 11 mm, (i) 12 mm, (j) 13 mm, (k) 14 mm	92

Gambar 4.29 Grafik Hasil Simulasi Variasi Ketebalan terhadap Nilai <i>Safety factor</i> pada Pengujian <i>Toe-off</i>	92
Gambar 4.30 Grafik Hasil Simulasi Variasi Ketebalan terhadap Nilai <i>Safety factor</i> pada Pengujian <i>Toe-off</i> di Seluruh Level	93

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 <i>Test force of the proof test of end attachments for test loading level P5, P4, P3</i>	7
Tabel 2.2 <i>Test forces of all principal tests and prescribed number of cycles of the cyclic test for test loading levels P5, P4 and P3</i>	7
Tabel 2.3 <i>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</i>	8
Tabel 2.4 <i>Test forces of the proof test of end attachments for test loading levels P6, P7 and P8</i>	9
Tabel 2.5 <i>Test forces of all principal tests and prescribed number of cycles of the cyclic test, for test loading levels P6, P7 and P8</i>	9
Tabel 2.6 <i>Test forces of all separate's tests on ankle foot devices and foot units and prescribed number of cycles of the cyclic test for test loading level P6, P7, and P8</i>	10
Tabel 2.7 <i>Komparasi sifat mekanik dari serat Alam (Loan, 2006)</i>	22
Tabel 2.8 <i>Properties Serat Kenaf</i>	24
Tabel 2.9 <i>Properties Epoksi</i>	24
Tabel 2.10 <i>Jenis Variasi yang digunakan</i>	29
Tabel 2.11 <i>Perbandingan Pylon Serat Karbon PLA dengan tipe lainnya (Tahir & Kadhim, 2021)</i>	35
Tabel 2.12 <i>Jenis Komposit Spesimen</i>	37
Tabel 2.13 <i>Data Analisis Pylon</i>	37
Tabel 3.1 <i>Static Test Procedure – Ultimate Static Test Force</i>	46
Tabel 3.2 <i>Properties Serat Kenaf</i>	46
Tabel 3.3 <i>Properties Resin Epoksi</i>	46
Tabel 3.4 <i>Properties Aluminium 6061 (ASM Aerospace Specification Metals Inc.)</i>	47
Tabel 3.5 <i>Penyusunan Orientasi Sudut Serat</i>	47
Tabel 3.6 <i>Konfigurasi Tumpukan Lamina</i>	47
Tabel 3.7 <i>Variasi Ketebalan Komposit pada Pylon</i>	48
Tabel 3.8 <i>Hasil Orthotropic Elasticity ANSYS Material Designer</i>	51
Tabel 3.9 <i>Hasil Uji Konvergensi Simulasi Static Structural</i>	57
Tabel 3.10 <i>Hasil perbandingan total deformasi</i>	59
Tabel 3.11 <i>Hasil perbandingan tegangan von-mises</i>	60
Tabel 3.12 <i>Perbandingan Hasil Material Designer dengan Hasil Kalkulasi Manual</i>	62

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dewasa ini perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi sangat pesat, baik dalam bidang material logam maupun material non-logam. Sampai saat ini, keberadaan material logam mendominasi pada sektor industri. Namun masih belum terpenuhi material yang mempunyai sifat tertentu dalam aplikasi di dunia industri sehingga dikembangkan material non-logam, khususnya material yang diperkuat serat alam yang lebih ringan, tahan korosi, murah, dan memiliki kekuatan yang bisa menyaingi dengan logam. Oleh karena itu, material komposit cocok untuk berbagai aplikasi industri, otomotif, arsitektur, dan biomedik. Perkembangan pada ilmu biomedik seperti pembuatan teknologi alat medis prostetik.

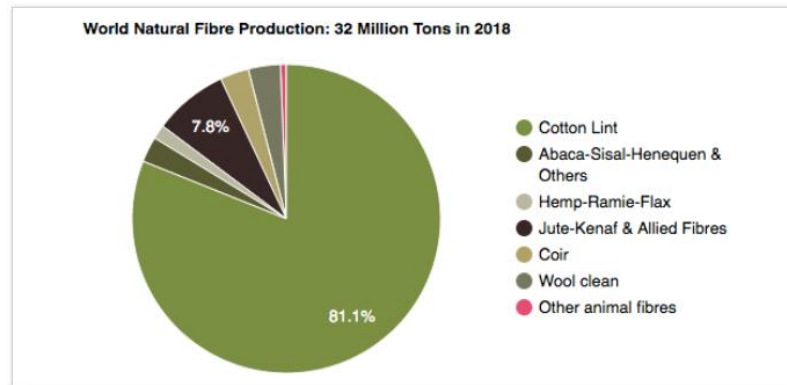
Prostetik adalah alat buatan yang menggantikan bagian tubuh manusia yang hilang, yang mungkin hilang karena trauma, penyakit, atau kondisi kelainan bawaan sejak lahir. Prostetik dirancang dimaksudkan untuk mengembalikan fungsi normal dari tubuh yang hilang. (Shurr & Cook, 1990). Berdasarkan data dari Survei Sosial Ekonomi Nasional (Susenas) pada tahun 2019, jumlah penyandang disabilitas mencapai 26 juta orang atau 9,7 % dari jumlah penduduk di Indonesia. Dengan jumlah data penyandang disabilitas di Indonesia, maka diciptakanlah teknologi prostetik yang mampu membantu penyandang disabilitas untuk bisa melakukan berbagai macam aktivitas sehari-hari.

Prostetik bawah lutut pada umumnya memiliki beberapa komponen utama yang terdiri dari 3 bagian penting yaitu *socket*, *pylon*, dan *foot-ankle system*. *Pylon* adalah komponen yang menghubungkan sendi lutut ke kaki dan menahan beban orang yang diamputasi ke lantai melalui kaki. *Pylon* biasanya dibuat dengan logam seperti baja agar memiliki kekuatan dan kekakuan mekanik yang tinggi. Untuk membatasi berat keseluruhan prostetik, *pylon* dibuat menjadi pipa berlubang. Aluminium paduan biasanya digunakan untuk membuat *pylon* karena relatif ringan dan telah menggantikan banyak logam baja pada material *pylon*. Perkembangan modern lainnya di *pylon* adalah penggabungan serat karbon untuk memproduksi produk yang ringan. Banyak pakar prostetik yakin bahwa serat superior ini pada akhirnya akan menggantikan logam dalam pembuatan *pylon* kaki prostetik. (P. K. Kumar et al., 2017)

Perkembangan teknologi komposit tidak hanya pada komposit sintetis, akan tetapi juga mengarah pada komposit alam dikarenakan keistimewaan sifatnya yang dapat didaur ulang atau istilah lain terbarukan. Komposit polimer dengan serat alam memiliki banyak keunggulan jika dibandingkan dengan komposit sintetis. Perkembangan material komposit alam sebagai pengganti logam dan karbon sangat menjadi perhatian, hal ini karena komposit alam memiliki sifat mekanik yang cukup baik, memiliki sifat isolator panas dan suara, tahan korosi, serta dapat dijadikan sebagai penghambat listrik yang baik selain itu juga ramah lingkungan. (Sirait, 2010)

Serat alam sebagai pengganti serat sintetis dalam matriks polimer menjadi fokus banyak ilmuwan dan insinyur. Alasan memilih serat alam yang diperkuat matriks polimer karena biaya murah dan dapat terurai secara alami. Karena banyak kelebihanannya, pemanfaatan serat alam sebagai bahan baku produk telah banyak dilakukan berbagai penelitian dalam mendapatkan data sifat mekanis dari produk untuk memenuhi standar keamanan maupun standar ekonomis produk tersebut. Serat alam yang akan digunakan pada penelitian ini yaitu serat kenaf. Produksi serat alam di dunia pada 2018 diperkirakan mencapai 32 juta metrik ton. Serat jute merupakan serat alam (*natural fibre*) yang digunakan nomor dua terbanyak sesudah kapas (*cotton*) sebagai bahan keperluan hidup manusia (Townsend, 2020). Tanaman jute yang banyak berada di

Indonesia adalah jenis yute jawa yang biasa disebut tanaman kenaf. Tanaman kenaf banyak ditanam di Indonesia didaerah Jawa Barat, Jawa Tengah dan Jawa Timur.



Gambar 1.1 Produksi serat alam di dunia pada tahun 2018 (Townsend, 2020)

Tanaman jute mampu menghasilkan serat yang harganya terjangkau. Dari kandungan kimianya, serat dari tanaman jute mengandung kadar selulosa dan lignin yang sangat tinggi. Dan karenanya, serat ini sering digolongkan dalam kategori serat *bast* bersama dengan kenaf, rami, dan juga flaks (serat yang berasal dari jaringan floem atau kulit tanaman). Karena produksinya yang tinggi dan pemanfaatannya yang besar, serat ini kerap dinamai sebagai *golden fiber*. Pada penelitian ini akan dilakukan simulasi untuk uji kekuatan *pylon* yang menggunakan material komposit serat kenaf pada kaki palsu transfemoral.

1.2 Rumusan Masalah

Dalam penelitian ini terdapat rumusan masalah yaitu:

1. Bagaimana pengaruh variasi orientasi sudut serat kenaf terhadap kekuatan dari *pylon* kaki palsu?
2. Bagaimana pengaruh ketebalan komposit terhadap kekuatan *pylon* kaki palsu?

1.3 Batasan Masalah

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

1. Material yang digunakan pada kaki palsu adalah aluminium 6061 dan *natural composite* yang digunakan adalah serat kenaf sebagai *reinforcement* dan epoksi sebagai matriks.
2. Standar pengujian yang dilakukan mengacu pada standar ISO 10328 (2016).
3. *Properties* material serat yang digunakan berdasarkan jurnal penelitian yang sudah ada.
4. *Properties* material komposit didapat melalui analisis dari *tools* Material Designer ANSYS.
5. Jenis komposit yang digunakan adalah RVE model *unidirectional*.
6. Variasi sudut serat penelitian ini adalah $[0^\circ/0^\circ]$, $[90^\circ/90^\circ]$, $[0^\circ/90^\circ]$, $[45^\circ/-45^\circ]$.
7. Fraksi volume serat kenaf dengan matriks adalah 40%.
8. Penelitian dilakukan dengan menggunakan *software* ANSYS Workbench 2021 R1 dan Solidworks 2019.

1.4 Tujuan Penelitian

Dalam penelitian ini terdapat beberapa tujuan yang dicapai, yaitu:

1. Mengetahui pengaruh variasi orientasi sudut serat kenaf terhadap kekuatan dari *pylon* kaki palsu.
2. Mengetahui pengaruh ketebalan komposit terhadap kekuatan *pylon* kaki palsu.

1.5 Manfaat Penelitian

Dalam penelitian ini terdapat beberapa manfaat yang diharapkan dapat berguna untuk penelitian atau perancangan *pylon* kaki prostetik, yaitu:

1. Penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai referensi untuk tugas akhir selanjutnya.
2. Penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai referensi untuk perancangan *pylon* kaki prostetik agar dapat dioptimalkan kembali dengan menggunakan kombinasi material alami dan penyusunan yang lebih efisien.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dasar Teori

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

2.1.1 Kaki Prostetik

Prostetik adalah alat yang digunakan untuk mengganti bagian tubuh yang hilang. Definisi yang dijelaskan tidak berkaitan dengan adanya suatu pengganti telinga, mata, gigi atau bagian tubuh lainnya, tetapi yang dibahas disini adalah prostetik berupa penggantian bagian tubuh sebagai alat gerak. (Sinaki, 1993)

Ada dua jenis gangguan fisik pada alat gerak bagian bawah yaitu cacat dari kaki bagian atas lutut (*above-knee*) dan cacat pada kaki bagian bawah lutut (*below-knee*). Pada kaki palsu terdapat bagian penghubung antara *foot-ankle* dengan *socket* yaitu berupa *shank/pylon* yang memiliki fungsi pembagi beban dari *socket* ke *foot*. (Huston, 2013)

Prostetik bawah lutut pada umumnya memiliki beberapa komponen utama yang terdiri dari 3 bagian penting yaitu *socket*, *pylon*, dan *foot-ankle system*. Masing-masing komponen utama ini masih dapat diklasifikasikan ke dalam jenis yang berbeda, yang dipengaruhi oleh fungsi dan keinginan pengguna prostetik bawah lutut.



Gambar 2.1 Bagian-bagian pada kaki prostetik
(Sumber: www.pandocare.com)

1. *Pylon*

Pylon adalah komponen yang menghubungkan sendi lutut ke kaki dan menahan beban orang yang diamputasi ke lantai melalui kaki. *Pylon* biasanya dibuat dengan logam seperti baja agar memiliki kekuatan dan kekakuan mekanik yang tinggi. Untuk membatasi berat keseluruhan prostetik, *pylon* dibuat menjadi pipa berlubang. Aluminium paduan digunakan untuk membuat *pylon* karena relatif ringan dan telah menggantikan banyak logam baja pada material *pylon*. Perkembangan modern lainnya di *pylon* adalah penggabungan serat karbon untuk memproduksi produk yang ringan. Banyak pakar prostetik yakin bahwa serat superior ini

pada akhirnya akan menggantikan logam dalam pembuatan *pylon* kaki prostetik (P. K. Kumar et al., 2017)



Gambar 2.2 *Pylon* pada kaki prostetik
(Sumber: Otto Bock HealthCare)

2.1.2 Standarisasi Prostetik

1. ISO 10328 (2016): Prosthetics – Structural testing of lower-limb prostheses – Requirements and test methods

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, P5, P6, P7, dan P8. P3 adalah level untuk berat badan kurang dari 60 kg, P4 untuk kurang dari 80 kg, P5 kurang dari 100 kg, P6 kurang dari 125 kg, P7 untuk kurang dari 150 kg, dan P8 untuk kurang dari 175 kg.

Tabel 2.1 Test force of the proof test of end attachments for test loading level P5, P4, P3

End attachment for			Stabilizing test force, F_{stab} N	Settling test force, F_{set} N	Proof test force, F_{pa} N
Test Procedure	Test loading level	Test loading condition			
Principal structural test	P5	I	50	1024	5376
		II		920	4830
	P4	I		944	4956
		II		828	4348
	P3	I		736	3864
		II		638	3348
Separate tests on knee locks	P5, P4, P3		50	800	4200

Tabel 2.2 Test forces of all principal tests and prescribed number of cycles of the cyclic test for test loading levels P5, P4 and P3

Test procedure and test load			Unit	Test loading level (Px) and test loading condition (I, II)					
				P5		P4		P3	
				I	II	I	II	I	II
Static and cyclic test procedures	Stabilizing test force	F_{stab}	N	50					
	Settling test force	F_{set}	N	1024	920	944	828	736	638
Static test procedure	Proof test force	F_{sp}	N	2240	2013	2065	1811	1610	1395
	Ultimate static test force	$F_{su, lower level}$	N	3360	3019	3098	2717	2415	2092
		$F_{su, upper level}$	N	4480	4025	4130	3623	3220	2790
Cyclic test procedure	Minimum test force	F_{cmin}	N	50					
	Cyclic range	F_{cr}	N	1280	1150	1180	1035	920	797
	Maximum test force	$F_{cmax}, F_{cmax}=F_{cmin}+F_{cr}$	N	1330	1200	1230	1085	970	847
	Mean test force	$F_{cmean}, F_{cmean} = 0.5(F_{cmin}+F_{cmax})$	N	690	625	640	568	510	449
	Cyclic amplitude	$F_{ca}, F_{ca}=0.5 F_{cr}$	N	640	575	590	518	460	399
	Final static force	$F_{fin}, F_{fin}=F_{sp}$	N	2240	2013	2065	1811	1610	1395

Test procedure and test load		Unit	Test loading level (Px) and test loading condition (I, II)					
			P5		P4		P3	
			I	II	I	II	I	II
Prescribed number of cycles		1	3 x 10 ⁶					

Table 2.3 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 _{xmax} =F _{xmin} +F _{xcr}	N	1330	1330	1230	1230	970	970
	Mean test force	F _{1cmean} , F _{2cmean} F _{xmean} =0.5(F _{xmin} +F _{xmax})	N	690	690	640	640	510	510
	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					

Tabel 2.4 Test forces of the proof test of end attachments for test loading levels P6, P7 and P8

End attachments for			Stabilizing test force, F_{stab} N	Settling test force, F_{set} N	Proof test force, F_{pa} N
Test procedure	Test loading level	Test loading condition			
Principal structural tests	P8	I	50	1640	6840
		II		1560	6300
	P7	I		1416	6360
		II		1360	5808
	P6	I		1224	5856
		II		1120	5310

Tabel 2.5 Test forces of all principal tests and prescribed number of cycles of the cyclic test, for test loading levels P6, P7 and P8

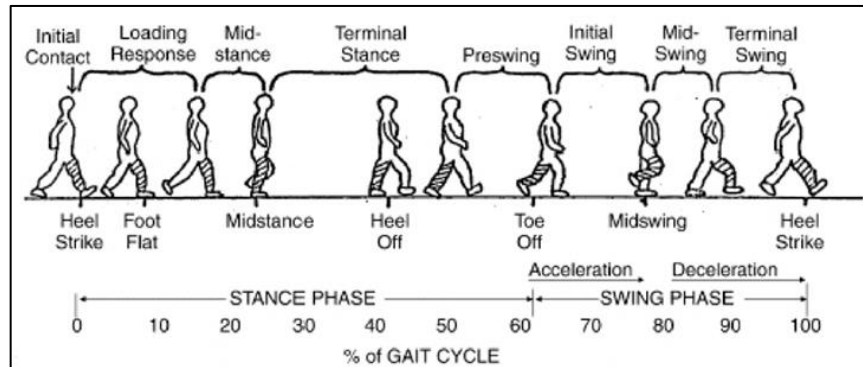
Test procedure and test load			Unit	Test loading level						
				P8		P7		P6		
				Test loading condition						
			I		II		I		II	
Static and cyclic test procedure	Stabilizing test force	F_{stab}	N	50						
	Settling test force	F_{set}	N	1640	1560	1416	1360	1224	1120	
Static test procedure	Proof test force	F_{sp}	N	3200	2950	2900	2650	2490	2263	
	Ultimate static test force	F_{su} , lower level	N	4450	4150	4100	3775	3760	3419	
		F_{su} , upper level	N	5700	5250	5300	4840	4880	4425	
Cyclic test procedure	Minimum test force	F_{cmin}	N	50						
	Cyclic range	F_{cr}	N	2050	1950	1770	1700	1530	1400	
	Maximum test force	F_{cmax} $F_{cmax}=F_{cmin}+F_{cr}$	N	2100	2000	1820	1750	1580	1450	
	Mean test force	F_{cmean} $F_{cmean}=0.5(F_{cmin}+F_{cmax})$	N	1075	1025	935	900	815	750	
	Cyclic amplitude	F_{ca} $F_{ca}=0.5 F_{cr}$	N	1025	1000	910	875	765	700	
	Final static force	F_{fin} $F_{fin}=F_{sp}$	N	3200	2950	2900	2650	2490	2263	

<i>Test procedure and test load</i>		<i>Unit</i>	<i>Test loading level</i>					
			P8		P7		P6	
<i>Prescribed numbers of cycles</i>		1	<i>Test loading condition</i>					
			I	II	I	II	I	II
			3 x 10 ⁶					

Table 2.6 Test forces of all separate's tests on ankle foot devices and foot units and prescribed number of cycles of the cyclic test for test loading level P6, P7, and P8

<i>Test procedure and test load</i>			<i>Unit</i>	<i>Test loading level (Px) and test loading condition (I, II)</i>					
				P8		P7		P6	
				<i>Heel loading</i> F _{1x}	<i>Forefoot loading</i> F _{2x}	<i>Heel loading</i> F _{1x}	<i>Forefoot loading</i> F _{2x}	<i>Heel loading</i> F _{1x}	<i>Forefoot loading</i> F _{2x}
<i>Static test procedure</i>	<i>Proof test force</i>	F _{1sp} , F _{2sp}	N	3200	3200	2900	2900	2490	2490
	<i>Ultimate static force</i>	F _{1su, lower level} , F _{2su, lower level}	N	4450	4450	4100	4100	3760	3760
		F _{1su, upper level} , F _{2su, upper level}	N	5700	5700	5300	5300	4880	4880
<i>Cyclic test procedure</i>	<i>Minimum test force</i>	F _{1cmin} , F _{2cmin}	N	50					
	<i>Cyclic range</i>	F _{1cr} , F _{2cr}	N	2050	2050	1770	1770	1530	1530
	<i>Maximum test force</i>	F _{1cmax} , F _{2cmax} F _{xcmax} = F _{xcmin} +F _{xcr}	N	2100	2100	1820	1820	1580	1580
	<i>Mean test force</i>	F _{1cmean} , F _{2cmean} F _{xcmean} = 0.5 (F _{xcmin} +F _{xcmax})	N	1075	1075	935	935	815	815
	<i>Cyclic amplitude</i>	F _{1ca} , F _{2ca} F _{xca} = 0.5 F _{xcr}	N	1025	1025	885	885	765	765

stance phase (sikap awal fase) dan *swing phase* (fase ayunan). Tahap *stance phase* menempati 60% dari siklus gaya berjalan, sementara fase ayunan menempati hanya 40% dari itu. Klasifikasi berjalan yang lebih rinci mengenali enam tahap, yaitu *heel strike*, *foot flat*, *mid-stance*, *heel-off*, *toe-off* dan *mid-swing*.

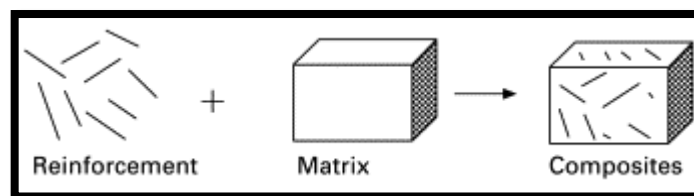


Gambar 2.4 Siklus Gaya Berjalan Manusia (Castermans et al., 2014)

Pada fase berdiri terbagi menjadi tiga periode, yaitu fase kontak, ketika tumit menyentuh tanah berlanjut ke kaki dengan posisi menapak di atas tanah, kemudian fase *mid-stance* terjadi saat kaki menapak di tanah bergerak mengangkat tumit, dan periode dorongan ketika tumit diangkat dan posisi *toe-off* terjadi atau jari-jari kaki menyentuh tanah. Pada fase berjalan, ada fase ketika kedua kaki berada di tanah terdapat dua *support* pada fase tersebut dan ada fase ketika satu kaki yang menginjak tanah dengan satu *support* pada fase tersebut.

2.1.4 Komposit

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



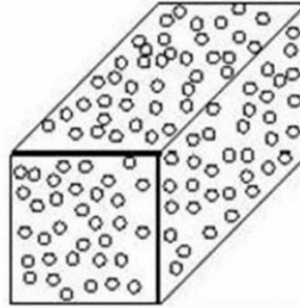
Gambar 2.5 Representasi Skematis dari Komposit (Nair & Joseph, 2014)

1. Klasifikasi Bahan Komposit

Komposit dibedakan menjadi 4 jenis menurut bentuk struktur dari penyusunnya, yaitu:

- a) Komposit Partikel (*Particulate Composite*)

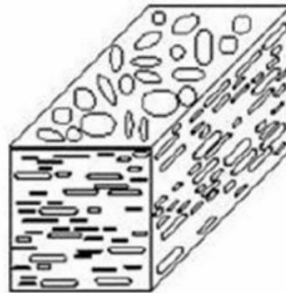
Komposit partikel adalah salah satu jenis komposit dimana dalam matriksnya ditambahkan material lain berupa serbuk/butir. Dalam komposit partikel material penambah terdistribusi secara acak atau kurang terkontrol dari pada komposit serpih, sebagai contoh adalah beton. Contoh komposit partikel dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Komposit partikel (Schwartz, 1984)

b) Komposit Serpih (*Flake Composite*)

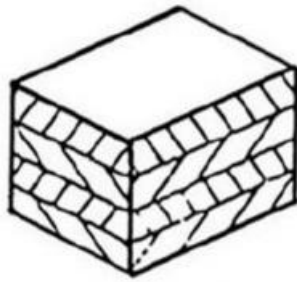
Komposit serpih adalah komposit dengan penambahan material berupa serpih kedalam matriksnya. Serpih dapat berupa serpihan mika, glass dan metal. Contoh komposit serpih dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Komposit serpih (Schwartz, 1984)

c) *Laminate Composite*

Laminate Composite adalah komposit dengan susunan dua atau lebih layer, dimana masing-masing layer dapat berbeda-beda dalam hal material, dan orientasi penguatnya. Contoh komposit laminasi dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Laminat composite (Schwartz, 1984)

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

Unidirectional six-ply: $[0/0/0/0/0/0] = [0_6]$

Crossply symmetric: $[0/90/0/90/90/0/90/0] = [0/90]_{2s}$

$[0/90/90/0] = [0/90]_s$

$[0/90/0] = [0/\overline{90}]_s$

Angle-ply symmetric: $[+45/-45/-45/+45] = [\pm 45]_s$

$[30/-30/30/-30/-30/30/-30/30] = [\pm 30]_{2s}$

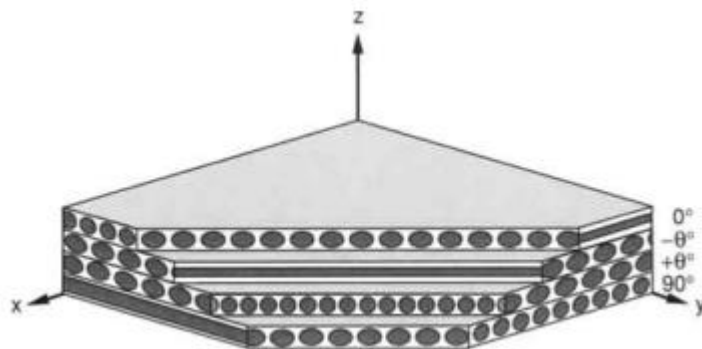
Angle-ply asymmetric: $[30/-30/30/-30/30/-30/30/-30] = [\pm 30]_4$

Multidirectional: $[0/45/-45/-45/45/0] = [0/\pm 45]_s$

$[0/0/45/-45/0/0/0/0/-45/45/0/0] = [0_2/\pm 45/0_2]_s$

$[0/15/-15/15/-15/0] = [0/\pm 15/\pm 15/0]_T = [0/(\pm 15)_2/0]_T$

Hybrid: $[0^K/0^K/45^C/-45^C/90^G/-45^C/45^C/0^K/0^K]_T = [0_2^K/\pm 45^C/\overline{90}^G]_s$



Gambar 2.9 Laminasi *Multidirectional* dengan Koordinat Referensinya (Daniel & Ishai, 2006)

Di mana makna dari angka dan simbol dijabarkan sebagai berikut:

Angka <i>subscript</i> =	banyaknya lamina atau <i>laminates</i>
s =	penyusunan simetris
T =	banyaknya jumlah lamina
⁻ (overbar) =	lamina tersebut berada di tengah dan simetris

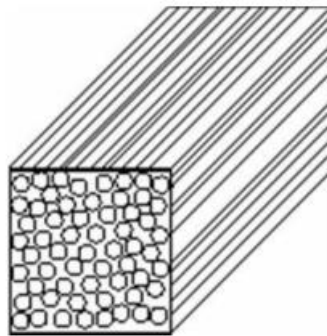
Makna dari huruf kapital seperti K, C, dan G mengartikan *Kevlar*, *Karbon*, dan *Glass Fiber*.

d) Komposit Serat (*Fiber Composite*)

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

- *Continuous fiber composite*

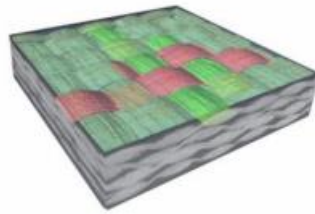
Tipe ini mempunyai susunan serat panjang dan lurus, membentuk lamina diantara matriksnya. Tipe ini mempunyai kelemahan pemisahan antar lapisan. Contoh *continuous fiber composite* dapat dilihat pada Gambar 2.10 di bawah ini.



Gambar 2.10 *Continuous fiber composite* (Gibson, 1994)

- *Woven fiber composite* (bi-directional)

Komposit ini tidak mudah dipengaruhi pemisahan antar lapisan karena susunan seratnya mengikat antar lapisan. Susunan serat memanjang yang tidak begitu lurus mengakibatkan kekuatan dan kekakuan melemah. Contoh *woven fiber composite* dapat dilihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 *Woven fiber composite* (Gibson, 1994)

- *Discontinuous fiber composite*

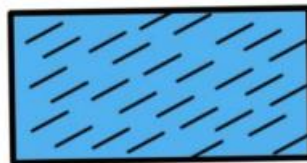
Discontinuous fiber composite adalah tipe komposit dengan serat pendek. Tipe ini dibedakan menjadi 3, yaitu:

- *Aligned discontinuous fiber*



Gambar 2.12 *Aligned discontinuous fiber* (Gibson, 1994)

- *Off-axis aligned discontinuous fiber*



Gambar 2.13 *Off-axis discontinuous fiber* (Gibson, 1994)

- *Randomly oriented discontinuous fiber*



Gambar 2.14 *Randomly oriented discontinuous fiber* (Gibson, 1994)

- *Hybrid fiber composite*

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



Gambar 2.15 *Hybrid fiber composite* (Gibson, 1994)

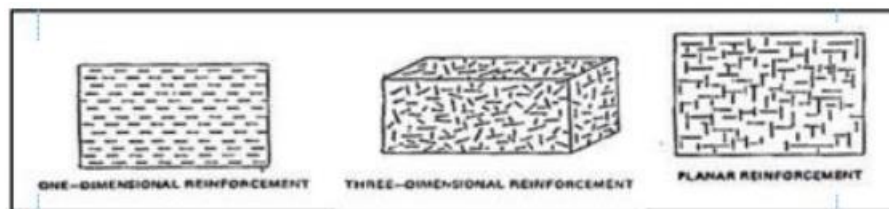
2. Faktor yang Mempengaruhi Sifat-Sifat Mekanik Komposit

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

- a) Faktor Serat
 - Letak Serat

Ada 3 jenis orientasi letak serat, yaitu:

- *One dimensional reinforcement*, mempunyai kekuatan pada arah *axis* serat.
- *Two-dimensional reinforcement* (planar), mempunyai kekuatan pada dua arah atau masing-masing arah orientasi serat.
- *Three-dimensional reinforcement*, mempunyai sifat isotropic, kekuatannya lebih tinggi dibanding dengan dua tipe sebelumnya.



Gambar 2.16 Orientasi letak serat (Schwartz, 1984)

- Panjang Serat

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

- Bentuk Serat

Bentuk serat tidak mempengaruhi, yang mempengaruhi adalah diameter seratnya. Semakin kecil diameter serat, maka akan menghasilkan kekuatan komposit yang tinggi.

- b) Faktor Matriks

Matriks sangat berpengaruh dalam performa komposit. Tergantung dari matriks jenis apa yang dipakainya, dan untuk tujuan apa dalam pemakaian matriks tersebut.

2.1.5 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 ditunjukkan 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 :

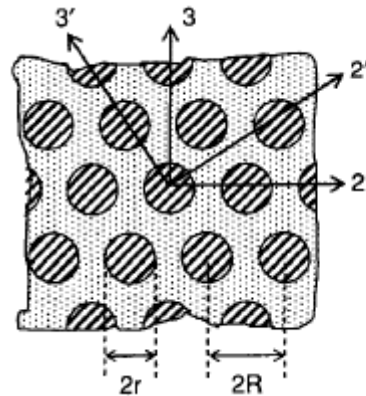
$$v_m = 1 - v_f$$

Sehingga didapatkan rumus untuk massa jenis komposit adalah :

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

1. *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}). Dimana *subscript* f dan m ditunjukkan untuk *fiber* dan matriks.



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 2.17 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. 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*.

Persamaan untuk *longitudinal tensile strength* pada komposit dibagi atas dua kondisi. Kondisi pertama adalah ketika nilai $\epsilon_m > \epsilon_f$ dan kondisi kedua adalah ketika nilai $\epsilon_m < \epsilon_f$. Rumus perhitungan dari kedua kondisi tersebut adalah sebagai berikut : (M. Kumar, 2017)

Untuk nilai $\epsilon_m > \epsilon_f$

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

Untuk nilai $\epsilon_m < \epsilon_f$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2.1.6 Fraksi Volume

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

$$m_c = m_m + m_r$$

Di mana m = massa, kg (lb); dan subskrip c, m, dan r menunjukkan komposit, matriks, dan fase penguat. Demikian pula, volume komposit adalah jumlah dari material penyusunnya:

$$V_c = V_m + V_r + V_v$$

Di mana V = volume, cm^3 (in^3). V_v adalah volume dari setiap rongga atau *voids* dalam komposit (misalnya, pori-pori). Massa jenis komposit adalah massa dibagi dengan volume.

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

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

$$m_m = \rho_m \times V_m$$

$$m_r = \rho_r \times V_r$$

Lalu persamaan tersebut dapat disubstitusikan ke persamaan (2.3), maka persamaannya menjadi:

$$\rho_c = (f_m \times \rho_m) + (f_r \times \rho_r)$$

Sehingga,

$$f_m = \frac{V_m}{V_c}$$

$$f_r = \frac{V_r}{V_c}$$

Dimana:

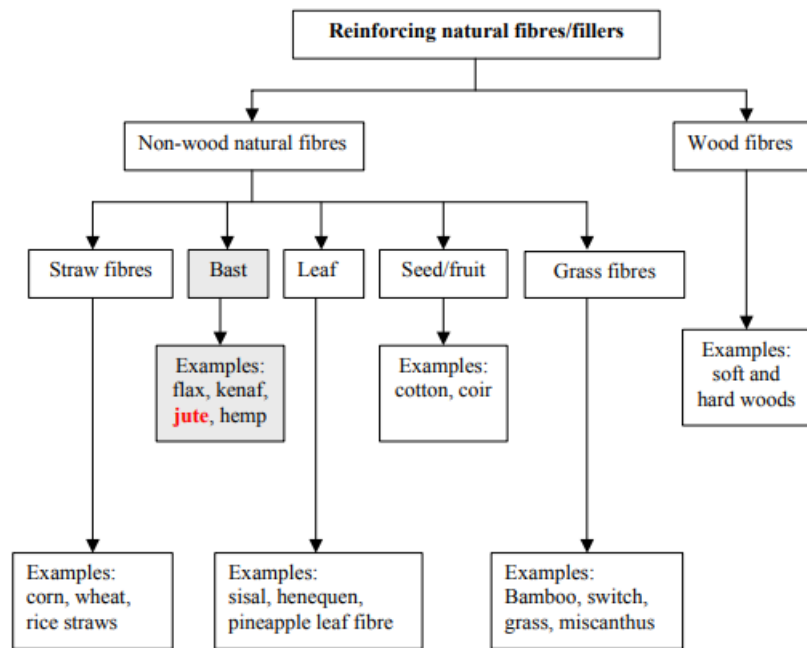
f_m : Fraksi volume matriks

f_r : Fraksi volume fase penguat

2.1.7 Serat Alam

Secara umum serat alam yang berasal dari tumbuhan dapat dikelompokkan berdasarkan bagian tumbuhan yang diambil seratnya. Berdasarkan hal tersebut pengelompokkan dibedakan menjadi 3, yaitu:

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



Gambar 2.18 Klasifikasi Jenis Serat Alam (Loan, 2006)

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

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

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

Tabel 2.7 Komparasi sifat mekanik dari serat Alam (Loan, 2006)

<i>Fibre</i>	<i>Density</i> (g/cm ³)	<i>Tensile Strength</i> (MPa)	<i>Young's Modulus</i> (GPa)	<i>Elongation At Break</i> (%)	<i>Specific Tensile Strength</i> (MPa/g.cm ⁻³)	<i>Specific Young's Modulus</i> (GPa/g.cm ⁻³)
Jute	1,3-1,45	393-773	13-26,5	1,16-1,5	286-562	9-19
Flax	1,5	345-1100	27,6	2,7-3,2	230-773	18
Ramie	1,5	400-938	61,4-128	1,2-3,8	267-625	41-85
Sisal	1,45	468-640	9,4-22,0	3-7	323-441	6-15
Coir	1,15	131-175	4-6	15-40	114-152	3-5

1. Serat Kenaf

Serat kenaf adalah serat yang didapat dari kulit batang tanaman kenaf atau biasa juga disebut yute jawa. Kenaf memiliki nama latin *Hibiscus Malvaceae*, ciri utama dari tanaman

kenaf adalah memiliki tinggi sekitar tiga meter dengan daun berwarna hijau dan memiliki batang berduri. Kenaf memiliki ketahanan yang baik terhadap serangga sehingga penggunaan pestisida tidak dibutuhkan untuk pembudidayaan tanaman kenaf. Tanaman kenaf juga memiliki toleransi yang tinggi terhadap air maupun dengan kekeringan.



Gambar 2.19 Tanaman Kenaf (*Hibiscus sabdariffa*)
(Sumber: balittas.litbang.pertanian.go.id)

Keberadaan tanaman kenaf di Indonesia sangatlah melimpah dikarenakan tanaman kenaf dapat tumbuh dengan baik dan sesuai dengan iklim di Indonesia. Budidaya tanaman kenaf di Indonesia tersebar di Pulau Sumatera, Pulau Jawa hingga Pulau Kalimantan. Budidaya kenaf dilakukan dikarenakan tanaman kenaf ini memiliki manfaat hampir seluruh bagiannya terutama dapat dijadikan bahan baku untuk industri. Kayu pada tanaman kenaf memiliki karakteristik yang sangat baik untuk dijadikan furnitur seperti pintu, jendela dan lainnya. Lalu bagian lainnya dari tanaman kenaf yang dimanfaatkan adalah serat dari tanaman kenaf.

Serat dari kenaf didapatkan dari batang kenaf itu sendiri dengan cara menguliti batang dari tanaman kenaf. Serat dari kenaf memiliki karakteristik yang baik untuk dijadikan sebagai serat komposit natural atau *natural composite* dikarenakan karakteristik dari kenaf itu sendiri. Serat pada kenaf tergolong dalam dua golongan yaitu kenaf serat panjang dan kenaf serat pendek. Perbedaan kedua golongan kenaf ada pada panjang seratnya dimana kenaf serat panjang memiliki ukuran sebesar 10-30 mm sedangkan kenaf serat pendek memiliki ukuran sebesar memiliki ukuran sebesar 1-6 mm. Sifat mekanik yang dimiliki kedua golongan serat kenaf tentunya memiliki perbedaan dan kenaf serat panjang memiliki sifat mekanik yang lebih baik jika dibandingkan dengan kenaf serat pendek. Sifat mekanik yang dimiliki kenaf dapat dilihat pada tabel berikut ini. Serat kenaf berwarna krem sampai putih perak. Diameter serat kenaf ini adalah sekitar 75 hingga 125 μm . (Ibrahim et al., 2018)



Gambar 2.20 Serat Kenaf (Fajrin et al., 2022)

Tabel 2.8 Properties Serat Kenaf

Properties		Referensi
<i>Density</i> (g/cm ³)	1,5	(Mariselvam & Logesh, 2015)
<i>Tensile Strength</i> (MPa)	89,58	(Ibrahim et al., 2018)
<i>Young Modulus</i> (GPa)	7,67	(Ibrahim et al., 2018)
<i>Poisson's Ratio</i>	0,324	(Mariselvam & Logesh, 2015)
<i>Shear Modulus</i> (GPa)	2,8965	ANSYS

2.1.8 Epoksi

Resin epoksi atau secara umum di pasaran dikenal dengan bahan epoksi adalah salah satu dari jenis polimer yang berasal dari kelompok termoset. Resin termoset adalah polimer cair yang diubah menjadi bahan padat secara polimerisasi jaringan silang dan juga secara kimia, membentuk formasi rantai polimer tiga dimensi. Sifat mekaniknya tergantung pada unit molekuler yang membentuk jaringan rapat dan panjang jaringan silang. Resin epoksi banyak digunakan untuk bahan komposit di beberapa bagian struktural, resin ini juga digunakan sebagai bahan campuran pembuatan kemasan, bahan cetakan dan perekat (Van Gemert et al., 2005).

Tabel 2.9 Properties Epoksi

Properties		Referensi
Density (kg/m ³)	1160	ANSYS
Tensile Yield Strength (MPa)	54,6	ANSYS
Modulus Young (MPa)	3780	ANSYS
Poisson's Ratio	0,35	ANSYS
Compressive Strength (MPa)	53	(Randjbaran et al., 2013)

2.1.9 Failure Theory

Untuk mengetahui kegagalan dalam sebuah material desain, terdapat beberapa pendekatan yang dapat digunakan dalam teori kegagalan dari sebuah material. Dimana tentunya

kegagalan dari material ini tidak sepenuhnya benar tetapi dapat mendekatinya. Pada sub-bab ini akan dijelaskan mengenai teori kegagalan yang akan dipakai pada penelitian ini.

1. Von-Mises Criterion

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

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

Hal ini akan terjadi kegagalan jika

$$\sigma' \geq S_y$$

2. Tsai-Wu Failure Criterion

Failure untuk laminasi *orthotropic* dapat di tentukan dengan menggunakan berbagai macam teori kegagalan yang dimiliki untuk menentukan kegagalan material *orthotropic*. Terdapat berbagai macam, salah satu contohnya adalah Tsai-Wu *Failure Criteria*. 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 dan sangat mudah dibaca untuk prosedur komputasi. Dimana untuk teori Tsai-Wu dapat di tentukan nilai faktor kegagalannya melalui rumus:

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

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

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

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

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

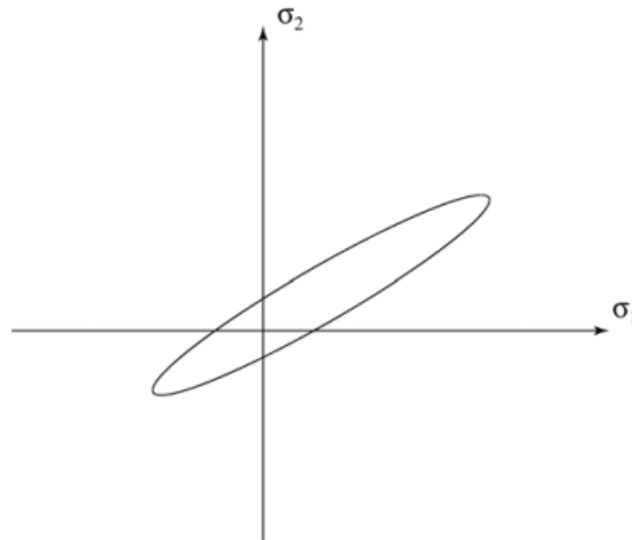
$$F_{66} = \frac{1}{(\tau_{12}^F)^2}$$

$$F_{12} \approx -\frac{1}{2}\sqrt{F_{11}F_{22}}$$

Dimana:

- σ_1^T : tensile strength in longitudinal direction
- σ_1^C : compressive strength in longitudinal direction
- σ_2^T : tensile strength in transverse direction
- σ_2^C : compressive strength in transverse direction
- τ_{12}^F : shear strength in the 1-2 plane

Kelebihan dari teori kegagalan ini adalah adanya hubungan antara komponen tegangan yang terjadi dan teori ini tidak membedakan antara gaya tarik dan gaya tekan. Pemetaan kegagalan dari teori ini secara umum ditunjukkan pada Gambar 2.21.

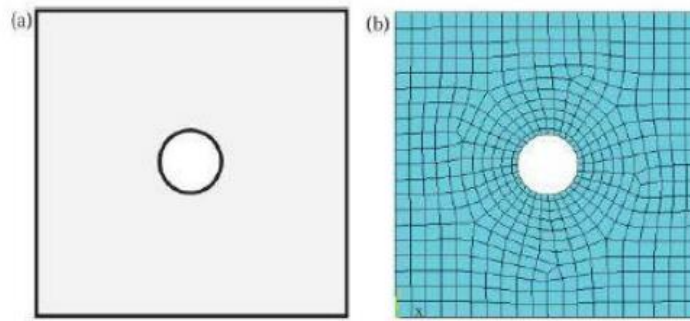


Gambar 2.21 Pemetaan dari Teori Kegagalan Tsai-Wu (Voyiadjis & Kattan, 2005)

2.1.10 Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga atau *finite element method* merupakan salah satu metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan dalam *engineering*. Macam – macam permasalahan yang dapat diselesaikan dengan metode ini antara lain seperti analisis struktur, perpindahan panas dan massa, aliran fluida dan potensial elektromagnetik. Metode elemen hingga baik dalam menyelesaikan masalah yang mencakup geometri yang rumit dengan pembebanan dan sifat mekanis material yang sulit diselesaikan dengan metode matematika analitis. Penyelesaian dengan metode matematika analitis akan membutuhkan persamaan diferensial yang lebih terperinci pada setiap detail geometri. Metode matematika analitis akan lebih menguras pikiran dan waktu yang lebih lama dalam melakukan analisis terhadap suatu geometri khusus yang rumit. Begitu juga pada penyelesaian masalah dengan metode eksperimental. Pada geometri yang besar akan banyak menghabiskan biaya dan waktu dalam menganalisis suatu tinjauan. Maka dari itu, digunakan metode elemen hingga sebagai pendekatan penyelesaian masalah *engineering* yang dapat dipertanggung-jawabkan kehandalan dan keakuratannya untuk menghemat biaya dan waktu dalam proses analisis. (Liu & Chen, 2014)

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



Gambar 2.22 (a) Plat dengan sebuah lubang (model CAD) dan (b) diskritisasi metode elemen hingga(Liu & Chen, 2014)

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

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

1. *Preprocessing*

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

2. *Solution*

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

3. *Post Processing*

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

2.1.11 Safety factor

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

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

Dimana:

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

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

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

Faktor kemandan lebih besar dari 1,0 menunjukkan bahwa laminasi aman dari kegagalan. Faktor keamanan pada prostetik akan aman jika faktor keamanannya sama dengan atau lebih tinggi dari 1,25 (Tahir & Kadhim, 2021)

2.2 Penelitian Terdahulu

Dalam penelitian ini, penulis mengambil beberapa referensi dari penelitian sebelumnya yang masih berhubungan dengan penelitian yang dilakukan saat ini.

1. “*Studying the Tensile and Buckling for PMMA Reinforced by Jute Fibers for Prosthetic Pylon*” (Jumaah & Oleiwi, 2016)

Pada tahun 2016 telah dilakukan penelitian oleh Khadhim dkk. yang berjudul “*Studying the Tensile and Buckling for PMMA Reinforced by Jute Fibers for Prosthetic Pylon*” bertujuan untuk mempelajari pengaruh jumlah lapisan serat jute pada sifat kekuatan tarik dan kekuatan tegangan tekuk kritis. Dalam penelitian ini digunakan anyaman serat jute dengan orientasi serat yang digunakan ($\pm 45^\circ$) dan ($0^\circ/90^\circ$) dengan matriks resin PMMA (Poly methyl methacrylate). Bahan yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2.23 di bawah ini.



Gambar 2.23 Bahan yang digunakan dalam penelitian ini (a) Serat jute (b) Serat perlon (c) Resin PMMA (Jumaah & Oleiwi, 2016)

Tabel 2.10 Jenis Variasi yang digunakan

<i>Number of laminations</i>	<i>Type of Material</i>	<i>Arrangement of layers</i>
<i>Laminate 1</i>	PMMA + Jute layers + Perlon layers at (0°/90°)	4 perlon layers + 1 Jute layers + 4 perlon layers.
<i>Laminate 2</i>		4 perlon layers + 2 Jute layers + 4 perlon layers.
<i>Laminate 3</i>		4 perlon layers + 3 Jute layers + 4 perlon layers.
<i>Laminate 4</i>	PMMA + Jute layers + Perlon layers at (±45°)	4 perlon layers + 1 Jute layers + 4 perlon layers.
<i>Laminate 5</i>		4 perlon layers + 2 Jute layers + 4 perlon layers.
<i>Laminate 6</i>		4 perlon layers + 3 Jute layers + 4 perlon layers.

Penelitian ini menggunakan standar pengujian ASTM (D-6348 tipe standar 4) untuk uji tarik pada mesin uji tarik tipe LARYEE dengan kapasitas beban 5 kN. Dilakukan juga pengujian tarik pada spesimen tanpa penguat serat (*pure PMMA*). Pengujian dilakukan dengan *tensile test* menggunakan spesimen berbentuk *dogbone* pada Gambar 2.24 di bawah ini.



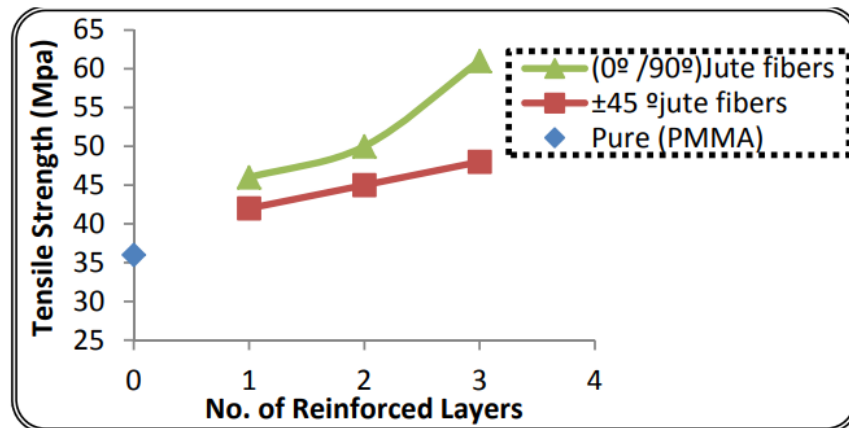
(a)



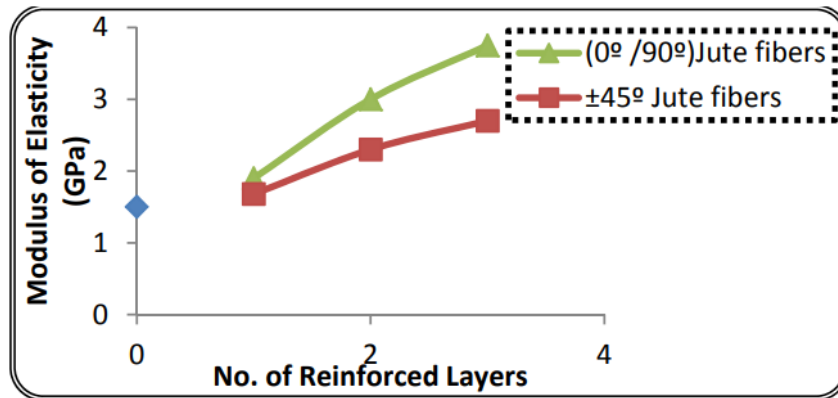
(b)

Gambar 2.24 Sampel spesimen uji tarik untuk *pylon* kaki prostetik (a) sebelum uji tarik (b) sesudah uji tarik (Jumaah & Oleiwi, 2016)

Berdasarkan hasil pengujian spesimen menyatakan kekuatan tarik dan modulus elastisitas adalah sifat mekanik yang meningkat dengan bertambahnya jumlah lapisan serat jute untuk kedua sudut ($\pm 45^\circ$ & $0^\circ/90^\circ$) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.25 dan Gambar 2.26 di bawah ini.



Gambar 2.25 Hubungan antara kekuatan tarik dengan jumlah lapisan serat (Jumaah & Oleiwi, 2016)



Gambar 2.26 Hubungan antara modulus elastisitas dengan jumlah lapisan serat (Jumaah & Oleiwi, 2016)

Berdasarkan hasil pengujian kekuatan tarik dan modulus elastisitas untuk spesimen komposit dengan arah sudut serat rami ($0^\circ/90^\circ$) lebih kuat dibandingkan dengan arah sudut ($\pm 45^\circ$) terhadap beban tarik.

2. Characteristics of Continuous Unidirectional Kenaf Fiber Reinforced Epoxy Composite (Mahjoub et al., 2014)

Pada tahun 2014 telah dilakukan penelitian oleh Reza Mahjoub dkk yang berjudul “*Characteristics of Continuous Unidirectional Kenaf Fiber Reinforced Epoxy Composite*” bertujuan untuk menyelidiki sifat-sifat mekanik dari komposit epoksi yang diperkuat dengan serat kenaf. Pada penelitian ini dilakukan pengujian tarik dengan standarisasi ASTM D3039-08. Serat kenaf yang diuji memiliki konfigurasi serat dengan jenis *Unidirectional*.



Gambar 2.27 Spesimen Komposit Kenaf-Epoksi

Pada penelitian ini, variasi yang digunakan adalah variasi fraksi volume serat kenaf dengan matriks *epoxy* resin dengan rentan fraksi volume 10%, 30% dan 40%. Dimensi dari spesimen adalah 270 x 25 x 6 mm.

Composite series	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Elongation at break (%)	Poisson's ratio
Epoxy	22.2	2.131	1.042	0.39
KFRP-10	58	6.8	0.86	0.39
KFRP-30	124	14.4	0.86	0.37
KFRP-40	164	18.15	0.9	0.32

Gambar 2.28 Hasil Tensile Strength (Mahjoub et al., 2014)

Berdasarkan hasil yang didapatkan dari pengujian, nilai tensile strength kenaf-*epoxy* resin memiliki titik maksimum pada fraksi volume 40% dengan nilai 164 MPa. Fraksi volume serat 40% terhadap matriks akan menjadi fraksi volume serat yang akan digunakan pada penelitian simulasi *pylon* kaki palsu ini.

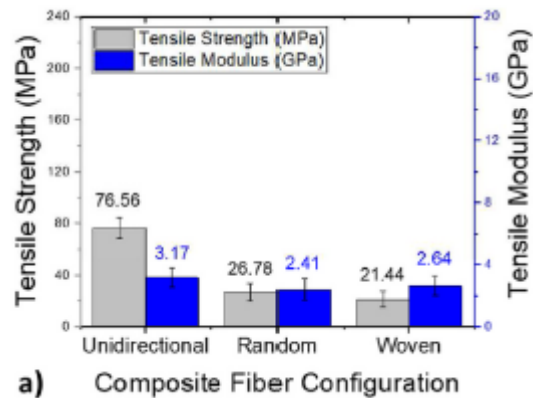
3. Utilization of kenaf fiber waste as reinforced polymer composites (Fajrin et al., 2022)

Pada tahun 2022 telah dilakukan penelitian oleh Fajrin dkk. yang berjudul “*Utilization of kenaf fiber waste as reinforced polymer composites*” yang tentang analisa yang dilakukan terhadap eksperimen serat yang diambil dari tanaman kenaf. Serat kenaf didapatkan dengan cara dicuci dengan air hangat dan dikeringkan pada suhu ruangan selama 12 jam. Lalu serat kenaf yang sudah disiapkan akan diberikan perlakuan NaOH dengan tujuan untuk menghilangkan zat hemiselulosa dan lignin yang dimana dapat mengurangi kemampuan untuk mengikat dengan matriks. Perlakuan alkali NaOH juga meningkatkan kekasaran permukaan serat yang mengarah pada ekstensi ikatan hidrogen yang lebih tinggi dalam antarmuka matriks serat.

Penelitian dilakukan dengan melakukan variasi konfigurasi yaitu konfigurasi *Unidirectional*, *Random* dan *Woven*. Pada penelitian ini dilakukan pengujian material dengan uji tarik untuk mengetahui aspek kekuatan tarik dari serat Kenaf yaitu *tensile test* dengan ASTM D3039 untuk mengetahui hasil kekuatan tarik.



Gambar 2.29 Pengujian Tarik (Fajrin et al., 2022)

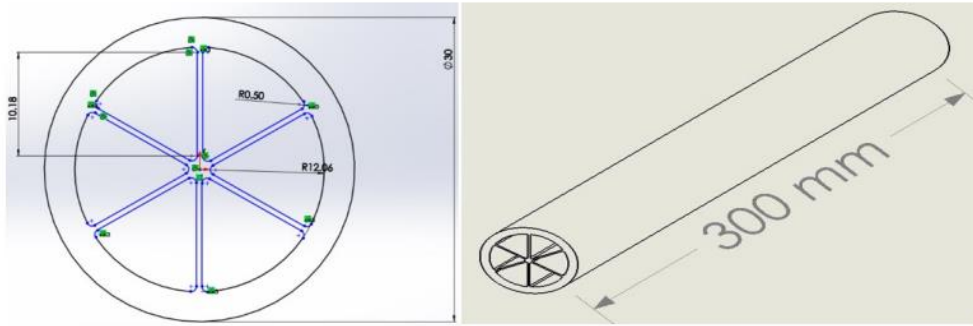


Gambar 2.30 Hasil Pengujian Tarik (Fajrin et al., 2022)

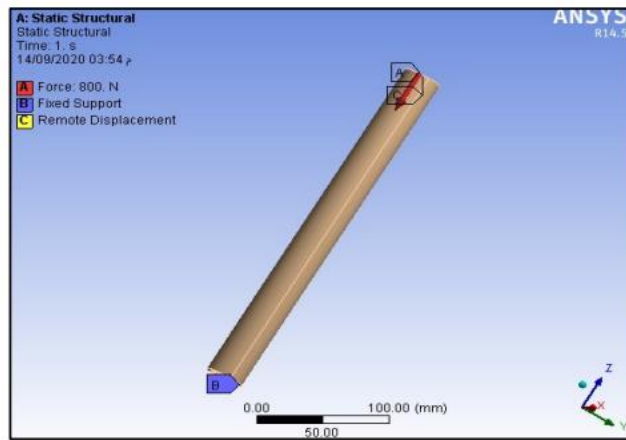
Berdasarkan hasil pengujian tarik yang telah dilakukan nilai kekuatan tarik dari ketiga variasi yang dilakukan terdapat perbedaan. Konfigurasi serat *Unidirectional* adalah 76, 56 MPa, sedangkan komposit dengan konfigurasi serat *Random* dan *Woven* memiliki kekuatan tarik 26,78 MPa dan 21, 44 MPa. Hasil modulus tarik dari pengujian tarik, spesimen konfigurasi *Unidirectional* menghasilkan komposit kekakuan yang lebih tinggi dengan modulus tarik rata-rata 3,18 GPa. Nilai ini sekitar 23,89% lebih tinggi dari modulus komposit konfigurasi serat *Random* dan 16,98% lebih tinggi dari modulus komposit konfigurasi serat *Woven*. Ini berarti bahwa modulus tarik konfigurasi serat *Random* dan *Woven* yang diperkuat serat masing-masing hanya 76,10% dan 83,02%, dibandingkan dengan konfigurasi serat *Unidirectional*.

4. Design and Manufacturing of New Low (Weight and Cost) 3D Printed Pylon Prosthesis for Amputee (Tahir & Kadhim, 2021)

Pada tahun 2021 telah dilakukan penelitian oleh Tahir & Kadhim yang berjudul “*Design and Manufacturing of New Low (Weight and Cost) 3D Printed Pylon Prosthesis for Amputee*” yang desain geometri *pylon* akan digunakan pada penelitian ini. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang dan menganalisa kekuatan *pylon* kaki prostetik dari bahan serat karbon PLA dengan kemampuannya untuk menahan beban pasien tanpa kegagalan mekanis. Dalam penelitian ini, pemodelan *pylon* di *software* solidwork dengan dimensi diameter luar 30 mm dan panjang 300 mm seperti Gambar 2.31. Setelah geometri model *pylon* dibuat, lalu dianalisis menggunakan metode elemen hingga pada *software* ANSYS dengan kondisi batas yang diterapkan sesuai Gambar 2.32 untuk mengevaluasi *von-mises stress*, *deformation*, dan *safety factor*.

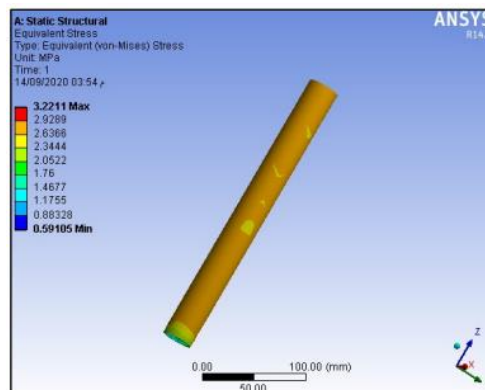


Gambar 2.31 Model geometri *pylon* yang dirancang (Tahir & Kadhim, 2021)

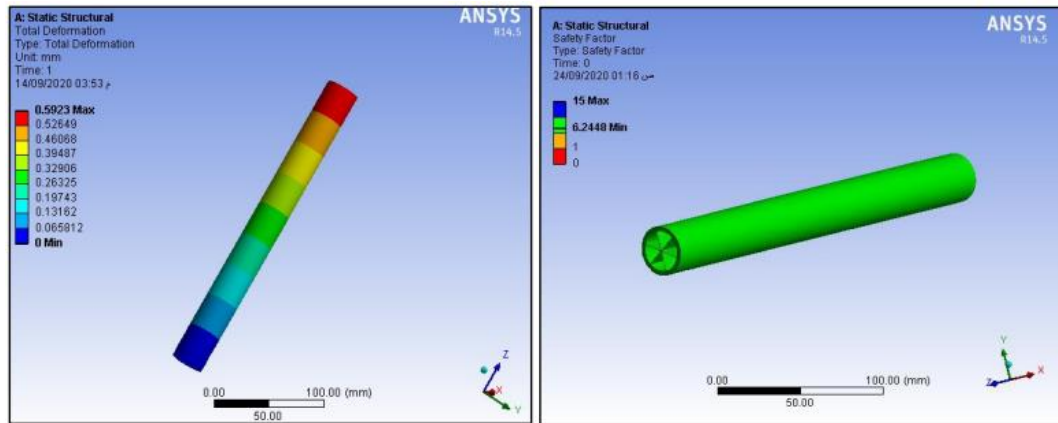


Gambar 2.32 Kondisi batas yang diterapkan pada *pylon* (Tahir & Kadhim, 2021)

Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai tegangan maksimum yang dihasilkan pada *pylon* adalah sebesar 3,22 MPa, tegangan yang terjadi tidak melebihi dari *yield stress* material yang sebesar 33,5 MPa. Deformasi maksimal yang terjadi sebesar 0,5923 mm, nilai deformasi ini baik dan cocok untuk *pylon* prostetik. Lalu nilai *safety factor pylon* sebesar 6,24 yang diartikan bahwa *pylon* tersebut aman karena lebih dari 1,25 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.33. Nilai faktor keamanan akan aman dalam desain jika faktor keamanan $\geq 1,25$.



(a)



(b)

(c)

Gambar 2.33 Hasil analisa (a) von-mises *stress* (b) deformasi (c) *safety factor* (Tahir & Kadhim, 2021)

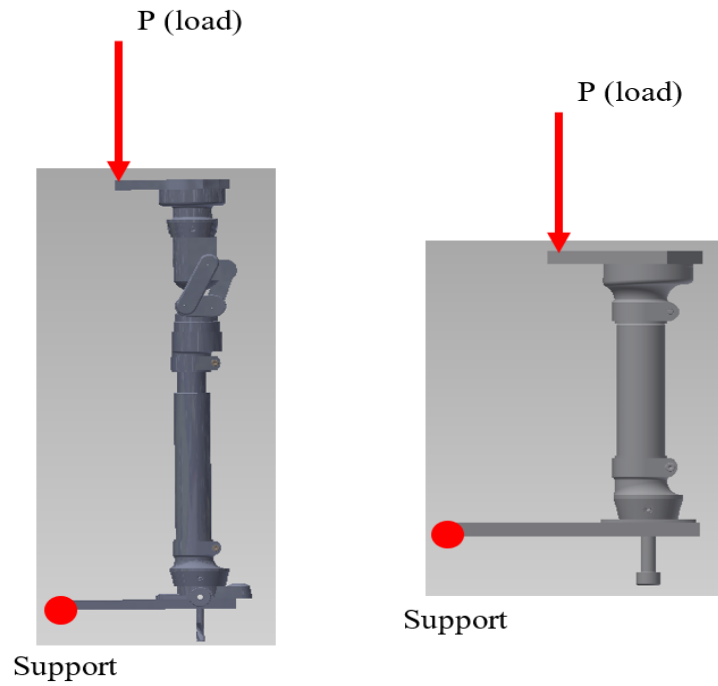
Selain menganalisa kekuatan *pylon* kaki prostetik, pada penelitian ini juga dilakukan perbandingan *pylon* serat karbon PLA dengan *pylon* jenis lain dengan standar panjang 300 mm, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.11. dapat dilihat bahwa *pylon* serat karbon PLA lebih ringan dan lebih murah daripada *pylon* standar.

Tabel 2.11 Perbandingan *Pylon* Serat Karbon PLA dengan tipe lainnya (Tahir & Kadhim, 2021)

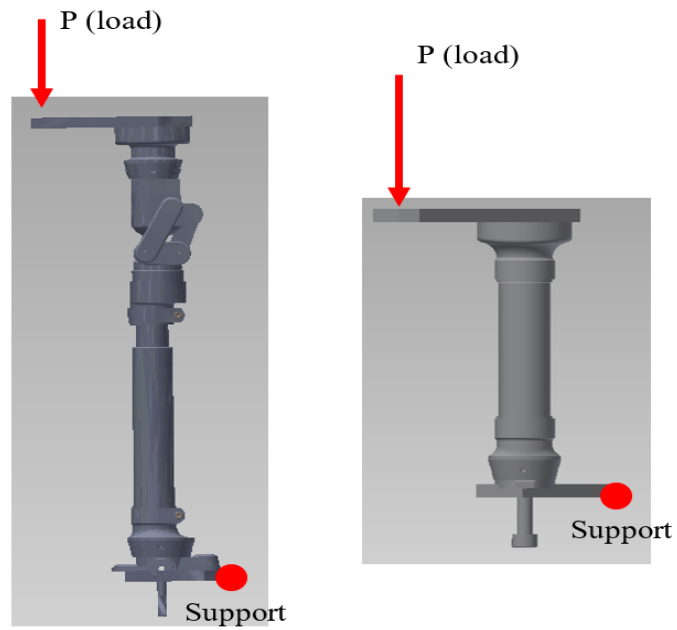
<i>Pylon</i> Type	Weight (kg)	Cost (\$)
Stainless steel	0,25	120
Titanium	0,173	166
Aluminium	0,2	95
PLA Carbon Fiber	0,1	3

5. Studi Numerik pada Kaki Palsu Transtibial dan Transfemoral Berbahan Baku Aluminium (Kadarisman, 2021)

Pada tahun 2021 telah dilakukan penelitian oleh Muhammad Kadarisman yang berjudul “*Studi Numerik pada Kaki Palsu Transtibial dan Transfemoral Berbahan Baku Aluminium*” yang skema simulasinya akan digunakan pada penelitian ini. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisa desain kaki palsu dengan bahan aluminium 6061 dan aluminium 7075 apakah memenuhi standar kekuatan yang ditetapkan WHO. Kondisi batas pembebanan pada kaki prostetik transtibial dan transfemoral mengikuti standar ISO. Untuk kondisi batas pada *condition 1* dan *condition 2* pada Gambar 2.34 di bawah ini.



(a)



(b)

Gambar 2.34 Kondisi Batas Pada Kaki Palsu Transfemoral dan Transtibial (a) *Condition 1*
(b) *Condition 2*

6. Numerical Optimum Design of a Prosthetic Shank Made of Different Composite Materials and Cross-Sections Areas for an AK Amputee (Noori Kareem & Habeeb Faidh-Allah, 2021)

Pada tahun 2021 telah dilakukan oleh Noori Kareem dkk yang berjudul “*Numerical Optimum Design of a Prosthetic Shank Made of Different Composite Materials and Cross-Sections Areas for an AK Amputee*” bertujuan untuk mengidentifikasi kombinasi tipe bentuk *pylon* untuk mendapatkan hasil tegangan von-mises dan deformasi. Dalam penelitian ini digunakan anyaman *perlon fiber* dengan orientasi serat yang digunakan ($0^{\circ}/90^{\circ}$) dengan resin polyester. Data material yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 2.12 di bawah ini.

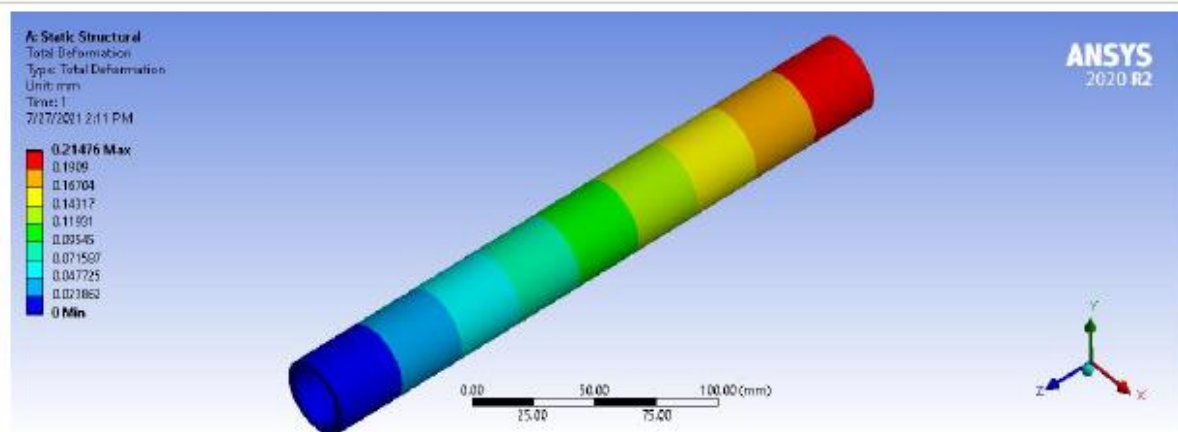
Tabel 2.12 Jenis Komposit Spesimen

Sample Type	Type Material	Angle of Fiber	Properties Orhotropic Elasticity					
			$E_1=E_2$ (GPa)	E_3 (GPa)	ν_{12}	$\nu_{23}=\nu_{13}$	G_{12} (GPa)	$G_{23}=G_{13}$ (GPa)
<i>Pylon Circle</i>	<i>Perlon Fiber + Polyester</i>	($0^{\circ}/90^{\circ}$)	5,1931	3,8708	0,398	0,3	1,5759	1,2732
<i>Pylon Ellipse</i>	<i>Perlon Fiber + Polyester</i>	($0^{\circ}/90^{\circ}$)	5,1931	3,8708	0,398	0,3	1,5759	1,2732
<i>Pylon Hexagonal</i>	<i>Perlon Fiber + Polyester</i>	($0^{\circ}/90^{\circ}$)	5,1931	3,8708	0,398	0,3	1,5759	1,2732

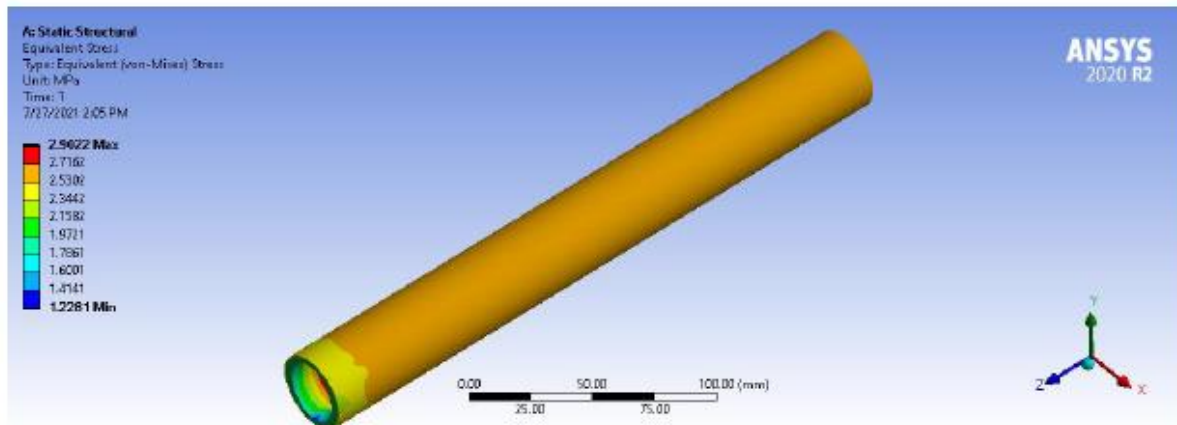
Tabel 2.13 Data Analisis *Pylon*

Type <i>Pylon</i>	Force (N)	Total Deformasi (mm)	Equivalent Stress (MPa)
<i>Circle</i>	1042	0,21655	2,9208
<i>Ellipse</i>		0,21476	2,9022
<i>Hexagonal</i>		0,21778	2,9991

Dari tabel data analisis *pylon* diberi beban 1042 N didapatkan *pylon* dengan tipe *circle* didapatkan hasil total deformasi sebesar 0,21655 mm dan von-mises stress sebesar 2,9208 MPa, *pylon* dengan tipe *ellipse* didapatkan hasil total deformasi sebesar 0,21476 dan von-mises stress sebesar 2,9022 mm, *pylon* dengan tipe *hexagonal* didapatkan hasil total deformasi sebesar 0,21778 dan von-mises stress sebesar 2,9991 mm. Model *pylon* dianalisis menggunakan metode elemen hingga pada software ANSYS, hasil simulasi pada *pylon ellipse* diberi beban tekan sebesar 1042 N didapatkan hasil total deformasi maksimum dan hasil tegangan von-mises pada Gambar 2.35 dibawah ini.



(a)



(b)

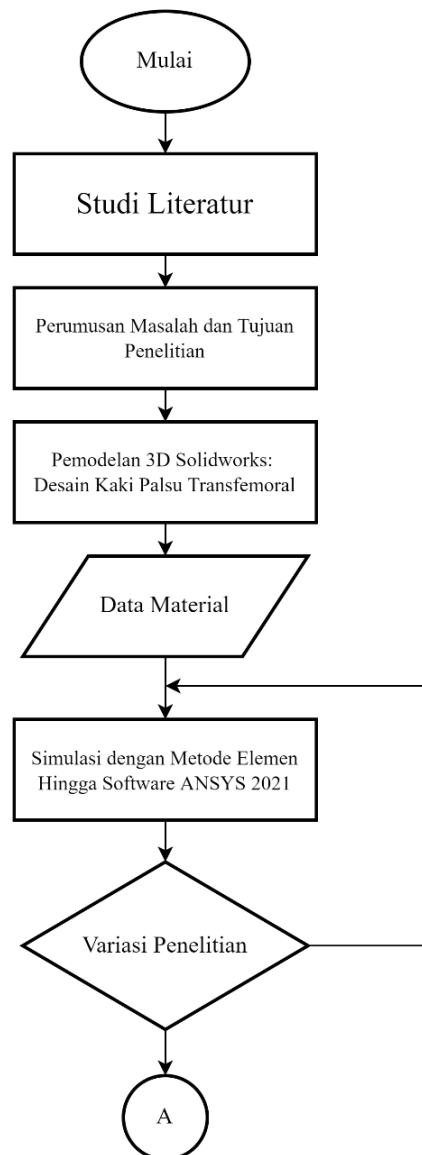
Gambar 2.35 Hasil analisa *pylon ellipse* (a) deformasi (b) von-mises stress

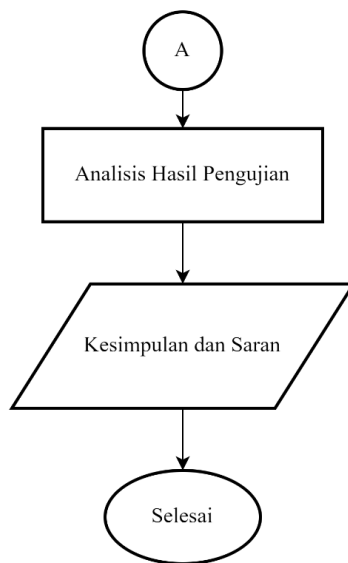
BAB III METODOLOGI

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi orientasi sudut serat kenaf dan ketebalan komposit terhadap kekuatan *pylon* kaki prostetik. Penulis akan melakukan penelitian ini melalui beberapa tahapan. Pada tahap pertama dilakukan studi literatur, kemudian mengumpulkan data yang dibutuhkan untuk penelitian *pylon* pada kaki prostetik, dari dimensi, material dan standar pengujian. Langkah selanjutnya adalah membuat Pemodelan 3D komponen kaki palsu transfemoral dan *pylon* kaki prostetik. Langkah selanjutnya simulasi menggunakan ANSYS *Workbench* untuk mendapatkan tegangan von-mises dan faktor keamanan dari bagian komponen *pylon*.

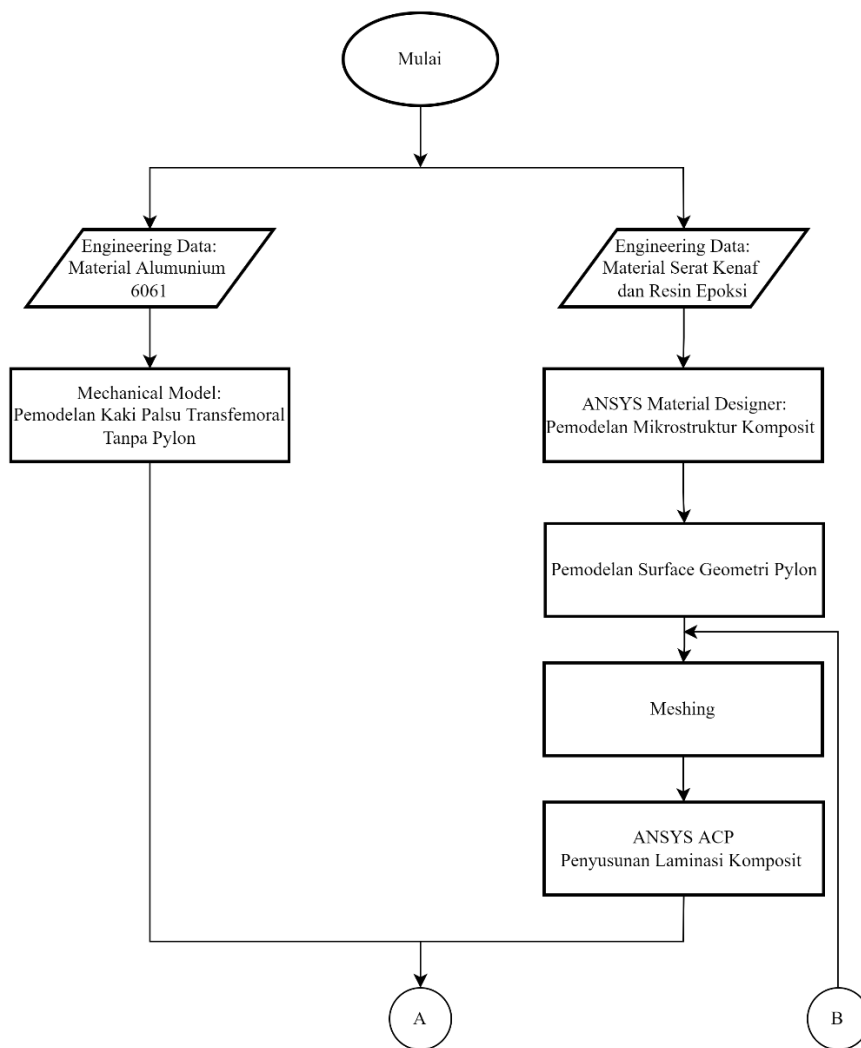
3.1 Diagram Alir Penelitian

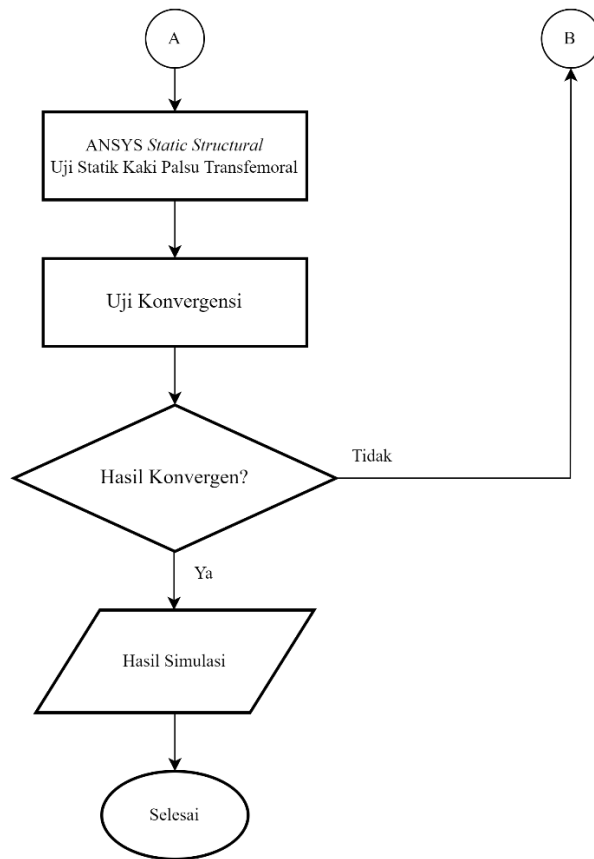
Dalam melakukan penelitian ini, diperlukan langkah-langkah sebagai berikut sesuai Gambar 3.1 yaitu Diagram Alir Penelitian pada Gambar 3.1 dibawah ini:



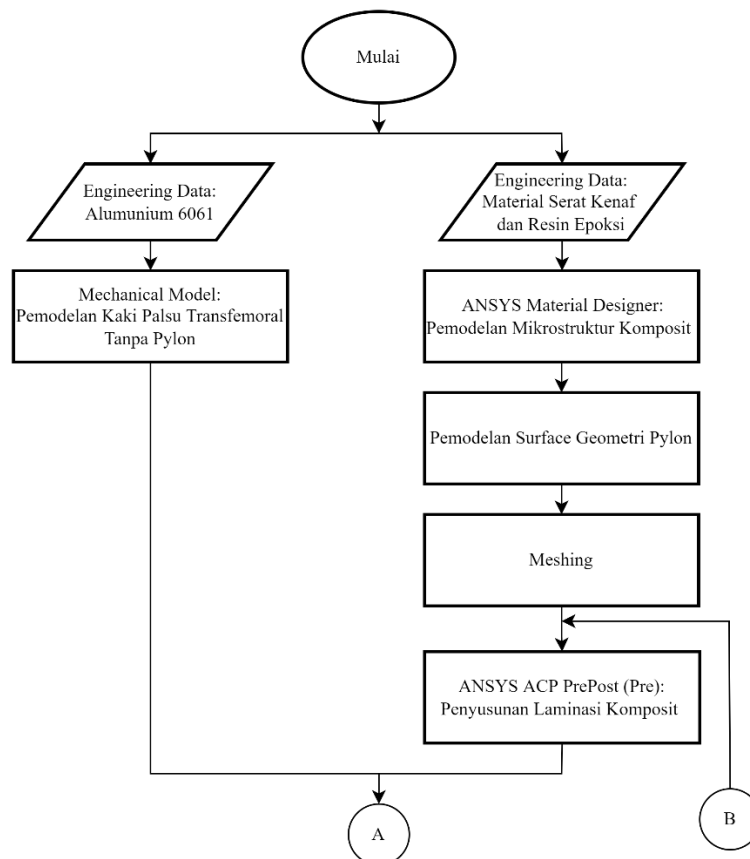


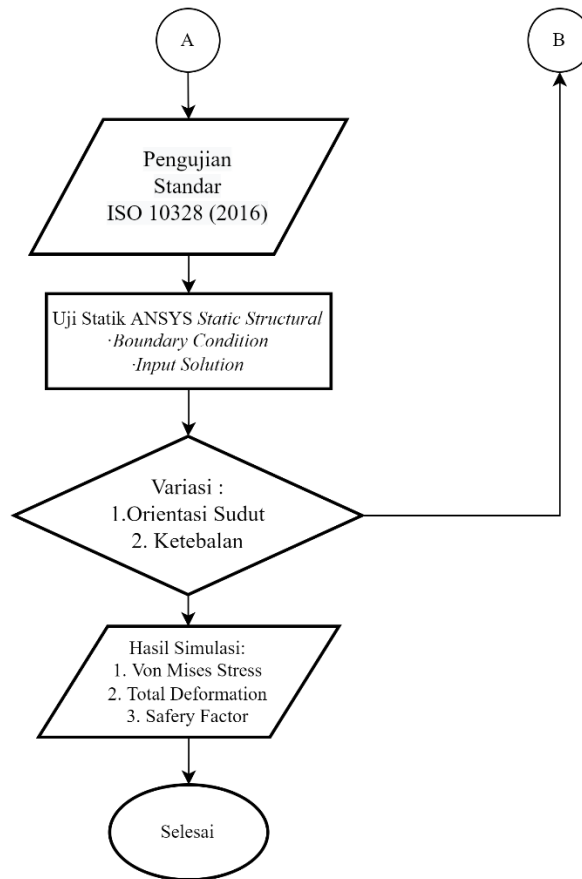
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian





Gambar 3.2 Diagram Alir Simulasi





Gambar 3.3 Diagram Alir Simulasi Pengujian Kaki Palsu Transfemoral

3.2 Studi Literatur

Pada penelitian ini, studi literatur dilakukan untuk mendapatkan data-data yang diperlukan untuk menunjang terlaksananya tugas akhir ini. Studi literatur dilakukan dengan pendalaman ilmu dan materi yang diambil dari berbagai buku, jurnal ilmiah, serta laporan penelitian terdahulu yang memiliki hubungan dengan pengujian *pylon* kaki prostetik yang menggunakan material komposit alam. Buku yang digunakan adalah “*Composite Material Handbook*” (Schwartz, 1984), “*Principles of Composite Material Handbook*” (Gibson, 1994) “*Engineering Mechanics of Composite Materials*” (Ishai & Daniel, 2006) dan “*Composite Structure Design, Mechanics, Analysis, Manufacturing, and Testing*” (M. Kumar, 2017). Laporan penelitian terdahulu yang digunakan pada penelitian ini adalah “*Studying the Tensile and Buckling for PMMA Reinforced by Jute Fibers for Prosthetic Pylon*” (Shaymaa, 2016), “*Characteristics of Continuous Unidirectional Kenaf Fiber Reinforced Epoxy Composite*” (Mahjoub et al., 2014), “*Utilization of kenaf fiber waste as reinforced polymer composites*” (Fajrin et al., 2022) , “*Design and Manufacturing of New Low (Weight and Cost) 3D Printed Pylon Prosthesis for Amputee*” (Tahir & Kadhim, 2021), “*Studi Numerik pada Kaki Palsu Transtibial dan Transfemoral Berbahan Baku Alumunium*” (Kadarisman, 2021), dan “*Numerical Optimum Design of a Prosthetic Shank Made of Different Composite Materials and Cross-Sections Areas for an AK Amputee*” (Noori Kareem & Habeeb Faidh-Allah, 2021).

3.3 Perumusan Masalah dan Tujuan Penelitian

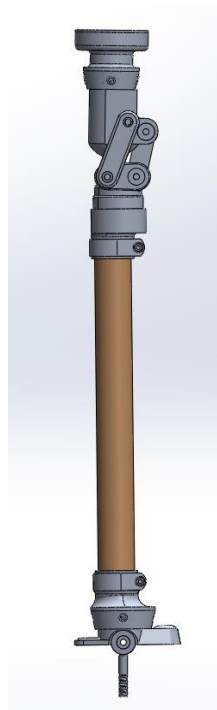
Rumusan masalah ditetapkan untuk mengidentifikasi langkah yang harus dilakukan agar mencapai tujuan dari suatu penelitian. Rumusan masalah diperoleh dari studi literatur dan lapangan yang telah dilakukan sebagaimana yang telah ditampilkan pada BAB I.

3.4 Pengumpulan Data

Pengumpulan data yang dilakukan pada penelitian ini yaitu referensi dimensi pada geometri *pylon* kaki prostetik, standar pengujian kaki palsu, data material dan variasi penelitian yang akan digunakan.

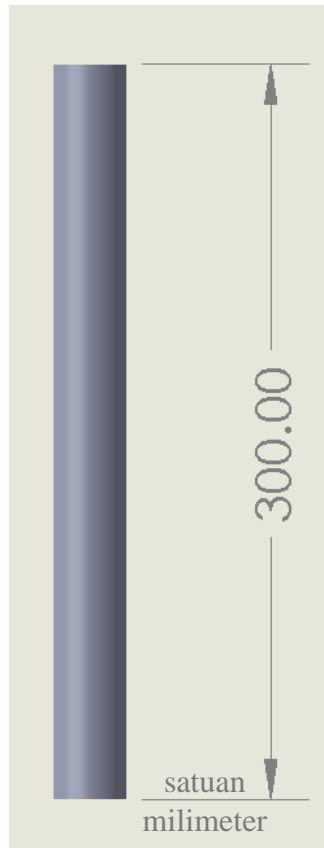
3.4.1 Model Kaki Palsu Transfemoral

Model kaki palsu transfemoral yang akan digunakan pada penelitian ini adalah model kaki palsu transfemoral *polycentric single axis ankle* berdasarkan penelitian terdahulu yang berjudul “Studi Numerik pada Kaki Palsu Transtibial dan Transfemoral Berbahan Baku Aluminium” oleh Muhammad Kadarisman pada tahun 2021. Untuk daftar komponen model dapat ditemukan pada bagian (lampiran).



Gambar 3.4 Model Kaki Palsu Transfemoral *Polycentric Single Axis Ankle*

Geometri *pylon* kaki prostetik yang akan digunakan pada penelitian berdasarkan referensi dari jurnal ilmiah sesuai Gambar 3.5 yaitu geometri *pylon* kaki prostetik.



Gambar 3.5 Geometri *Pylon* Kaki Prostetik

3.4.2 Standar Pengujian

Standar pengujian yang dilakukan pada *pylon* kaki prostetik ini mengacu pada standar ISO 10328 (2016): *Prosthetics — Structural testing of lower-limb prostheses — Requirements and test methods*. Pada penelitian pembebanan yang diberikan pada kaki prostetik transfemoral adalah level terendah yaitu P3 dengan berat badan kurang dari 60 kg sampai level tertinggi yaitu P8 dengan berat badan kurang dari 175 kg. Untuk kondisi batas pada *condition 1* dan *condition 2* seperti pada Gambar 3.6 dan *condition 2* pada Gambar 3.7.



Gambar 3.6 *Boundary condition pada condition 1*



Gambar 3.7 *Boundary condition pada condition 2*

Tabel 3.1 *Static Test Procedure – Ultimate Static Test Force*

ISO 10328 (2016)		
<i>Level</i>	<i>Test loading condition</i>	<i>Ultimate Static Test Force (N)</i>
P3	I	3220
	II	2790
P4	I	4130
	II	3623
P5	I	4480
	II	4025
P6	I	4880
	II	4425
P7	I	5300
	II	4840
P8	I	5700
	II	5250

Untuk data tabel pembebanan yang digunakan dapat merujuk pada Tabel 3.1 untuk pada pembebanan terdapat beberapa level, yaitu P3, P4, P5, P6, P7, dan P8. P3 adalah level untuk berat badan kurang dari 60 kg, P4 untuk kurang dari 80 kg, P5 kurang dari 100 kg, P6 kurang dari 125 kg, P7 untuk kurang dari 150 kg, dan P8 untuk kurang dari 175 kg.

3.4.3 Data Material

Material yang akan digunakan pada penelitian ini adalah komposit alam dengan komposisi bahan penguat serat kenaf dan matriks epoksi. Data material yang digunakan pada penelitian ini berdasarkan referensi dari buku dan jurnal ilmiah sesuai Tabel 3.1 yaitu *Properties* Serat Kenaf, Tabel 3.2 yaitu *Properties* Epoksi, dan Tabel 3.3 yaitu *Properties* Aluminium 6061.

Tabel 3.2 *Properties* Serat Kenaf

<i>Properties</i>		Referensi
<i>Density</i> (g/cm ³)	1,5	(Mariselvam & Logesh, 2015)
<i>Tensile Strength</i> (MPa)	89,58	(Ibrahim et al., 2018)
<i>Young Modulus</i> (GPa)	7,67	(Ibrahim et al., 2018)
<i>Poisson's Ratio</i>	0,324	(Mariselvam & Logesh, 2015)
<i>Shear Modulus</i> (GPa)	2,8965	ANSYS

Tabel 3.3 *Properties* Resin Epoksi

<i>Properties</i>		Referensi
<i>Density</i> (kg/m ³)	1160	ANSYS
<i>Tensile Yield Strength</i> (MPa)	54,6	ANSYS

Properties		Referensi
Young Modulus (MPa)	3780	ANSYS
Poisson's Ratio	0,35	ANSYS
Compressive Strength (MPa)	53	(Randjbaran et al., 2013)

Tabel 3.4 Properties Alumunium 6061 (*ASM Aerospace Specification Metals Inc.*)

Properties	
Density (kg/m ³)	2700
Ultimate Tensile Strength (MPa)	310
Tensile Yield Strength (MPa)	276
Modulus of Elasticity (GPa)	68,9
Poisson's Ratio	0,33
Shear Modulus (GPa)	26
Shear Strength (MPa)	207

3.4.4 Variasi Penelitian

Variasi penelitian yang akan dilakukan pada penelitian ini yaitu variasi orientasi sudut dan variasi ketebalan. Variasi tersebut akan dijelaskan pada subbab berikutnya.

3.4.4.1 Variasi Orientasi Sudut

Berdasarkan penelitian terdahulu, orientasi sudut yang digunakan adalah ($\pm 45^\circ$) dan ($0^\circ/90^\circ$) sehingga pada penelitian ini sudut orientasi yang akan disusun adalah ($0^\circ/0^\circ$), ($90^\circ/90^\circ$), ($0^\circ/90^\circ$), ($45^\circ/-45^\circ$) Sehingga, penyusunan orientasi sudut serat dapat dilihat pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Penyusunan Orientasi Sudut Serat

Penyusunan Orientasi Sudut Serat			
Material	Arah Sudut Serat	Ketebalan	Jenis
Serat Kenaf/ Resin Epoksi	($0^\circ/0^\circ$) ₃	0.5mm	<i>unidirectional</i>
	($90^\circ/90^\circ$) ₃		
	($0^\circ/90^\circ$) ₃		
	($45^\circ/-45^\circ$) ₃		

Untuk tumpukan arah serat dari setiap lamina dapat dilihat pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Konfigurasi Tumpukan Lamina

Tumpukan Lamina	
Arah Sudut	Tumpukan Arah Serat
($0^\circ/0^\circ$) ₃	[0/0/0/0/0/0]
($90^\circ/90^\circ$) ₃	[90/90/90/90/90/90]
($0^\circ/90^\circ$) ₃	[0/90/0/90/0/90]
($45^\circ/-45^\circ$) ₃	[45/-45/45/-45/45/-45]

Berdasarkan konfigurasi tersebut, lamina memiliki total ketebalan sebesar 1 mm. Spesimen *pylon* yang akan digunakan memiliki ketebalan tertipis sebesar 3 mm, sehingga dibutuhkan total sebanyak 3 tumpukan untuk memenuhi ketebalan dari *pylon* tersebut.

3.4.4.2 Variasi Ketebalan

Variasi ketebalan dalam penyusunan komposit dilakukan untuk memperoleh desain *pylon* yang aman terhadap pengujian pembebanan standar ISO 10328 (2016). Sehingga, variasi ketebalan dapat dilihat pada Tabel 3.7.

Tabel 3.7 Variasi Ketebalan Komposit pada *Pylon*

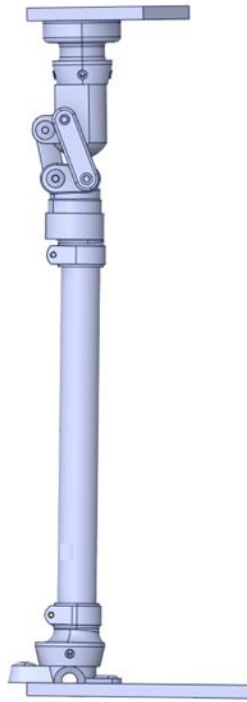
Orientasi Sudut Terbaik	Ketebalan (mm)
$(\theta^\circ/\theta^\circ)_3$	3
$(\theta^\circ/\theta^\circ)_4$	4
$(\theta^\circ/\theta^\circ)_5$	5
$(\theta^\circ/\theta^\circ)_6$	6
$(\theta^\circ/\theta^\circ)_7$	7
$(\theta^\circ/\theta^\circ)_8$	8
$(\theta^\circ/\theta^\circ)_9$	9
$(\theta^\circ/\theta^\circ)_{10}$	10
$(\theta^\circ/\theta^\circ)_{11}$	11
$(\theta^\circ/\theta^\circ)_{12}$	12
$(\theta^\circ/\theta^\circ)_{13}$	13
$(\theta^\circ/\theta^\circ)_{14}$	14

3.5 Pemodelan 3D dan Simulasi

Pada subbab ini akan dijelaskan lebih lanjut mengenai pemodelan 3D hingga hasil simulasi.

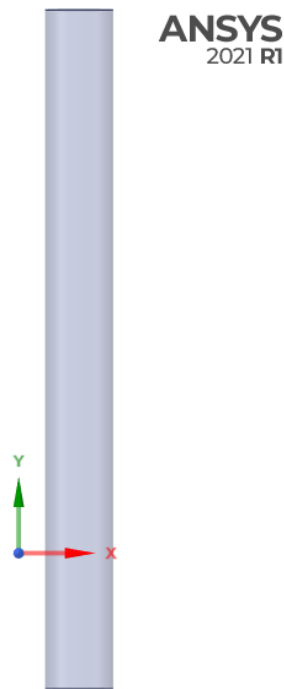
3.5.1 Pemodelan 3D

Pemodelan 3D dilakukan untuk memodelkan geometri dari kaki palsu transfemoral dengan menggunkan software SolidWorks sebelum dilakukan analisis di software ANSYS. Gambar dari pemodelan kaki palsu transfemoral dapat dilihat pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Pemodelan 3D Kaki Palsu Transfemoral

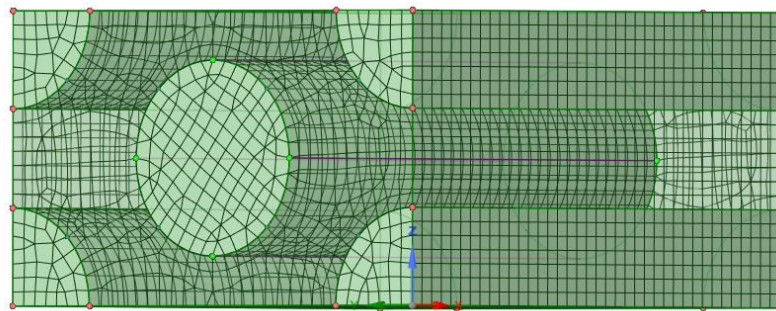
Dilakukan juga pemodelan pada permukaan luar dari *pylon* sebelum dilakukan penyusunan komposit. Gambar dari pemodelan 3D permukaan luar *pylon* dapat dilihat pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Pemodelan 3D Permukaan luar dari *Pylon*

3.5.2 Pemodelan Mikrostruktur Komposit

Penyusunan pemodelan mikrostruktur komposit dilakukan pada *software* ANSYS dengan *tools* ANSYS Material Designer. Penggunaan ANSYS Material Designer untuk menyederhanakan bahan penyusun komposit yaitu fase penguat/serat dan fase matriks. Dengan memasukkan properties serat dan juga matriks, maka gabungan kedua material tersebut menjadi lamina pada suatu komposit. Gabungan dari kedua material tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.10 di bawah ini.



Gambar 3.10 Model Mikrostruktur Komposit Serat/Resin UD

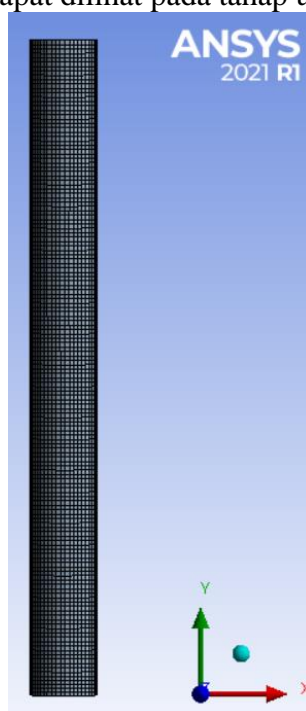
Pada material designer ini dapat mengatur fraksi volume serat yang akan digunakan. Material designer juga mendapatkan hasil dari properties material gabungan yang merupakan konstanta material baru antara serat dan matriks yang sudah menjadi lamina. Material properties yang didapatkan adalah *Young Modulus*, *Shear Modulus*, dan *Poisson Ratio*. Hasil dari *orthotropic elasticity* gabungan serat kenaf dengan fraksi volume 40% dan resin epoksi seperti Tabel 3.8.

Tabel 3.8 Hasil *Orthotropic Elasticity* ANSYS Material Designer

<i>Engineering Constant</i>	<i>Value</i>
ρ (t mm ⁻³)	1,296E-09
E ₁ (MPa)	5336,7
E ₂ (MPa)	4957,2
E ₃ (MPa)	4957,2
G ₁₂ (MPa)	1853,3
G ₂₃ (MPa)	1831,6
G ₃₁ (MPa)	1853,3
ν_{12}	0,33894
ν_{13}	0,33894
ν_{23}	0,35328

3.5.3 Meshing

Sebelum dilakukannya pemodelan komposit, model 3D perlu melalui proses *meshing* terlebih dahulu. Ukuran elemen *mesh* yang digunakan akan didapatkan setelah dilakukannya uji konvergensi, yang rinciannya dapat dilihat pada tahap uji konvergensi nanti.

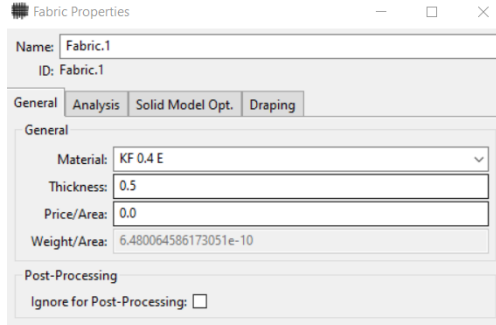


Gambar 3.11 Mesh pada Pylon

3.5.4 Pemodelan Laminasi Komposit

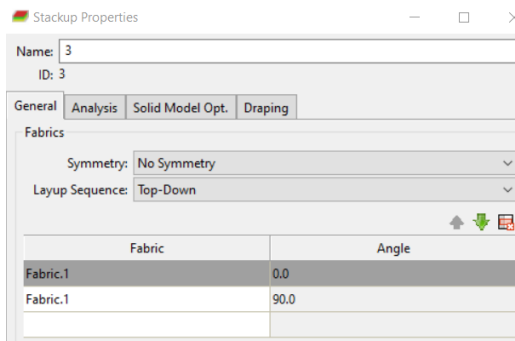
Penyusunan pemodelan laminasi komposit dilakukan pada software ANSYS Composite PrePost. Penggunaan ANSYS Composite PrePost untuk pemodelan laminasi komposit (Pre) dan hasil analisa lanjutan (Post) untuk mencari faktor kegagalan dari komposit. ACP Prepost memungkinkan untuk menentukan urutan susunan dari lamina dan menentukan arah orientasi sudut dari masing-masing lamina.

Langkah pertama adalah mendefinisikan material komposit yang akan diaplikasikan pada model komposit serta memberikan ketebalan awal material, dimana pada simulasi ini material komposit yang digunakan yaitu serat kenaf dan resin epoksi yang memiliki ketebalan awal setiap lapisan sebesar 0.5 mm.



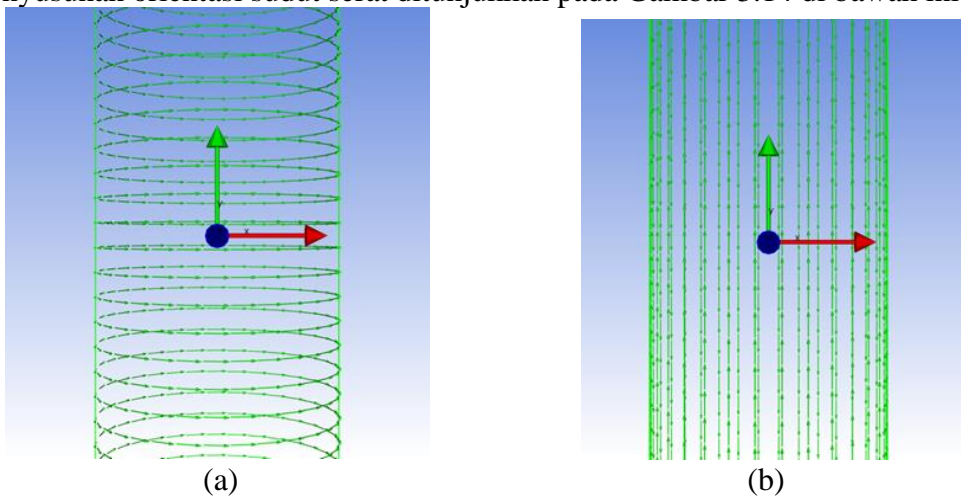
Gambar 3.12 *Input Material dan Ketebalan*

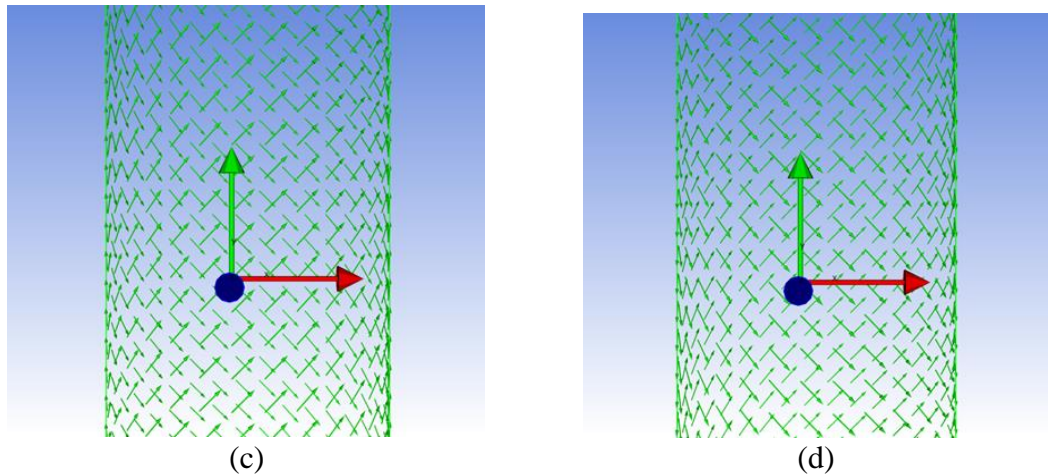
Selanjutnya mendefinisikan *Stackup* dan menentukan arah orientasi dari setiap lapisan komposit.



Gambar 3.13 *Input Arah Orientasi Sudut Serat*

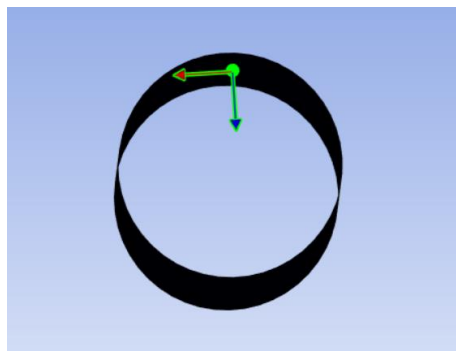
Pada penelitian ini dilakukan 4 variasi orientasi sudut untuk susunan pada spesimen *pylon*. Penyesunan orientasi sudut serat ditunjukkan pada Gambar 3.14 di bawah ini.





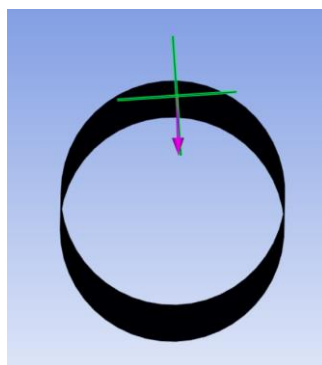
Gambar 3.14 Penyusunan Orientasi Sudut (a) 0° (b) 90° (c) 45° (d) -45°

Selanjutnya yaitu mendefinisikan *rosette* yang akan digunakan, rosette digunakan sebagai sumbu acuan dalam melakukan *Set-up* komposit. Dimana sumbu x pada rosette digunakan sebagai acuan alur orientasi 0° dari material komposit.



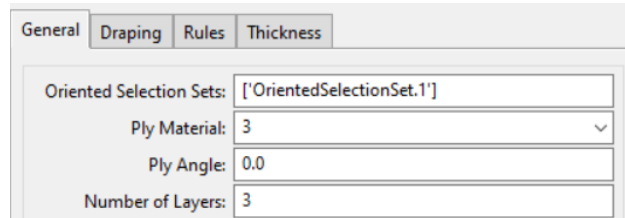
Gambar 3.15 Penentuan Sumbu Rosettes

Selanjutnya mendefinisikan *Oriented Selection Sets*. *Oriented Selection Sets* digunakan untuk menentukan arah dalam menyusun (*stackup*) lapisan komposit. Penentuan arah *Oriented Selection Sets* ini menggunakan setup yang sudah disusun pada material data dan juga pengaturan koordinat pada rosettes.

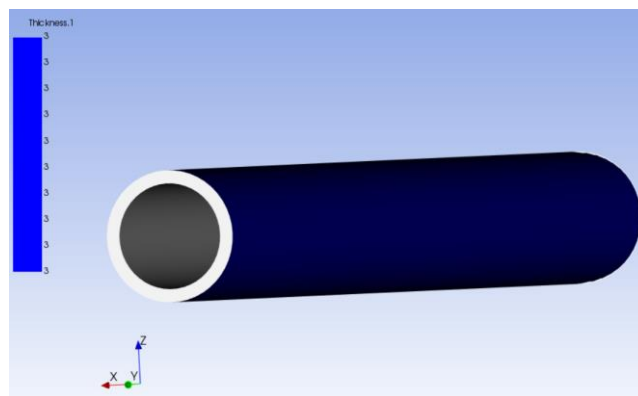


Gambar 3.16 Penentuan Sumbu *Oriented Selection Sets*

Kemudian mendefinisikan *modelling group*, pada tahap ini menentukan jumlah lapisan/layer yang akan digunakan dalam menyusun komposit pada *surface* model yang telah dibuat. Adapun pada penelitian ini lapisan yang digunakan berjumlah 3 dengan ketebalan 3 mm.



Gambar 3.17 *Modelling Group*



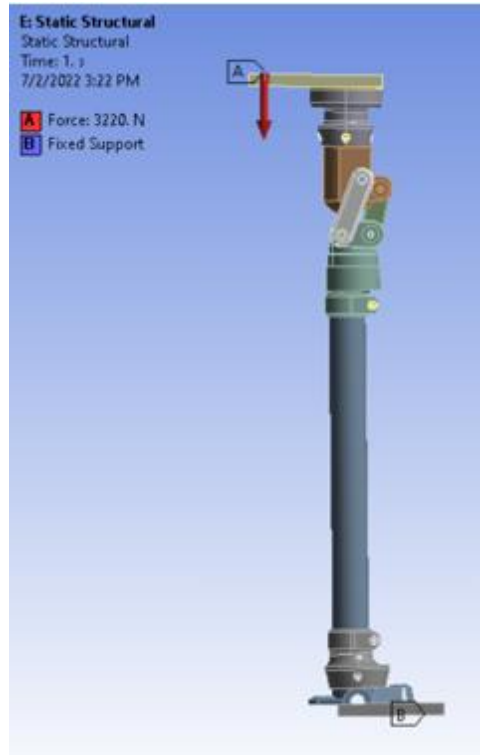
Gambar 3.18 Ketebalan *Pylon* Komposit

Layer	Sudut
1	0°
2	90°
3	0°
4	90°
5	0°
6	90°

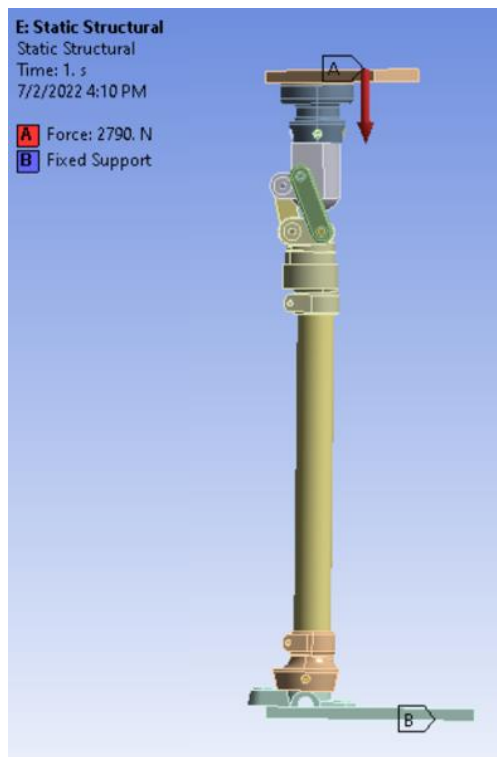
Gambar 3.19 Ilustrasi Penyusunan Arah Orientasi Sudut Komposit

3.5.5 Pengujian Statik

Pengujian statik dilakukan menggunakan ANSYS *Static Structural*. Pada proses ini kaki palsu akan diberikan *fixed support* pada plat kaki bagian bawah dan plat bagian atas akan diberikan gaya beban. Berikut gambar dari *boundary condition* pada *set-up* pembebanan yang diberikan pada kaki palsu transfemorale.

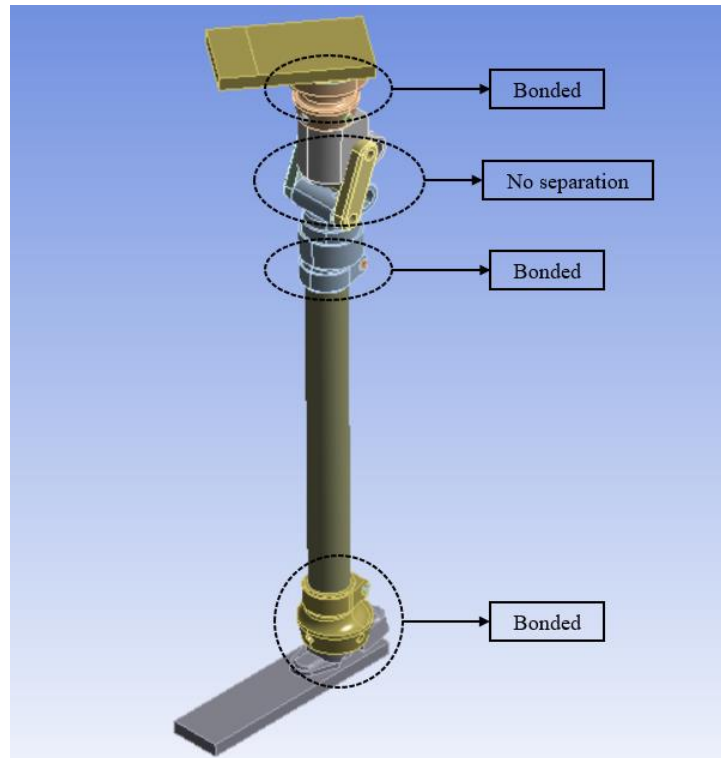


Gambar 3.20 *Boundary condition* kondisi 1 simulasi kaki palsu pada ANSYS



Gambar 3.21 *Boundary condition* kondisi 2 simulasi kaki palsu pada ANSYS

Pada pengujian ini akan dilakukan pendefinisian kontak. Dimana dilakukan pemilihan kontak pada setiap komponen pada kaki palsu.



Gambar 3.22 *Body contact* kaki palsu transfemoral

Pada pengujian ini dilakukan input kontak. Di mana dilakukan pemilihan kontak pada setiap komponen kaki palsu transfemoral. Pada *body contact* antara kunci socket (*contact bodies*) dengan plat atas (*target bodies*) dengan kontak yang dipilih yaitu *bonded*. Pada *body contact* antara kunci socket (*contact bodies*) dengan pengunci lutut *polycentric* (*target bodies*) dengan kontak yang dipilih yaitu *bonded*. Pada *body contact* antara lutut atas *polycentric* (*contact bodies*) dengan pengunci lutut *polycentric* (*target bodies*) dengan kontak yang dipilih yaitu *bonded*. Pada *body contact* antara sambungan tengah (*contact bodies*) dengan lutut atas *polycentric* (*target bodies*) dengan kontak yang dipilih yaitu *no separation*. Pada *body contact* antara sambungan samping (*contact bodies*) dengan lutut atas *polycentric* (*target bodies*) dengan kontak yang dipilih yaitu *no separation*. Pada *body contact* antara sambungan tengah (*contact bodies*) dengan lutut atas *polycentric* (*target bodies*) dengan kontak yang dipilih yaitu *no separation*. Pada *body contact* antara sambungan samping (*contact bodies*) dengan lutut bawah *polycentric* (*target bodies*) dengan kontak yang dipilih yaitu *no separation*. Pada *body contact* antara *pylon* komposit (*contact bodies*) dengan lutut bawah *polycentric* (*target bodies*) dengan kontak yang dipilih yaitu *bonded*. Pada *body contact* antara *pylon* komposit (*contact bodies*) dengan *holder* bawah (*target bodies*) dengan kontak yang dipilih yaitu *bonded*. Pada *body contact* antara *single axis ankle* (*contact bodies*) dengan *holder* bawah (*target bodies*) dengan kontak yang dipilih yaitu *bonded*. Pada *body contact* antara *single axis ankle* (*contact bodies*) dengan plat bawah (*target bodies*) dengan kontak yang dipilih yaitu *bonded*.

3.5.6 Uji Konvergensi

Setelah menentukan geometri, properti material, laminasi komposit, *mesh*, dan boundary condition, maka dapat dilakukan simulasi *Static Structural*. 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 *pylon*. 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. Di mana hasil dapat dilihat pada Tabel 3.9 dan Gambar 3.24 di bawah ini.

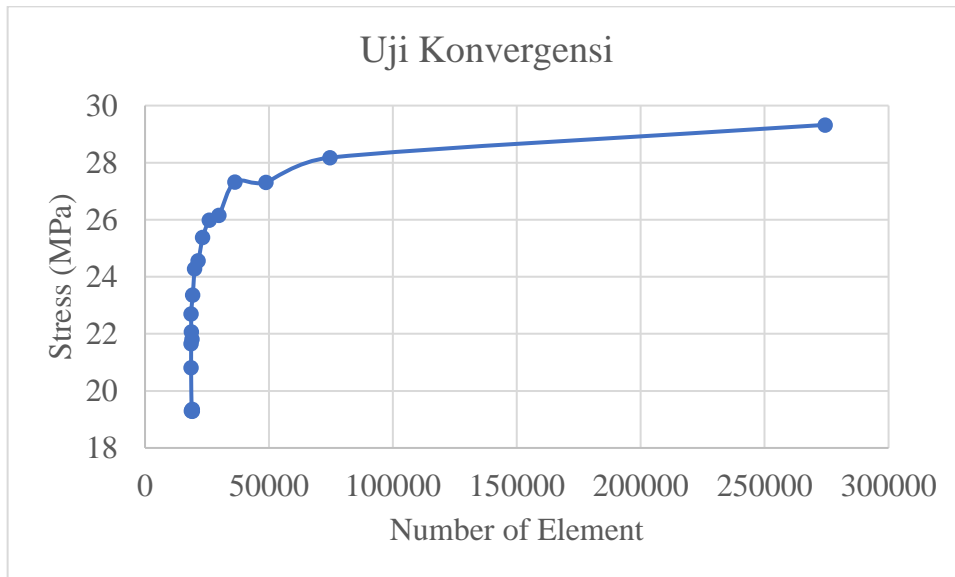


Gambar 3.23 Mesh pada kaki palsu

Tabel 3.9 Hasil Uji Konvergensi Simulasi *Static Structural*

Uji Konvergensi							
No.	Element Size (mm)	Nodes	Element	Skewness	Orthogonal	Equivalent Stress (MPa)	Relative Error
1	10	40481	19133	0.513994	0.621641	19.3564	
2	9.5	40208	18899	0.513994	0.513244	19.3194	0.19%
3	9	40439	19097	0.513994	0.509972	19.2834	0.19%
4	8.5	40096	18803	0.513994	0.514274	19.2989	0.08%
5	8	39844	18587	0.513743	0.518551	20.8136	7.28%
6	7.5	39949	18677	0.512816	0.516935	21.6537	3.88%
7	7	40243	18953	0.511399	0.512142	21.8117	0.72%
8	6.5	40082	18791	0.509751	0.514111	22.0736	1.19%
9	6	39858	18581	0.50831	0.51984	22.6991	2.76%
10	5.5	40677	19277	0.506461	0.509324	23.3585	2.82%
11	5	41594	20057	0.503849	0.498923	24.2816	3.80%
12	4.5	43281	21491	0.501001	0.483713	24.5594	1.13%
13	4	45430	23321	0.497559	0.469268	25.3867	3.26%
14	3.5	48587	26009	0.494488	0.456449	25.9878	2.31%
15	3	53039	29807	0.492158	0.447323	26.1583	0.65%
16	2.5	60599	36257	0.49275	0.448822	27.3268	4.28%

Uji Konvergensi							
No.	Element Size (mm)	Nodes	Element	Skewness	Orthogonal	Equivalent Stress (MPa)	Relative Error
17	2	75355	48857	0.504286	0.475127	27.3101	0.06%
18	1.5	105539	74657	0.550058	0.547191	28.1776	3.08%
19	1	395444	274449	0.686984	0.618442	29.324	3.91%



Gambar 3.24 Grafik Hasil Uji Konvergensi Simulasi

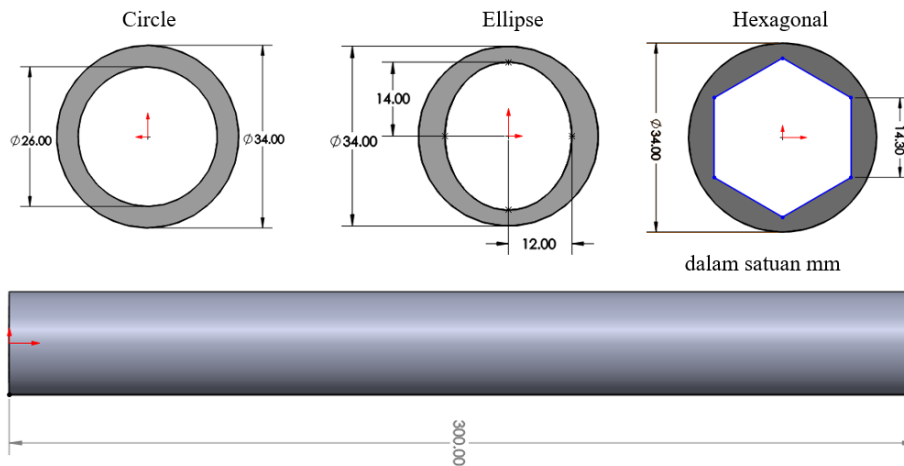
Dari hasil uji konvergensi yang dapat dilihat dalam grafik pada Tabel 3.9 dan Gambar 3.24 didapatkan ukuran meshing dengan nilai *error* terkecil pada ukuran element sebesar 2 mm dengan *relative error* sebesar 0.06%.

3.5.7 Hasil Simulasi

Simulasi yang dilakukan pada penelitian ini dengan pembebanan sesuai *boundary condition*. Analisa dilakukan untuk melihat kekuatan pada *pylon* dimana *output* yang dihasilkan yaitu von-misses stress, total deformasi, nilai faktor kegagalan dan faktor keamanan.

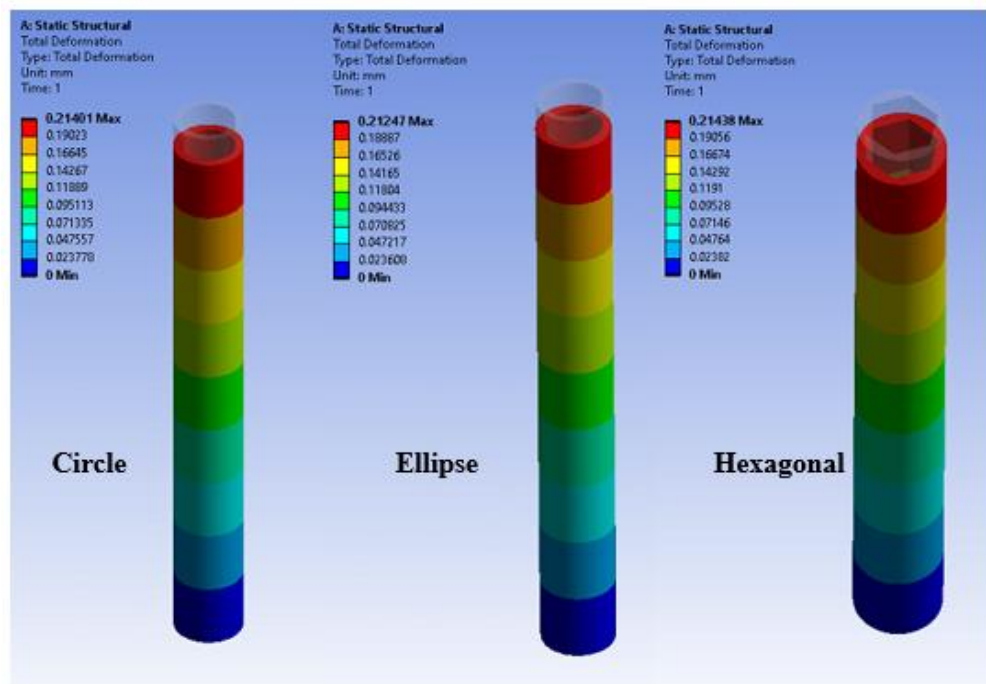
3.5.8 Validasi Model Simulasi

Validasi model simulasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dari referensi penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Noori Kareem dkk pada tahun 2021 seperti yang tertera pada bagian 2.2 penelitian ini. Pemodelan pengujian dapat dilihat pada Gambar 3.25.



Gambar 3.25 Model pengujian berdasarkan referensi penelitian oleh Noori Kareem

Dari pengujian yang sudah dilakukan penulis didapatkan hasil total deformasi seperti Gambar 3.26 dibawah ini.

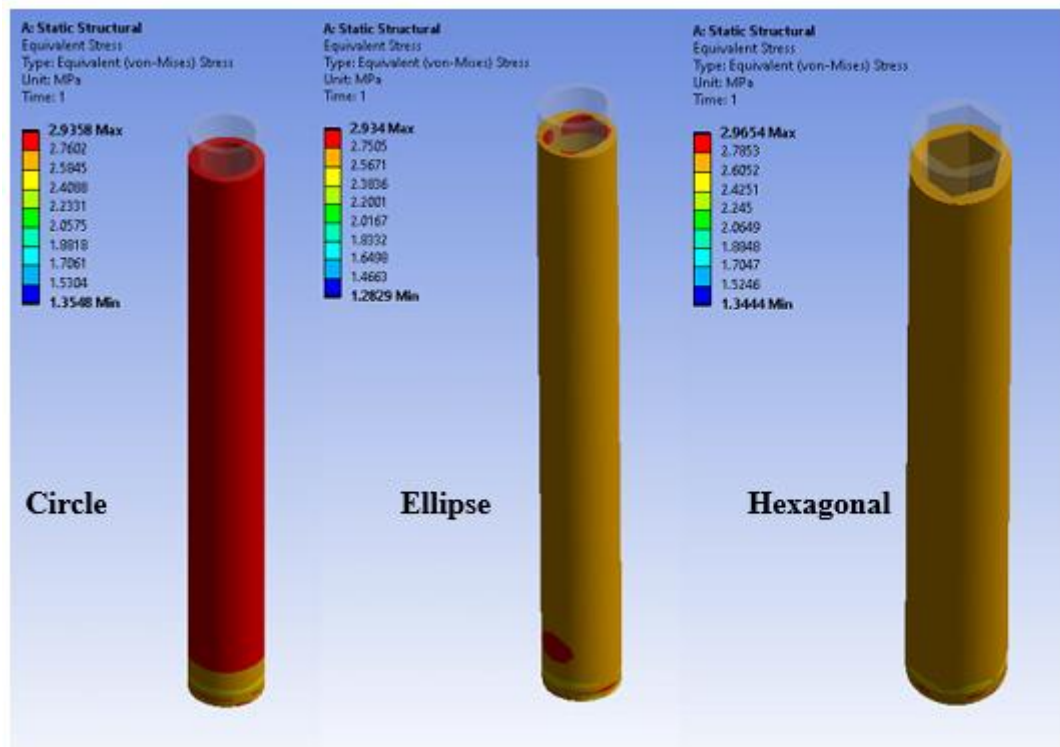


Gambar 3.26 Hasil total deformasi maksimum

Tabel 3.10 Hasil perbandingan total deformasi

Type	Force (N)	Total Deformasi (mm)		Error (%)
		Penelitian Terdahulu	Penulis	
Circle	1042	0,21655	0,21418	1,09%
Elipse		0,21476	0,21247	1,07%
Hexagonal		0,21778	0,21438	1,56%

Didapatkan hasil perbedaan total deformasi maksimum pada *pylon circle* sebesar 1,09%, pada *pylon ellipse* sebesar 1,07%, dan pada *pylon hexagonal* sebesar 1,56%. Dari pengujian yang sudah dilakukan penulis didapatkan hasil tegangan von-mises seperti Gambar 3.27 dibawah ini.



Gambar 3.27 Hasil tegangan von-mises maksimum

Tabel 3.11 Hasil perbandingan tegangan von-mises

Type	Force (N)	Equivalent Stress (MPa)		Error (%)
		Penelitian Terdahulu	Penulis	
Circle	1042	2,9208	2,9358	0,51%
Elipse		2,9022	2,934	1,10%
Hexagonal		2,9991	2,9654	1,12%

Didapatkan hasil perbedaan tegangan von-mises maksimum pada *pylon circle* sebesar 0,51%, pada *pylon ellipse* sebesar 1,10%, dan pada *pylon hexagonal* sebesar 1,12%.

3.6 Perhitungan Data Material Orthotropic

Perhitungan data material ini untuk mencari data orthotropic elasticity dan orthotropic stress limit untuk dimasukkan pada tools ANSYS ACP. Perhitungan orthotropic elasticity untuk dibandingkan dengan hasil tools ANSYS Material Designer.

3.6.1 Perhitungan Orthotropic Elasticity

Berdasarkan penjelasan yang telah dipaparkan pada dasar teori, *rules of mixtures* merupakan salah satu metode untuk mengetahui nilai *properties* massa jenis, *shear modulus*, *Young modulus*, dan *poisson ratio* dari komposit. Metode ini akan digunakan sebagai validasi

dalam hasil simulasi mikrostruktur komposit dari *software* Material Designer. Nilai massa jenis dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

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

$$\rho_c = (0,4 \times 1500) + (0,6 \times 1160)$$

$$\rho_c = 1296 \text{ kg/mm}^3$$

Adapun nilai *longitudinal* dan *transverse* dari Young Modulus dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$E_1 = v_f E_f + v_m E_m$$

$$E_1 = (0,4 \times 7,67) + (0,6 \times 3,78)$$

$$E_1 = 5,336 \text{ GPa} = 5336 \text{ MPa}$$

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

$$E_2 = \frac{3,78(1 + (1 \times 0,339 \times 0,324))}{1 - (0,339 \times 0,324)}$$

$$E_2 = 4,9689 \text{ GPa} = 4968,9 \text{ MPa}$$

$$E_2 = E_3$$

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

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

$$G_{12} = 1,4 \frac{(1 + 0,4) \times 2,8965 + 0,6 \times 1,4}{0,6 \times 2,8965 + (1 + 0,4) \times 1,4}$$

$$G_{12} = 1,8532 \text{ GPa} = 1853,2 \text{ MPa}$$

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

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

$$G_{23} = \frac{1,4 \times 4,2 \times (1,4 + 2,8965) + 2 \times 2,8965 \times 1,4 + 4,2 \times (2,8965 - 1,4) \times 0,4}{4,2 \times (1,4 + 2,8965) + 2 \times 2,896 \times 1,4 - (4,2 + 2 \times 1,4)(2,8965 - 1,4) \times 0,4}$$

$$G_{23} = 1,8273 \text{ GPa} = 1827,3 \text{ MPa}$$

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

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

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

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

$$v_{12} = v_{13}$$

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

$$v_{23} = \frac{4968,9}{2 \times 1827,3} - 1$$

$$v_{23} = 0,3596$$

Jika dibandingkan hasil *material designer* dengan hasil perhitungan teoritis *rules of mixtures* diatas, maka didapatkan error sebagaimana yang dijelaskan pada Tabel 3.11 di bawah ini.

Tabel 3.12 Perbandingan Hasil Material Designer dengan Hasil Kalkulasi Manual

Engineering Constant	Hasil Material Designer	Hasil Kalkulasi	Error
ρ	1296	1296	0,00%
E_1 (MPa)	5336,7	5336	0,01%
E_2 (MPa)	4957,2	4969	0,24%
E_3 (MPa)	4957,2	4969	0,24%
G_{12} (MPa)	1853,3	1853	0,00%
G_{23} (MPa)	1831,6	1827	0,23%
G_{31} (MPa)	1853,3	1853	0,00%
v_{12}	0,3389	0,3396	0,19%
v_{13}	0,3389	0,3396	0,19%
v_{23}	0,3532	0,3596	1,80%

Berdasarkan Tabel 3.12 di atas, hasil *error* dari perbandingan hasil tools ANSYS Material Designer dengan hasil kalkulasi manual sangat kecil, dapat disimpulkan bahwa data yang didapatkan dengan menggunakan *software* material designer dapat digunakan dalam proses simulasi ini.

3.6.2 Perhitungan Orthotropic Stress Limit

Setelah mendapatkan nilai *orthotropic elasticity* dari gabungan serat alam dan matriks dengan menggunakan tools ANSYS Material Designer, langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan *orthotropic stress limit*. Perhitungan *orthotropic stress limit* meliputi tensile (x,y,z) direction, compressive (x,y,z), dan shear (xy, yz, xz). Pada perhitungan *orthotropic stress limit*, berdasarkan referensi dari buku “Design, Mechanics, Analysis, Manufacturing, and Testing”. Nilai pertama yang akan dicari adalah nilai *longitudinal tensile strength* yang di mana akan didapatkan melalui perumusan berikut ini.

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

$$\varepsilon_m = \frac{54,6}{3780} \quad \varepsilon_f = \frac{89,58}{7670}$$

$$\varepsilon_m = 0,014 > \varepsilon_f = 0,011$$

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

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

$$(\sigma_{x_c}^T)_{ult} = (89,58) 0,4 + (0,011) 3780 (1 - 0,4)$$

$$(\sigma_{x_c}^T)_{ult} = 62,32 \text{ MPa}$$

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

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

$$(\sigma_{y_c}^T)_{ult} = 4957,2 \left[1 + \left(\frac{3780}{7670} - 1 \right) 0,4 \right] 0,014$$

$$(\sigma_{y_c}^T)_{ult} = 49,81 \text{ MPa}$$

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

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

$$= \left[\frac{7670 \times 0,4 + 3780 (1 - 0,4)}{0,324 \times 0,4 + 0,35 (1 - 0,4)} (1 - 0,4) \right] \left[1 + \left(\frac{7670 \times 0,4}{7670} - 1 \right) 0,4 \right] 0,014$$

$$(\sigma_{x_c}^C)_{ult} = 44,74 \text{ MPa}$$

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

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

$$(\sigma_{y_c}^C)_{ult} = 4957,2 \left(1 + \left(\frac{3780}{7670} - 1 \right) 0,4 \right) 0,014$$

$$(\sigma_{y_c}^C)_{ult} = 55,405 \text{ MPa}$$

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

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

$$(\tau_{xy_c})_{ult} = 1853,3 \left[1 + \left(\frac{1400}{2896,5} - 1 \right) 0,4 \right] 0,028$$

$$(\tau_{xy_c})_{ult} = 42,008 \text{ MPa}$$

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

$$(\tau_{yz_c})_{ult} = \frac{26,011}{2} = 21,004 \text{ MPa}$$

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini terdapat pembahasan dan hasil analisa penelitian tentang kekuatan dari *pylon* pada kaki palsu transfemoral dengan variasi penyusunan berdasarkan orientasi sudut dan ketebalan komposit. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga pada ANSYS 2021.

4.1 Hasil Simulasi Penelitian dan Pembahasan

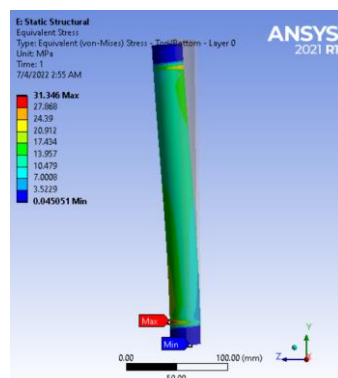
Penelitian ini dilakukan untuk menemukan orientasi sudut dan ketebalan yang optimal dalam perancangan *pylon* kaki prostetik dengan menggunakan material komposit kenaf/epoksi agar memperoleh kekuatan yang baik berdasarkan standar pengujian ISO 10328 (2016): *Prosthetics — Structural testing of lower-limb prostheses — Requirements and test methods* dengan dua jenis kondisi pengujian yaitu *heel strike* dan *toe-off*. Dengan menggunakan level P3 sampai level P8. Dimana dalam penelitian ini dilakukan simulasi untuk tiap variasi kombinasi sudut yaitu $(0^\circ/0^\circ)$, $(90^\circ/90^\circ)$, $(0^\circ/90^\circ)$, $(45^\circ/-45^\circ)$. Kemudian dengan orientasi sudut yang terbaik akan dilakukan simulasi pada variasi ketebalan. Selanjutnya hasil simulasi dari variasi orientasi sudut dan variasi ketebalan akan diperoleh data berupa tegangan von-mises, total deformasi dan *safety factor*. Selanjutnya akan dilakukan analisa pada hasil yang diperoleh pada subbab berikutnya.

4.1.1 Hasil Simulasi Pengujian *Pylon* Kaki Palsu pada Kondisi *Heel strike*

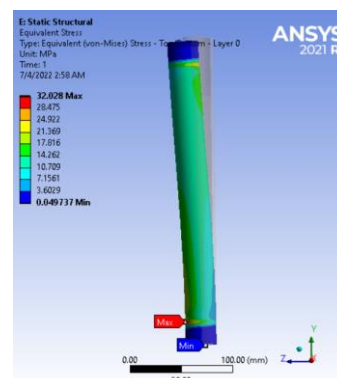
Pada tahap ini dilakukan pengujian *heel strike* pada desain *pylon* kaki palsu dengan menghasilkan orientasi sudut yang akan dibandingkan dengan nilai tegangan maksimum von mises, total deformasi, nilai kegagalan tsai-wu dan *safety factor*. Pembebanan yang diberikan sebesar 3220 N pada level P3.

4.1.1.1 Hasil Simulasi dan Pembahasan Tegangan Von-Mises

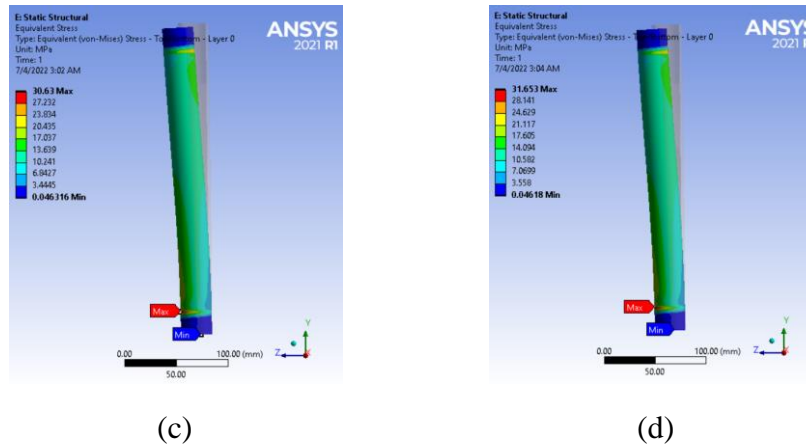
Pada simulasi yang dilakukan berdasarkan penelitian ini didapatkan nilai tegangan von-mises. Tegangan von-mises adalah nilai yang menjadi tolak ukur untuk material mengalami kegagalan atau tidak. Hasil simulasi untuk variasi sudut $(0^\circ/0^\circ)$, $(90^\circ/90^\circ)$, $(0^\circ/90^\circ)$, $(45^\circ/-45^\circ)$ di paparkan pada Gambar 4.1.



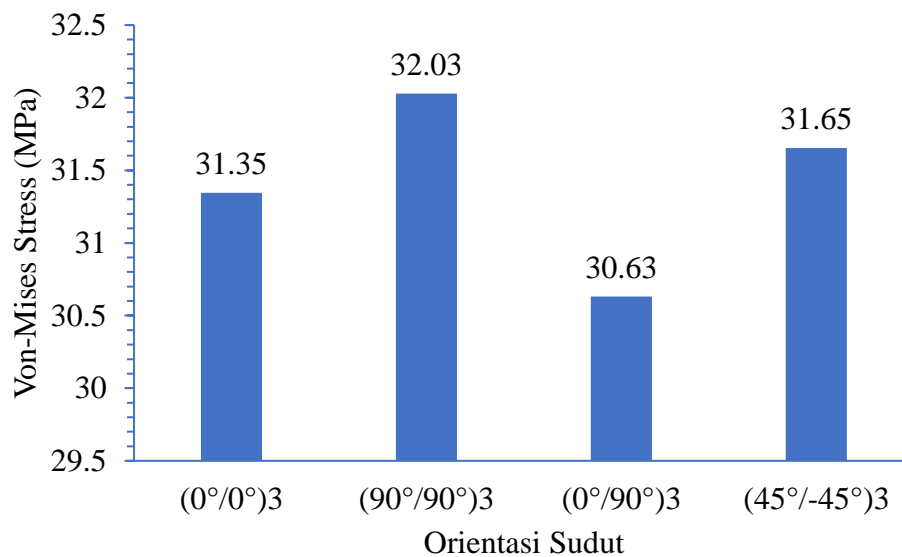
(a)



(b)



Gambar 4.1 Hasil Simulasi Tegangan Von-Mises Setiap Variasi Sudut pada Pengujian *Heel strike* (a) ($0^{\circ}/0^{\circ}$), (b) ($90^{\circ}/90^{\circ}$), (c) ($0^{\circ}/90^{\circ}$), (d) ($45^{\circ}/-45^{\circ}$)



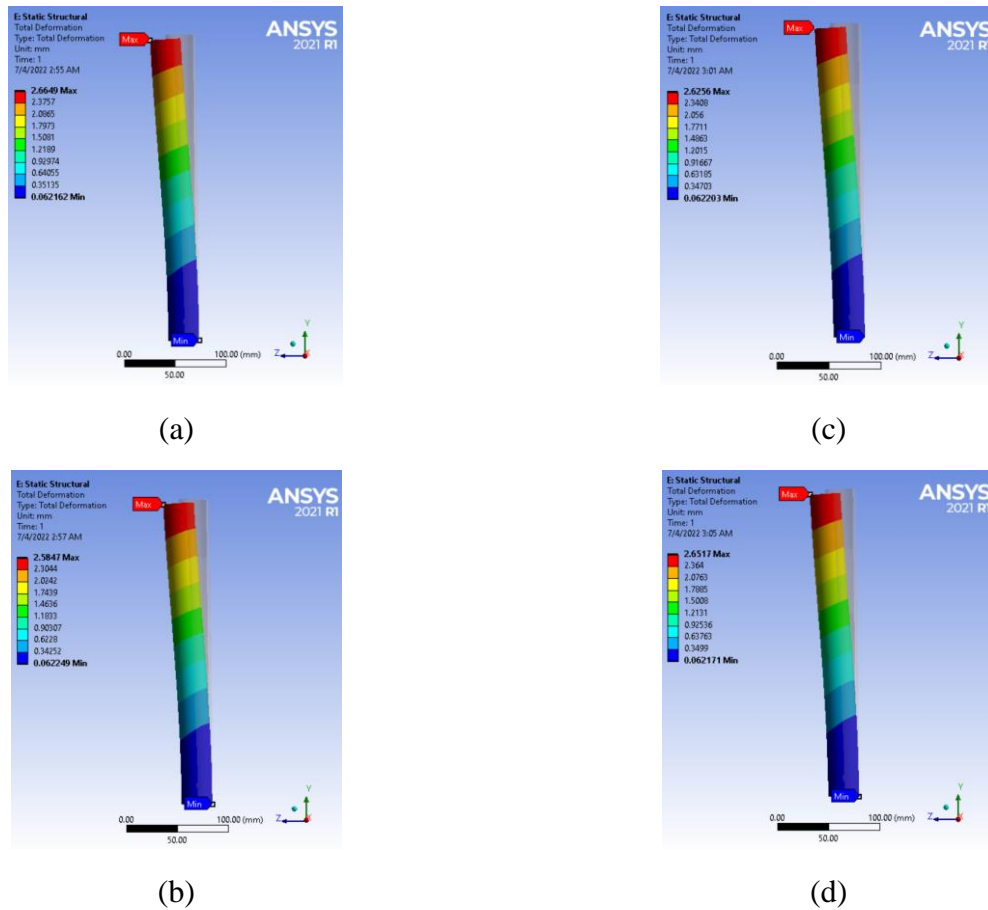
Gambar 4.2 Grafik Hasil Simulasi Orientasi Sudut Serat terhadap Tegangan Von-mises Maksimum pada Pengujian *Heel strike*

Dari data hasil simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.2 diatas, diketahui *pylon* dengan menggunakan material komposit pada pengujian *heel strike* dengan pemberian beban berdasarkan standar 3220 N diperoleh bahwa untuk orientasi sudut ($0^{\circ}/0^{\circ}$)₃ nilai maksimum tegangan von-mises sebesar 31,35 MPa, dan untuk orientasi sudut ($90^{\circ}/90^{\circ}$)₃ didapatkan nilai maksimum tegangan von-mises sebesar 32,03 MPa. Untuk penyusunan material komposit dengan orientasi sudut ($0^{\circ}/90^{\circ}$)₃ didapatkan nilai maksimum tegangan von-mises sebesar 30,63 MPa, dan untuk penyusunan dengan orientasi sudut ($45^{\circ}/-45^{\circ}$)₃ didapatkan nilai maksimum tegangan von-mises sebesar 31,65 MPa. Secara keseluruhan nilai tegangan von-mises tertinggi didapat pada orientasi sudut ($90^{\circ}/90^{\circ}$)₃ sebesar 32,03 MPa dan tegangan von-mises terendah didapat pada orientasi sudut ($0^{\circ}/90^{\circ}$)₃ sebesar 30,63 MPa. Berdasarkan teori, tegangan von-mises akan dibandingkan dengan strength dari material tersebut. Jadi apabila tegangan yang dialami pada material semakin besar maka material tersebut semakin tidak aman. Sebaliknya

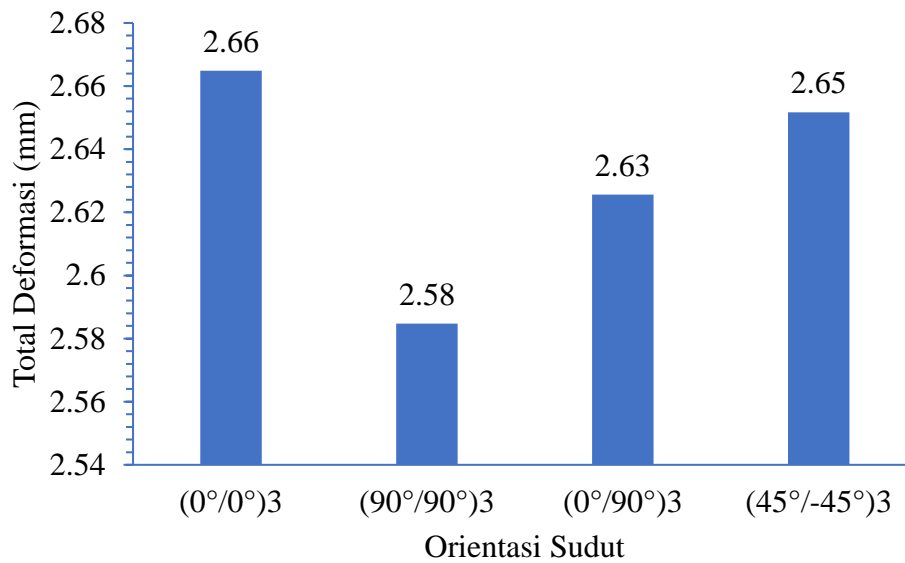
jika tegangan yang dialami semakin kecil maka tingkat keamanan material tersebut semakin baik.

4.1.1.2 Hasil Simulasi dan Pembahasan Nilai Total Deformasi

Total deformasi yang terjadi pada *pylon* dapat dilihat pada hasil simulasi pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Hasil Simulasi Total Deformasi Setiap Variasi Sudut pada Pengujian *Heel strike* (a) $(0^\circ/0^\circ)$, (b) $(90^\circ/90^\circ)$, (c) $(0^\circ/90^\circ)$, (d) $(45^\circ/-45^\circ)$

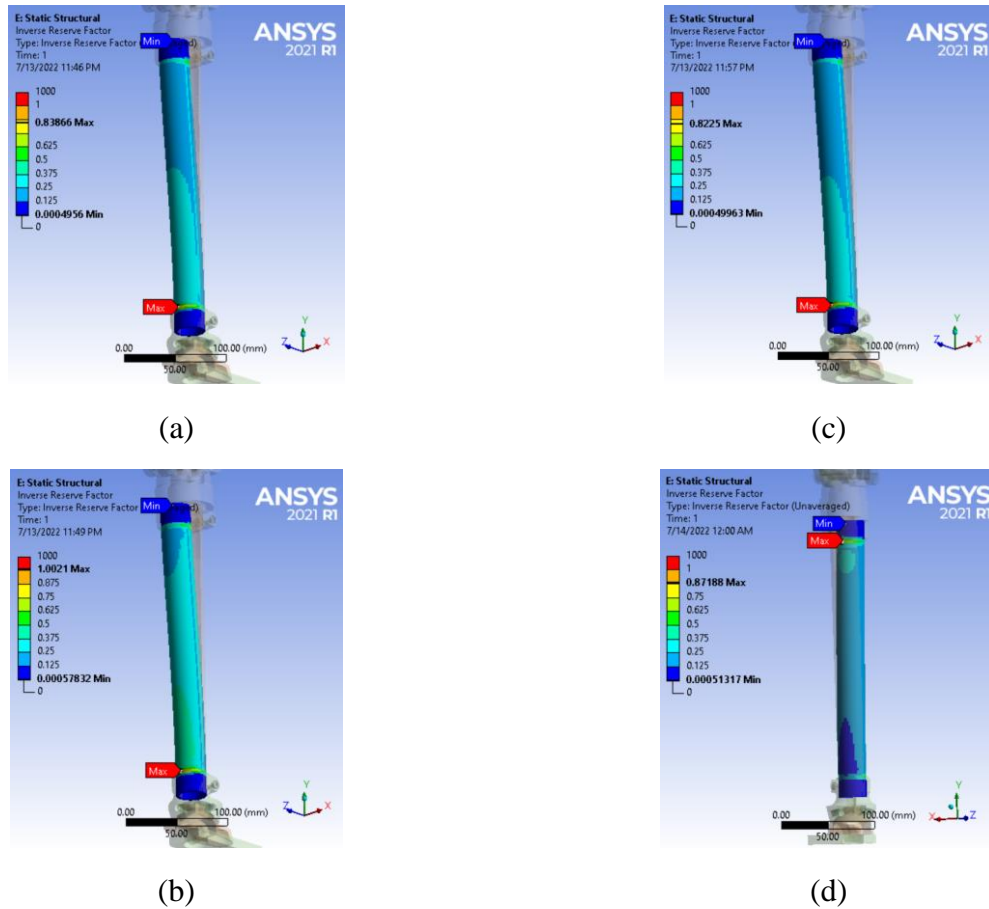


Gambar 4.4 Grafik Hasil Simulasi Orientasi Sudut Serat terhadap Total Deformasi Maksimum pada Pengujian *Heel strike*

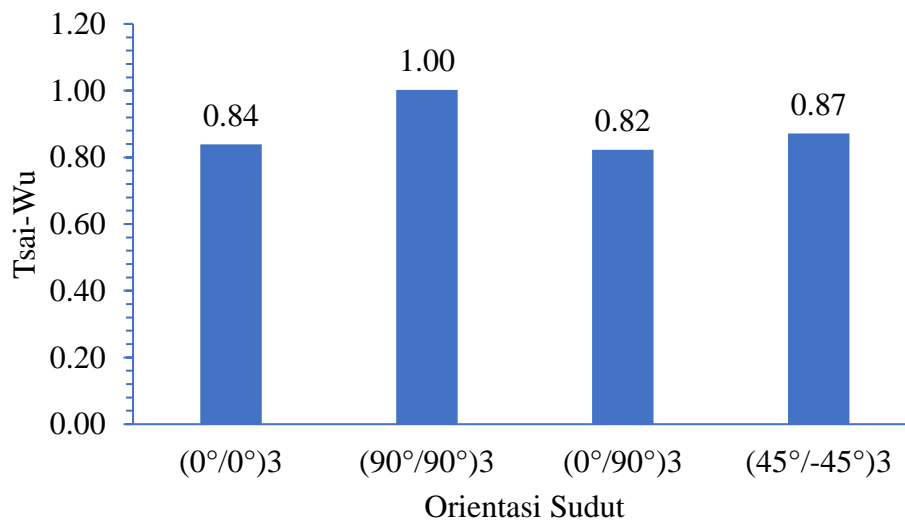
Berdasarkan Gambar 4.4 merupakan hasil simulasi variasi orientasi sudut terhadap nilai total deformasi pada pengujian *heel strike* untuk *pylon* menggunakan standar pengujian ISO 10328(2016) dengan pembebanan 3220 N. Diperoleh nilai deformasi maksimum pada penyusunan material komposit dengan orientasi sudut $(0^\circ/0^\circ)_3$ sebesar 2,66 mm, dan untuk orientasi sudut $(90^\circ/90^\circ)_3$ didapatkan nilai deformasi maksimum sebesar 2,68 mm. Untuk penyusunan material komposit dengan orientasi sudut $(0^\circ/90^\circ)_3$ didapatkan nilai deformasi maksimum sebesar 2,63 mm. Dan untuk orientasi sudut $(45^\circ/-45^\circ)_3$ didapatkan nilai deformasi maksimum sebesar 2,65 mm. Secara keseluruhan nilai deformasi tertinggi didapat pada variasi $(0^\circ/0^\circ)_3$ sebesar 2,66 mm dan nilai deformasi terendah didapat pada variasi $(90^\circ/90^\circ)_3$ sebesar 2,58 mm. Berdasarkan teori apabila deformasi yang dialami pada material semakin besar maka penyusunan material komposit tersebut semakin tidak kaku alias lentur. Sebaliknya jika deformasi yang dialami semakin kecil maka tingkat penyusunan material komposit tersebut semakin kaku. Berdasarkan data grafik diatas didapat bahwa orientasi sudut $(90^\circ/90^\circ)_3$ memiliki tingkat kekakuan yang terbaik dibandingkan variasi sudut lainnya.

4.1.1.3 Hasil Simulasi dan Pembahasan Nilai Kegagalan Tsai-Wu

Nilai faktor kegagalan ini adalah nilai menjadi dasar untuk menentukan apakah material komposit yang merupakan material orthotropic, mengalami kegagalan atau tidak. Jika material komposit mengalami kegagalan maka hal ini mendefinisikan bahwa *pylon* akan mengalami kegagalan, yang artinya *pylon* dengan kombinasi sudut tersebut tidak memiliki kekuatan untuk menahan pembebanan yang ada. Berikut hasil simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Hasil Simulasi Nilai Kegagalan Tsai-Wu Setiap Variasi Sudut pada Pengujian *Heel strike* (a) $(0^\circ/0^\circ)$, (b) $(90^\circ/90^\circ)$, (c) $(0^\circ/90^\circ)$, (d) $(45^\circ/-45^\circ)$



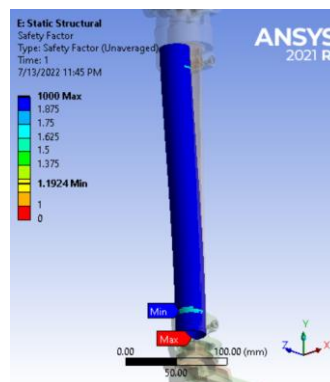
Gambar 4.6 Grafik Hasil Simulasi Variasi Sudut Serat terhadap Nilai Tsai-Wu pada Pengujian *Heel strike*

Dari data hasil simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.6 diatas, diketahui *pylon* dengan penyusunan material komposit untuk orientasi sudut $(0^\circ/0^\circ)_3$ pada pengujian *heel strike*

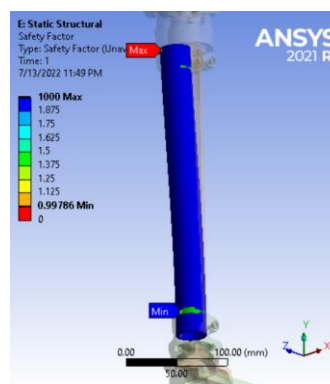
nilai faktor kegagalan tsai-wu yang dialami oleh *pylon* sebesar 0,84, dan untuk orientasi sudut $(90^\circ/90^\circ)_3$ didapatkan nilai faktor kegagalan tsai-wu sebesar 1. Untuk penyusunan material komposit dengan orientasi sudut $(0^\circ/90^\circ)_3$ didapatkan nilai faktor kegagalan tsai-wu sebesar 0,82, dan untuk orientasi sudut $(45^\circ/-45^\circ)_3$ didapatkan nilai faktor kegagalan tsai-wu sebesar 0,87. Secara keseluruhan nilai kegagalan tsai-wu tertinggi didapat pada variasi $(90^\circ/90^\circ)_3$ sebesar 1 dan nilai tsai-wu terendah didapat pada variasi $(0^\circ/90^\circ)_3$ sebesar 0,82. Berdasarkan teori, apabila nilai kegagalan tsai-wu pada material semakin kecil maka penyusunan material komposit tersebut semakin aman dikarenakan kekuatan yang dimiliki oleh susunan komposit tersebut lebih kuat dibandingkan tegangan yang dialami. Sebaliknya jika nilai kegagalan tsai-wu yang dialami semakin semakin besar maka tingkat penyusunan material komposit semakin tidak aman. Batas aman nilai kegagalan tsai-wu bernilai 1, jika lebih dari 1 maka komposit tersebut dikatakan gagal menerima pembebanan tersebut.

4.1.1.4 Hasil Simulasi dan Pembahasan Nilai *Safety factor*

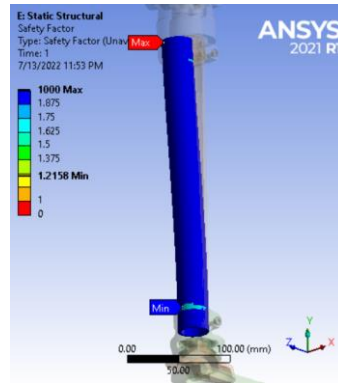
Nilai faktor keamanan adalah nilai yang menjadi dasar untuk menentukan apakah material yang digunakan mengalami kegagalan atau tidak. Jika material komposit mengalami kegagalan maka hal ini mendefinisikan bahwa desain *pylon* mengalami kegagalan, yang mana artinya *pylon* dengan penyusunan orientasi sudut tersebut tidak memiliki kekuatan untuk menahan pembebanan yang diberikan. Berikut hasil simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.7.



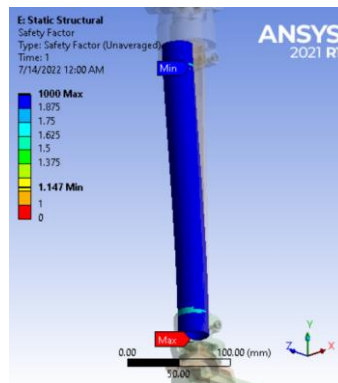
(a)



(b)

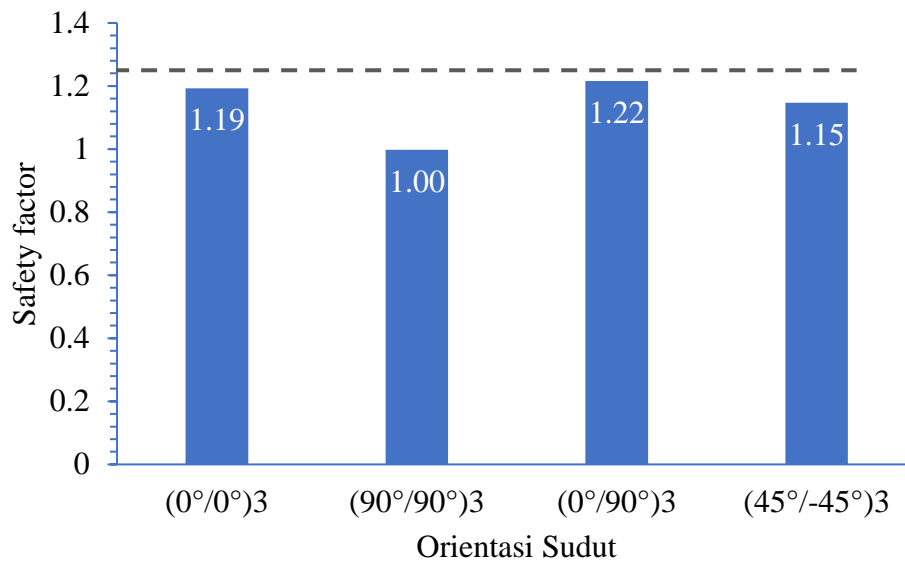


(c)



(d)

Gambar 4.7 Hasil Simulasi Nilai *Safety factor* Setiap Variasi Sudut pada Pengujian *Heel strike* (a) (0°/0°), (b) (90°/90°), (c) (0°/90°), (d) (45°/-45°)



Gambar 4.8 Grafik Hasil Simulasi Variasi Sudut Serat terhadap Nilai *Safety factor* pada Pengujian *Heel strike*

Berdasarkan Gambar 4.8 merupakan hasil simulasi variasi orientasi sudut terhadap *safety factor* pada pengujian *heel strike* untuk *pylon* menggunakan standar pengujian ISO 10328(2016) dengan pembebanan 3220 N. Diperoleh nilai *safety factor* pada penyusunan komposit dengan orientasi sudut $(0^\circ/0^\circ)_3$ sebesar 1,19, dan untuk orientasi sudut $(90^\circ/90^\circ)_3$ didapatkan nilai *safety factor* sebesar 1. Untuk penyusunan material komposit dengan orientasi sudut $(0^\circ/90^\circ)_3$ didapatkan nilai *safety factor* sebesar 1,22. Dan untuk orientasi sudut $(45^\circ/-45^\circ)_3$ didapatkan nilai *safety factor* sebesar 1,15. Secara keseluruhan nilai *safety factor* tertinggi didapat pada orientasi sudut $(0^\circ/90^\circ)_3$ sebesar 1,22 dan nilai *safety factor* terendah didapat pada orientasi sudut $(90^\circ/90^\circ)_3$ sebesar 1. Berdasarkan teori, apabila nilai *safety factor* yang dialami pada desain *pylon* semakin besar maka penyusunan material komposit tersebut semakin aman dikarenakan kekuatan yang dimiliki oleh susunan material komposit tersebut lebih kuat dibandingkan tegangan yang dialami. Sebaliknya jika nilai *safety factor* yang dialami pada desain *pylon* semakin rendah maka penyusunan material komposit tersebut semakin tidak aman. Batas aman dari nilai *safety factor* adalah 1, jika nilai *safety factor* dibawah 1 maka bisa dikatakan bahwa desain dari *pylon* tidak aman. *Safety factor* pada alat prostetik akan aman jika faktor keamanannya sama dengan atau lebih tinggi dari 1,25.(Tahir & Kadhim, 2021). Berdasarkan hasil simulasi dari grafik diatas bahwa untuk semua orientasi sudut terhadap nilai *safety factor* menghasilkan nilai *safety factor* masih dibawah 1,25, sehingga dikatakan bahwa desain *pylon* dari seluruh orientasi sudut dapat dikatakan tidak aman. Berdasarkan hasil dari simulasi dengan orientasi sudut terbaik yaitu orientasi $(0^\circ/90^\circ)_3$ akan dijadikan acuan untuk melakukan variasi ketebalan untuk memperoleh nilai *safety factor* yang lebih aman.

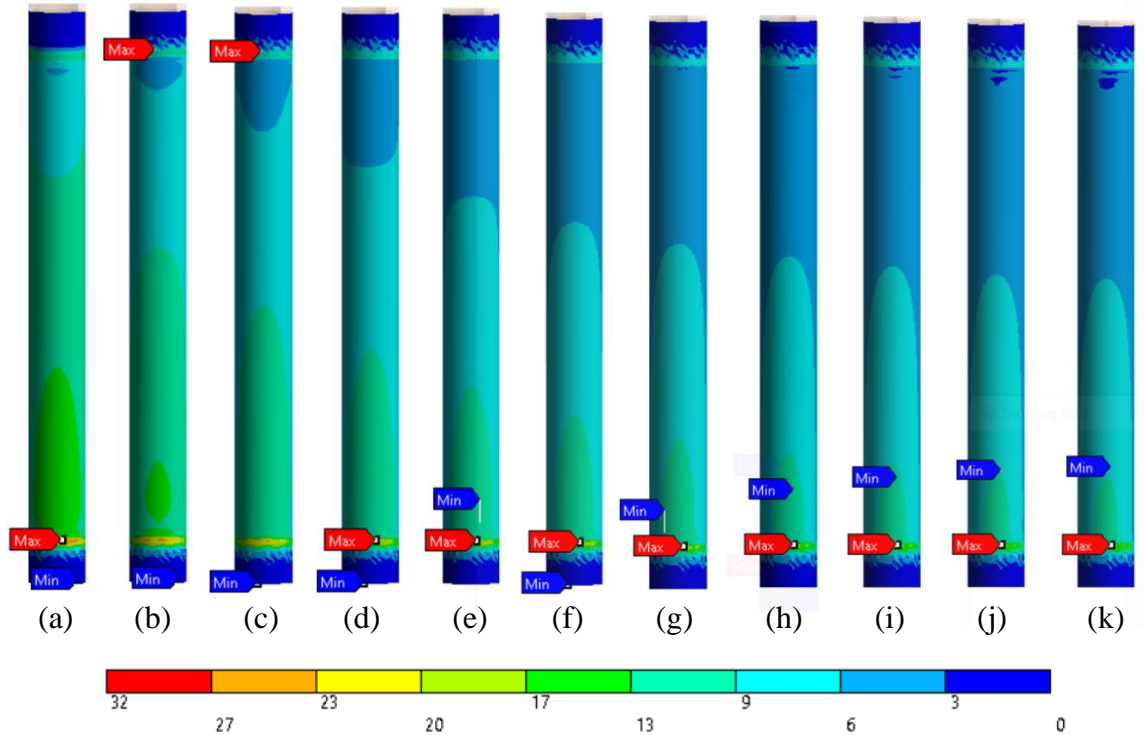
4.1.1.5 Hasil Simulasi dan Pembahasan Variasi Ketebalan

Variasi ketebalan dilakukan untuk memperoleh desain *pylon* yang lebih aman terhadap pengujian pembebanan sesuai standar ISO 10328(2016). Penyusunan orientasi sudut yang akan digunakan untuk variasi ketebalan adalah orientasi sudut terbaik yaitu sudut $(0^\circ/90^\circ)$. Pada tahap ini dilakukan pengujian *heel strike* pada desain *pylon* kaki palsu dengan variasi ketebalan

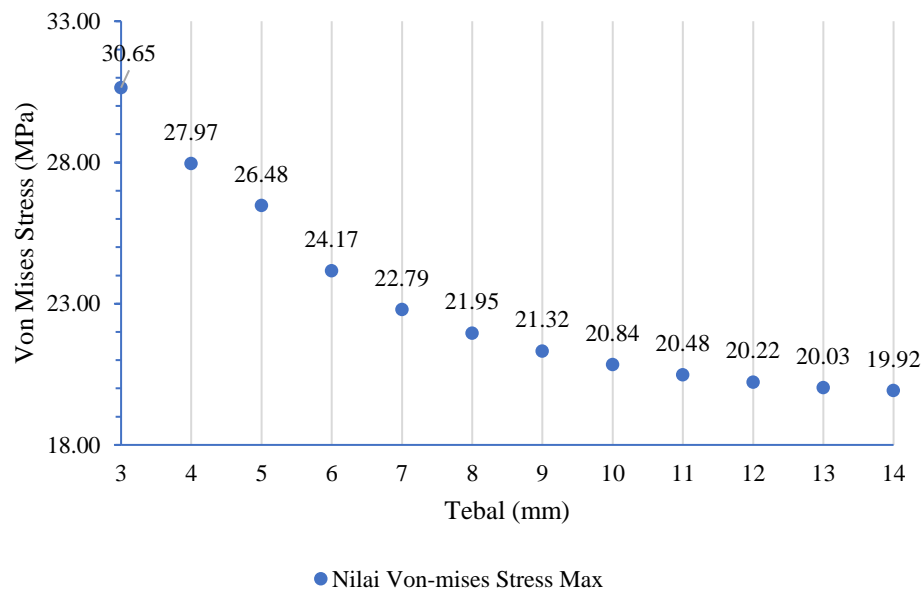
yang akan dibandingkan dengan nilai tegangan maksimum von mises, total deformasi, dan *safety factor*. Pembebanan yang diberikan dari setiap level.

4.1.1.5.1 Hasil Simulasi dan Pembahasan Nilai Tegangan Von-Mises

Hasil simulasi nilai tegangan von mises secara keseluruhan dari variasi ketebalan saat diberi pembebanan level P3 3220 N dapat dilihat pada Gambar 4.9 dibawah ini.



Gambar 4.9 Hasil Simulasi Nilai Tegangan Von-Mises Setiap Variasi Ketebalan pada Pengujian *Heel strike* (a) 4 mm, (b) 5 mm, (c) 6 mm, (d) 7 mm, (e) 8 mm, (f) 9 mm, (g) 10 mm, (h) 11 mm, (i) 12 mm, (j) 13 mm, (k) 14 mm

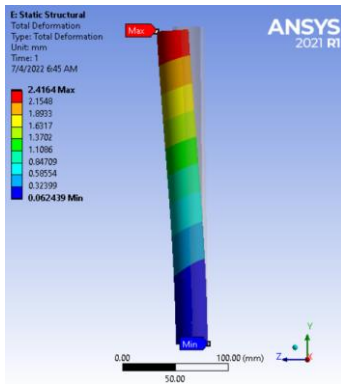


Gambar 4.10 Grafik Hasil Simulasi Variasi Ketebalan terhadap Tegangan Von-mises Maksimum pada Pengujian *Heel strike*

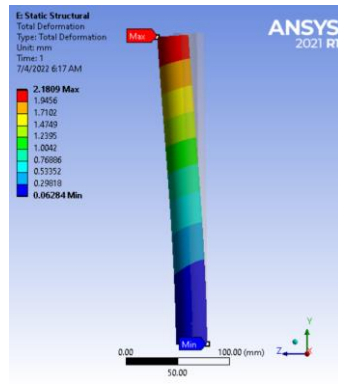
Berdasarkan grafik dari hasil simulasi bahwa setelah dilakukan penambahan ketebalan, diperoleh grafik hubungan antara variasi ketebalan dengan tegangan von-mises yang dialami oleh desain *pylon*. Pada gambar grafik diatas tren mengalami penurunan, dimana grafik mengalami penurunan dari ketebalan 3 mm sampai dengan ketebalan 14 mm. Untuk tebal 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm, 8 mm, 9 mm, 10 mm, 11 mm, 12 mm, 13 mm, 14 mm didapatkan nilai tegangan von-mises maksimum secara berturut-turut adalah 30,65 MPa, 27,97 MPa, 26,48 MPa, 24,17 MPa, 22,79 MPa, 21,95 MPa, 21,32 MPa, 20,84 MPa, 20,48 MPa, 20,22 MPa, 20,03 MPa, 19,92 MPa. Titik maksimum nilai dari tegangan von-mises maksimum yang dialami oleh *pylon* berada pada tebal 3 mm dengan nilai tegangan sebesar 30,65 MPa. Sedangkan titik minimum berada pada tebal 14 mm dengan nilai 19,92 MPa. Dapat dilihat dari grafik diatas bahwa terjadi penurunan tegangan von-mises seiring dengan bertambahnya ketebalan. Hal tersebut bisa terjadi dikarenakan setiap penambahan ketebalan maka jumlah layer dari komposit semakin bertambah, sehingga ketika diberikan pembebanan kepada *pylon* komposit tegangan didistribusikan pada setiap layer yang menyebabkan nilai tegangan yang terjadi semakin menurun.

4.1.1.5.2 Hasil Simulasi dan Pembahasan Nilai Total Deformasi

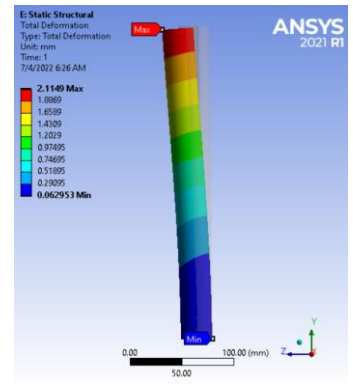
Hasil simulasi nilai total deformasi secara keseluruhan dari variasi ketebalan saat diberi pembebanan level P3 3220 N dapat dilihat pada Gambar 4.11 di bawah ini.



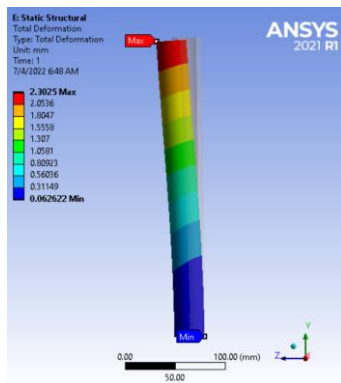
(a)



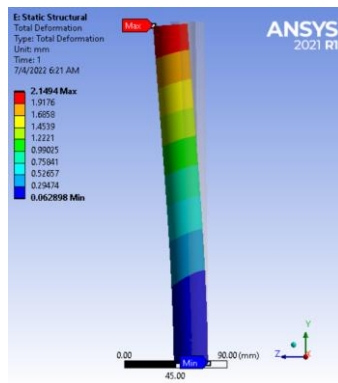
(d)



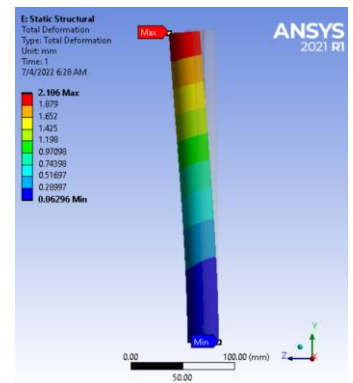
(g)



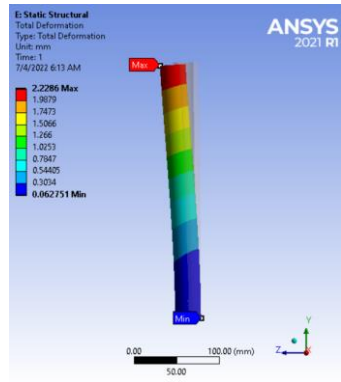
(b)



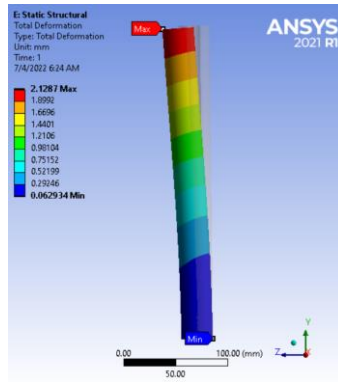
(e)



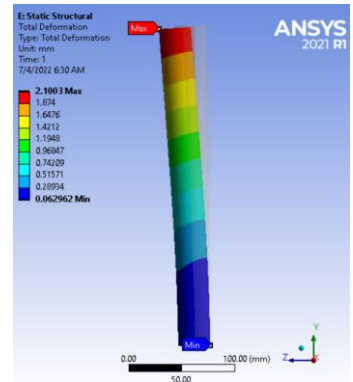
(h)



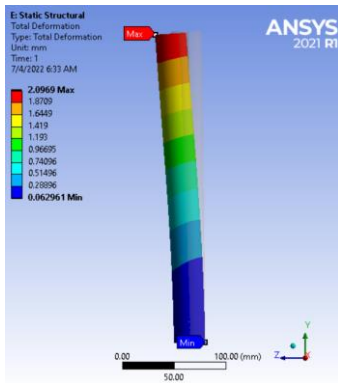
(c)



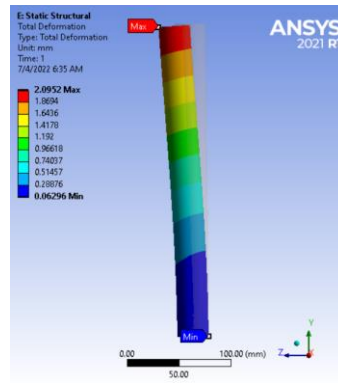
(f)



(i)

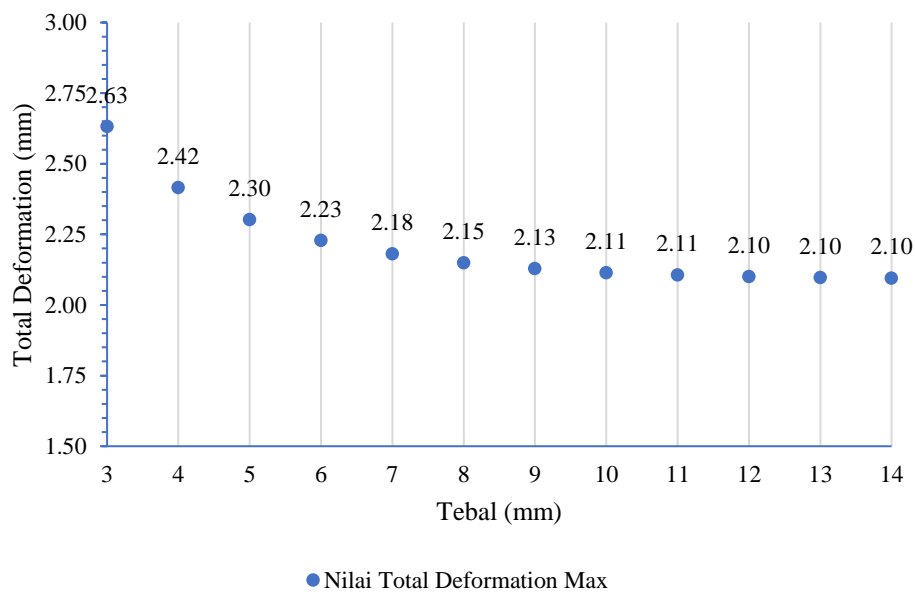


(j)



(k)

Gambar 4.11 Hasil Simulasi Nilai Total Deformasi Setiap Variasi Ketebalan pada Pengujian *Heel strike* (a) 4 mm, (b) 5 mm, (c) 6 mm, (d) 7 mm, (e) 8 mm, (f) 9 mm, (g) 10 mm, (h) 11 mm, (i) 12 mm, (j) 13 mm, (k) 14 mm



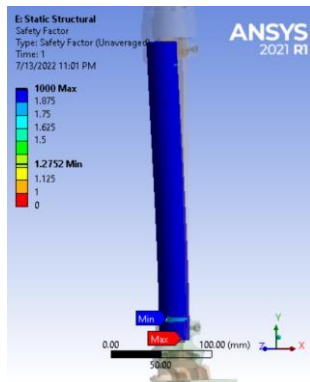
Gambar 4.12 Grafik Hasil Simulasi Variasi Ketebalan terhadap Nilai Total Deformasi Maksimum pada Pengujian *Heel strike*

Berdasarkan grafik dari hasil simulasi bahwa setelah dilakukan penambahan ketebalan, diperoleh grafik hubungan antara variasi ketebalan dengan nilai total deformasi yang dialami oleh desain *pylon*. Pada gambar grafik diatas tren mengalami penurunan, dimana grafik mengalami penurunan dari ketebalan 3 mm sampai dengan ketebalan 14 mm. Untuk tebal 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm, 8 mm, 9 mm, 10 mm, 11 mm, 12 mm, 13 mm, 14 mm didapatkan nilai tegangan von-mises maksimum secara berturut-turut adalah 2,63 mm, 2,42 mm, 2,30 mm, 2,23 mm, 2,18 mm, 2,15 mm, 2,13 mm, 2,11 mm, 2,11 mm, 2,10mm , 2,10 mm, 2,10 mm. Titik maksimum nilai dari total deformasi maksimum yang dialami oleh *pylon* berada pada tebal 3 mm dengan nilai deformasi sebesar 2,63 mm. Sedangkan titik minimum berada

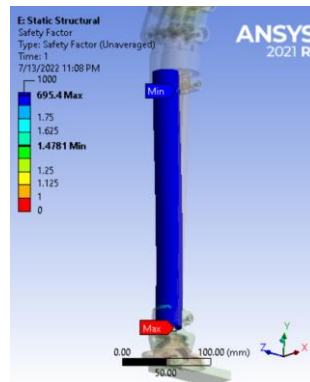
pada tebal 14 mm dengan nilai 2,10 mm. Dapat dilihat dari grafik diatas bahwa terjadi penurunan nilai deformasi seiring dengan bertambahnya ketebalan. Hal tersebut bisa terjadi dikarenakan setiap penambahan ketebalan maka jumlah layer dari komposit semakin bertambah, sehingga menyebabkan material komposit semakin menjadi lebih kaku. Apabila material komposit semakin kaku maka nilai deformasi yang terjadi juga semakin kecil.

4.1.1.5.3 Hasil Simulasi dan Pembahasan Nilai *Safety factor*

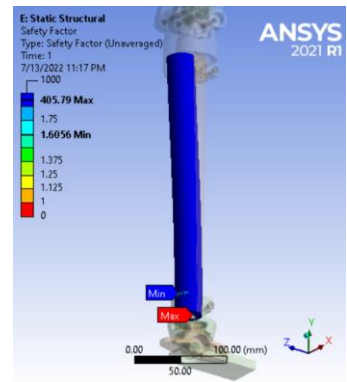
Hasil simulasi nilai *safety factor* secara keseluruhan dari variasi ketebalan saat diberi pembebanan level P3 3220 N dapat dilihat pada Gambar 4.13 di bawah ini.



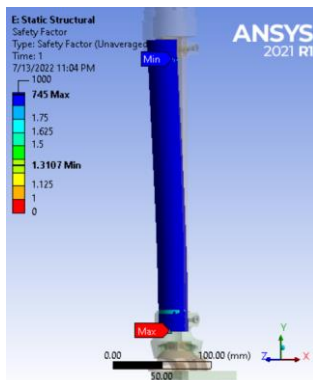
(a)



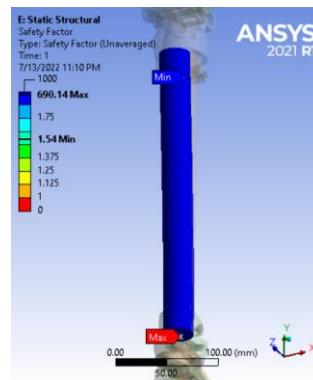
(d)



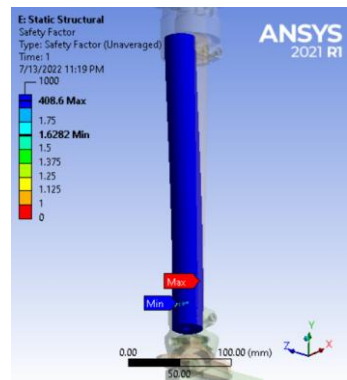
(g)



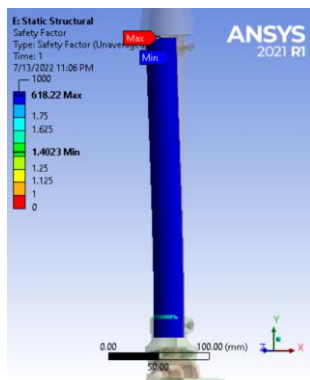
(b)



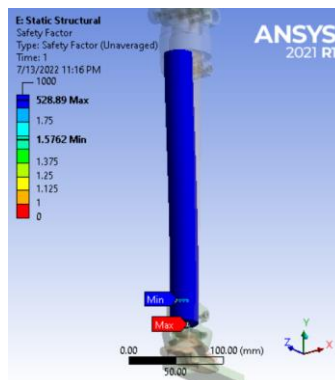
(e)



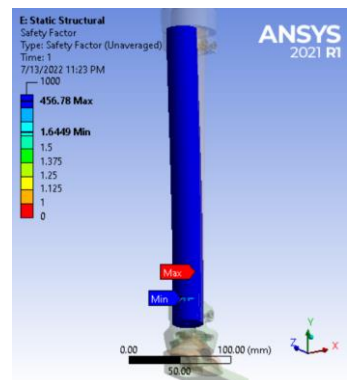
(h)



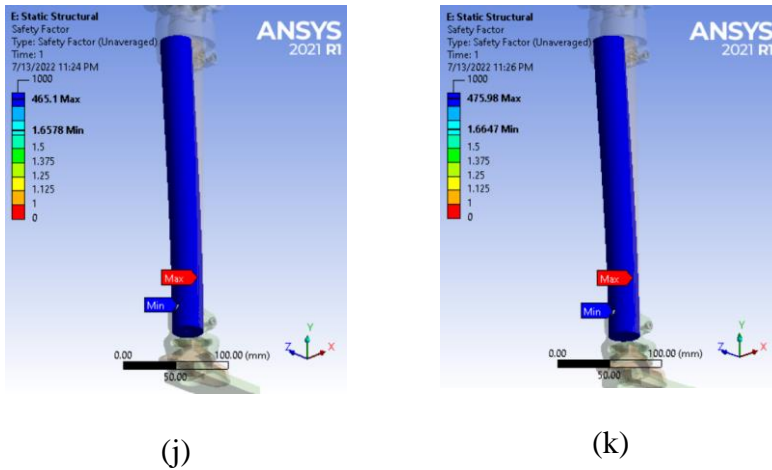
(c)



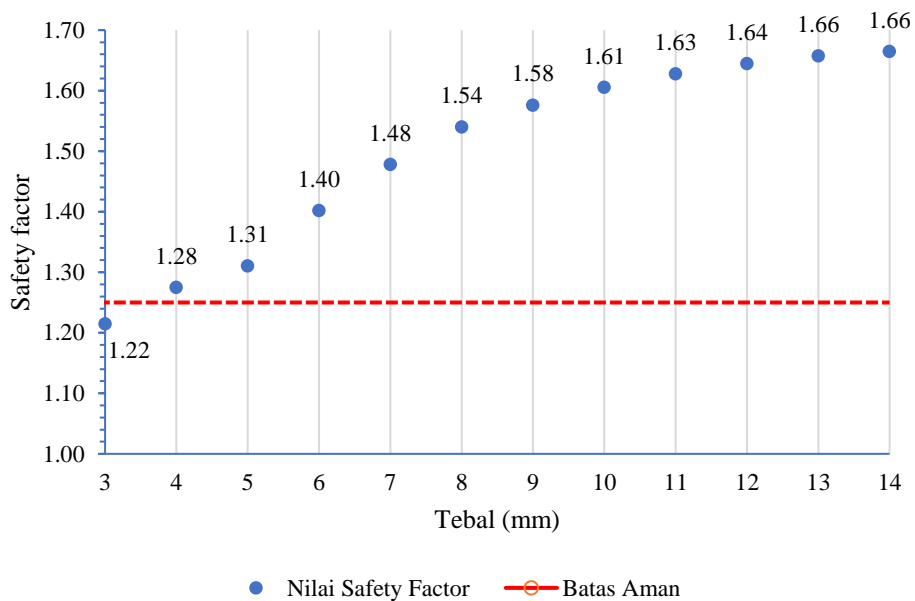
(f)



(i)



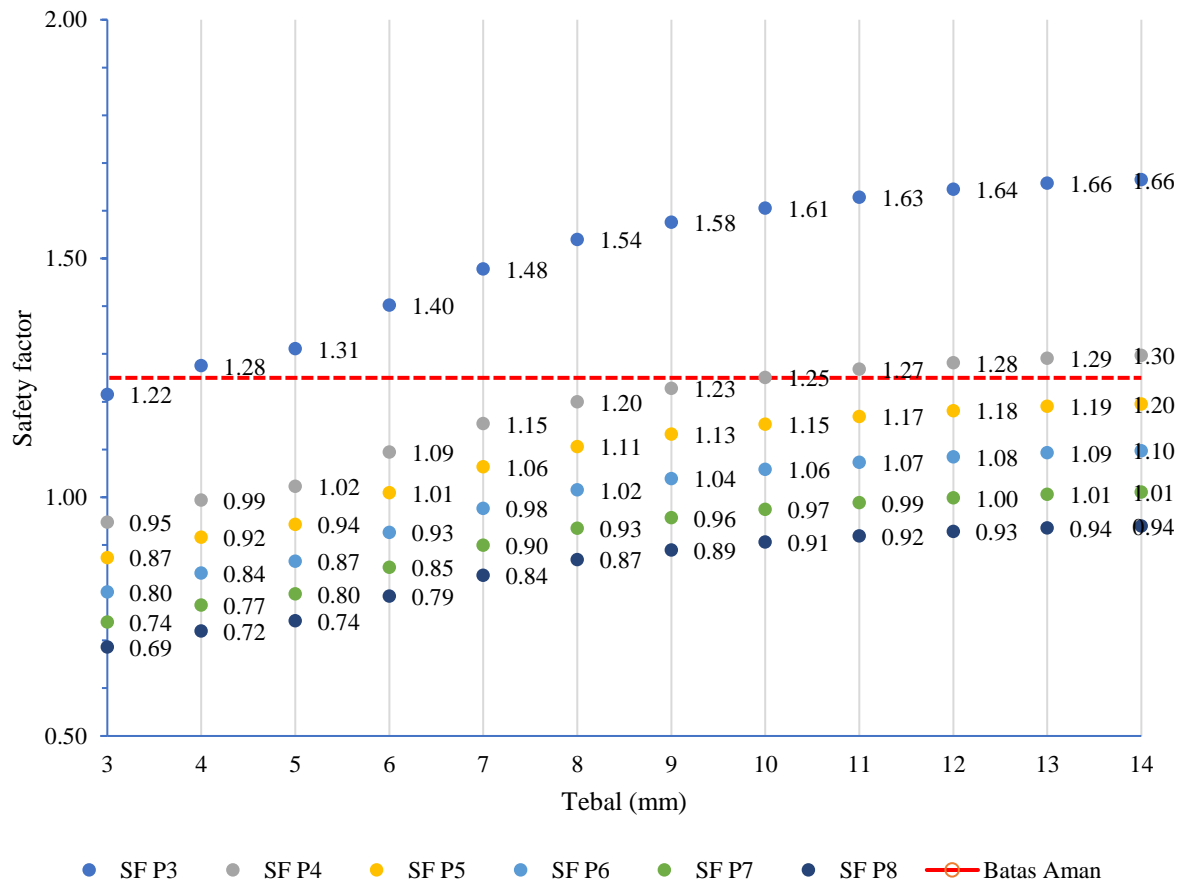
Gambar 4.13 Hasil Simulasi Nilai *Safety factor* Setiap Variasi Ketebalan pada Pengujian *Heel strike* (a) 4 mm, (b) 5 mm, (c) 6 mm, (d) 7 mm, (e) 8 mm, (f) 9 mm, (g) 10 mm, (h) 11 mm, (i) 12 mm, (j) 13 mm, (k) 14 mm



Gambar 4.14 Grafik Hasil Simulasi Variasi Ketebalan terhadap Nilai *Safety factor* pada Pengujian *Heel strike*

Berdasarkan grafik dari hasil simulasi bahwa setelah dilakukan penambahan ketebalan, diperoleh grafik hubungan antara variasi ketebalan dengan nilai *safety factor* yang dialami oleh desain *pylon*. Pada gambar grafik diatas tren mengalami kenaikan, dimana grafik mengalami kenaikan dari ketebalan 3 mm sampai dengan ketebalan 14 mm. Untuk tebal 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm, 8 mm, 9 mm, 10 mm, 11 mm, 12 mm, 13 mm, 14 mm didapatkan nilai *safety factor* secara berturut-turut adalah 1,22; 1,28; 1,31; 1,40; 1,48; 1,54; 1,61; 1,63; 1,64; 1,66; 1,66. Titik maksimum nilai *safety factor* yang dialami oleh *pylon* berada pada tebal 14 mm dengan nilai *safety factor* sebesar 1,66. Sedangkan titik minimum berada pada tebal 3 mm dengan nilai *safety factor* sebesar 1,22. Nilai *safety factor* pada ketebalan 3 mm tidak aman

dikarenakan masih dibawah batas aman *safety factor* dari alat prostetik. Dapat dilihat dari grafik diatas bahwa terjadi kenaikan nilai *safety factor* seiring dengan bertambahnya ketebalan. Hal tersebut menjelaskan bahwa penyusunan material komposit tersebut semakin aman.



Gambar 4.15 Grafik Hasil Simulasi Variasi Ketebalan terhadap Nilai *Safety factor* pada Pengujian *Heel strike* di Seluruh Level

Berdasarkan grafik dari hasil simulasi diatas pada pembebanan level P4 diberikan beban 4130 N nilai *safety factor* untuk tebal 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm, 8 mm, 9 mm, 10 mm, 11 mm, 12 mm, 13 mm, 14 mm didapatkan nilai *safety factor* secara berturut-turut adalah 0,95; 0,99; 1,02; 1,09; 1,15; 1,20; 1,23; 1,25; 1,27; 1,28; 1,29; 1,30. Pada pembebanan level P5 diberikan beban 4480 N nilai *safety factor* untuk tebal 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm, 8 mm, 9 mm, 10 mm, 11 mm, 12 mm, 13 mm, 14 mm didapatkan nilai *safety factor* secara berturut-turut adalah 0,87; 0,92; 0,94; 1,01; 1,06; 1,11; 1,13; 1,15; 1,17; 1,18; 1,19; 1,20. Pada pembebanan level P6 diberikan beban 4880 N nilai *safety factor* untuk tebal 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm, 8 mm, 9 mm, 10 mm, 11 mm, 12 mm, 13 mm, 14 mm didapatkan nilai *safety factor* secara berturut-turut adalah 0,80; 0,84; 0,87; 0,93; 0,98; 1,02; 1,04; 1,06; 1,07; 1,08; 1,09; 1,10. Pada pembebanan level P7 diberikan beban 5300 N nilai *safety factor* untuk tebal 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm, 8 mm, 9 mm, 10 mm, 11 mm, 12 mm, 13 mm, 14 mm didapatkan nilai *safety factor* secara berturut-turut adalah 0,74; 0,77; 0,80; 0,85; 0,90; 0,93; 0,96; 0,97; 0,99; 1,00; 1,01; 1,01. Pada pembebanan level P8 diberikan beban 5700 N nilai *safety factor* untuk tebal 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm, 8 mm, 9 mm, 10 mm, 11 mm, 12 mm, 13 mm, 14 mm didapatkan nilai *safety factor* secara berturut-turut adalah 0,69; 0,72; 0,74;

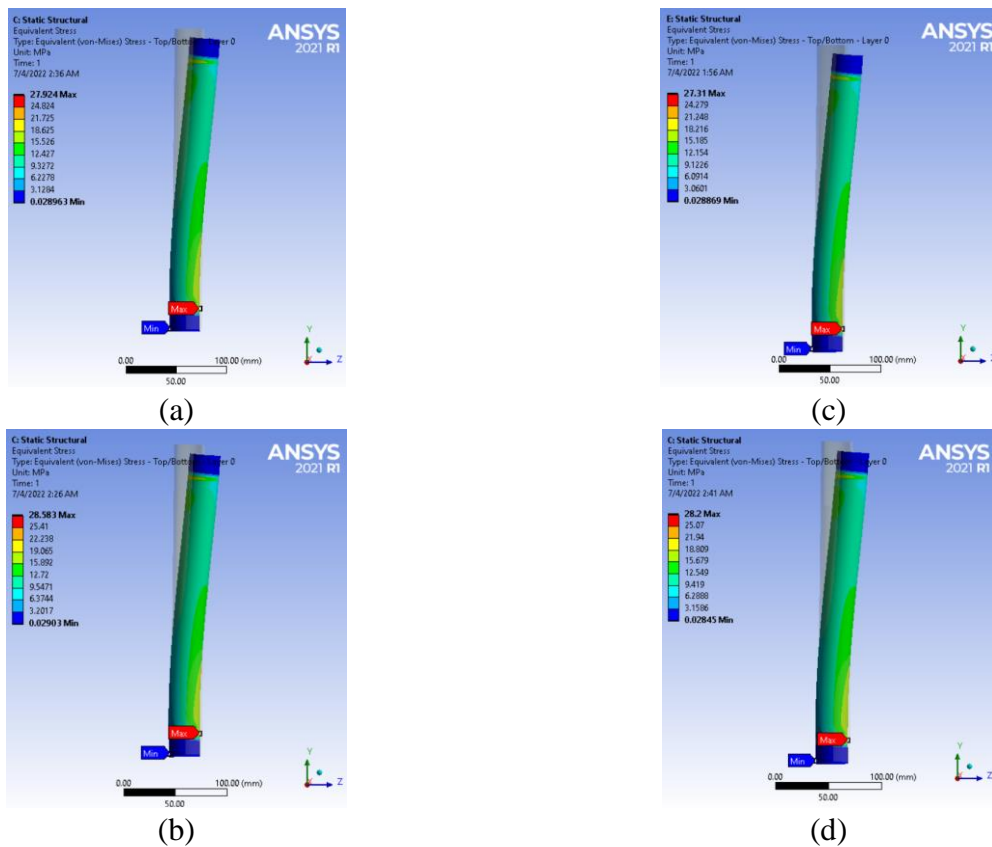
0,79; 0,84; 0,89; 0,91; 0,92; 0,93; 0,94; 0,94. Untuk hasil di pembebanan level P4 di ketebalan 10 mm desain *pylon* aman karena sudah diatas batas aman *safety factor* dari alat prostetik. Untuk hasil di pembebanan level P5, P6, P7, dan P8 dari setiap variasi ketebalan desain *pylon* tidak aman dikarenakan masih dibawah batas aman *safety factor* dari alat prostetik.

4.1.2 Hasil Simulasi Pengujian *Pylon* Kaki Palsu pada Kondisi *Toe-off*

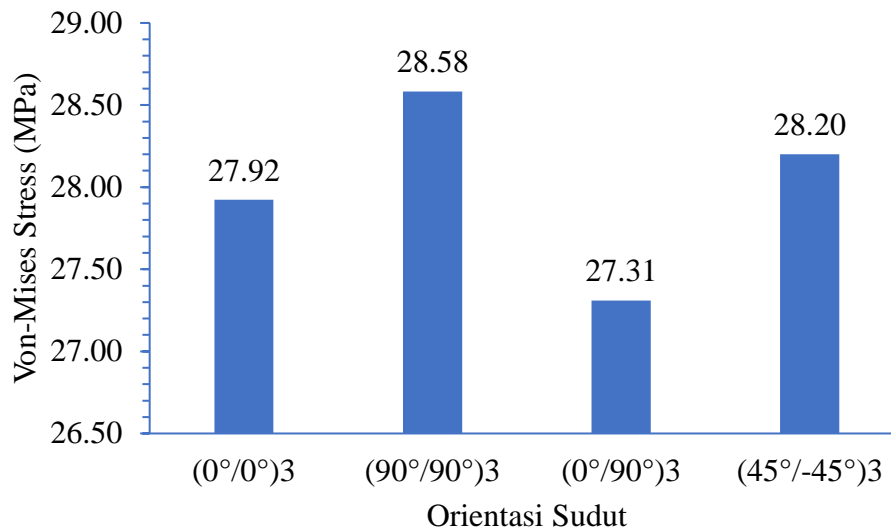
Pada tahap ini dilakukan pengujian *toe-off* pada desain *pylon* kaki palsu dengan menghasilkan kombinasi sudut dan variasi ketebalan yang akan dibandingkan dengan nilai tegangan maksimum von mises, total deformasi, nilai kegagalan tsai-wu dan *safety factor*. Pembebanan yang diberikan sebesar 2790 N pada level P3.

4.1.2.1 Hasil Simulasi dan Pembahasan Tegangan Von-Mises

Pada simulasi yang dilakukan berdasarkan penelitian ini didapatkan nilai tegangan von-mises. Tegangan von-mises adalah nilai yang menjadi tolak ukur untuk material mengalami kegagalan atau tidak. Hasil simulasi untuk variasi sudut (0°/0°), (90°/90°), (0°/90°), (45°/-45°) diapaparkan pada Gambar 4.16. Untuk hasil dari semua variasi sudut dipaparkan pada Gambar 4.17.



Gambar 4.16 Hasil Simulasi Tegangan Von-Mises Setiap Variasi Sudut pada Pengujian *Toe-off* (a) (0°/0°), (b) (90°/90°), (c) (0°/90°), (d) (45°/-45°)

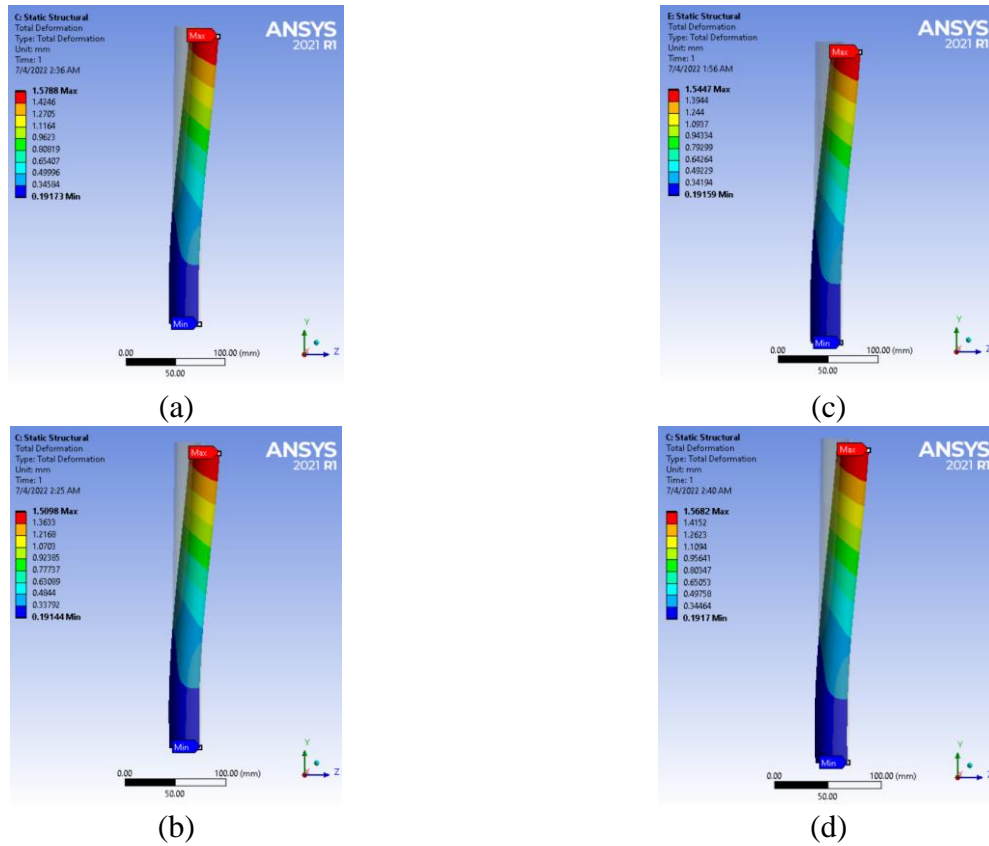


Gambar 4.17 Grafik Hasil Simulasi Variasi Sudut Serat terhadap Tegangan Von-mises Maksimum pada Pengujian *Toe-off*

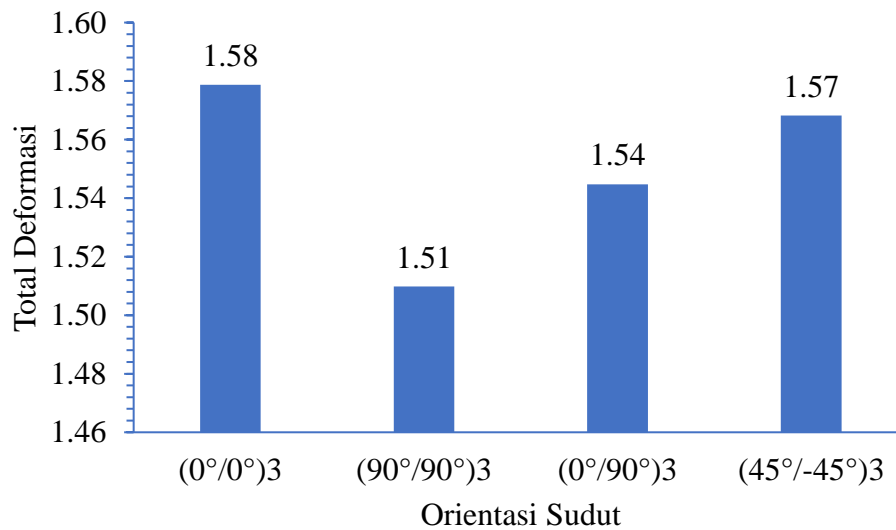
Dari data hasil simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.17 diatas, diketahui *pylon* dengan menggunakan material komposit pada pengujian *toe-off* dengan pemberian beban berdasarkan standar 2790 N diperoleh bahwa untuk orientasi sudut $(0^\circ/0^\circ)_3$ nilai maksimum tegangan von-mises sebesar 27,92 MPa, dan untuk orientasi sudut $(90^\circ/90^\circ)_3$ didapatkan nilai maksimum tegangan von-mises sebesar 28,58 MPa. Untuk penyusunan material komposit dengan orientasi sudut $(0^\circ/90^\circ)_3$ didapatkan nilai maksimum tegangan von-mises sebesar 27,31 MPa, dan untuk penyusunan dengan orientasi sudut $(45^\circ/-45^\circ)_3$ didapatkan nilai maksimum tegangan von-mises sebesar 28,20 MPa. Secara keseluruhan nilai tegangan von-mises tertinggi didapat pada orientasi sudut $(90^\circ/90^\circ)_3$ sebesar 28,58 MPa dan tegangan von-mises terendah didapat pada orientasi sudut $(0^\circ/90^\circ)_3$ sebesar 27,31 MPa. Berdasarkan teori, tegangan von-mises akan dibandingkan dengan strength dari material tersebut. Jadi apabila tegangan yang dialami pada material semakin besar maka material tersebut semakin tidak aman. Sebaliknya jika tegangan yang dialami semakin kecil maka tingkat keamanan material tersebut semakin baik.

4.1.2.2 Hasil Simulasi dan Pembahasan Nilai Total Deformasi

Total deformasi yang terjadi pada *pylon* dapat dilihat pada hasil simulasi yang dipaparkan Gambar 4.18.



Gambar 4.18 Hasil Simulasi Total Deformasi Setiap Variasi Sudut pada Pengujian *Toe-off*
 (a) $(0^\circ/0^\circ)$, (b) $(90^\circ/90^\circ)$, (c) $(0^\circ/90^\circ)$, (d) $(45^\circ/-45^\circ)$

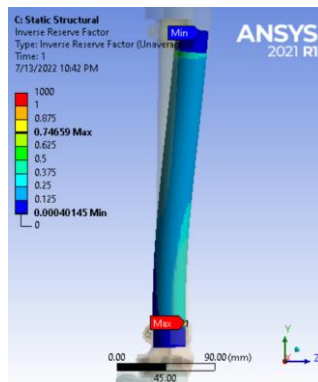


Gambar 4.19 Grafik Hasil Simulasi Variasi Sudut Serat terhadap Total Deformasi Maksimum pada Pengujian *Toe-off*

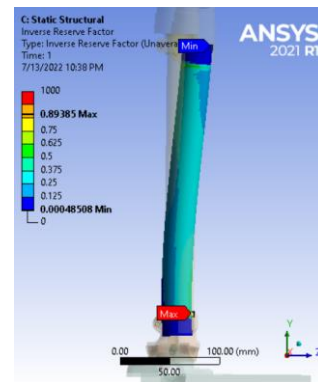
Berdasarkan Gambar 4.19 merupakan hasil simulasi variasi orientasi sudut terhadap nilai total deformasi pada pengujian *toe-off* untuk *pylon* menggunakan standar pengujian ISO 10328(2016) dengan pembebanan 2790 N. Diperoleh nilai deformasi maksimum pada penyusunan material komposit dengan orientasi sudut $(0^\circ/0^\circ)_3$ sebesar 1,58 mm, dan untuk orientasi sudut $(90^\circ/90^\circ)_3$ didapatkan nilai deformasi maksimum sebesar 1,51 mm. Untuk penyusunan material komposit dengan orientasi sudut $(0^\circ/90^\circ)_3$ didapatkan nilai deformasi maksimum sebesar 1,54 mm. Dan untuk orientasi sudut $(45^\circ/-45^\circ)_3$ didapatkan nilai deformasi maksimum sebesar 1,57 mm. Secara keseluruhan nilai deformasi tertinggi didapat pada variasi $(0^\circ/0^\circ)_3$ sebesar 1,58 mm dan nilai deformasi terendah didapat pada variasi $(90^\circ/90^\circ)_3$ sebesar 1,51 mm. Berdasarkan teori apabila deformasi yang dialami pada material semakin besar maka penyusunan material komposit tersebut semakin tidak kaku alias lentur. Sebaliknya jika deformasi yang dialami semakin kecil maka tingkat penyusunan material komposit tersebut semakin kaku. Berdasarkan data grafik diatas didapat bahwa orientasi sudut $(90^\circ/90^\circ)_3$ memiliki tingkat kekakuan yang terbaik dibandingkan variasi sudut lainnya.

4.1.2.3 Hasil Simulasi dan Pembahasan Nilai Kegagalan Tsai-Wu

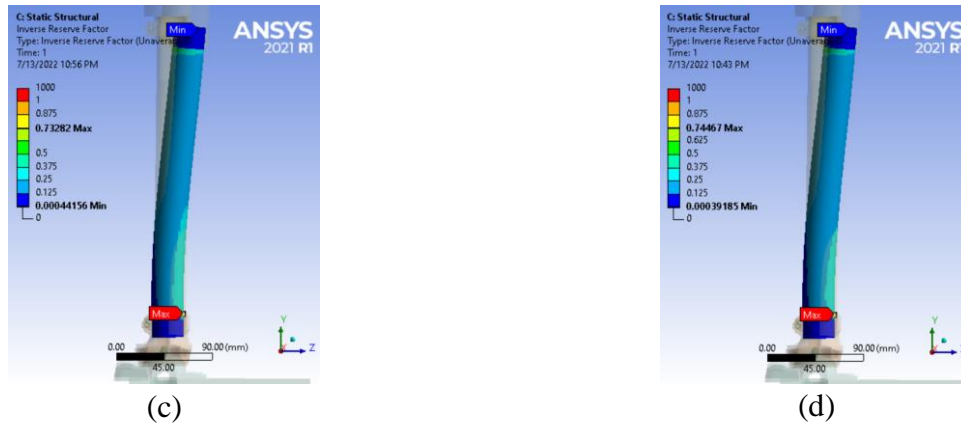
Nilai faktor kegagalan ini adalah nilai menjadi dasar untuk menentukan apakah material komposit yang merupakan material orthotropic, mengalami kegagalan atau tidak. Jika material komposit mengalami kegagalan maka hal ini mendefinisikan bahwa *pylon* akan mengalami kegagalan, yang artinya *pylon* dengan kombinasi sudut tersebut tidak memiliki kekuatan untuk menahan pembebanan yang ada. Berikut hasil simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.20.



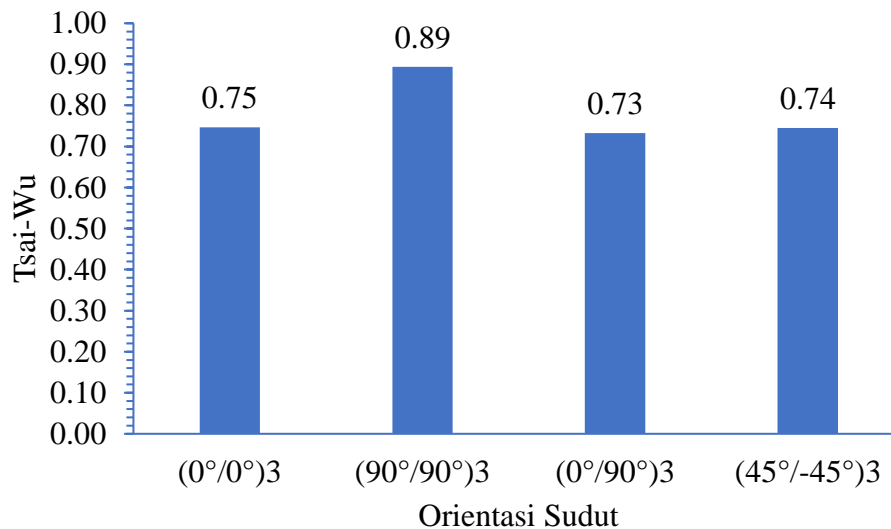
(a)



(b)



Gambar 4.20 Hasil Simulasi Nilai Kegagalan Tsai-Wu Setiap Variasi Sudut pada Pengujian *Toe-off* (a) $(0^\circ/0^\circ)$, (b) $(90^\circ/90^\circ)$, (c) $(0^\circ/90^\circ)$, (d) $(45^\circ/-45^\circ)$



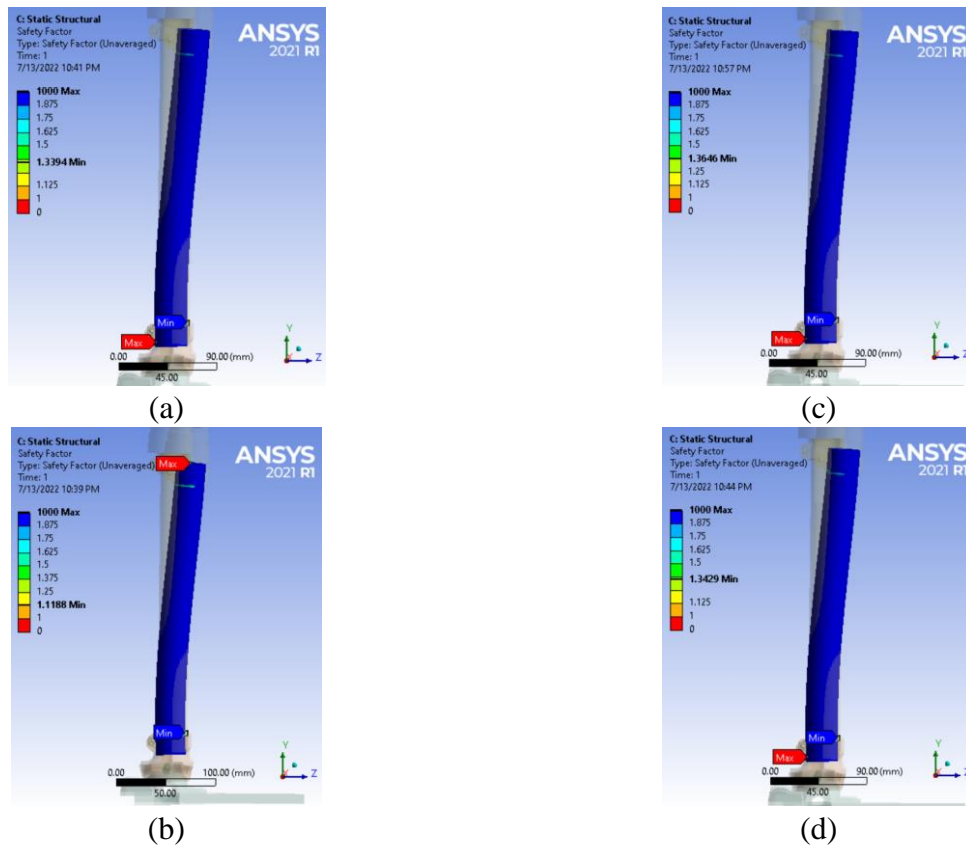
Gambar 4.21 Grafik Hasil Simulasi Variasi Sudut Serat terhadap Nilai Tsai-Wu pada Pengujian *Toe-off*

Dari data hasil simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.21 diatas, diketahui *pylon* dengan penyusunan material komposit untuk orientasi sudut $(0^\circ/0^\circ)_3$ pada pengujian *toe-off* nilai faktor kegagalan tsai-wu yang dialami oleh *pylon* sebesar 0,75, dan untuk orientasi sudut $(90^\circ/90^\circ)_3$ didapatkan nilai faktor kegagalan tsai-wu sebesar 0,89. Untuk penyusunan material komposit dengan orientasi sudut $(0^\circ/90^\circ)_3$ didapatkan nilai faktor kegagalan tsai-wu sebesar 0,73, dan untuk orientasi sudut $(45^\circ/-45^\circ)_3$ didapatkan nilai faktor kegagalan tsai-wu sebesar 0,74. Secara keseluruhan nilai kegagalan tsai-wu tertinggi didapat pada variasi $(90^\circ/90^\circ)_3$ sebesar 0,89 dan nilai tsai-wu terendah didapat pada variasi $(0^\circ/90^\circ)_3$ sebesar 0,74. Berdasarkan teori, apabila nilai kegagalan tsai-wu pada material semakin kecil maka penyusunan material komposit tersebut semakin aman dikarenakan kekuatan yang dimiliki oleh susunan komposit tersebut lebih kuat dibandingkan tegangan yang dialami. Sebaliknya jika nilai kegagalan tsai-

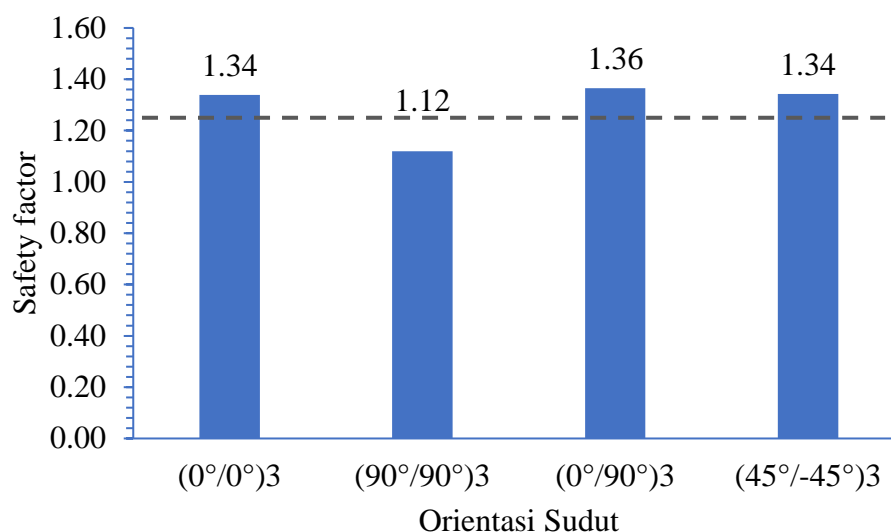
wu yang dialami semakin semakin besar maka tingkat penyusunan material komposit semakin tidak aman. Batas aman nilai kegagalan tsai-wu bernilai 1, jika lebih dari 1 maka komposit tersebut dikatakan gagal menerima pembebanan tersebut.

4.1.2.4 Hasil Simulasi dan Pembahasan Nilai *Safety factor*

Nilai faktor keamanan adalah nilai yang menjadi dasar untuk menentukan apakah material yang digunakan mengalami kegagalan atau tidak. Jika material komposit mengalami kegagalan maka hal ini mendefinisikan bahwa desain *pylon* mengalami kegagalan, yang mana artinya *pylon* dengan penyusunan orientasi sudut tersebut tidak memiliki kekuatan untuk menahan pembebanan yang diberikan. Berikut hasil simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.22.



Gambar 4.22 Hasil Simulasi Nilai *Safety factor* Setiap Variasi Sudut pada Pengujian *Toe-off* (a) (0°/0°), (b) (90°/90°), (c) (0°/90°), (d) (45°/-45°)



Gambar 4.23 Grafik Hasil Simulasi Variasi Sudut Serat terhadap Nilai *Safety factor* pada Pengujian *Toe-off*

Berdasarkan Gambar 4.23 merupakan hasil simulasi variasi orientasi sudut terhadap *safety factor* pada pengujian *toe-off* untuk *pylon* menggunakan standar pengujian ISO 10328(2016) dengan pembebanan 2790 N. Diperoleh nilai *safety factor* pada penyusunan komposit dengan orientasi sudut $(0^\circ/0^\circ)_3$ sebesar 1,34, dan untuk orientasi sudut $(90^\circ/90^\circ)_3$ didapatkan nilai *safety factor* sebesar 1,12. Untuk penyusunan material komposit dengan orientasi sudut $(0^\circ/90^\circ)_3$ didapatkan nilai *safety factor* sebesar 1,36. Dan untuk orientasi sudut $(45^\circ/-45^\circ)_3$ didapatkan nilai *safety factor* sebesar 1,34. Secara keseluruhan nilai *safety factor* tertinggi didapat pada orientasi sudut $(0^\circ/90^\circ)_3$ sebesar 1,36 dan nilai *safety factor* terendah didapat pada orientasi sudut $(90^\circ/90^\circ)_3$ sebesar 1,12. Berdasarkan teori, apabila nilai *safety factor* yang dialami pada desain *pylon* semakin besar maka penyusunan material komposit tersebut semakin aman dikarenakan kekuatan yang dimiliki oleh susunan material komposit tersebut lebih kuat dibandingkan tegangan yang dialami. Sebaliknya jika nilai *safety factor* yang dialami pada desain *pylon* semakin rendah maka penyusunan material komposit tersebut semakin tidak aman. Batas aman dari nilai *safety factor* adalah 1, jika nilai *safety factor* dibawah 1 maka bisa dikatakan bahwa desain dari *pylon* tidak aman. *Safety factor* pada alat prostetik akan aman jika faktor keamanannya sama dengan atau lebih tinggi dari 1,25.(Tahir & Kadhim, 2021). Berdasarkan hasil simulasi dari grafik diatas bahwa untuk orientasi sudut $(0^\circ/0^\circ)_3$, $(0^\circ/90^\circ)_3$, $(45^\circ/-45^\circ)_3$ nilai *safety factor* dibilang aman karena didapatkan nilai *safety factor* diatas 1,25, sedangkan untuk orientasi sudut $(90^\circ/90^\circ)_3$ bahwa desain *pylon* dari orientasi sudut tersebut dapat dikatakan tidak aman karena dibawah 1,25. Berdasarkan hasil dari simulasi dengan orientasi sudut terbaik yaitu orientasi $(0^\circ/90^\circ)_3$ akan dijadikan acuan untuk melakukan variasi ketebalan untuk memperoleh nilai *safety factor* yang lebih aman.

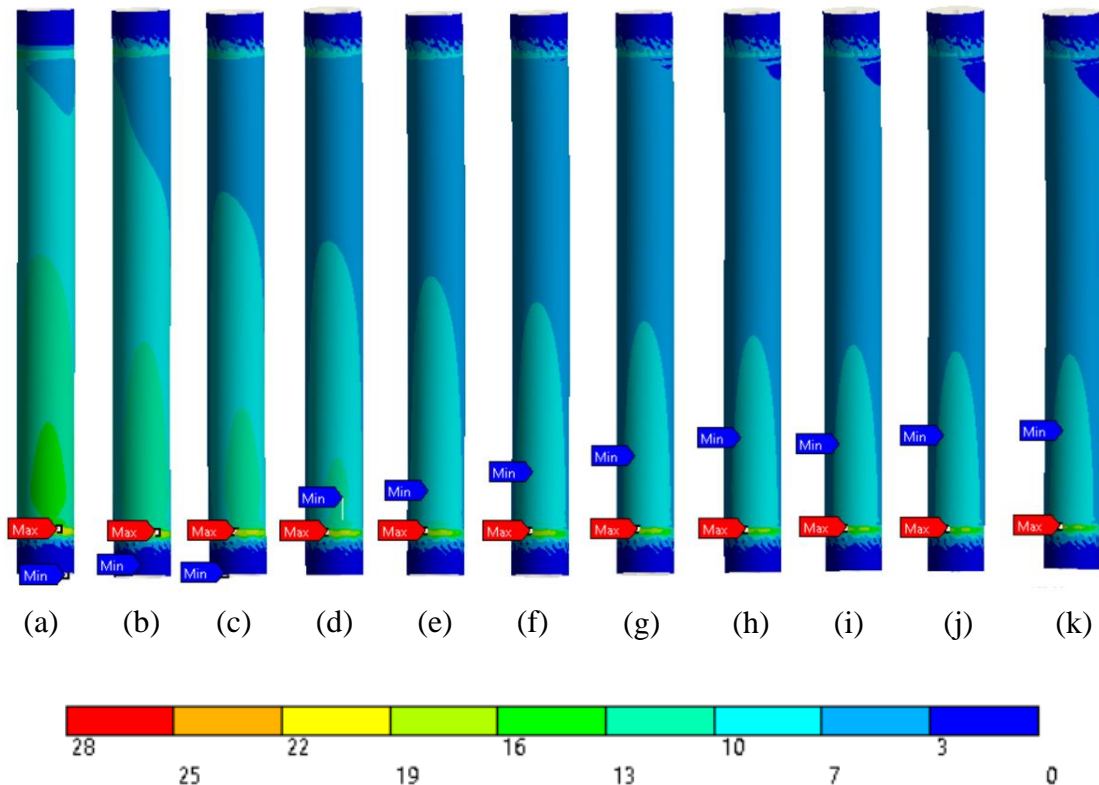
4.1.2.5 Hasil Simulasi dan Pembahasan Variasi Ketebalan

Variasi ketebalan dilakukan untuk memperoleh desain *pylon* yang lebih aman terhadap pengujian pembebanan sesuai standar ISO 10328(2016). Penyusunan orientasi sudut yang akan digunakan untuk variasi ketebalan adalah orientasi sudut terbaik yaitu sudut $(0^\circ/90^\circ)$. Pada tahap ini dilakukan pengujian *toe-off* pada desain *pylon* kaki palsu dengan variasi ketebalan

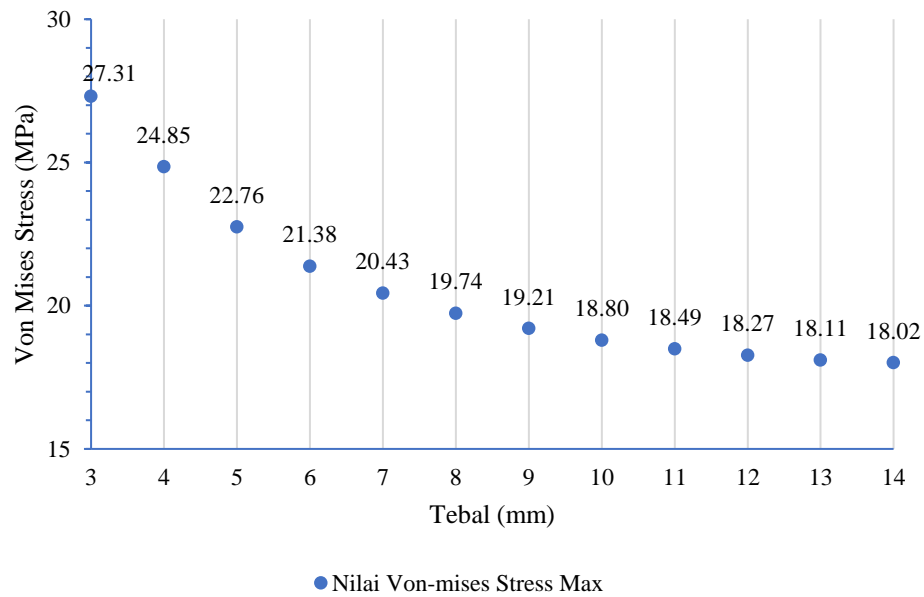
yang akan dibandingkan dengan nilai tegangan maksimum von mises, total deformasi, dan *safety factor*. Pembebanan yang diberikan dari setiap level.

4.1.2.5.1 Hasil Simulasi dan Pembahasan Nilai Tegangan Von-Mises

Hasil simulasi nilai tegangan von mises secara keseluruhan dari variasi ketebalan saat diberi pembebanan level P3 2790 N dapat dilihat pada Gambar 4.24 di bawah ini.



Gambar 4.24 Hasil Simulasi Nilai Tegangan Von-Mises Setiap Variasi Ketebalan pada Pengujian *Toe-off* (a) 4 mm, (b) 5 mm, (c) 6 mm, (d) 7 mm, (e) 8 mm, (f) 9 mm, (g) 10 mm, (h) 11 mm, (i) 12 mm, (j) 13 mm, (k) 14 mm

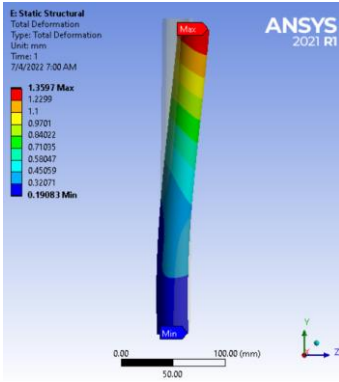


Gambar 4.25 Grafik Hasil Simulasi Variasi Ketebalan terhadap Nilai Tegangan von-mises pada Pengujian *Toe-off*

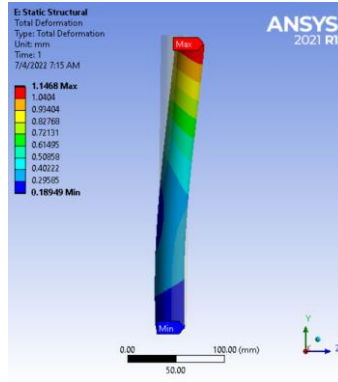
Berdasarkan grafik dari hasil simulasi bahwa setelah dilakukan penambahan ketebalan, diperoleh grafik hubungan antara variasi ketebalan dengan tegangan von-mises yang dialami oleh desain *pylon*. Pada gambar grafik diatas tren mengalami penurunan, dimana grafik mengalami penurunan dari ketebalan 3 mm sampai dengan ketebalan 14 mm. Untuk tebal 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm, 8 mm, 9 mm, 10 mm, 11 mm, 12 mm, 13 mm, 14 mm didapatkan nilai tegangan von-mises maksimum secara berturut-turut adalah 27,31 MPa, 24,85 MPa, 22,76 MPa, 21,38 MPa, 20,43 MPa, 19,74 MPa, 19,21 MPa, 18,80 MPa, 18,49 MPa, 18,27 MPa, 18,11 MPa, 18,02 MPa. Titik maksimum nilai dari tegangan von-mises maksimum yang dialami oleh *pylon* berada pada tebal 3 mm dengan nilai tegangan sebesar 27,31 MPa. Sedangkan titik minimum berada pada tebal 14 mm dengan nilai 18,02 MPa. Dapat dilihat dari grafik diatas bahwa terjadi penurunan tegangan von-mises seiring dengan bertambahnya ketebalan. Hal tersebut bisa terjadi dikarenakan setiap penambahan ketebalan maka jumlah layer dari komposit semakin bertambah, sehingga ketika diberikan pembebanan kepada *pylon* komposit tegangan didistribusikan pada setiap layer yang menyebabkan nilai tegangan yang terjadi semakin menurun.

4.1.2.5.2 Hasil Simulasi dan Pembahasan Nilai Total Deformasi

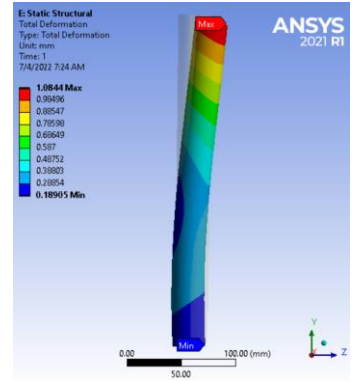
Hasil simulasi nilai total deformasi secara keseluruhan dari variasi ketebalan saat diberi pembebanan level P3 2790 N dapat dilihat pada Gambar 4.26.



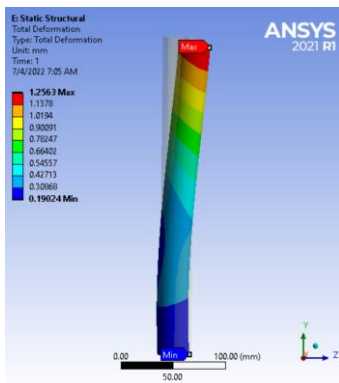
(a)



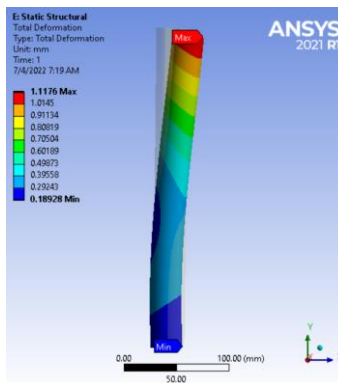
(d)



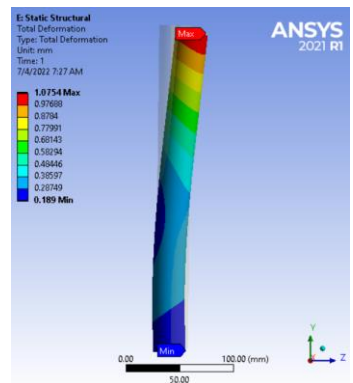
(g)



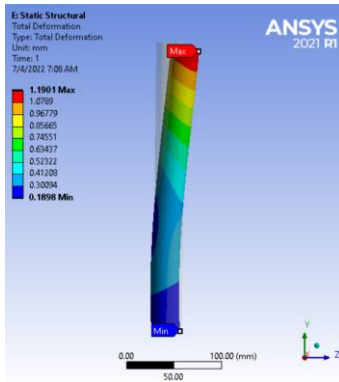
(b)



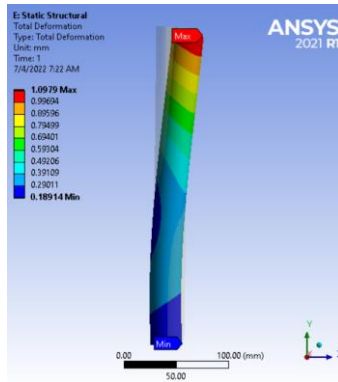
(e)



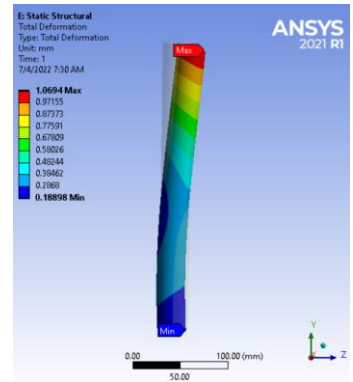
(h)



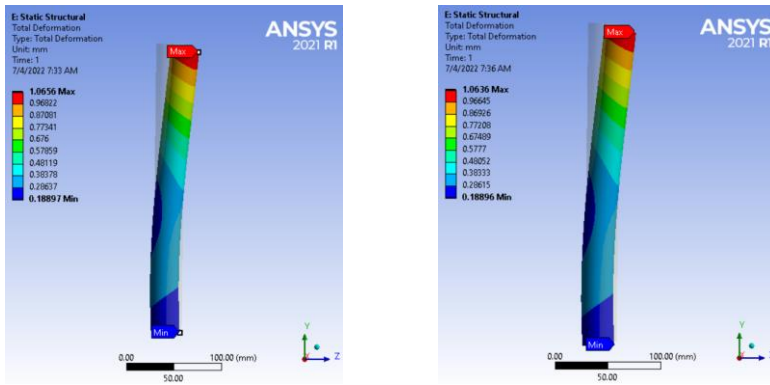
(c)



(f)



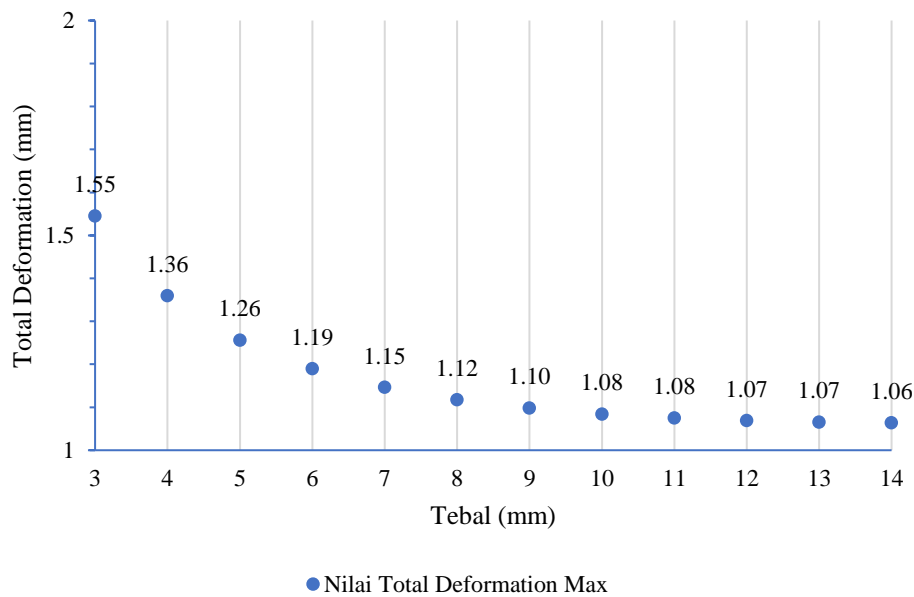
(i)



(j)

(k)

Gambar 4.26 Hasil Simulasi Nilai Total Deformasi Setiap Variasi Ketebalan pada Pengujian *Toe-off* (a) 4 mm, (b) 5 mm, (c) 6 mm, (d) 7 mm, (e) 8 mm, (f) 9 mm, (g) 10 mm, (h) 11 mm, (i) 12 mm, (j) 13 mm, (k) 14 mm



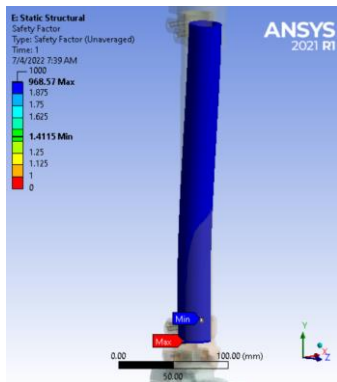
Gambar 4.27 Grafik Hasil Simulasi Variasi Ketebalan terhadap Nilai Total Deformasi pada Pengujian *Toe-off*

Berdasarkan grafik dari hasil simulasi bahwa setelah dilakukan penambahan ketebalan, diperoleh grafik hubungan antara variasi ketebalan dengan nilai total deformasi yang dialami oleh desain *pylon*. Pada gambar grafik diatas tren mengalami penurunan, dimana grafik mengalami penurunan dari ketebalan 3 mm sampai dengan ketebalan 14 mm. Untuk tebal 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm, 8 mm, 9 mm, 10 mm, 11 mm, 12 mm, 13 mm, 14 mm didapatkan nilai tegangan von-mises maksimum secara berturut-turut adalah 1,55 mm, 1,36 mm, 1,26 mm, 1,19 mm, 1,15 mm, 1,12 mm, 1,10 mm, 1,08 mm, 1,08 mm, 1,07 mm , 1,07 mm, 1,06 mm. Titik maksimum nilai dari total deformasi maksimum yang dialami oleh *pylon* berada pada tebal 3 mm dengan nilai deformasi sebesar 1,55 mm. Sedangkan titik minimum

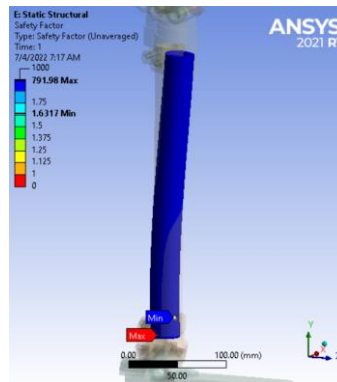
berada pada tebal 14 mm dengan nilai 1,06 mm. Dapat dilihat dari grafik diatas bahwa terjadi penurunan nilai deformasi seiring dengan bertambahnya ketebalan. Hal tersebut bisa terjadi dikarenakan setiap penambahan ketebalan maka jumlah layer dari komposit semakin bertambah, sehingga menyebabkan material komposit semakin menjadi lebih kaku. Apabila material komposit semakin kaku maka nilai deformasi yang terjadi juga semakin kecil.

4.1.2.5.3 Hasil Simulasi dan Pembahasan Nilai *Safety factor*

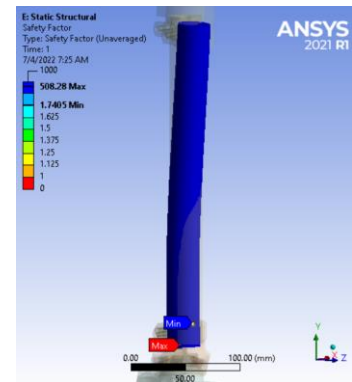
Hasil simulasi nilai *safety factor* secara keseluruhan dari variasi ketebalan saat diberi pembebanan level P3 2790 N dapat dilihat pada Gambar 4.28 di bawah ini.



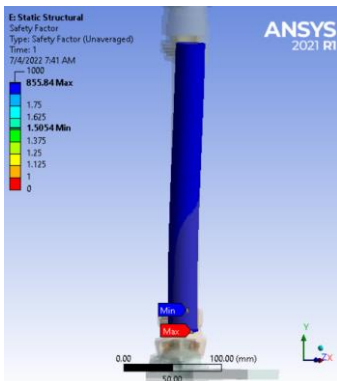
(a)



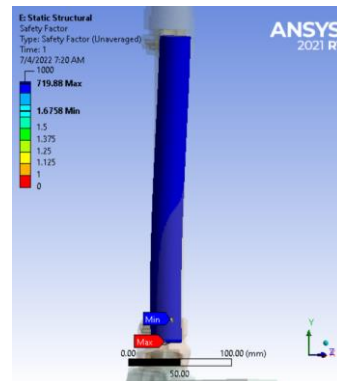
(d)



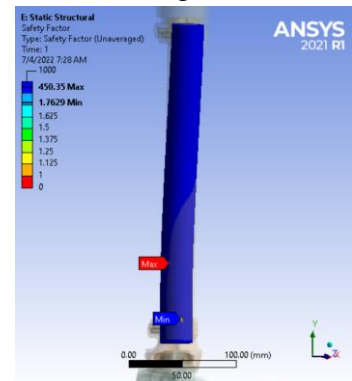
(g)



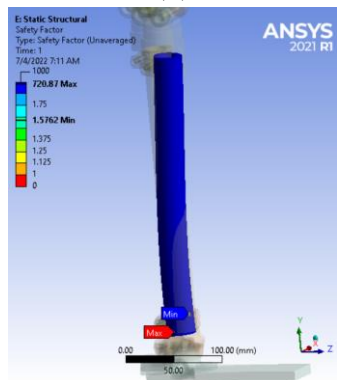
(b)



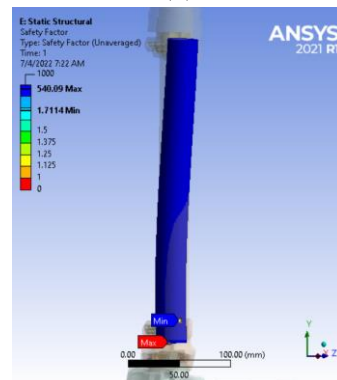
(e)



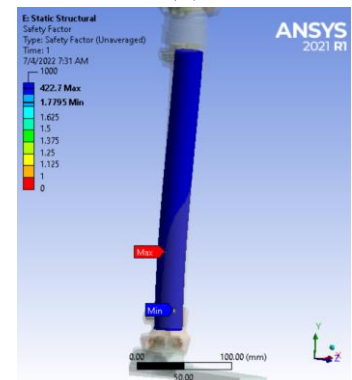
(h)



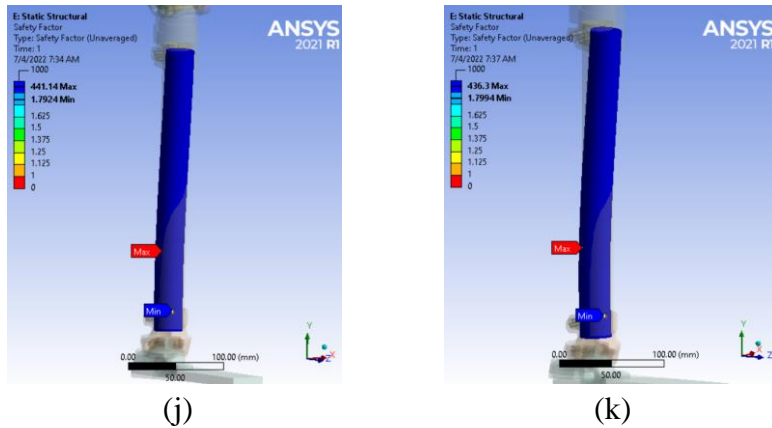
(c)



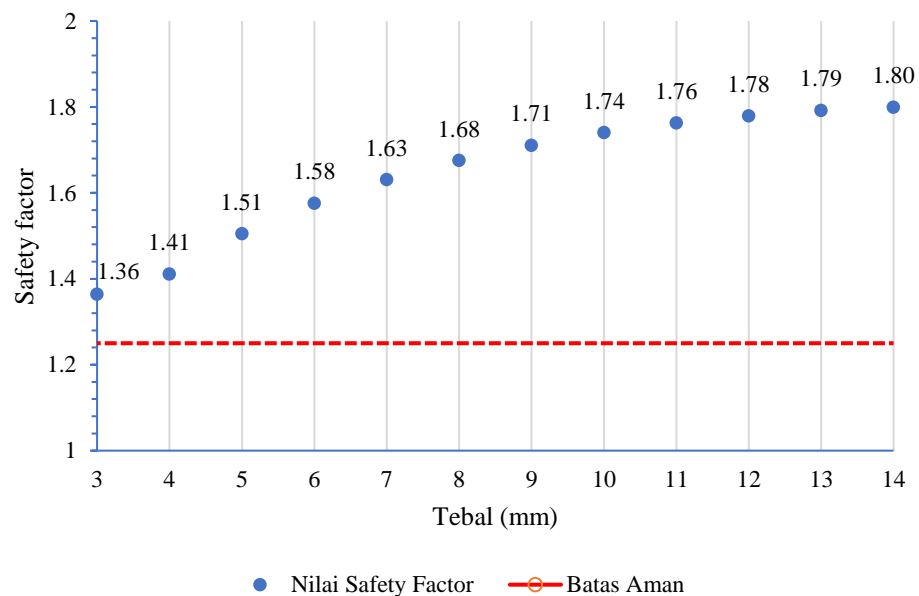
(f)



(i)



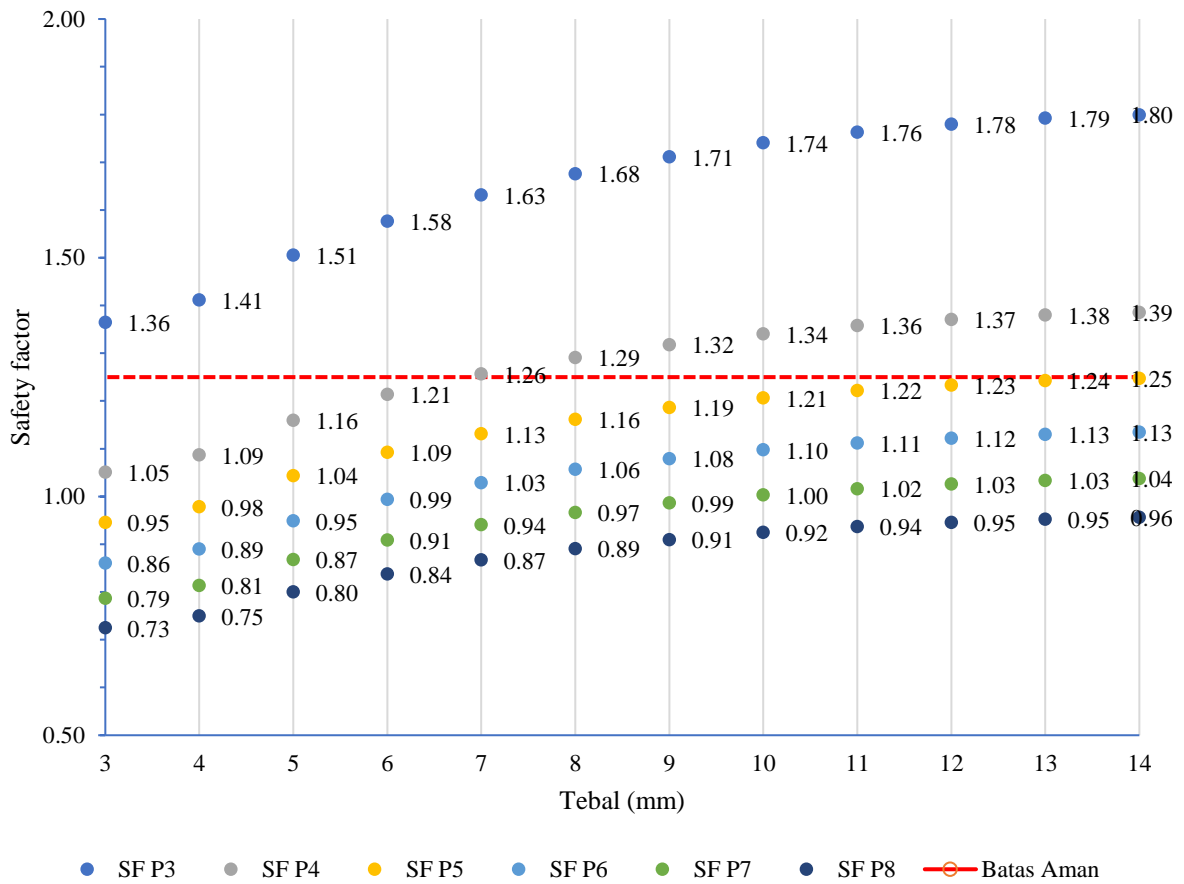
Gambar 4.28 Hasil Simulasi Nilai *Safety factor* Setiap Variasi Ketebalan pada Pengujian *Toe-off* (a) 4 mm, (b) 5 mm, (c) 6 mm, (d) 7 mm, (e) 8 mm, (f) 9 mm, (g) 10 mm, (h) 11 mm, (i) 12 mm, (j) 13 mm, (k) 14 mm



Gambar 4.29 Grafik Hasil Simulasi Variasi Ketebalan terhadap Nilai *Safety factor* pada Pengujian *Toe-off*

Berdasarkan grafik dari hasil simulasi bahwa setelah dilakukan penambahan ketebalan, diperoleh grafik hubungan antara variasi ketebalan dengan nilai *safety factor* yang dialami oleh desain *pylon*. Pada gambar grafik diatas tren mengalami kenaikan, dimana grafik mengalami kenaikan dari ketebalan 3 mm sampai dengan ketebalan 14 mm. Untuk tebal 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm, 8 mm, 9 mm, 10 mm, 11 mm, 12 mm, 13 mm, 14 mm didapatkan nilai *safety factor* secara berturut-turut adalah 1,36; 1,41; 1,51; 1,58; 1,63; 1,68; 1,71; 1,74; 1,76; 1,78; 1,79; 1,80. Titik maksimum nilai *safety factor* yang dialami oleh *pylon* berada pada tebal 14 mm dengan nilai *safety factor* sebesar 1,80. Sedangkan titik minimum berada pada tebal 3 mm dengan nilai *safety factor* sebesar 1,36. Nilai *safety factor* pada seluruh ketebalan sudah aman dikarenakan diatas batas aman *safety factor* dari alat prostetik. Dapat dilihat dari grafik diatas

bahwa terjadi kenaikan nilai *safety factor* seiring dengan bertambahnya ketebalan. Hal tersebut menjelaskan bahwa penyusunan material komposit tersebut semakin aman.



Gambar 4.30 Grafik Hasil Simulasi Variasi Ketebalan terhadap Nilai *Safety factor* pada Pengujian *Toe-off* di Seluruh Level

Berdasarkan grafik dari hasil simulasi diatas pada pembebanan level P4 diberikan beban 3623 N nilai *safety factor* untuk tebal 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm, 8 mm, 9 mm, 10 mm, 11 mm, 12 mm, 13 mm, 14 mm didapatkan nilai *safety factor* secara berturut-turut adalah 1,05; 1,09; 1,16; 1,21; 1,26; 1,29; 1,32; 1,34; 1,36; 1,37; 1,38; 1,39. Pada pembebanan level P5 diberikan beban 4025 N nilai *safety factor* untuk tebal 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm, 8 mm, 9 mm, 10 mm, 11 mm, 12 mm, 13 mm, 14 mm didapatkan nilai *safety factor* secara berturut-turut adalah 0,95; 0,98; 1,04; 1,09; 1,13; 1,16; 1,19; 1,21; 1,22; 1,23; 1,24; 1,25. Pada pembebanan level P6 diberikan beban 4425 N nilai *safety factor* untuk tebal 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm, 8 mm, 9 mm, 10 mm, 11 mm, 12 mm, 13 mm, 14 mm didapatkan nilai *safety factor* secara berturut-turut adalah 0,86; 0,89; 0,95; 0,99; 1,03; 1,06; 1,08; 1,10; 1,11; 1,12; 1,13; 1,13. Pada pembebanan level P7 diberikan beban 4840 N nilai *safety factor* untuk tebal 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm, 8 mm, 9 mm, 10 mm, 11 mm, 12 mm, 13 mm, 14 mm didapatkan nilai *safety factor* secara berturut-turut adalah 0,79; 0,81; 0,87; 0,91; 0,94; 0,97; 0,99; 1,00; 1,02; 1,03; 1,03; 1,04. Pada pembebanan level P8 diberikan beban 5250 N nilai *safety factor* untuk tebal 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm, 8 mm, 9 mm, 10 mm, 11 mm, 12 mm, 13 mm, 14 mm didapatkan nilai *safety factor* secara berturut-turut adalah 0,73; 0,75; 0,80; 0,84; 0,87; 0,89; 0,91; 0,92; 0,94; 0,95; 0,95; 0,96. Untuk hasil di pembebanan level P4 di

ketebalan 7 mm desain *pylon* aman karena sudah diatas batas aman *safety factor* dari alat prostetik. Untuk hasil di pembebanan level P5 di ketebalan 14 mm desain *pylon* aman karena sudah diatas batas aman *safety factor* dari alat prostetik. Untuk hasil di pembebanan level P6, P7, dan P8 dari setiap variasi ketebalan desain *pylon* tidak aman dikarenakan masih dibawah batas aman *safety factor* dari alat prostetik.

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 penyusunan orientasi sudut serat untuk *pylon* komposit yang paling optimal yaitu orientasi sudut ($0^{\circ}/90^{\circ}$). Hal ini dikarenakan penggunaan orientasi sudut ($0^{\circ}/90^{\circ}$) pada pembebanan standar ISO 10328(2016) menghasilkan nilai tegangan von-mises maksimum terendah, nilai kegagalan tsai-wu terendah, dan nilai *safety factor* tertinggi dibandingkan dengan orientasi sudut lainnya pada masing-masing pengujian saat kondisi *heel strike* dan *toe-off*. Meskipun nilai total deformasi pada penggunaan orientasi sudut ($0^{\circ}/90^{\circ}$) memiliki nilai terendah kedua setelah orientasi sudut ($90^{\circ}/90^{\circ}$).
2. Semakin bertambahnya ketebalan *pylon* maka kenaikan nilai *safety factor* juga meningkat. Hal tersebut bahwa penyusunan material komposit tersebut untuk *pylon* semakin aman. Dengan penyusunan sudut ($0^{\circ}/90^{\circ}$) untuk desain *pylon* dengan ketebalan 4 mm sudah aman untuk pengujian *heel strike* dan *toe-off* pada pembebanan level P3 untuk berat badan 60 kg dan dengan ketebalan 10 mm sudah aman untuk pengujian *heel strike* dan *toe-off* pada pembebanan level P4 untuk berat badan 80 kg. Untuk *pylon* dengan ketebalan 14 mm hanya aman pada pengujian *toe-off* pada pembebanan level P5.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian ini saran yang dapat dilakukan atau diberikan untuk penelitian selanjutnya, adalah:

1. Melakukan analisa dengan penyusunan orientasi sudut yang lebih bervariasi dan optimal untuk perancangan *pylon* kaki prostetik.
2. Melakukan studi eksperimen dari *pylon* komposit untuk membandingkan hasil eksperimen dengan dengan hasil analisa dengan metode elemen hingga.
3. Melakukan simulasi pengujian *fatigue* untuk *pylon* komposit.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA


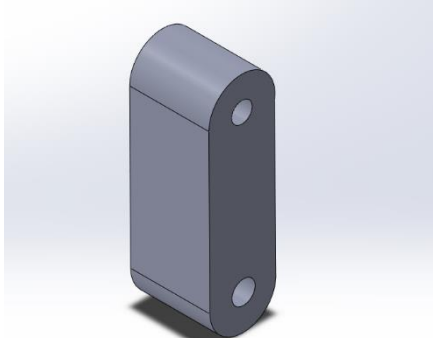
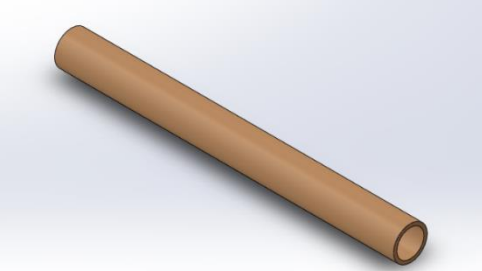
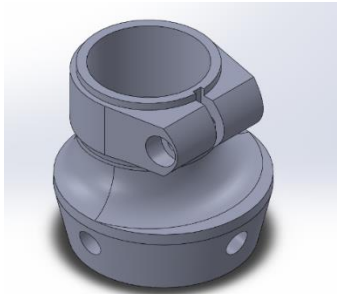
- Chawla, K. (1987). *Composite Material: Sciene and Engineering-Springer Verlag*. CRC Press.
- Daniel, I. M., & Ishai, O. (2006). Engineering Mechanics of Composite Materials. In *Isbn:1859572634 9781859572634*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1016/B978-1-84569-385-5.50021-0>
- Fajrin, J., Akmaluddin, A., & Gapsari, F. (2022). Utilization of kenaf fiber waste as reinforced polymer composites. *Results in Engineering*, 13(February), 100380. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100380>
- Gibson, F. . (1994). *Principles of Composite Material Handbook*. Mc Graw-Hill.
- Huston, R. L. (2013). Fundamentals of biomechanics. In *Fundamentals of Biomechanics*. <https://doi.org/10.1201/b14767>
- Hutton, D. V. (2004). *Fundamental of Finite Element Analysis*. Mc Graw-Hill.
- Ibrahim, M. I., Hassan, M. Z., Dolah, R., Yusoff, M. Z. M., & Salit, M. S. (2018). Tensile behaviour for mercerization of single kenaf fiber. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 14(4), 437–439. <https://doi.org/10.11113/mjfas.v14n4.1099>
- ISO 10328. (2016). *Prosthetic – Structural Testing of Lower Limb Prostheses Requirement and Test Method, 2016*.
- Jumaah, S., & Oleiwi, J. K. (2016). Studying the Tensile and Buckling for PMMA Reinforced by Jute Fibers for Prosthetic Pylon. *&Tech.Journal*, 34(1), 111.
- Kumar, M. (2017). *Composite Structures Design, Mechanics, Analysis, Manufacturing, and Testing* (Vol. 59). CRC Press.
- Kumar, P. K., Charan, M., & Kanagaraj, S. (2017). Trends and Challenges in Lower Limb Prosthesis. *IEEE Potentials*, 36(1), 19–23. <https://doi.org/10.1109/MPOT.2016.2614756>
- Liu, Y., & Chen, X. (2014). *Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench*. CRC Press.
- Loan, D. T. T. (2006). Investigation on jute fibres and their composites based on polypropylene and epoxy matrices. *Dissertation Der Fakultät Maschinenwesen Der Technischen Universität Dresden*, 11. <https://doi.org/10.1210/endo-122-6-2584>
- Madenci, E., & Guven, I. (2015). *The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS*. Springer International Publishing.
- Mahjoub, R., Yatim, J. M., Mohd Sam, A. R., & Raftari, M. (2014). Characteristics of continuous unidirectional kenaf fiber reinforced epoxy composites. *Materials and Design*, 64(May 2019), 640–649. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.08.010>
- Mariselvam, V., & Logesh, M. (2015). Analytical analysis on material properties of Kenaf fiber composite. *International Journal of Applied Engineering Research*, 10(50), 617–620.
- Nair, A. B., & Joseph, R. (2014). Eco-friendly bio-composites using natural rubber (NR) matrices and natural fiber reinforcements. In *Chemistry, Manufacture and Applications of Natural Rubber*. <https://doi.org/10.1533/9780857096913.2.249>

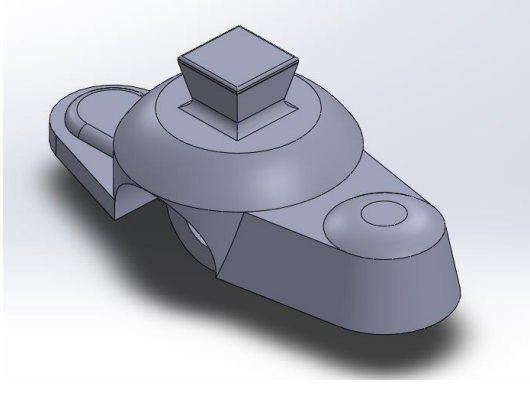

- Noori Kareem, A., & Habeeb Faidh-Allah, M. (2021). Numerical Optimum Design of a Prosthetic Shank Made of Different Composite Materials and Cross- Sections Areas for an AK Amputee. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 44(10), 329–342.
- Randjbaran, E., Zahari, R., Laila, D., Haji, A., Majid, A., Aswan, N., & Jalil, A. (2013). *An Experimental Investigation of the Effects of Stacking Sequence on Laminated Composite Flat Plates Response to Compressive Load An Experimental Investigation of the Effects of Stacking Sequence on Laminated Composite Flat Plates Response to Compressive L. January.*
- Schwartz, M. . (1984). *Composite Material Handbook*. Mc Graw-Hill.
- Shurr, D. G., & Cook, T. M. (1990). *Prosthetics and Orthotics*. Appleton & Lange.
- Sinaki, M. (1993). *Basic clinical rehabilitation medicine*. Mosby.
- Sirait, D. . (2010). *Material Komposit*. Erlangga.
- Tahir, M. S. A.-D., & Kadhim, F. M. (2021). Design and Manufacturing of New Low (Weight and Cost) 3D Printed Pylon Prosthesis for Amputee. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1094(1), 012144. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1094/1/012144>
- Townsend, T. (2020). World natural fibre production and employment. In *Handbook of Natural Fibres: Second Edition* (Vol. 1). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818398-4.00002-5>
- Van Gemert, D., Czarnecki, L., Maultzsch, M., Schorn, H., Beeldens, A., Łukowski, P., & Knapen, E. (2005). Cement concrete and concrete-polymer composites: Two merging worlds: A report from 11th ICPIG Congress in Berlin, 2004. *Cement and Concrete Composites*, 27(9–10), 926–933. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.05.004>
- Voyiadjis, G. Z., & Kattan, P. I. (2005). Mechanics of composite materials with MATLAB. In *Mechanics of Composite Materials with MATLAB*. <https://doi.org/10.1007/3-540-27710-2>

LAMPIRAN

Tabel Daftar Komponen Kaki Palsu Transfemoral *Polycentric Single Axis Ankle*

Nama Komponen	Jumlah Komponen	Material Komponen	Pemodelan 3D Komponen
Kuncian Socket	1	Alumunium 6061	
Pengunci Lutut Polycentric	1	Alumunium 6061	
Lutut Atas Polycentric	1	Alumunium 6061	
Lutut Bawah Polycentric	1	Alumunium 6061	

Nama Komponen	Jumlah Komponen	Material Komponen	Pemodelan 3D Komponen
Sambungan Samping	2	Alumunium 6061	
Sambungan Tengah	1	Alumunium 6061	
<i>Pylon</i>	1	Komposit Kenaf-Epoksi	
Holder Bawah	1	Alumunium 6061	

Nama Komponen	Jumlah Komponen	Material Komponen	Pemodelan 3D Komponen
Single Axis Ankle	1	Alumunium 6061	
Mur Single Axis Ankle	1	Alumunium 6061	

Hasil Variasi Ketebalan Terhadap Pengujian *Heel strike* Pada Seluruh Level Pembebanan

<i>Heel strike</i>			
Level P3 3220 N			
Tebal (mm)	Total Deformation Max (mm)	Von Mises Stress Max (MPa)	<i>Safety factor</i>
3	2.63	30.65	1.22
4	2.42	27.97	1.28
5	2.30	26.48	1.31
6	2.23	24.17	1.40
7	2.18	22.79	1.48
8	2.15	21.95	1.54
9	2.13	21.32	1.58
10	2.11	20.84	1.61
11	2.11	20.48	1.63
12	2.10	20.22	1.64
13	2.10	20.03	1.66
14	2.10	19.92	1.66
Level P4 4130 N			

Tebal (mm)	Total Deformation Max (mm)	Von Mises Stress Max (MPa)	<i>Safety factor</i>
3	3.38	39.31	0.95
4	3.11	35.90	0.99
5	2.96	33.94	1.02
6	2.87	30.97	1.09
7	2.81	29.25	1.15
8	2.77	28.18	1.20
9	2.74	27.38	1.23
10	2.72	26.75	1.25
11	2.71	26.29	1.27
12	2.70	25.96	1.28
13	2.70	25.71	1.29
14	2.70	25.58	1.30
Level P5 4480 N			
Tebal (mm)	Total Deformation Max (mm)	Von Mises Stress Max (MPa)	<i>Safety factor</i>
3	3.66	42.64	0.87
4	3.37	38.94	0.92
5	3.21	36.81	0.94
6	3.11	33.60	1.01
7	3.04	31.73	1.06
8	3.00	30.57	1.11
9	2.97	29.70	1.13
10	2.95	29.02	1.15
11	2.94	28.52	1.17
12	2.93	28.16	1.18
13	2.93	27.89	1.19
14	2.92	27.75	1.20
Level P6 4880 N			
Tebal (mm)	Total Deformation Max (mm)	Von Mises Stress Max (MPa)	<i>Safety factor</i>
3	3.99	46.45	0.80
4	3.67	42.41	0.84
5	3.50	40.10	0.87
6	3.39	36.60	0.93
7	3.32	34.57	0.98
8	3.27	33.30	1.02
9	3.24	32.35	1.04
10	3.22	31.61	1.06
11	3.20	31.07	1.07
12	3.19	30.67	1.08
13	3.19	30.38	1.09

14	3.19	30.23	1.10
Level P7 5300 N			
Tebal (mm)	Total Deformation Max (mm)	Von Mises Stress Max (MPa)	Safety factor
3	4.33	50.44	0.74
4	3.99	46.06	0.77
5	3.80	43.55	0.80
6	3.68	39.74	0.85
7	3.60	37.54	0.90
8	3.55	36.17	0.93
9	3.51	35.13	0.96
10	3.49	34.33	0.97
11	3.48	33.74	0.99
12	3.47	33.31	1.00
13	3.46	33.00	1.01
14	3.46	32.83	1.01
Level P8 5700 N			
Tebal (mm)	Total Deformation Max (mm)	Von Mises Stress Max (MPa)	Safety factor
3	4.66	54.25	0.69
4	4.29	49.54	0.72
5	4.09	46.84	0.74
6	3.96	42.74	0.79
7	3.87	40.38	0.84
8	3.82	38.90	0.87
9	3.78	37.78	0.89
10	3.76	36.92	0.91
11	3.74	36.29	0.92
12	3.73	35.83	0.93
13	3.72	35.49	0.94
14	3.72	35.31	0.94

Hasil Variasi Ketebalan Terhadap Pengujian *Toe-off* Pada Seluruh Level Pembebanan

<i>Toe-off</i>			
Level P3 2790 N			
Tebal (mm)	Total Deformation Max (mm)	Von Mises Stress Max (MPa)	Safety factor
3	1.55	27.31	1.36
4	1.36	24.85	1.41
5	1.26	22.76	1.51
6	1.19	21.38	1.58
7	1.15	20.43	1.63

8	1.12	19.74	1.68
9	1.10	19.21	1.71
10	1.08	18.80	1.74
11	1.08	18.49	1.76
12	1.07	18.27	1.78
13	1.07	18.11	1.79
14	1.06	18.02	1.80
Level P4 3623 N			
Tebal (mm)	Total Deformation Max (mm)	Von Mises Stress Max (MPa)	<i>Safety factor</i>
3	2.01	35.47	1.05
4	1.77	32.27	1.09
5	1.63	29.55	1.16
6	1.55	27.76	1.21
7	1.49	26.54	1.26
8	1.45	25.63	1.29
9	1.43	24.94	1.32
10	1.41	24.41	1.34
11	1.40	24.02	1.36
12	1.39	23.73	1.37
13	1.38	23.52	1.38
14	1.38	23.40	1.39
Level P5 4025 N			
Tebal (mm)	Total Deformation Max (mm)	Von Mises Stress Max (MPa)	<i>Safety factor</i>
3	2.23	39.40	0.95
4	1.96	35.85	0.98
5	1.81	32.83	1.04
6	1.72	30.84	1.09
7	1.65	29.48	1.13
8	1.61	28.47	1.16
9	1.58	27.71	1.19
10	1.56	27.12	1.21
11	1.55	26.68	1.22
12	1.54	26.36	1.23
13	1.54	26.12	1.24
14	1.53	25.99	1.25
Level P6 4425 N			
Tebal (mm)	Total Deformation Max (mm)	Von Mises Stress Max (MPa)	<i>Safety factor</i>
3	2.45	43.32	0.86
4	2.16	39.41	0.89
5	1.99	36.09	0.95

6	1.89	33.91	0.99
7	1.82	32.41	1.03
8	1.77	31.30	1.06
9	1.74	30.47	1.08
10	1.72	29.82	1.10
11	1.71	29.33	1.11
12	1.70	28.98	1.12
13	1.69	28.72	1.13
14	1.69	28.58	1.13
Level P7 4840 N			
Tebal (mm)	Total Deformation Max (mm)	Von Mises Stress Max (MPa)	Safety factor
3	2.68	47.38	0.79
4	2.36	43.11	0.81
5	2.18	39.48	0.87
6	2.06	37.09	0.91
7	1.99	35.45	0.94
8	1.94	34.24	0.97
9	1.90	33.32	0.99
10	1.88	32.61	1.00
11	1.87	32.08	1.02
12	1.86	31.70	1.03
13	1.85	31.41	1.03
14	1.85	31.26	1.04
Level P8 5250 N			
Tebal (mm)	Total Deformation Max (mm)	Von Mises Stress Max (MPa)	Safety factor
3	2.91	51.40	0.73
4	2.56	46.76	0.75
5	2.36	42.82	0.80
6	2.24	40.23	0.84
7	2.16	38.45	0.87
8	2.10	37.14	0.89
9	2.07	36.15	0.91
10	2.04	35.38	0.92
11	2.02	34.80	0.94
12	2.01	34.38	0.95
13	2.01	34.08	0.95
14	2.00	33.91	0.96

BIODATA PENULIS



Ananda Ariwijaya merupakan nama lengkap penulis tugas akhir ini. Penulis yang lahir di Palembang pada 28 September 2000 ini merupakan anak pertama dari dua bersaudara, anak dari pasangan Bapak Bahrudin dan Ibu Rita (Alm.). Penulis memulai Pendidikan formal di SD N Cipinang Melayu 05 Pg. Setelah lulus pada tahun 2012 penulis melanjutkan ke jenjang sekolah menengah, dimulai di SMP N 117 Kota Jakarta kemudian melanjutkannya di SMA N 42 Kota Jakarta. Setelah menyelesaikan sekolah menengah, penulis melanjutkan studi S-1 di Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama menjalani perkuliahan penulis aktif di organisasi mahasiswa, yaitu sebagai Staf Departemen Dalam Negeri dan Kepala Departemen Organisasi Himpunan Mahasiswa Mesin. Penulis mengambil konsentrasi ilmu rumpun desain khususnya mengenai mekanika benda padat. Untuk semua informasi dan masukan terkait tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email ariwijayaananda@gmail.com.