TUGAS AKHIR – TL184834

ANALISIS PENGARUH GEOMETRI *FRAME* TERHADAP KEKUATAN DAN BOBOT *BALANCE BIKE* DIBUAT DENGAN 3D *PRINTING*

GHALIB ABYAN
NRP. 02511640000033

Dosen Pembimbing
Mas Irfan P Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D.
Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

TUGAS AKHIR − TL 184834

ANALISIS PENGARUH GEOMETRI *FRAME* TERHADAP KEKUATAN DAN BOBOT *BALANCE BIKE* DIBUAT DENGAN 3D *PRINTING*

GHALIB ABYAN
NRP. 02511640000033

Dosen Pembimbing
Mas Irfan P Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D.
Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

FINAL PROJECT − TL 184834

ANALYSIS THE EFFECT OF GEOMETRY FRAME ON THE STRENGTH AND WEIGHT BALANCE BIKE MADE BY 3D PRINTING

GHALIB ABYAN
NRP. 02511640000033

Supervisor
Mas Irfan P Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D.
Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D.

MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

(*This page is intentionally left blank*)

ANALISIS PENGARUH GEOMETRI *FRAME* TERHADAP KEKUATAN DAN BOBOT *BALANCE BIKE* DIBUAT DENGAN 3D *PRINTING*

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
GHALIB ABYAN
NRP 02511640000033

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D. ..... (Pembimbing I)
2. Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D. ..... (Pembimbing II)

SURABAYA
Agustus 2020

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

ANALISIS PENGARUH GEOMETRI *FRAME* TERHADAP KEKUATAN DAN BOBOT *BALANCE BIKE* DIBUAT DENGAN 3D *PRINTING*

Nama : Ghalib Abyan
NRP : 02511640000033
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi
Pembimbing I : Mas Irfan P Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D.
Pembimbing II : Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D.

Abstrak

Fused Deposition Modelling banyak digunakan sebagai metode dalam pembuatan rapid prototyping dan salah satu yang dikembangkan adalah sepeda. Sepeda yang saat ini diminati yaitu balance bike yang memiliki manfaat untuk melatih keseimbangan anak sebagai dasar kemampuan dalam bersepeda. Salah satu bagian terpenting dalam sepeda yaitu frame, dimana penggunaan material carbon fiber-nylon dapat memenuhi sifat mekanik material yang dibutuhkan. Dilakukan analisis pengaruh variasi geometri yakni honeycomb, circle dan rhombus terhadap kekuatan dan bobot. Pendekatan analisis numerik digunakan untuk mengetahui pengaruh variasi geometri terhadap kekuatan dengan pengujian beban statis menggunakan software ANSYS sebesar 196,133 N. Hasil simulasi statis menunjukkan geometri honeycomb memiliki sifat mekanik paling baik dengan tegangan maksimal sebesar 5,5224 MPa, regangan elastis sebesar 0,0062933 m/m dan deformasi total sebesar 0,00035311 m. Aspek lain dalam penentuan desain adalah bobot dan survei estetika dimana geometri circle memiliki bobot paling ringan dan geometri honeycomb menjadi desain yang paling diminati oleh masyarakat. Proses pencetakan geometri honeycomb memakan waktu 1 hari 13 jam dengan menghabiskan 1725 gram filamen carbon fiber-nylon. Setelah ditimbang, frame honeycomb memiliki bobot sebesar 1050 gram.

Kata Kunci: ***Balance Bike, Filamen Carbon fiber-Nylon, Fused Deposition Modelling***

ANALYSIS THE EFFECT OF GEOMETRY FRAME ON THE STRENGTH AND WEIGHT BALANCE BIKE MADE BY 3D PRINTING

Student Name : Ghalib Abyan
NRP : 02511640000033
Department : Material and Metallurgical Engineering
Supervisor : Mas Irfan P Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D.
Co-Supervisor : Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D.

Abstract

Fused Deposition Modeling (FDM) is known as 3D printing is the most extensively used as a method in the making of rapid prototyping and one of the products which is recently being developed is bicycles. Bicycles that are now in demand are balance bikes which encourage kids to train their balance as a basic skill in cycling. One of the important parts of a bicycle is the frame, where the use of carbon fiber-nylon material can meet the required mechanical properties of the material. This research aims to analyze the effect of geometric design variations; honeycomb, circle, and rhombus on strength and weight of 3D printed Balance Bike frame. The numerical analysis approach was used to determine the effect of geometric variations in strength by static load testing using ANSYS with 196,133 N load. The static simulation showed honeycomb geometry has the best material mechanical properties with equivalent stress of 5,5224 MPa, equivalent elastic strain of 0,0062933 m/m, and total deformation of 0,00035311 m. Besides mechanical properties, weight analysis and aesthetic surveys were considered to determine the geometric design, which showed circle geometry has the lightest weight and honeycomb geometry is the most sought after design by the survey participant. Geometric honeycomb printing takes 1 day 13 hours by consuming 1725 grams of carbon fiber-nylon filament. After being weighed using a mass balance, frame honeycomb is 1050 grams in total weight.

Keywords: ***Balance Bike, Filamen Carbon fiber-Nylon, Fused Deposition Modelling***

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis sampaikan kepada Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul "Analisis Pengaruh Geometri *Frame* Terhadap Kekuatan Dan Bobot *Balance Bike* Dibuat Dengan 3D *Printing*". Laporan ini disusun dan diajukan untuk dapat memenuhi sebagian persyaratan studi di Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Insitut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Penulis juga menyampaikan banyak terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu penulis dari awal pelaksanaan tugas akhir hingga selesainya penyusunan laporan tugas akhir ini, diantaranya yakni :

1. Allah SWT yang telah memberi kelancaran dalam proses mengerjakan Tugas Akhir hingga penyusunan laporan.
2. Rasulullah SAW yang selalu memberikan kasih sayang dan tuntunannya untuk senantiasa beribadah kepada Allah SWT.
3. Kedua orang tua serta adik dan Agustien yang selalu memberikan dukungan, doa serta motivasi untuk penulis.
4. Kepada Bapak Wawan Aries Widodo selaku dekan Fakultas Teknologi Industri Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
5. Bapak Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D., selaku Kepala Departemen Teknik Material dan Metalurgi, FTIRS – ITS.
6. Bapak Mas Irfan P Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D., dan Bapak Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D., selaku dosen pembimbing tugas akhir, yang telah memberikan arahan, bimbingan dan masukan kepada penulis.
7. Seluruh dosen serta karyawan Departemen Teknik Material dan Metalurgi yang telah memberikan ilmu baik akademik maupun non akademik kepada penulis selama menempuh pendidikan.
8. Seluruh anggota tim Antasena ITS yang telah berjuang bersama selama 3 tahun untuk mengharumkan nama

almamater tercinta baik dikancah nasional maupun internasional.

9. Kelompok tugas akhir riset 3D *print* yaitu M. Gefin dan Akhlish Abdi R. yang telah belajar bersama serta mengaplikasikannya untuk kebermanfaatan lingkungan sekitar hingga penyusunan laporan dengan penulis.
10. Semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung memberikan dukungan dan membantu kelancaran proses tugas akhir ini.

Surabaya, 12 Agustus 2020
Penulis

Ghalib Abyan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL ..... **i**
LEMBAR PENGESAHAN ..... **v**
ABSTRAK ..... **vii**
ABSTRACT ..... **ix**
KATA PENGANTAR ..... **xi**
DAFTAR ISI ..... **xiii**
DAFTAR GAMBAR ..... **xv**
DAFTAR TABEL ..... **xix**
BAB I PENDAHULUAN
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Perumusan Masalah 3
1.3 Batasan Masalah 4
1.4 Ruang Lingkup Penelitian 4
1.5 Tujuan Penelitian 4
1.6 Manfaat Penelitian 5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA
2.1 Penelitian Sebelumnya 7
2.2 *Balance Bike* 9
2.3 *Frame Bike* 16
2.4 Dinamika Sepeda 22
2.5 Metode Elemen Hingga 27
2.6 *Additive Manufacturing* 32
2.6.1 *Rapid Prototyping* 34
2.6.2 *Fused Deposition Modelling* 36
2.7 Prinsip 3D *Printer* 36
2.8 Filamen 3D *Printing* 39
BAB III METODOLOGI PENELITIAN
3.1 Diagram Alir Penelitian 45
3.2 Bahan Penelitian 47
3.3 Peralatan Penelitian 49
3.4 Variabel Penelitian 50
3.5 Tahapan Penelitian 51
BAB IV HASIL DAN ANALISIS DATA

4.1 Hasil Modelling Geometri 63
4.1.1 Geometri Honeycomb 63
4.1.2 Geometri Circle 64
4.1.3 Geometri Rhombus..... 66
4.2 Hasil Simulasi Statis 67
4.2.1 Hasil Simulasi Statis pada Geometri *Honeycomb*..... 73
4.2.2 Hasil Simulasi Statis pada Geometri *Circle* 75
4.2.3 Hasil Simulasi Statis pada Geometri *Rhombus* 78
4.3 Analisis Pengaruh Bentuk Geometri..... 80
4.3.1 Analisis Pengaruh Bentuk Geometri terhadap Kurva *Stress-Strain*..... 83
4.3.2 Analisis Pengaruh Bentuk Geometri terhadap Bobot 84
4.4 Analisis Aspek dalam Penentuan Desain..... 86
4.4.1 Hasil Survei Penentuan Desain 86
4.4.2 Aspek Penilaian dalam Pentuan Desain 87
4.5 Optimalisasi Pengaturan Pencetakann *Frame Balance Bike* 88
4.5.1 Parameter Pencetakan *Frame Balance Bike*..... 89
4.6 Hasil Pencetakan *Frame Balance Bike* 93
4.6.1 *Front Frame Balance Bike* 93
4.6.2 *Back Frame Balance Bike* 94
4.7 Analisis Hasil Pencetakan *Frame Balance Bike* 94
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN
5.1 Kesimpulan 107
5.2 Saran 108
DAFTAR PUSTAKA 109
LAMPIRAN 117
UCAPAN TERIMA KASIH 147
BIODATA PENULIS 149

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 *Skeleton Frame* 8
Gambar 2.2 *Handwrapped Frame* dan *Rear Stays* 9
Gambar 2.3 Posisi Geometri *Balance Bike* yang (a) Baik (b) Buruk 13
Gambar 2.4 FirstBIKE *Limited Orange* 14
Gambar 2.5 Strider Sport 15
Gambar 2.6 Komponen Pada Sepeda 16
Gambar 2.7 *Tubing Diagram* pada *Frame* Sepeda 17
Gambar 2.8 Anatomi Geometri BXT *Balance Bike* 19
Gambar 2.9 Dimensi Geometri *Frame* BXT *Balance Bike* (a) Samping (b) Belakang 19
Gambar 2.10 Posisi *Feature Points* dan *Feature Angle* yang Terbentuk Saat Berkendara 21
Gambar 2.11 Definisi Ukuran *Frame* Sepeda 22
Gambar 2.12 Derajat Kebebasan Utama 23
Gambar 2.13 Tata Acuan Koordinat Dinamika Sepeda 24
Gambar 2.14 Skema Kinematika Sepeda 24
Gambar 2.15 Dinamika *Leaning* 25
Gambar 2.16 Proses Analisis Metode Elemen 28
Gambar 2.17 Proses Fabrikasi *Advanced Engineering Systems* 29
Gambar 2.18 *Mesh* Untuk Desain Model Skala Pesawat Terbang Dalam Pengujan Dinamis 30
Gambar 2.19 *Roadmap of Rapid Technology* 35
Gambar 2.20 Klasifikasi RP Berdasarkan Material Proses Manufaktur 35
Gambar 2.21 Diagram Alir Proses 3D *Printing* 38
Gambar 2.22 Ilustrasi *Nozzle Head* 38
Gambar 2.23 Ilustrasi Parameter Proses Ekstrusi FDM 39
Gambar 2.24 Langkah Produksi Filamen Nano-Mikro Komposit Polimer 41

Gambar 2.25 Representatif Kurva *Tensile Stress* dengan *Strain* pada 3D *Printing* dengan Variasi Komposisi 42
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian 47
Gambar 3.2 Filamen Material *Carbon Fiber-Nylon* (ePA-CF) 48
Gambar 3.3 Piranti Lunak (a) Solidworks 2018 (b) ANSYS 19.1 (c) Cura 4.4 49
Gambar 3.4 Creality3D Ender 5 Plus 50
Gambar 3.5 Anatomi Geometri *Honeycomb* (a) Tampak Depan (b) Tampak Atas 52
Gambar 3.6 Anatomi Geometri *Circle* (a) Tampak Depan (b) Tampak Atas 53
Gambar 3.7 Anatomi Geometri *Rhombus* (a) Tampak Depan (b) Tampak Atas 54
Gambar 3.8 *Input* Material *Properties* 55
Gambar 3.9 Pengaturan untuk *Geometry Meshing* 56
Gambar 3.10 *Free Body* Diagram Sepeda 57
Gambar 3.11 Pengaturan untuk *Analysis Settings* 57
Gambar 3.12 Diagram Alir Simulasi 59
Gambar 3.13 Diagram Alir Proses 3D *Printing* 60
Gambar 3.14 *Print Setting Software* Cura 61
Gambar 4.1 Geometri *Honeycomb* (a) Tampak *Isometric* (b) Tampak Depan (c) Tampak Kanan (d) Tampak Atas 64
Gambar 4.2 Geometri *Circle* (a) Tampak *Isometric* (b) Tampak Depan (c) Tampak Kanan (d) Tampak Atas 65
Gambar 4.3 Geometri *Rhombus* (a) Tampak *Isometric* (b) Tampak Depan (c) Tampak Kanan (d) Tampak Atas 67
Gambar 4.4 Spektrum Warna Nilai Tegangan 67
Gambar 4.5 Hasil *Meshing* Tampak Depan. (a) *Honeycomb*, (b) *Circle*, (c) *Rhombus* 70
Gambar 4.6 Peletakan titik *Fixed Support* bagian depan 71

Gambar 4.7 Peletakan titik *Fixed Support* bagian belakang 71
Gambar 4.8 Peletakan titik *Force* pada *Frame* 72
Gambar 4.9 Hasil Simulasi Statis pada *Frame Honeycomb* (a) *Equivalent Stress* (b) *Equivalent Elastic Strain* (c) *Total Deformation* 74
Gambar 4.10 Lokasi Maksimum pada *Frame Honeycomb* (a) *Equivalent Stress* (b) *Equivalent Elastic Strain* (c) *Total Deformation* 75
Gambar 4.11 Hasil Simulasi Statis pada *Frame Circle* (a) *Equivalent Stress* (b) *Equivalent Elastic Strain* (c) *Total Deformation* 76
Gambar 4.12 Lokasi Maksimum pada *Frame Circle* (a) *Equivalent Stress* (b) *Equivalent Elastic Strain* (c) *Total Deformation* 77
Gambar 4.13 Hasil Simulasi Statis pada *Frame Rhombus* (a) *Equivalent Stress* (b) *Equivalent Elastic Strain* (c) *Total Deformation* 79
Gambar 4.14 Lokasi Maksimum pada *Frame Rhombus* (a) *Equivalent Stress* (b) *Equivalent Elastic Strain* (c) *Total Deformation* 80
Gambar 4.15 Perbandingan nilai *Equivalent Stress* pada Geometri 81
Gambar 4.16 Perbandingan nilai *Equivalent Elastic Strain* pada Geometri 82
Gambar 4.17 Perbandingan nilai Total Deformasi pada Geometri 83
Gambar 4.18 Grafik *Stress-Strain* basis Geometri *Honeycomb*, *Circle* dan *Rhombus* 84
Gambar 4.19 Hasil Survei Desain *Frame Balance Bike* 87
Gambar 4.20 Nilai Akhir Penentuan Desain *Frame Balance Bike* 88
Gambar 4. 21 Tampilan Pengaturan Cetak *Front Frame Balance Bike* pada *software* Cura 4.4 92

Gambar 4.22 Tampilan Pengaturan Cetak *Back Frame Balance Bike* pada *software* Cura 4.4 92
Gambar 4.23 Proses Pencetakan *Front Frame Balance Bike* (a) Proses Cetak Objek < 50 % (b) Proses Cetak Objek > 50 % (c) Pencetakan Objek Selesai 94
Gambar 4.24 Proses Pencetakan *Back Frame Balance Bike* (a) Proses Cetak Objek < 50 % (b) Proses Cetak Objek > 50 % (c) Pencetakan Objek Selesai 94
Gambar 4.25 Perhitungan Bobot *Frame Balance Bike* (a) Bagian Depan (b) Bagian Belakang..... 96
Gambar 4.26 Sampel dari cacat *Gaps Layer to Layer*..... 97
Gambar 4.27 *Printing Defects : Gaps Layer to Layer*..... 97
Gambar 4.28 *Printing Defects : Gaps in Top Layer*..... 97
Gambar 4.29 *Printing Defects : Blobs*..... 98
Gambar 4.30 *Printing Defects : Stringing*..... 99
Gambar 4.31 Bagian *Overhang* pada Objek..... 100
Gambar 4.32 *Printing Defects : Gaps between Infill and Outline* 100
Gambar 4.33 Proses Pendempulan (a) Sambungan *Back Frame Balance Bike* (b) Back *Frame Balance Bike* (c) Seluruh Permukaan *Frame Balance Bike* 102
Gambar 4.34 Hasil Proses Pelapisan Cat..... 103
Gambar 4.35 Susunan Lapisan *Frame Balance Bike* 103
Gambar 4.36 Fabrikasi *Frame Honeycomb*..... 104
Gambar 4.37 Skema *Real Testing Frame*..... 105

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Pendekatan Tiga Langkah Metode Lama dan Baru Dalam Mempelajari Cara Mengemudi Sepeda 10
Tabel 2.2 *Balance Bike*: Istilah, Fitur, Produsen, Harga dan Ukuran 11
Tabel 2.3 Panduan Ukuran Pembelian *Balance Bike* 12
Tabel 2.4 Spesifikasi Material Untuk *Frame* Sepeda.....18
Tabel 2.5 Metode *Fused Deposition Modelling* 36
Tabel 2.6 Ringkasan Teknik dan Material Yang Digunakan Untuk 3D *Printing* Komposit Polimer *Fiber-Reinforced*.....42
Tabel 3.1 Komposisi Material Filamen *ePA-CF* 48
Tabel 3.2 Sifat Material Filamen *ePA-CF*.....48
Tabel 3.3 Variabel Penelitian 50
Tabel 3.4 Variasi Geometri *Frame Balance Bike*.....51
Tabel 4.1 Sifat material *Nylon 6* (PA 6) 68
Tabel 4.2 Hasil Analisis *Mesh Sensitivty*.....72
Tabel 4.3 Estimasi Massa *Frame Balance Bike* 85
Tabel 4.4 Besaran Nilai berdasarkan *Rank*.....86
Tabel 4.5 Hasil Penilaian dalam Aspek Penentuan Desain.....88
Tabel 4.6 Parameter Pencetakan Menu *Basic* pada Cura 4.4.....90
Tabel 4.7 Perhitungan Bobot Total.....104

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Revolusi industri 4.0 menjadi perbincangan yang hangat setelah diperkenalkan oleh Angella Markel dalam *World Economic Forum (WEF)* 2015, beliau mengenalkan gagasan pemerintah Jerman dan menjelaskan bahwa pemerintah Jerman menginvestasikan 200 juta Euro untuk penelitian terkait industri 4.0 di seluruh bidang pemerintahan, akademisi, dan bisnis. Sementara itu pada tahun 2018, Kementerian Perindustrian Republik Indonesia telah menyusun gagasan "*Making Indonesia 4.0*" sebagai sebuah *roadmap* yang terintegrasi untuk mengimplementasikan sejumlah strategi dalam memasuki perkembangan Industri 4.0 yang melibatkan institusi pemerintah, asosiasi industri, pelaku usaha, penyedia teknologi, hingga lembaga riset dan pendidikan (Hartarto, 2018).

Pada tahun 2015 membentuk visi dari industri 4.0 dengan mendefinisikan menjadi 9 aspek terkait konsep ini yaitu *big data*, *autonomous robots*, *simulation*, *horizontal and vertical integration*, *Internet of Things*, *the cloud*, *additive manufacturing*, *augmented reality*, dan *cyber security*. Salah satu yang berkembang sangat pesat di Indonesia adalah *additive manufacturing* (AM), dimana merubah pola produksi manufaktur menjadi lebih mudah dan sederhana dengan menggunakan *3D printer* (Rüßmann, 2015). Andreja Rojko mengatakan bahwa *3D printing* menjadi kunci teknologi dari AM. Dengan kombinasi metode *rapid prototyping* termasuk 3*D modelling*, dapat dibangun dari desain produk sampai ke produksi dimana mempersingkat waktu dari ide tersebut sampai terbentuk produk (Rojko, 2017).

Prinsip, metode, dan penggunaan material dari AM pun sangat beragam. Salah satu metode AM yang paling banyak digunakan adalah *fused deposition modelling* (FDM) yang

dipatenkan oleh Stratasys pada tahun 1989 (Gebhardt, 2011). FDM merupakan sistem *3D printer* yang menggunakan material dari filamen plastik seperti *amorphous thermoplastics* (ABS, PLA, *nylon*, dll) dengan sistem penyambungan *hot melt adhesive bonding* dan pembentukan lapisan menggunakan ekstursi filamen plastik dari *nozzle*. FDM sendiri memiliki keunggulan dari segi kemudahan, biaya yang murah dan ramah lingkungan. Hal tersebut sangat mendukung dalam pengembangan inovasi pencetakan objek tiga dimensi dimana implementasi tersebut selaras dengan berkembangnya *software* komputer seperti CAD (*Computer Aided Design*), CAM (*Computer Aided Manufacturing*) dan CAE (*Computer Aided Engineering*). Salah satu inovasi objek tiga dimensi yang saat ini sedang dikembangkan adalah sepeda yang dicetak menggunakan *3D Printer*.

Pada tahun 2018, Chris Edward berhasil memproduksi jenis sepeda gunung (*mountain bike*) menggunakkan *3D printer* dengan material berupa *carbon fiber* yang menawarkan keunggulan berupa bobot yang ringan dan kuat (Chris Edwards, 2018). Sementara di Indonesia sendiri pun masih belum ada yang membuat sepeda dengan metode cetak menggunakan *3D printer*. Berbicara terkait peminatan sepeda di Indonesia, saat ini *balance bike* menjadi sorotan orang tua untuk melatih keseimbangan anak sebagai dasar kemampuan dalam bersepeda. Pembuatan *balance bike* saat ini masih diproduksi secara konvensional menggunakan material dari paduan baja maupun kayu. *Balance bike* sendiri harus memiliki standar berat yang ringan, bentuk yang unik serta aman digunakan untuk anak anak. Saat ini *balance bike* yang beredar di Indonesia merupakan produk luar negeri yang menyebabkan harganya pun tergolong mahal. Mayoritas *balance bike* yang beredar dipasaran memiliki bobot sekitar 3-4 kg.

Hal tersebut menjadi alasan penulis untuk bisa memproduksi sendiri agar dapat dijangkau oleh masyarakat

dengan biaya produksi yang relatif lebih murah. Terdapat proses produksi *balance bike* pada bagian *frame* yakni mendesain *frame* sepeda tersebut menggunakan *software* CAD yaitu Solidworks dengan bentuk yang menarik dan futuristik serta melakukan simulasi beban statis pada *frame* sepeda menggunakan *software* CAE yaitu ANSYS. Kemudian *frame balance bike* dicetak menggunakan FDM dengan material filamen dari eSun bernama ePA-CF yang terbuat dari bahan *polyamide* (PA) atau *nylon* dengan campuran *carbon fiber* yang memiliki *tensile strength* sebesar 85 MPa, *flexural strength* sebesar 98 MPa, *flexural modulus* sebesar 2300 MPa dan *IZOD impact strength* sebesar 15,5 Kj/m^2 dimana sifat mekanik material tersebut sangat cocok dengan kriteria yang dibutuhkan oleh *balance bike* (Shenzhen Esun Industrial Co., 2016). Lalu untuk bersaing dengan jenis *balance bike* yang ada dipasaran, rancangan dan desain *frame* sepeda ini ditargetkan untuk memiliki bobot yang ringan yakni kurang dari 3 kg, bentuk yang unik dan juga memiliki struktur *frame* yang lebih solid. Pencetakan *frame* menggunakan FDM dirasa dapat meningkatkan kecepatan dalam produksi sehingga dapat mengurangi biaya dalam produksi *balance bike*.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah yang telah dibahas sebelumnya, rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh bentuk geometri *frame balance bike* terhadap kekuatan.
2. Bagaimana pengaruh bentuk geometri *frame balance bike* terhadap bobot.
3. Bagaimana hasil produksi *frame balance bike* menggunakan 3D *printer* dengan material filamen *carbon fiber-nylon based* (PA-CF).

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah digunakan untuk mengasumsikan parameter yang pengaruhnya sangat kecil dan seragam pada penelitian sehingga dapat diabaikan. Adapun batasan masalah yang dimaksud adalah sebagai berikut:

1. Kondisi lingkungan eksternal dianggap tidak berpengaruh pada proses pencetakan objek.
2. Material filamen yang digunakan dianggap tidak memiliki cacat.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Adapun ruang lingkup penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Sistem ergonomis pada *frame balance bike* belum diperhitungkan baik dalam proses mendesain bentuk objek maupun pada proses *assembly*.
2. Temperatur cetak yang digunakan sesuai dengan standar *safety data sheet* milik perusahaan yaitu *Shenzhen Esun Industrial Co., Ltd.*
3. Pengujian dilakukan pada anak-anak balita yang memiliki berat badan normal sesuai dengan standar *World Heart Organization* (WHO) serta tinggi badan diabaikan.

1.5 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh bentuk geometri dari *frame balance bike* terhadap kekuatan.
2. Menganalisis pengaruh bentuk geometri dari *frame balance bike* terhadap bobot.
3. Menganalisis hasil produksi *frame balance bike* menggunakan *3D printer* dengan material filamen *carbon fiber-nylon based* (PA-CF).

1.6 Manfaat Penelitian

Adapun penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Menghasilkan objek tiga dimensi dengan sifat mekanik yang optimal menggunakan *3D printing* FDM.
2. Dapat diaplikasikan dalam bidang manufaktur untuk skala menengah ke bawah.
3. Dapat diproduksi dengan mudah serta biaya yang terjangkau.
4. Dapat digunakan sebagai referensi untuk penelitian-penelitian berikutnya mengenai proses pencetakan objek tiga dimensi menggunakan *3D printing* FDM dan penggunaan material filamen *carbon fiber-nylon based* (PA-CF).

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

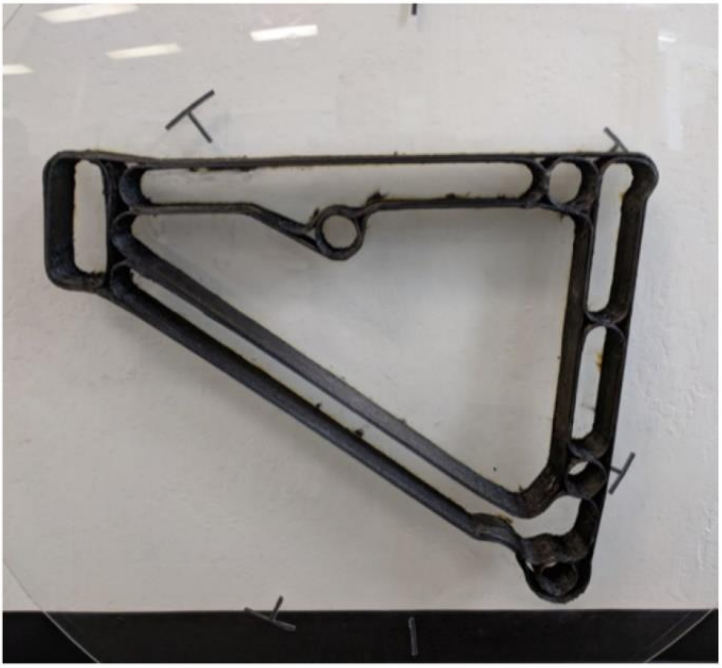
2.1 Penelitian Sebelumnya

Dalam 5 tahun terakhir, perkembangan teknologi dalam *3D printing* menggunakan komposit serat karbon sangatlah pesat. Pada tahun 2018, Chris Edwards d.k.k mencoba untuk membuat sepeda gunung menggunakan metode 3D *printing* dengan bahan serat karbon. Aspek yang diperhatikan adalah kemampuan *printer*, sifat bahan dan jenis skenario pembebanan pada sepeda gunung yang menjadi bagian penting dalam analisis, simulasi dan optimalisasi desain. Dengan demikian, fokus dari proyek ini adalah mendesain sepeda gunung untuk memiliki tingkat keamanan yang tinggi serta dapat mengoptimalkan *frame* sepeda dengan meminimalisir jumlah penggunaan bahan untuk mengurangi bobot sepeda dan biaya.

Mencetak komposit serat karbon memiliki banyak kesamaan dengan termoplastik pada umumnya. Dimana filamen dilebur melalui elemen yang dipanaskan dan digunakan untuk membangun permukaan dengan jalur yang telah ditentukan oleh *file* perangkat lunak yang sudah diprogram. Meskipun relatif lentur dalam kondisi panas, sifat kaku serat karbon memiliki batas untuk jari-jari terkecil pada jalur lengkung yang dapat diekstrusi oleh mesin. Karena itu, sebagian besar struktur bagian yang dicetak akan terdiri dari lapisan ekstrusi di mana setiap lapisan serat berjalan sejajar satu sama lain. Serat karbon memiliki kekakuan aksial yang sangat baik, namun memiliki kapabilitas yang rendah dalam menahan beban orthogonal. Untuk mengurangi ini, lapisan serat akan diekstrusi pada sudut relatif satu sama lain untuk memperkenalkan sifat *quasi-isotropic* pada *frame* sepanjang sumbu bidang ekstrusi.

Alhasil, tidak semua bagian dapat dicetak dengan terkendala waktu proses cetak serta tenaga kerja dari tim Arevo. Bagian belakang dan dinding dari *frame* utama memerlukan waktu yang sangat lama untuk dicetak sehingga tim hanya dapat mencetak *skeleton frame* seperti Gambar 2.1, untuk meningkatkan kekuatan

frame dibungkus dengan lapisan serat karbon yang dicampur dengan resin. Serat karbon bukanlah bahan yang mudah untuk dicetak karena setelah dicelupkan ke dalam campuran resin dan *hardener* terdapat banyak lubang dan gelembung yang menyebabkan ketidaksempurnaan pada permukaan *frame*. Karena hal tersebut, harus ditambahkan lapisan lebih banyak pada *frame* namun menambah bobot yang tidak sesuai dengan tujuan awal. Dengan permasalahan yang dihadapi, penelitian tersebut hanya terbatas dalam penyelesain *frame* dengan bagian *fork* dan *rear stay* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2 (Chris Edwards, 2018).



Gambar 2.1 *Skeleton Frame* (Chris Edwards, 2018)

Gambar 2.2 *Handwrapped Frame* dan *Rear Stays* (Chris Edwards, 2018)

2.2 *Balance Bike*

Selama bertahun-tahun "*balance bike*" telah disebut dengan berbagai macam nama. *Balance bike* adalah jenis sepeda yang tidak menggunakan pedal dimana sepeda bergerak dengan didorong menggunakan kaki sambil berlari atau berjalan. Sepeda ini dirancang untuk mengajari anak-anak kecil cara mengendarai sepeda dalam waktu yang lebih singkat dengan memungkinkan anak-anak untuk berlatih keseimbangan dengan risiko jatuh yang lebih aman. Saat ini *balance bike* dianggap sebagai "*teaches balance*" dan dijadikan sebagai media belajar dalam kurikulum keseimbangan yang diimplementasikan oleh guru pendidikan jasmani dan instruktur keseimbangan. *Balance bike* mengajarkan keseimbangan pada anak-anak dan keseimbangan adalah aspek yang sangat sulit dikuasai oleh anak-anak dalam belajar untuk mengemudikan sepeda, namun bersepeda juga merupakan keterampilan dasar dalam kegiatan fisik.

Manfaat khusus dari *balance bike* apabila dibandingkan dengan metode lama yang masih menggunakan tambahan roda latihan ketika belajar untuk mengendarai sepeda difokuskan pada tiga aspek yaitu keamanan, kepercayaan diri dan keseimbangan. *Balance bike* dinilai lebih ringan daripada sepeda pedal dengan tambahan roda latihan dimana kaki anak-anak juga selalu menyentuh dengan tanah selama penggunaan sepeda sehingga memberikan stabilitas yang lebih besar, lebih mudah untuk dikendalikan dan membuat mereka lebih aman. Dengan meningkatnya rasa aman dan stabil, anak-anak akan merasa lebih mengendalikan sepeda yang dapat meningkatkan kepercayaan diri dan kebebasan dalam mengeksplorasi gerakan yang dibutuhkan dalam mengendarai sepeda dengan sedikit rasa takut daripada mengendarai sepeda dengan tambahan roda latihan.

Tabel 2.1 Pendekatan Tiga Langkah Metode Lama dan Baru Dalam Mempelajari Cara Mengemudi Sepeda (Andrew Becker, 2017)

Proses	Gambar
Menggunakan sepeda tiga roda	
Metode lama menggunakan tambahan roda latihan	

Metode baru menggunakan *balance bike*

Menggunakan sepeda dua roda dengan pedal

Tabel 2.2 *Balance Bike*: Istilah, Fitur, Produsen, Harga dan Ukuran (Andrew Becker, 2017)

Istilah Lain dari "*balance bike*"	Draisine (dinamakan sesuai nama penemunya); Glide bike; Kick bike, Laufmaschine (bahasa jerman untuk "mesin berjalan"); Learner bike; Like-a bike; No-pedal bike; Pedal-less bike; Push bike; Running bike; Strider bike; Walking bike
Fitur Utama	Kursi dan setang yang dapat disesuaikan; sandaran kaki; Rem tangan atau tidak ada rem; Rentang kemudi yang terbatas; *Frame* yang sangat ringan terbuat dari kayu atau logam; Tidak ada pedal
Produsen Terkenal	Early Rider Bikes; FirstBIKE; Glide Bikes; Kazam; Kinder Bikes; Like-A-Bike; MiiR; MUNA; Novara; Radio Flyer; Scoot; Skuut; Strider Bikes; Trikke; TykesBykes; YBIKE; Yvolution; Zum
Perkiraan Harga	$ 40 sampai $ 315, dengan rata-rata harga sekitar $ 60 hingga $ 100
Ukuran	Tinggi *frame* 12 inci untuk usia 2 - 5 tahun; Tinggi *frame* 16 inci untuk usia 4,5 – 9 tahun

Manfaat utama dari *balance bike* secara langsung menargetkan keterampilan yang paling sulit dalam belajar mengendarai sepeda yaitu keseimbangan. Pada Tabel 2.1 digambarkan proses langkah-langkah untuk anak-anak dalam mempelajari cara mengendarai sepeda dimana *balance bike* menggantikan proses lama yaitu sepeda yang menggunakan

tambahan roda kecil untuk latihan. Sedangkan pada Tabel 2.2 memberikan informasi umum yang dikumpulkan mengenai istilah untuk penamaan *balance bike* di dunia, fitur utama pada sepeda, perkiraan harga dan ukuran sepeda yang dijual pada pasar serta produsen pembuat *balance bike* yang terkenal di dunia (Andrew Becker, 2017).

Dalam artikel yang ditulis oleh Natalie Martins membahas panduan dalam mengukur dan membeli *balance bike*. Perbedaan ukuran sepeda, kualitas dan fitur yang dimiliki oleh *balance bike* memberikan pengalaman dalam berkendara yang diklasifikasikan menjadi 11 kriteria utama dalam memilih *balance bike* terbaik untuk anak-anak yaitu ukuran, berat, geometri, jenis ban, rem, radius putar, sandaran kaki, bearing, material *frame*, pegangan tangan dan baut. Ukuran dalam memilih *balance bike* merupakan hal yang paling penting dimana ukuran ban dan tinggi tempat duduk menjadi hal yang dipertimbangkan. Hal tersebut dijelaskan dalam tabel dibawah ini yaitu:

Tabel 2.3 Panduan Ukuran Pembelian *Balance Bike* (Martins, 2019)

Ukuran	*Inseam* (In)	Ukuran Roda (In)	Tinggi Anak (In)	Merk Sepeda
18 Bulan	10,5 – 12	10 atau 12	30,5 – 32,5	Strider, WOOM 1
24 Bulan	11,5 – 13	12	32,5 – 34	Swagtron K3, Strider Sport
2 T	13 – 14,5	12	34,5 – 36,5	Yedoo Too Too, GOMO
3 T	14,5 – 16	12 atau 14	36,5 – 38,5	Radio Flyer, Banana Bike GT
4 T	16 – 18	12 atau 14	38,5 – 41,5	Ridgeback Scoot, WOOM 1 PLUS
5/5 T	18 – 19,5	14 atau 16	41,5 – 45	Strider 14X, Ridgeback Scoot XL
6 T	19,5 – 23	16	45 - 48	Bixe 16, Strider Sport 16
7 T	23 dan lebih	16	48 dan lebih	Strider Sport 16, Go Glider 16

Dalam aturan umum, berat sepeda tidak boleh lebih 30 % dari berat anak. Keseluruhan berat dipengaruhi oleh rangka dan juga roda sepeda. Jenis ban busa memiliki berat lebih ringan daripada ban udara. Perbedaan tersebut mempengaruhi harga, kualitas serta performa *balance bike* dari sepeda dengan harga $75 dibandingkan dengan $200. Geometri dari *balance bike* juga

mempengaruhi performa dari sepeda dimana sepeda yang memiliki bentuk geometri yang baik akan membantu anak-anak dalam belajar menyeimbangkan dan bermanuver. Beberapa faktor penting dalam membuat geometri sepeda antara lain desain rangka dan jarak sumbu roda, bentuk dan ukuran setang, posisi kursi terhadap ban, dan sudut dari garpu depan.

(a)

(b)

Gambar 2.3 Posisi Geometri *Balance Bike* yang (a) Baik (b) Buruk (Martins, 2019)

Wheelbase merupakan jarak antara dua roda sepeda yang menyentuh tanah dimana sepeda dengan jarak roda lebih panjang lebih stabil dan mudah untuk diseimbangkan. Kemudian *cockpit* merupakan jarak ruang antara kursi dengan stang. Pada sepeda dengan jarak *cockpit* yang sedikit akan menghalangi anak dalam bersandar pada setang saat mengendarai sepeda. *Fork angle* memiliki peranan penting dalam kemampuan manuver sepeda. *Fork* yang memiliki posisi lebih tegak akan mengurangi jarak roda sepeda dan memberikan lebih banyak beban pada roda depan. *Balance bike* yang dirancang dengan baik akan memiliki jarak yang sedikit antara ban belakang dengan kursi saat posisi terendah. Menempatkan kursi posisi rendah pada rangka membantu menurunkan pusat gravitasi pada sepeda sehingga lebih mudah untuk diseimbangkan dalam kecepatan rendah (Martins, 2019).

Terdapat banyak jenis *balance bike* yang beredar dipasaran dengan material *frame* dari kayu dan metal. Dan beberapa lebih mirip seperti mainan daripada sepeda. Semakin mahal harga *balance bike* maka semakin mendekati sepeda orang dewasa dengan perbedaan pada bagian *drivetrain* dan komponen lainnya.

Gambar 2.4 FirstBIKE *Limited Orange* (The FirstBIKE Co., 2020)

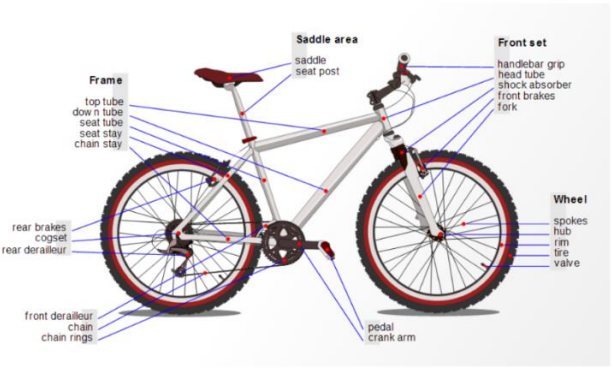
Salah satu merk *balance bike* yang mirip seperti mainan yakni FirstBIKE limited, yang diproduksi di jerman. Sepeda dengan harga $200 terbuat dari bahan komposit yang dibuat dengan metode *injection-molded.* Komposisi material pada *frame* terdiri dari 30% serat kaca diperkuat komposit nilon. Material yang memiliki kekuatan serta durabilitas yang tinggi dan juga ringan. FirstBIKE dapat digunakan oleh anak-anak dari usia 2 – 5 tahun. FirstBIKE *limited* memiliki berat sebesar 3,9 kg dengan sistem pengereman yang dapat menerima beban maksimum sebesar 35 kg.

Selanjutnya merupakan merk *balance bike* yang paling dikenal oleh masyarakat yakni Strider. Sejak didirikan pada tahun 2007, strider berhasil menjual lebih dari 700.000 sepeda di seluruh dunia. Model yang paling popular yaitu sport dengan roda berukuran 12 inci. Strider sport dijual dengan harga $119 dengan berat 2,9 kg dimana material *frame* terbuat dari baja. Sepeda ini memiliki fitur sandaran kaki, dudukan rem, pelindung pada ujung setang, serta menggunakan ban busa. Strider sport dapat digunakan oleh anak-anak berusia 18 bulan sampai 3 tahun dengan berat maksimal sebesar 27 kg (Schuler, 2014).

Gambar 2.5 Strider Sport (Strider Sports International, 2020)

2.3 *Frame Bike*

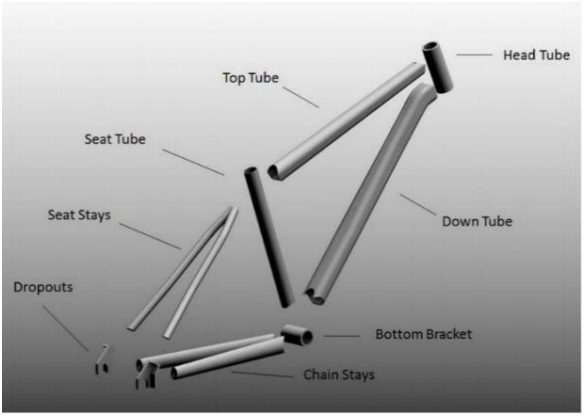
Sebuah *frame* sepeda merupakan pusat sistem untuk mendukung dan menentukan bagian komponen lainnya seperti sistem *chain-drive*, *handle-bar* dan sistem *steering*, pemasangan pedal dan tempat duduk. Untuk mengetahui performa yang baik dari sepeda harus memenuhi beberapa kondisi seperti stabilitas, kualitas berkendara, ergonomis untuk pengendara, dll. Sepeda saat ini sudah berumur lebih dari 100 tahun, dengan sedikit perubahan sepeda masih sangat penting untuk digunakan dalam berpergian. Sekarang ada lebih dari satu miliar sepeda di seluruh dunia, dua kali lebih banyak daripada mobil, bukan hanya sebagai moda transportasi tetapi juga digunakan untuk olahraga rekreasi, sebagai latihan fisik dan juga sebagai transportasi yang paling ramah lingkungan dan murah.



Gambar 2.6 Komponen Pada Sepeda (M.Zubair Ahmed, 2014)

Pada penelitian yang dilakukan oleh M. Zubair Ahmed, *frame* sepeda yang disumbangkan untuk dilakukan investigasi terhadap *fatigue* memiliki bentuk desain *diamond frame* yang terdiri dari bagian depan dan belakang segitiga. Desain ini menjadi standar industri untuk *frame* sepeda selama lebih dari 100 tahun. *Frame* ini terdiri dari *top tube, down tube, head tube, seat tube,*

seat stays dan *chain stays*. *Head tube* pada *frame* berfungsi untuk menahan *steer tube* dari *fork*, yang menahan roda depan saat berbelok. *Top tube* dan *down tube* menghubungkan bagian *head tube* dengan *seat tube* dan *bracket* bawah. Sedangkan *seat tube* menahan tiang kursi untuk *saddle* dan *bracket* bawah menahan engkol untuk pedal. Dan *seat stays* dan *chain stays* menahan *rear dropout* yang menghubungkan roda belakang dengan *frame*. Metode pembuatan *frame* sendiri pada umumnya menggunakan pengelasan, sebagian besar pabrikan menggunakan metode pengelasan untuk menggabungkan *frame tubes* dikarenakan sangat terjangkau serta memberikan kekuatan penyambungan yang tinggi. Pengelasan TIG merupakan jenis pengelasan yang paling umum digunakan untuk *frame* sepeda yang menggunakan bahan aluminium *alloy* 6061. Selain itu hasil dari lasan TIG memiliki kualitas yang tinggi pada lasan permukaan dan tabung tipis.



Gambar 2.7 *Tubing Diagram* pada *Frame* Sepeda (M.Zubair Ahmed, 2014)

Terdapat berbagai macam jenis material yang digunakan dalam proses produksi *frame* sepeda. Pada awalnya *frame* sepeda dibuat dengan kayu, namun dengan berkembangkan teknologi manufaktur sekarang *frame* modern secara massal dibuat dengan

bahan aluminium, *steel*, titanium sampai *carbon fiber*. Namun terdapat beberapa bahan yang juga dapat digunakan seperti bambu, termoplastik dan magnesium. Penggunaan sepeda juga menjadi dasaran dalam pemilihan bahan dimana *frame* sepeda yang baik memiliki berat yang ringan dan kekuatan yang tinggi. Bahan yang digunakan untuk *frame* sepeda gunung membutuhkan beberapa sifat mekanik yang tinggi. Sifat-sifat mekanik tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.4. dimana tidak ada bahan yang lebih unggul antara satu sama lain, yang menjelaskan mengapa pabrikan selalu mengembangkan teknologi untuk *frame* dengan variasi material yang berbeda (Ahmed, 2014).

Tabel 2.4 Spesifikasi Material Untuk *Frame* Sepeda (M.Zubair Ahmed, 2014)

Properties	***Aluminum* – 6061-T6**	***Steel* - 4130**	***Titanium* – Grade 9**	***Carbon Fiber***
Modulus of Elasticity (GPa)	72	205	91-95	275-415
Yield Strength (MPa)	193-290	800-1.000	483-620	*Varies*
Tensile Strength (MPa)	241-320	650	621-750	*Varies*
Fatigue Strength at 50,000 Cycles (MPa)	75	250	250	*Varies*
Density (kg/m3)	2.700	7.800	4.480	1.800
Weldability and Machinability	*Excellent*	*Excellent*	*Fair*	*Fair*
Cost (rupess per kg)	280	170	4000	*Varies*

Rangka *balance bike* pada umumnya terbuat dari material aluminium, baja, kayu, dan komposit. Aluminium *alloy* 6061 biasanya digunakan sebagai material pada sepeda yang terbuat dari metal dengan sifat mekanik yang kuat, ringan, serta tahan karat. Sepeda yang terbuat dari kayu lebih ramah lingkungan, tetapi kurang dapat disesuaikan dalam pengaturannya dalam berkendara. Dan rangka yang terbuat dari bahan komposit memiliki berat yang jauh lebih ringan dibandingkan dengan material lainnya. Hal tersebut juga didukung oleh sifat material komposit yang tahan karat serta memiliki struktur yang kuat (Martins, 2019).

Gambar 2.8 Anatomi Geometri BXT *Balance Bike* (Shenzhen BXT Technology Co., 2018)

Perusahaan manufatur sepeda asal cina yakni Shenzhen BXT Technology Co., Ltd., menjual berbagai macam jenis komponen sepeda yang dibuat dengan material *carbon fiber*. BXT juga memproduksi *frame* untuk *balance bike* menggunakan material *carbon fiber* dengan jenis T800 *carbon* yang dapat digunakan pada roda berukuran 12 inci. *Frame* tersebut memiliki dimensi ukuran yang ditunjukkan pada gambar diatas, dimana berat dari *frame* tersebut sebesar 292,5 gram. Dengan fitur yang dimiliki oleh *frame* tersebut, *frame* dijual dengan harga yang tergolong mahal apabila dibandingkan dengan *balance bike* lainnya yaitu sebesar $300 (Shenzhen BXT Technology Co., 2020).

(a) (b)

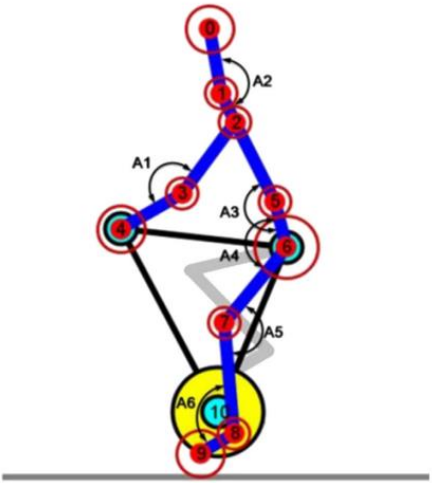
Gambar 2.9 Dimensi Geometri *Frame* BXT *Balance Bike* (a) Samping (b) Belakang (Shenzhen BXT Technology Co., 2020)

Dalam beberapa tahun terakhir perkembangan untuk mengkustomisasi desain sepeda sangatlah pesat, dengan begitu kenyaman mengendarai sepeda merupakan faktor penting yang harus diperhatikan dalam mengembangkan sepeda. Dari sudut pandang ergonomis, konsep "*fitting object to the human body*" digunakan untuk merancang *frame* sepeda dalam penelitian yang dilakukan oleh Shih-Wen Hsiao pada tahun 2015. Dalam penelitian ini menggambarkan postur pengendara pada saat mengendarai sepeda seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9, dimana terdapat *feature points* yang meliputi kepala (0), leher (1), bahu (2), siku (3), tangan (4), pinggang (5), daerah inguinal (6), lutut (7), tulang pergelangan kaki (8) dan sol (9), yang semuanya ditandai dengan titik merah. Dengan begitu terdapat tiga feature points pada frame sepeda yaitu *handle-bars* (4), *saddle* (6) dan *cranck centre* (10). Desain dari posisi realtif antara tiga titik akan menentukan ukuran dari *frame* total. Diantara semua *feature points*, titik 4, 6 dan 9 adalah tempat dimana terdapat interaksi ukuran manusia dengan *frame*. Dari titik-titik tersebut derajat postur kenyamanan dapat diukur sehingga menghasilkan desain ukuran *frame*.

Selain itu, berdasarkan keterkaitan yang terbentuk antara *feature points*, penelitian ini mendefinisikan enam *feature points* yang berhubungan dengan derajat tingkat kenyamanan untuk dianalisis dan memahami korelasi hubungan antara *feature angles* dan tingkat kenyamanan. Definisi *feature angles* ditunjukkan pada Gambar 2.10, simbol A1 menandakan sudut *elbow* yang dibentuk oleh 2-3-4; A2 menandakan sudut leher yang dibentuk oleh 0-1-2; A3 menandakan sudut pinggang yang dibentuk oleh 2-5-6; A4 menandakan sudut *sciatic* yang dibentuk oleh 5-6-7; A5 menandakan sudut *patellar* yang dibentuk oleh 6-7-8 dan A6 menandakan sudut *malleolar* yang dibentuk oleh 7-8-9. Penelitian ini mengukur posisi relatif pada setiap *feature points* pada bidang proyeksi, *feature angles* yang disebutkan diatas mengacu pada sudut yang dibentuk oleh *feature points* pada bidang proyeksi dan nilai dari masing-masing sudut dapat dihitung dengan

menggunakan vektor *inner-product* seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 2.1.

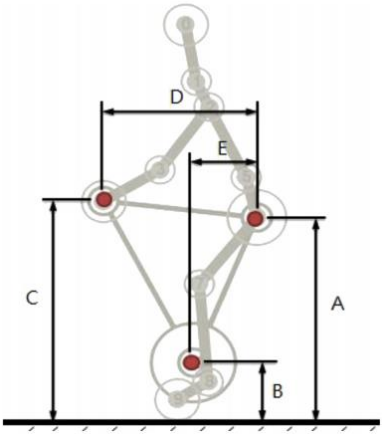
$$\emptyset = cos^{-1}\left(\vec{u} \times \vec{v} \Big/ \overrightarrow{|u|} \times \overrightarrow{|v|}\right) \quad (2.1)$$



Gambar 2.10 Posisi *Feature Points* dan *Feature Angle* yang Terbentuk Saat Berkendara (Shih-Wen Hsiao, 2015)

Dimana ∅ mengacu pada dua nilai yang dibentuk oleh dua vektor $\vec{u}\ dan\ \overrightarrow{v}$, setelah dilakukan analisis dan dirangkum lebih lanjut, hubungan sebab akibat antara faktor dan dejarat kenyamanan dalam berkendara dapat diperoleh. Skema ukuran dari *frame* sepeda dapat diperoleh dari percobaan mengendarai yang ditunjukkan pada Gambar 2.11. Secara umum, tiga *feature points* yaitu *handle-bars, the saddle* dan *central crank* digunakan sebagai inti dalam menandai ukuran *frame*. Simbol A menggambarkan jarak vertikal dari *saddle* ke tanah, B menunjukkan jarak vertikal dari *crank center* ke tanah dan C menunjukkan jarak vertikal dari *handle-bars* ke tanah, D menunjukkan jarak horizontal dari *handle-*

bars ke *saddle* dan E menunjukkan jarak horizontal dari *crank center* ke *saddle*. Dengan metode penandaan tersebut, perbedaan ukuran *frame* untuk dimensi manusia dapat diilustrasikan dengan jelas (Shih-Wen Hsiao, 2015).



Gambar 2.11 Definisi Ukuran *Frame* Sepeda (Shih-Wen Hsiao, 2015)

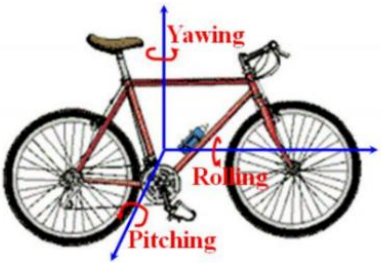
2.4 Dinamika Sepeda

Sepeda dan/atau sepeda motor memiliki dinamika yang unik terkait dengan konfigurasinya dimana dipengaruhi oleh beberapa hal seperti kecepatan, konfigurasi *frame* atau kerangka utama dan konfigurasi *fork* atau batang pemegang dan penggerak roda kendali. Hingga saat ini, pengkajian terhadap dinamika sepeda secara intensif terus berkembang, masih ada beberapa karakteristik dinamika sepeda yang belum dipahami dan diformulasikan secara lengkap sebagaimana yang disampaikan oleh Freeman Dyson, seorang ahli fisika teoritik dan matematikawan dalam media *Wired News* pada tahun 1998. Kajian tentang dinamika sepeda mencakup tentang masalah dinamika serta pengendalian sistem mekanik seperti masalah kestabilan dan pengendalian (*steering*). Perlu digaris bawahi bahwa dinamika utama sepeda muncul akibat

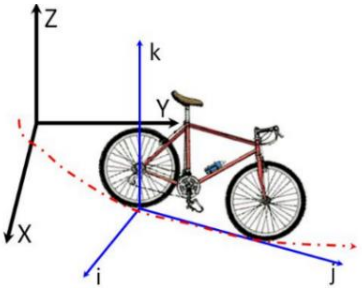
konfigurasi kerangka utama (*frame*) dan dinamika batang kemudi (*fork*).

Pada penelitian Rianto Adhy S., pemodelan kinematika dan dinamika sepeda motor masih dilakukan dengan mengabaikan faktor mesin, suspensi, ban dan pengemudi. Derajat kebebasan utama ditinjau berdasarkan gerakan rotasi pada ketiga sumbu yang berbeda yaitu gerak *pitching*, *rolling* dan *yawing* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12. Gerak sepeda relatif didefinisikan pada titik beratnya dan juga gerak sepeda pada ruang inersia. Maka dua tata acuan koordinat (TAK) digunakan pada proses pemodelan yaitu TAK inersia (XYZ) dan TAK benda (ijk) yang dideskripsikan pada Gambar 2.13.

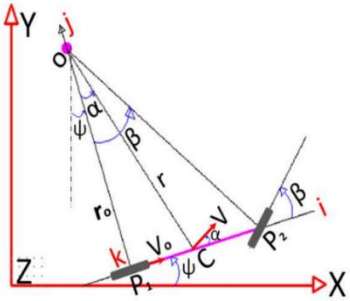
Langkah awal yang dilakukan adalah pemodelan kinematik gerak sepeda pada ruang inersia. Hubungan antara variabel gerak sepeda pada bidang horisontal (bidang X-Y ataupun bidang i-j) dapat diturunkan dengan skema pada Gambar 2.14. Dalam skema tersebut dapat dilihat hubungan antara variabel defleksi roda depan (sudut kemudi) β, dengan sudut orientasi kerangka utama ψ, arah vektor kecepatan a, radius putar r dan r_0. Variasi harga dari variabel tersebut akan menentukan perhitungan respon dinamika baik pada bidang lateral benda (bidang i-k) ataupun longitudinal benda (bidang k-j) (Rianto Adhy Sasongko, 2010).



Gambar 2.12 Derajat Kebebasan Utama (Rianto Adhy S., 2010)



Gambar 2.13 Tata Acuan Koordinat Dinamika Sepeda (Rianto Adhy S., 2010)



Gambar 2.14 Skema Kinematika Sepeda (Rianto Adhy S., 2010)

Dapat diperoleh persamaan kinematika berdasarkan skema pada Gambar 2.14, dimana persamaan 2.2, 2.3, 2.4 secara berturut-turut menyatakan (pada bidang inersia) kecepatan gerak sepeda dalam arah X, arah Y dan perubahan sudut orientasi ψ. Perubahan posisi titik berat sepeda pada ruang inersia dapat diperoleh dengan mengintegrasikan Persamaan 2.2 dan 2.3, kemudian percepatan pada sumbu inersia dapat diperoleh juga dengan menurunkan waktu persamaan tersebut. Variabel dari persamaan kinematik tersebut digunakan dalam pembentukan dinamika sepeda.

$$V_x(t) = V_o\left[\cos(\psi) - \frac{a}{b}\sin(\psi)\tan(\beta)\right] \qquad (2.2)$$

$$V_y(t) = V_o\left[\sin(\psi) + \frac{a}{b}\cos(\psi)\tan(\beta)\right] \quad (2.3)$$

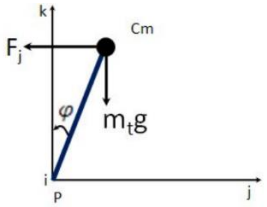
$$\psi = \frac{V}{r} = \frac{\tan(\beta)}{b}V_o \quad (2.4)$$

Gerak *leaning* atau *rolling* menggunakan persamaan dinamika yang dimodelkan secara matematika dengan memperhatikan kesetimbangan momen pada bidang latera sepeda (bidang i-k) dengan asumsi tidak terjadi *slip* pada roda. Hubungan dinamika *leaning* ini dengan sudut kemudi β dan kecepatan dapat dinyatakan oleh persamaan diferensial non-linier yang dapat dilihat pada Persamaan 2.5 sebagai berikut:

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{m_t g l \sin(\varphi)}{J} + \frac{m_t l V_o \cos(\varphi)}{J}\frac{\sqrt{\left(\frac{a}{b}tan^2(\beta)V_o\right)^2 + \left\{\frac{\left(\alpha + a tan^2(\beta)\right)d\beta}{dt} + V_o \tan(\beta)\right\}^2}}{\sqrt{b^2 + \alpha^2 tan^2(\beta)}} \quad (2.5)$$

Persamaan diatas dapat dilinierkan untuk memperoleh bentuk berikut:

$$\varphi = \frac{m_\tau g l}{J}\varphi + \frac{l m_\tau V_o}{J\left(\frac{V_o}{b}\beta + \frac{a}{b}\beta\right)} \quad (2.6)$$



Gambar 2.15 Dinamika *Leaning* (Rianto Adhy S., 2010)

Selanjutnya Persamaan 2.6 dapat digunakan untuk membentuk fungsi transfer sudut *leaning* terhadap *input* sudut kemudi seperti yang ditunjukkan Gambar 2.15 dan digunakan

untuk melakukan analisis kestabilan pada bidang lateral. *Front-fork* sepeda atau garpu depan memiliki kontribusi yang signifikan terhadap dinamika sepeda secara keseluruhan, saat memberikan *input* sudut kemudi dapat mengintroduksi momen tambahan yang akan mempengaruhi dinamika *leaning* sepeda. Dan sebaliknya gerak *leaning* sepeda akan memberikan beban torsi tambahan yang dirasakan pada batang kemudi akibat bentuk spesifik struktur *fork* tersebut. Momen yang bekerja pada *front-fork* akibat gerak *leaning* dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$M_L = F_L d = m_t g t sin(\varphi) t cos(\lambda) \tag{2.7}$$

di mana λ adalah *rake angle* atau sudut kemiringan garpu. Sedangkan momen yang muncul pada *fork* akibat diaplikasikannya suatu sudut kemudi β tertentu dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$M_S = m g t sin(\delta) \sin(\beta) \cos(\lambda) \tag{2.8}$$

di mana δ adalah sudut antara poros putar kemudi dengan garis yang menghubungkan suatu titik pada poros putar dengan titik sentuh roda dengan tanah. Kedua momen pada persamaan 2.7 dan 2.8 akan memberikan beban torsi pada poros kemudi. Selain itu, karena konfigurasi *fork*, maka aplikasi suatu sudut kemudi tertentu akan membuat titik kerja gaya normal (pada titik sentuh roda depan dengan tanah) bergeser keluar dari bidang simetri (bidang longitudinal *frame*) sepeda. Hal ini akan menyebabkan munculnya momen *lean* tambahan yang akan membuat persamaan dinamika *leaning* menjadi :

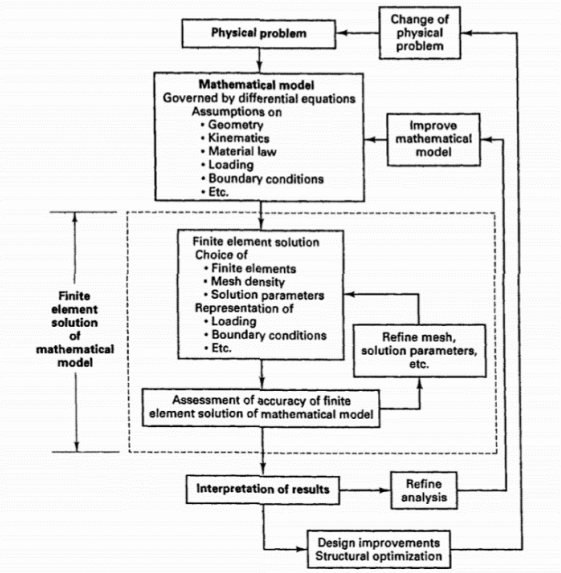
$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{a t m_t g sin(\beta)}{J(b + t cos(\beta))} + \frac{m_t g l sin(\varphi)}{J} + \frac{m_t l V_o \cos(\varphi)}{J} \frac{\sqrt{\left(\frac{a}{b} tan^2(\beta) V_o\right)^2 + \left\{\frac{\left(\alpha + a tan^2(\beta)\right) d\beta}{dt} + V_o \tan(\beta)\right\}^2}}{\sqrt{b^2 + \alpha^2 tan^2(\beta)}} \tag{2.9}$$

2.5 Metode Elemen Hingga

Prosedur elemen hingga saat ini menjadi bagian penting dan menjadi hal yang tidak terpisahkan dari analisis serta gambar gambar teknik. Program komputer elemen hingga banyak digunakan oleh semua cabang dari bidang teknik untuk menganalisis struktur, padatan dan cairan. Penggunaan ini akan meningkat secara signifikan pada tahun mendatang, yang berkembang selaras dengan perkembangan dari metode elemen hingga sebagai solusi untuk permasalahan yang dihadapi oleh teknisi atau praktisi dengan datangnya komputer digital. Esensi dari permasalahan teknik yang dapat disolusikan menggunakan persamaan aljabar dan kemudian hanya melalui penggunaan komputer digital membuat proses analisis teknik menjadi efektif dan dapat diterapkan secara umum sehingga metode elemen hingga menjadi daya tarik dalam praktik rekayasa.

Metode elemen hingga biasanya digunakan untuk menyelesaikan permasalahan fisika dalam analisis dan gambar teknik. Alur proses analisis tersebut dirangkum secara umum pada Gambar 2.16, dimana permasalahan fisika melibatkan struktur asli atau komponen yang mengalami beban tertentu. Idealisasi dalam permasalahan fisika untuk model matermatika membutuhkan asumsi tertentu untuk persamaan diferensial yang menentukan model matematika. Dalam gambar teknik, sangatlah penting pengaplikasian dari metode elemen hingga yang dapat diandalkan dan efisien. Kemudahan tesebut sangat membantu perancang karena waktu yang terbatas untuk menganalisis dan harus mendapatkan solusi yang akurat dari model matematika yang dipilih dengan cepat tanpa "*trial and error*". Metode elemen hingga secara sederhana tidak dapat diterima dalam rekayasa teknik. Tujuan umum dari metode elemen hingga adalah perhitungan estimasi kesalahan yaitu estimasi seberapa dekat solusi dari elemen hingga mendekati solusi yang tepat dari model matematika. Perkiraan tersebut menunjukkan apakah diskritisasi

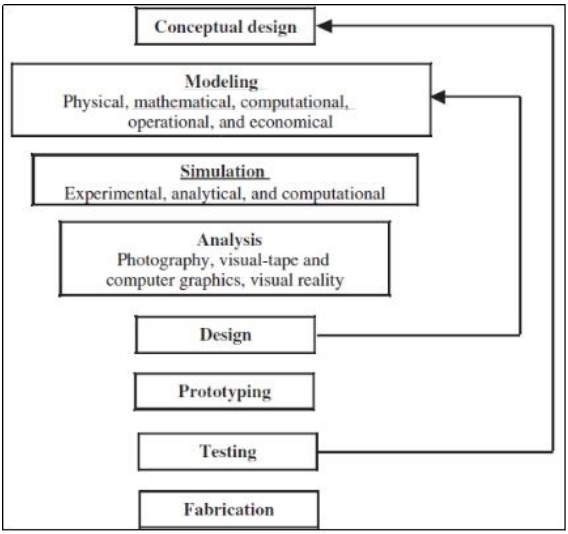
spesifik metode elemen hingga memang menghasilkan prediksi respon yang akurat dan kemudian perancang dapat menentukan secara rasional apakah hasil yang diberikan dapat digunakan (Bathe, 2014).



Gambar 2.16 Proses Analisis Metode Elemen (Bathe, 2014)

Saat ini metode elemen hingga telah dikembangkan menjadi teknologi yang sangat diperlukan dalam pemodelan dan simulasi *advanced engineering systems* di berbagai bidang seperti perumahan, transportasi, komunikasi, dan lainnya. Dalam membangun sistem rekayasa modern, *engineer* dan *designer* melalui beberapa proses seperti pemodelan, simulasi, visualisasi, analisis, desain, *prototype*, pengujian, dan fabrikasi yang rumit. Sering kali, banyak pekerjaan yang harus dilakukan sebelum fabrikasi produk akhir atau sistem. Hal ini dilakukan untuk memastikan kinerja produk yang dihasilkan dan juga efektivitas biaya pada proses manufaktur produk tersebut. Pada awalnya,

FEM (*Finite Element Method*) digunakan untuk memecahkan masalah analisis solid dan struktural. Setelah diaplikasikan pada analisis solid dan struktural, FEM juga diaplikasikan ke bidang lain seperti analisis termal, analisis aliran fluida, analisis *piezoelectric*, dan lain-lain (G.R. Liu, 2013).



Gambar 2.17 Proses Fabrikasi *Advanced Engineering Systems* (G.R. Liu, 2013)

Prosedur dari permodelan komputasi yang menggunakan FEM secara umum terdiri dari empat langkah, yaitu:

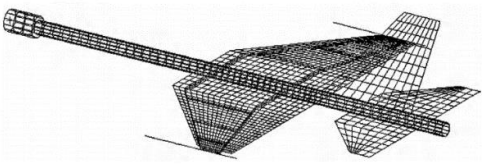
1. *Modelling of geometry*

Objek Geometri merepresentasikan dari kumpulan elemen-elemen, dan garis-garis/permukaan berliku dan elemen-elemen ini yang diasumsikan sebagai bagian/segmen yang datar/lurus (diasumsikan linier). Elemen yang lebih banyak, representasi dari bagian berliku oleh tepian lurus akan semakin halus dan akurat. Akan tetapi, dengan elemen yang lebih banyak, waktu komputasional yang dibutuhkan akan semakin lama. Ada banyak

cara dalam membuat geometri yang baik dengan menggunakan *software* pada komputer untuk membuat *finite element*. Poin-poin bisa dibuat dengan mudah dengan *keying* pada koordinat. Garis dan kurva bisa dibuat dengan menyambungkan poin-poin atau *nodes*. Permukaan bisa dibuat dengan menyambungkan, rotasi, atau translasi garis atau kurva yang ada. Bentuk solid bisa dibuat dengan berbagai cara penyambungan, rotasi, translasi permukaan yang ada. Poin, garis, kurva, permukaan, dan bentuk solid bisa di translasikan, dirotasikan, direfleksikan untuk membuat bentuk baru. Terdapat banyak *software* CAD (*Computer Aided Design*) yang dapat digunakan untuk desain teknik dimana dapat menghasilkan *file* yang berisi geometri dari sistem teknik yang dirancang dan *file* tersebut dapat dibaca oleh *software* CAE (*Computer Aided Engineering*). Namun ada beberapa *software* CAD yang menggabungkan paket pemodelan dengan simulasi yang sangat berguna dalam pembuatan *prototype* produk baru.

2. *Meshing*

Ketika geometri atau domain direpresentasikan menjadi bagian-bagian kecil, yang disebut elemen atau sel, proses ini disebut *meshing*. Alasan mengapa *meshing* ini dilakukan adalah karena jika permasalahan *domain* bisa dibagi menjadi elemen-elemen kecil menggunakan *grid* atau *nodes*, variasi dari solusi diantara elemen bisa diaproksimasi dengan mudah menggunakan fungsi sederhana seperti polinomial. Variasi kolektif dari solusi untuk semua elemen ini kemudian membentuk variasi solusi untuk seluruh permasalahan *domain*.



Gambar 2.18 *Mesh* Untuk Desain Model Skala Pesawat Terbang Dalam Pengujian Dinamis (G.R. Liu, 2013)

Mesh generation adalah proses yang sangat penting dan memakan waktu yang lama untuk analisis. Biasanya analis berpengalaman akan menghasilkan *mesh* yang lebih kredibel untuk masalah yang kompleks. *Domain* harus disatukan dengan sesuai seperti segitiga dan segiempat dalam 2D, tetrahedron dan heksahedron dalam 3D. Informasi seperti konektivitas elemen harus dibuat selama *meshing* untuk digunakan dalam bentuk persamaan FEM. Pengembangan *generator mesh* secara otomatis masih dalam penelitian, namun *generator mesh* semi otomatis sudah tersedia disebagian besar *software* FEM komersial.

3. Spesifikasi *property* material

Banyak sistem rekayasa yang terdiri dari beberapa komponen dan masing-masing komponen bisa terdiri dari material yang berbeda. Faktanya, walaupun pada *single* komponen, akan ada *multiple* material seperti halnya pada material komposit. Sifat-sifat material bisa didefinisikan untuk sekumpulan elemen ataupun untuk material individu jika dibutuhkan. FEM bisa bekerja dengan mudah untuk sistem dengan *multiple* material, dimana hal ini merupakan keuntungan yang signifikan dari FEM. Untuk fenomena atau fisika yang berbeda, perbedaan sifat-sifat material dibutuhkan. Sebagai contoh, *modulus young* dan modulus geser dibutuhkan untuk analisis tegangan solid dan struktur dimana koefisien konduktivitas termal akan dibutuhkan untuk analisis termal. Ada beberapa *database* material yang komersil yang bisa digunakan untuk material yang telah distandarisasi, namun eksperimen biasanya dibutuhkan untuk menentukan keakuratan dari sifat-sifat material yang spesial untuk digunakan pada sistem.

4. *Boundary, initial, and loading condition*s

Boundary, *initial*, dan *loading condition*s mempunyai peran yang sangat menentukan pada simulasi. Untuk menentukan kondisi yang biasanya diselesaikan dengan mudah menggunakan *preprocessor* komersial dan juga terkadang digambarkan dengan grafik. Peneliti dapat menspesifikasikan kondisi-kondisi ini dengan identitas geometri (titik, garis atau kurva, permukaan, dan bentuk solid) atau *mesh identity* (*nodes*, *element*, *element edges*, dan

element surface). Kemudian, untuk mengakuratkan simulasi kondisi-kondisi ini untuk sistem rekayasa yang nyata membutuhkan pengalaman, pengetahuan, dan penilaian rekayasa yang baik (G.R. Liu, 2013).

Secara umum, tujuan dari *finite element* analisis adalah untuk memperoleh nilai pendekatan numerik sehingga dapat diselesaikan dengan bantuan komputer, maka *Finite Element* Analisis (FEA) dikatakan bersifat *computer oriented*. Saat ini pengunaan *Finite Element* Analisis untuk menghitung dan mensimulasikan model dengan perangkat komputer mengalami perkembangan yang sangat pesat. Perkembangan *hardware* komputer yang sangat pesat mendukung proses perhitungan dengan metode numerik. Program FEA yang berkembang pesat serta banyak digunakan untuk melakukan analisis struktur adalah *software* ANSYS. ANSYS WORKBENCH dapat melakukan beberapa macam tipe simulasi yang bermacam-macam seperti: struktural, thermal, mekanika fluida, analisa elektromagnetik, dll atau bahkan gabungan analisis seperti thermal dengan struktur atau lainnya sehingga *software* tersebut sering dikenal dengan *Finite Element Multyphisic* (Awwaluddin, 2013).

2.6 *Additive Manufacturing*

Additive manufacturing (AM) atau pencetakan objek tiga dimensi telah memperkenalkan metode produksi baru dengan desain, manufaktur dan distribusi kepada pengguna akhir. Teknologi ini telah memberikan kebebasan besar dalam mendesain untuk membuat komponen yang kompleks, produk yang dapat dikostumisasi dan meminimalisasi limbah secara efektif. Revolusi industri terakhir dinamakan industri 4.0, menggunakan sistem integrasi "*smart manufacturing*" (SM) dan mengembangkan teknologi informasi. Oleh sebab itu, AM memiliki peran yang penting dalam industri 4.0 dengan berbagai macam manfaat seperti penghematan waktu dan bahan, *rapid prototyping*, efesiensi yang tinggi dan metode produksi yang terdesentralisasi. (Mehrshad Mehrpouya, 2019).

Proses AM ditandai dengan meningkatnya massa benda kerja, AM mewakili salah satu dari tiga kelas utama dalam teknologi manufaktur, proses subtraktif dimana massa benda kerja direduksi dan proses formatif dimana massa benda kerja dikonservasi. (Gebhardt, 2011). Kemudian proses AM sendiri sangat berbeda dengan proses kimia dan termal seperti etsa, pelapisan, oksidasi dan perlakuan panas yang berlaku (reaktif) untuk semua permukaan terbuka serta proses tradisional untuk membuat bahan komposit. (Mary Kathryn Thompson, 2016). Dalam proses AM sendiri memiliki metode yang berbeda dengan berbagai macam jenis teknik penyambungannya. Metode AM dan teknik penyambungan konvensional berhubungan dengan ukuran lapisan dan durasi waktu untuk memproduksinya. Faktor-faktor ini juga menentukan perincian resolusi dan produktivitas yang diberikan oleh teknologi AM. Bahkan jika dalam penggunaan bahan yang sama dan juga teknik penyambungannya, teknologi AM masih bisa berbeda antara satu sama lain karena perbedaan implementasi teknis dari *feedstock delivery* dan sistem pembentukan lapisan (Martina Kohlhuber, 2017).

Selain itu AM memperkenalkan banyak perubahan yang signifikan dalam desain produk, pengolahan bahan, proses manufaktur dan manajemen rantai persediaan. Apabila dibandingkan dengan produksi tradisional (seperti permesinan, penempaan, finishing, pengecoran, dll.) AM memberikan peluang yang sangat besar dalam produksi keberlanjutan (Liang Hao, 2010).

Keuntungan dari manufaktur berkelanjutan yang menggukan AM adalah sebagai berikut:

1. Semakin sedikit bahan baku yang dibutuhkan dalam proses rantai persediaan.
2. Efisiensi sumber daya yang tinggi dalam proses manufaktur.
3. Berkurangnya konsumsi, bahan limbah dan polusi dalam proses manufaktur.
4. Efisiensi dan fleksibilitas yang lebih tinggi dalam pendesainan bentuk produk.

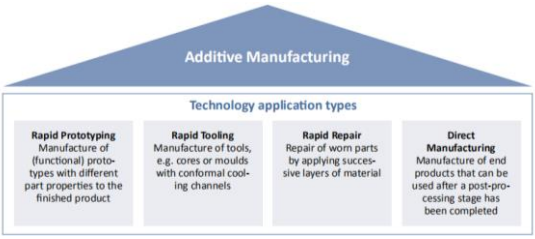
5. Semakin sedikit jumlah proses transportasi dan mengurangi karbon *footprint*.
6. Proses manufaktur yang terdesentralisasi dan lebih dekat dengan konsumen.
7. Menggunakan metode distribusi yang inovatif, memperpendek proses rantai persediaan dan berkolaborasi dengan yang lain.

2.6.1 *Rapid Prototyping*

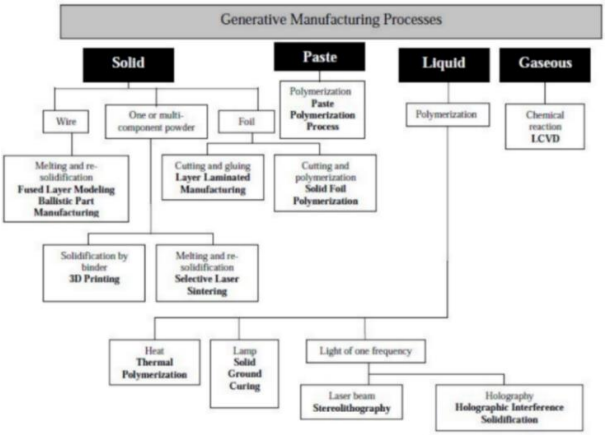
Rapid Prototyping (RP) adalah teknik membentuk dan merakit sebuah produk dengan cara yang cepat dengan integrasi antara sistem CAD (*Computer Aided Design*) dan mesin dengan sistem *Rapid prototyping* (3D *printing*, CNC). Pembentukannya dengan menambahkan *layer by layer* sesuai irisan yang diolah dengan CAD. (Andhy Rinanto, 2017). Dalam pengaplikasiannya proses RP berbeda dengan proses manufaktur konvesional lainnya dimana mengurangi bagian-bagian yang tidak diperlukan sedangkan proses manufaktur RP membentuk objek benda tiga dimensi berupa lapisan. Teknologi RP pertama kali diperkenalkan oleh ilmuan Jepang bernama Hideo Kodama pada tahun 1981 dengan membentuk model tiga dimensi dari bahan plastik-plastik menggunakan metode menyinari polimer cair dengan sinar ultraviolet. Selanjutnya pada tahun 1986 di California, USA ditemukan metode lain yaitu *stereolithiography* (SLA). Dengan pesatnya perkembangan metode lainnya mempercepat proses pembuatan purwarupa. Pada Gambar 2.19 menjelaskan berkembangnya *roadmap* dari *rapid technology* yang mendukung kemajuan proses manufaktur menggunakan AM.

Dalam proses RP objek atau model pertama yang dibuat secara elektronik dalam file CAD. Kemudian file CAD dikonversi kedalam format file STL menggunakan komputer atau mesin RP, lalu file STL tersebut dipotong-potong atau "*slicing*" menggunakan mesin tersebut untuk menghasilkan objek berlapis-lapis secara elektronik. Terakhir, mesin dapat menghasilkan objek secara fisik dengan berlapis-lapis dari hasil file "*slice*" berlapis.

Lapisan-lapisan dapat dibentuk dari bahan berbentuk filamen, tetesan atau laminasi. Bahan produksi RP berupa laminasi kertas, serbuk, termoplastik, *photopolymers* dan jenis bahan lainnya. Semua bahan ini dibentuk dengan cara dipadatkan, disambungkan, dileburkan, dilas atau dikeraskan sesuai dengan jenis metode AM. Ada beberapa metode yang sering digunakan yaitu *Selective Laser Sintering* (SLS), *Laminated Object Manufaturing* (LOM), *Stereolithiography* (SLA) dan *Fused Deposition Modeling* (FDM). Pada Gambar 2.20 dijelaskan klasifikasi RP berdasarkan bahan untuk proses manufakturnya (Anand.N, 2014).



Gambar 2.19 *Roadmap of Rapid Technology* (Martina Kohlhuber, 2017)

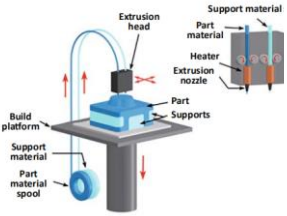


Gambar 2.20 Klasifikasi RP Berdasarkan Material Proses Manufaktur (Anand.N, 2014)

2.6.2 *Fused Deposition Modelling*

Salah satu contoh metode pembuatan RP yang terkenal saat ini adalah *Fused Layer Manufacturing* atau disebut juga dengan *Fused Deposition Modelling* (FDM) yang dipatenkan oleh Stratasys pada tahun 1989 dan saat ini telah menjual lebih banyak sistem untuk diaplikasikan pada industri daripada metode teknologi AM lainnya. Ketika masa berlaku paten telah habis pada tahun 2009, produk rakitan yang lebih sederhana serta harganya jauh lebih murah masuk ke dalam pasar dan membuat akses penggunaan FDM tidak hanya untuk peneliti tetapi juga untuk para penggemar. Perkembangan besar-besaran terhadap FDM yang terjadi saat ini menjadi penyebab tingginya peminatan kepada teknologi AM secara keseluruhan. Pada Tabel 2.5 dibawah ini dijelaskan salah satu metode AM yaitu FDM secara lebih spesifik (Martina Kohlhuber, 2017).

Tabel 2.5 Metode *Fused Deposition Modelling* (Martina Kohlhuber, 2017)

Metode	Spesifikasi	Gambar
Fused Deposition Modelling™ (FDM™)	**Sinonim**: *Fused Layer Manufacturing/Modelling* (FLM) **Kategori**: Ekstrusi bahan **Perilisan**: 1991 **Dipatenkan** oleh: Scott Crump (1989) **Prinsip Penyambungan**: *Hot Melt Adhesive Bonding* **Pembentukan Lapisan**: Ekstrusi filamen plastik oleh nozzle yang bergerak **Bahan**: Filamen plastik seperti *amorphous thermoplastics* (ABS, PLA) **Fitur Khusus**: Lebih banyak sistem yang dijual daripada jenis metode lainnya	

2.7 Prinsip 3D *Printer*

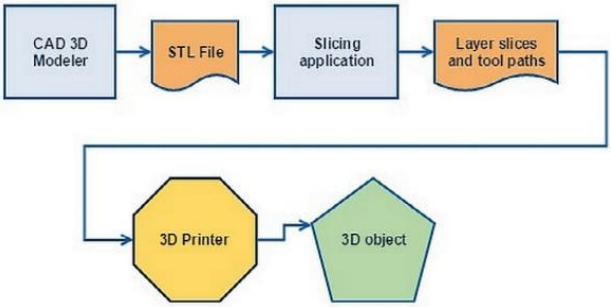
Pada dasarnya prinsip kerja mesin 3D *printer* tidak jauh berbeda dengan mesin *printer* pada umumnya, namun yang berbeda hanyalah format *file* untuk pencetakan. Pada Gambar 2.21 dijelaskan ilustrasi proses pencetakan objek tiga dimensi

menggunakan mesin 3D *printer*. Desain objek yang akan dibuat terlebih dahulu harus dikonversi ke dalam beberapa format *file* yang relevan dengan aplikasi yang digunakan. Desain awal objek menggunuakan aplikasi CAD dengan format gambar *.dwg* atau langsung dikerjakan dalam aplikasi *inventor* maupun *SolidWork* atau aplikasi pemodelan lain yang relevan. Kemudian hasil desain disimpan dalam bentuk format *.stl* untuk membentuk lapisan – lapisan yang membentuk objek menggunakan aplikasi pencetakan tiga dimensi yaitu *Cura* (Izabela Hager, 2016).

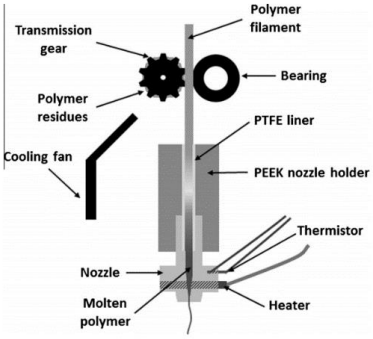
Dalam penggunaannya, mesin 3D *printer* menggunakan input material berbentuk *filament* jenis polimer termoplastik. Terdapat dua jenis material *filament* yang paling umum digunakan yaitu *polylactic acid* (PLA) dan *acrylonitrile butadiene styrine* (ABS) yang di ekstrusi dari *nozzle head*, dengan proses fabrikasi lapis demi lapis (*layer-by-layer*). *Filament* dilunakkan di dalam *liquifier* di atas temperatur *melting*nya dan ditekan melalui *nozzle die*. Saat *liquifier* bergerak, polimer yang terekstrusi akan turun pada *bed* yang terdapat pada mesin pencetak kemudian *catridge* 3D *printer* yang meliputi komponen pada Gambar 2.22 yang akan bergerak mengikuti pola dari desain yang akan dicetak (O.S. Carneiro, 2015). Meskipun terlihat mudah, terdapat model kontrol untuk mengatur semua parameter secara bersamaan. Parameter tersebut diantaranya: *filament feeding rate, extrusion width, linear speed,* dan *layer thickness*. Parameter – parameter tersebut merupakan kesatuan yang memengaruhi hasil pada proses FDM. Pada Gambar 2.23 merupakan ilustrasi dari parameter cetak *layer thickness* dan *extrusion width.*

Parameter – parameter tersebut diatur menggunakan aplikasi pencetak objek tiga dimensi *Cura*. Terdapat berbagai panel opsi untuk mengatur kecepatan pencetakan hingga ketebalan atau jumlah lapisan objek yang akan dicetak. Gambar 2.23 menunjukkan ilustrasi pengaruh pengaturan lebar dan tebal *layer* terhadap *feeding rate* dan *linear speed* yang dibutuhkan. Sebelum dicetak, pengaturan parameter – parameter tersebut diatur menggunakan aplikasi *Cura*, objek yang akan dicetak harus berada

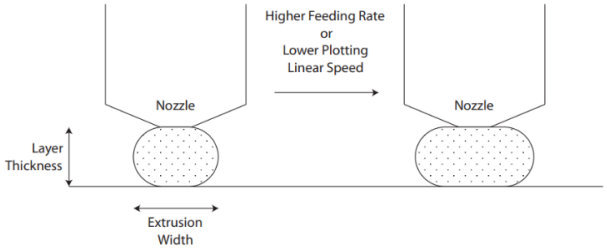
pada area kerja yang menggambarkan area *bed* 3D *printer*. Pilihan menu utama untuk mengatur kerja *printer* tersedia pada menu *basic* dan *advance* yang tersedia pada *toolbar* aplikasi *Cura*. Selain menentukan besaran parameter – parameter pencetakan objek tiga dimensi, aplikasi *Cura* juga berfungsi sebagai *slicer* untuk menentukan jumlah *layers* dari objek berformat *.stl* yang akan dicetak (Pambudi, 2017).



Gambar 2.21 Diagram Alir Proses 3D *Printing* (Izabela Hager, 2016)



Gambar 2.22 Ilustrasi *Nozzle Head* (O.S. Carneiro, 2015)



Gambar 2.23 Ilustrasi Parameter Proses Ekstrusi FDM (O.S. Carneiro, 2015)

Meskipun futuristik, prinsip *layer-by-layer* dapat memicu terjadinya kegagalan pada objek hasil cetak tiga dimensi. Beberapa bagian dari objek hasil 3D *printing* memiliki properti elastik yang lebih rendah dibandingkan dengan objek yang dibuat dengan cara *injection molding* dengan jenis polimer termoplastik yang sama. Beberapa penulis telah melakukan riset terhadap sifat mekanik terhadap objek hasil 3D *printing.* Salah satu fokus utamanya adalah agar memperoleh perbadingan hasil sifat mekanik objek yang dicetak menggunakan metode FDM konvensional dengan mesin 3D *printer* yang beredar dipasaran (Zixiang Weng, 2016).

2.8 Filamen 3D *Printing*

Material polimer dengan titik leleh rendah atau dalam keadaan cair banyak digunakan dalam industri 3D *printing* dengan berat yang ringan, biaya yang murah dan proses yang fleksibel. Meskipun produk dari 3D *printing* dapat dibentuk untuk geometri yang kompleks, namun kurangnya kekuatan mekanik dan fungsinya merupakan tantangan besar untuk diaplikasikan secara luas. Menggabungkan berbagai jenis material merupakan cara untuk menyelesaikan permasalahan tersebut. Oleh karena itu, dalam beberapa tahun terakhir pengembangan material komposit yang kompatibel dengan printer yang tersedia telah menarik perhatian khusus. Terdapat banyak hasil yang menjanjikan dalam pengembangan filamen material komposit yang diperkuat dengan

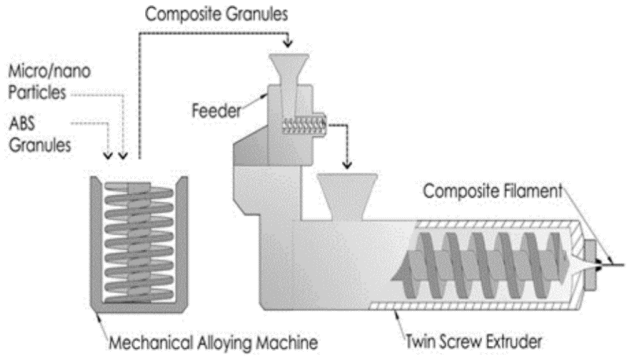
partikel, serat atau nanomaterial yang telah dibuktikan (Xin Wang, 2017).

Penelitian yang dilakukan oleh Ebubekir ÇANTI pada tahun 2017 berfokus pada produksi komposit filamen 3D *printing*. Pada penelitian tersebut, menggunakan material partikel MWCNTs, SiO2, ZrB2, dan Al sebagai *reinforcement* atau penguat dalam produksi filamen komposit polimer. Sedangkan peralatan yang digunakan adalah sebuah *twin screw* ekstruder dari AES Lab-30 Aysa Machine, Istanbul dimana mesin ekstruder tersebut memiliki *twin screw* yang masing-masing memiliki diameter 22 mm. Dan juga rasio panjang atau diameter dari ekstruder sebesar 32. Mesin ini dapat dioperasikan dalam kisaran suhu 60 ^{o}C - 400 ^{o}C dengan bantuan 6 pemanas dan pendingin yang diletakkan pada *barrel* utama.

Langkah-langkah produksi diilustrasikan pada Gambar 2.24. Pertama-tama, campur partikel penguat dengan butiran ABS yang dimasukkan kedalam mesin paduan tanpa bola baja selama sepuluh menit. Selanjutnya, butiran komposit dituangkan ke dalam pengumpan mesin ekstruder untuk mempertahankan proses ekstruksi agar tidak terputus. Untuk pengumpanan yang konstan, kecepatan rotasi dari *feeder* atau pengumpan dan *twin screw* masing-masing diatur ke 15 rpm dan 73 rpm. Selama proses ektrusi berlangsung, suhu panas diatur oleh 6 buah *heater* yang ditetapkan pada kisaran suhu 175 ^{o}C - 210 ^{o}C. Pada *die* ekstruder terdapat lubang keluar dengan diameter 2 mm yang disambungkan menuju kolam air dengan suhu 19 ^{o}C untuk proses solidifikasi. Untuk meningkatkan konsistensi ukuran diameter filamen maka kecepatan proses solidifikasi mencapai 50 rpm agar dapat menghasilkan filamen dengan diameter 1,75 mm (Ebubekir ÇANTI, 2018).

Penguat *fiber* juga dapat secara signifikan meningkakan sifat dari material matriks polimer. Pada umumnya teknologi 3D *printing* untuk menghasilkan *fiber-reinforced* komposit polimer yang digunakan untuk FDM dan *direct write technique*. Dalam proses FDM, pelet polimer dan serat digabungkan dalam blender

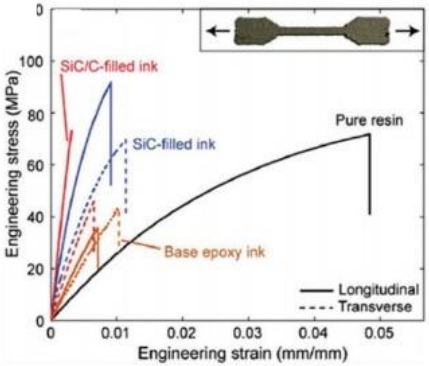
terlebih dahulu dan kemudian disalurkan menuju ekstruder untuk difabrikasi menjadi filamen. Proses ekstrusi kedua dapat dilakukan untuk memastikan distribusi serat yang homogen. Untuk proses *direct writing*, pasta polimer dan serat digabungkan pertama dan langsung diekstrusi keluar. Penggunaan *powder* atau bubuk tidak ideal dalam teknologi pembuatan *fiber-reinforced* komposit, karena membuat lapisan yang halus dari campuran *powder-fiber* sangatlah sulit. Material *fiber* yang digunakan dalam 3D printing komposit polimer dirangkum dalam Tabel 2.6, dimana diklasifikasikan berdasarkan peningkatan sifat mekanik, jenis serat yang digunakan termasuk *fiber glass* dan *fiber carbon* yang biasa digunakan sebagai penguat untuk meningkatkan sifat mekanik dari material komposit polimer. Orientasi serat dan fraksi *void* dari komposit memiliki peranan penting dalam menentulan sifat dari komposit tersebut (Xin Wang, 2017).



Gambar 2.24 Langkah Produksi Filamen Nano-Mikro Komposit Polimer (Ebubekir ÇANTI, 2018)

Efek dari kandungan serat pada sifat mekanik dari bagian objek 3D yang dicetak yang ditunjukkan pada penelitian Halil L. Tekinalp, bahwa komposit ABS/*carbon fiber* menunjukkan peningkatan kekuatan tarik dan modulus ketika kandungan serat meningkat, dan peningkatan maksimum sebesar 115% dan 700% dapat diperoleh dengan kandungan serat sebesar 40%. Pada

Gambar 2.25 menunjukkan efek kandungan serat dan proses persiapan pada kekuatan tarik material komposit ABS/*carbon fiber* (Halil L. Tekinalp, 2014).



Gambar 2.25 Representatif Kurva *Tensile Stress* dengan *Strain* pada 3D *Printing* dengan Variasi Komposisi (Brett G. Compton, 2014)

Tabel 2.6 Ringkasan Teknik dan Material Yang Digunakan Untuk 3D *Printing* Komposit Polimer *Fiber-Reinforced* (Xin Wang, 2017)

Teknik	Material	Kandungan Serat (wt%)	Maksimum Kekuatan Tarik (MPa)	Peningkatan Kekuatan Tarik (%) dari *Pure* Polimer
FDM	*Short glass fiber/ABS*	18	58.6	140
		40	70	115
	Short carbon fiber/ABS	5	42	24
		13	70.69	194
Direct write	*Short carbon fiber/Silicon carbide whisker/epoxy*	35	66.2	127
FDM *based co-extrusion*	*Continuous carbon fiber/nylon*	34.5	464.4	446
	Continuous carbon fiber/PLA	6.6	185.2	335

Fuda Ning, juga mempelajari pengaruh dari kandungan serat pada sifat mekanik yang dicetak menggunakan FDM. Hasil terbaik diperoleh pada komponen yang dicetak dengan kandungan 5%

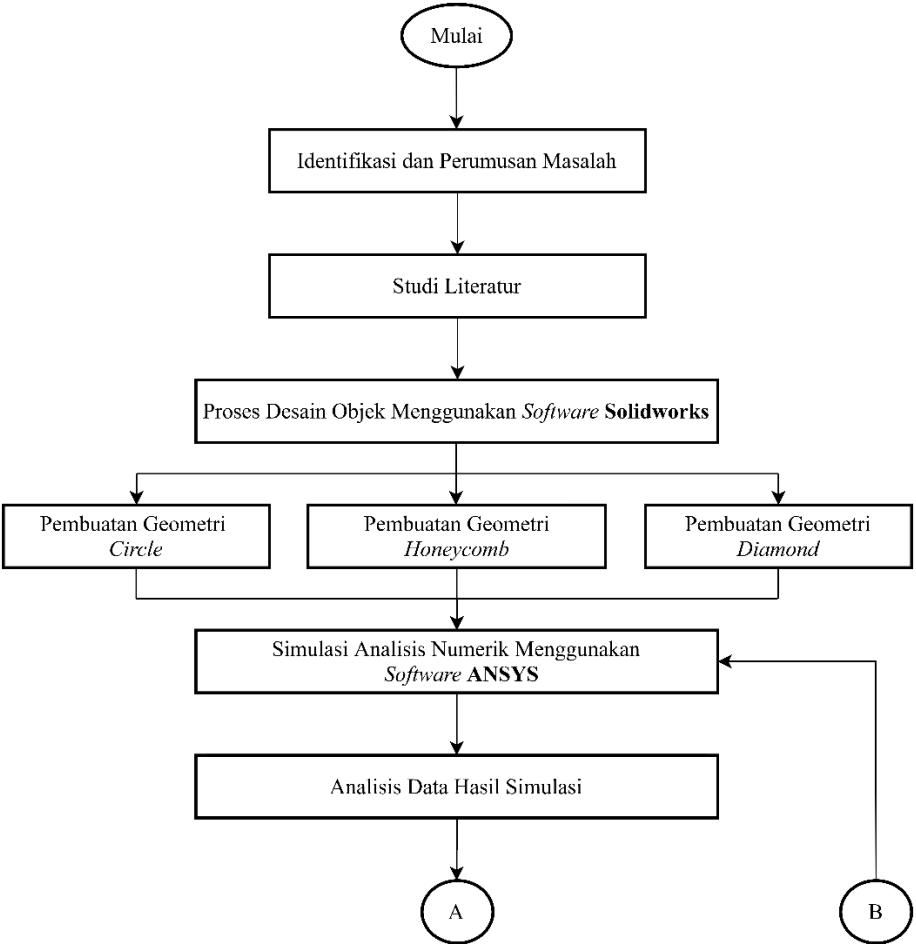
serat karena semakin tinggi kandungan serat maka semakin tinggi porositas yang dihasilkan dan mengurangi performa dari komponen tersebut. Sebenarnya, ada variasi yang signifikan dalam kandungan serat untuk mencapai peningkatan maksimum sifat mekanik yaitu karena kondisi distribusi serat dan kekuatan ikatan ikatan antarmuka yang sangat bervariasi antara setiap kasus. Standar dasar untuk rancangan dan proses ini sangat perlu untuk ditetapkan (Fuda Ning, 2015).

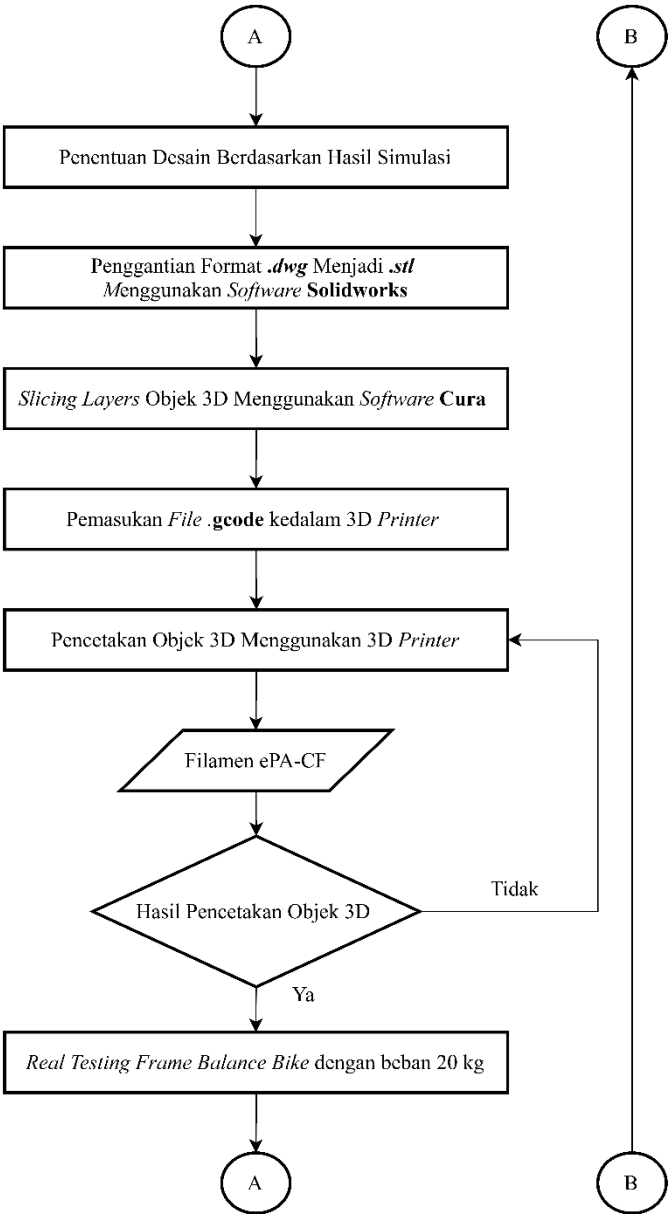
(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

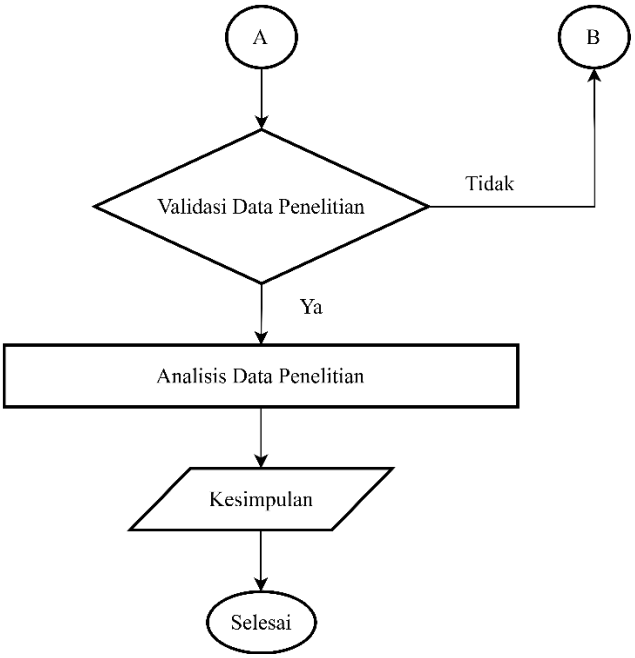
BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Dalam rancang bangun *frame balance bike*, terdapat beberapa tahapan-tahapan yang harus dilakukan yang ditunjukan pada gambar sebagai berikut:




A
B
Penentuan Desain Berdasarkan Hasil Simulasi
Penggantian Format .dwg Menjadi .stl
Menggunakan Software Solidworks
Slicing Layers Objek 3D Menggunakan Software Cura
Pemasukan File .gcode kedalam 3D Printer
Pencetakan Objek 3D Menggunakan 3D Printer
Filamen ePA-CF
Hasil Pencetakan Objek 3D
Tidak
Ya
Real Testing Frame Balance Bike dengan beban 20 kg
A
B



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Bahan Penelitian

Dalam penelitian tugas akhir ini, terdapat filamen material yang digunakan yakni filamen ePA-CF digunakan sebagai *feeding material* pada proses pencetakan objek tiga dimensi dengan nomor *Safety Data Sheet* (SDS) YS3D416001 yang diproduksi oleh *Shenzhen Esun Industrial Co., Ltd*., Cina. Komposisi dari material ini terurai pada Tabel 3.1 dan informasi mengenai sifat fisik dan kimia dari material ini tertera pada Tabel 3.2 Filamen ePA-CF ditunjukkan pada Gambar 3.2 sebagai berikut.

Gambar 3.2 Filamen Material *Carbon Fiber-Nylon* (ePA-CF)

Tabel 3.1 Komposisi Material Filamen *ePA-CF*

Nama Bahan	Nomor CAS	Nomor EC	Kandungan (%)
PA (*Nylon*)	32131-17-2	-	74
CF (*Carbon Fiber*)	7782-42-5	231-955-3	25
Additives	-	-	1

Tabel 3.2 Sifat Material Filamen *ePA-CF*

Nama	Keterangan
Bentuk	Padat
Berat Bersih	1 kg
Panjang	10 m
Kelarutan dalam Air (g/L)	Tidak Larut dalam Air
Print Temperature (^{0}C)	230-260
Bed Temperature (^{0}C)	80-90
Massa Jenis (g/cm^3)	1.24
Heat Distortion Temperature (^{0}C, 0.45 MPa)	120
Melt Flow Index (g/10min)	6 (250 ^{0}C, 5 kg)
Tensile Strength (MPa)	85
Elongation at Break (%)	26
Flexural Strength (MPa)	98
Flexural Modulus (MPa)	2300
IZOD Impact Strength (kJ/m^2)	15.5

3.3 Peralatan Penelitian

Terdapat beberapa peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Perangkat Komputer

Terdapat perangkat komputer yang digunakan yakni Laptop MSI GL65 dengan spesifikasi RAM 8GB, CPU Intel ® Core i7 9th *generation Dodeca(12)-core* @ ~2.6 GHz, dan Windows 10 Home x64 yang digunakan untuk menggambar desain dan juga digunakan untuk melakukan simulasi analisis statis dari *frame balance bike*.

2. Piranti Lunak

Terdapat tiga piranti lunak yang digunakan dalam penelitian ini yakni Solidworks 2018, ANSYS 19.1 dan Ultimaker Cura 4.4. Dalam membuat desain digunakan Solidworks, kemudian untuk melakukan simulasi numerik digunakan ANSYS 19.1 dan Ultimaker Cura 4.4 berperan sebagai *slicing software* untuk proses cetak tiga dimensi.

(a) (b) (c)

Gambar 3.3 Piranti Lunak (a) Solidworks 2018 (b) ANSYS 19.1 (c) Cura 4.4

3. Mesin 3D *Printer*

3D *Printer* yang digunakan untuk mencetak objek tiga dimensi yakni Creality3D Ender 5 Plus dengan spesifikasi ukuran cetak objek sebesar 350x350x400 mm, akurasi cetak ± 0.1 mm, temperatur nozzle cetak ≤ 260℃ sehingga dapat mencetak objek dengan bahan dari jenis PLA, *copper*, *wood*, *carbon fiber* dan lain-lainnya.

Gambar 3.4 Creality3D Ender 5 Plus

4. Jangka Sorong, Mistar dan Meteran

Digunakan untuk mengukur akurasi dimensi objek hasil cetakan dengan desain objek pada komputer dan juga digunakan untuk mengukur presisi selama proses berlangsung.

5. Neraca Massa

Digunakan untuk menghitung massa dari *frame* sepeda ataupun komponen lainya.

6. Tool Kit

Digunakan sebagai peralatan untuk menggabungkan antar komponen sepeda lainnya.

3.4 Variabel Penelitian

Dalam penelitian ini menggunakan variabel untuk membantu mengkomprehensifkan penelitian, akan digunakan 2 jenis variabel (*Independent, Dependent*) yang diulas secara rinci dan terdapat dalam Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Variabel Penelitian

Independent	***Dependent***
Geometri *Honeycomb* Geometri *Circle* Geometri *Rhombus*	Kekuatan, Bobot (Massa)

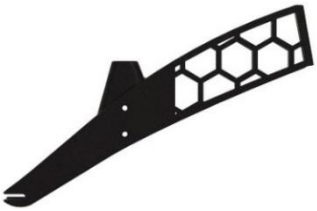
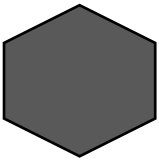
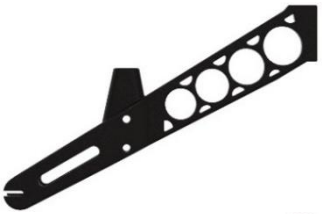
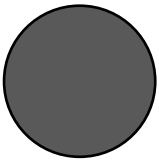
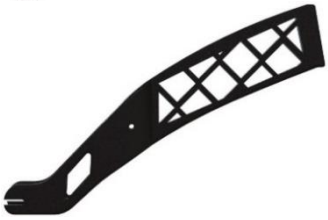
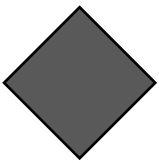
3.5 Tahapan Penelitian

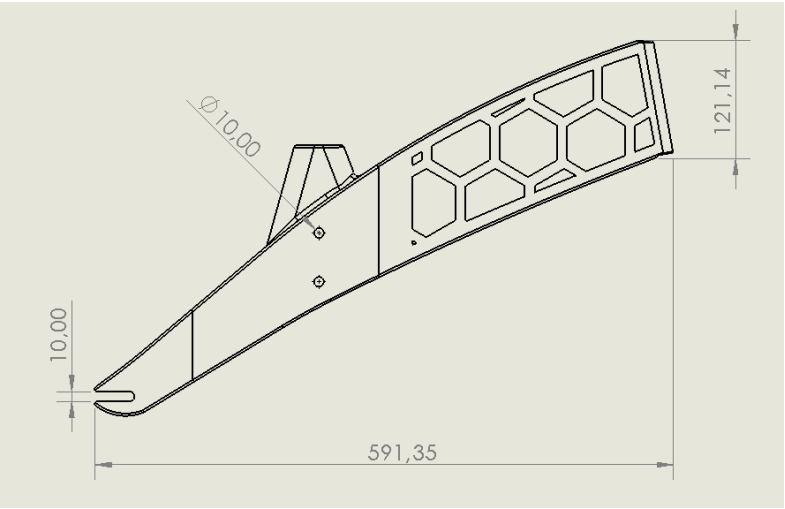
Berdasarkan diagram alir penelitian pada Gambar 3.1, tahapan–tahapan dalam penelitian akan dijelaskan sebagai berikut.

1. Pembuatan Geometri

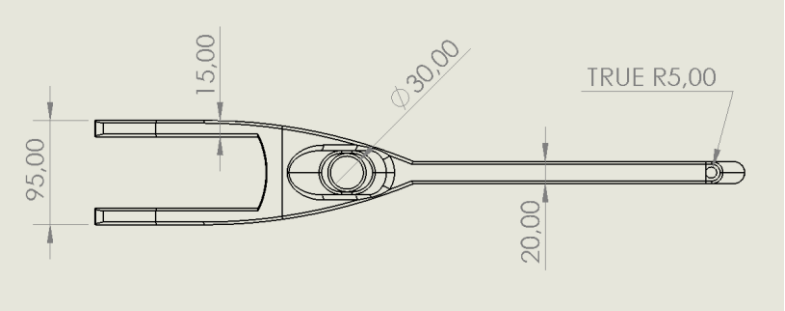
Dalam penelitian ini, objek terlebih dahulu digambar desain tiga dimensinya menggunakan *software* Solidworks dengan jenis variasi geometri yang berbeda dan disimpan dengan format *.dwg* atau *drawing*. Dalam penelitian ini, terdapat tiga jenis variasi geometri yaitu *honeycomb*, *circle* dan *rhombus* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.4 Anatomi dari masing-masing geometri *frame balance bike* dijelaskan secara rinci dengan ukuran pada desain geometri sepeda tersebut pada gambar dibawah ini.

Tabel 3.4 Variasi Geometri *Frame Balance Bike*

Gambar	Geometri	Keterangan
		*Honeycomb*
		*Circle*
		*Rhombus*

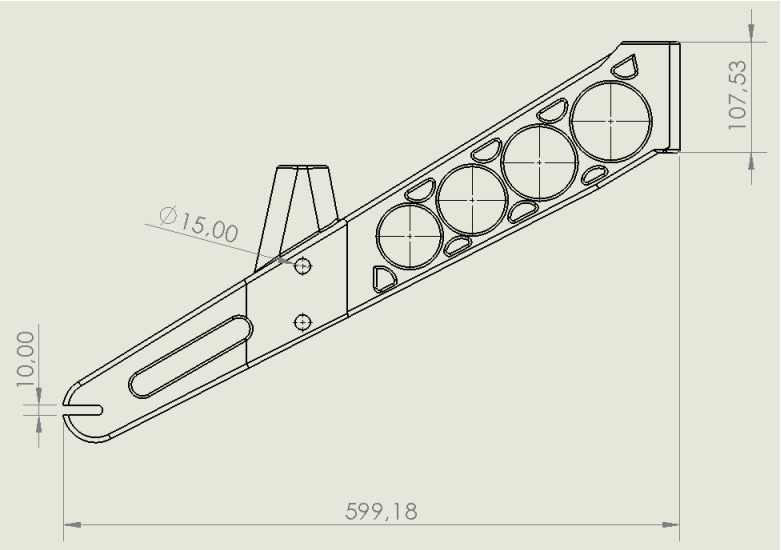


(a)

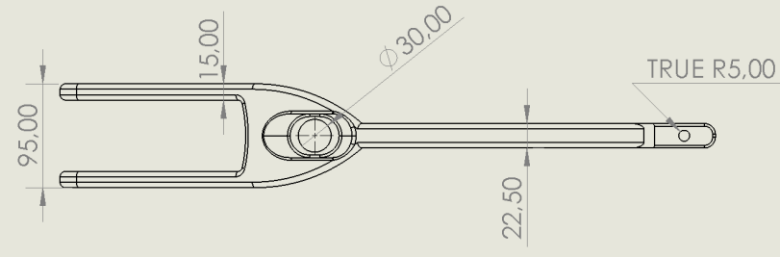


(b)

Gambar 3.5 Anatomi Geometri *Honeycomb* (a) Tampak Depan (b) Tampak Atas

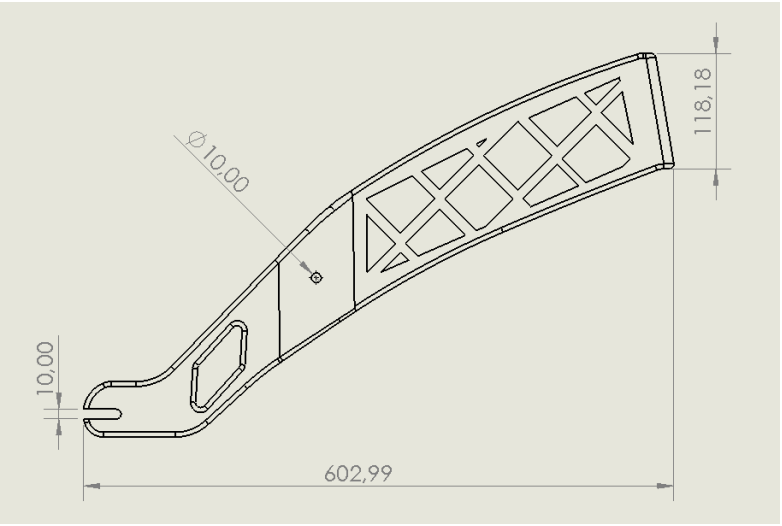


(a)

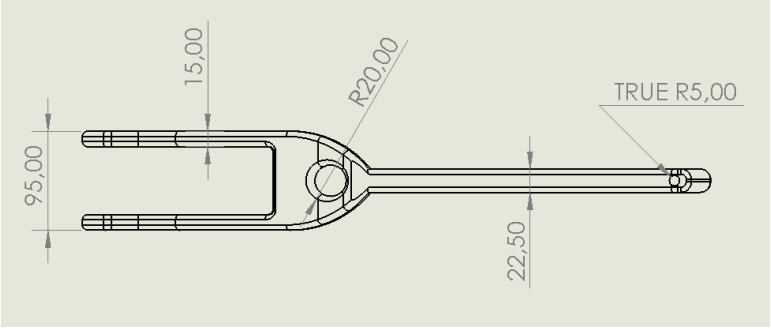


(b)

Gambar 3.6 Anatomi Geometri *Circle* (a) Tampak Depan (b) Tampak Atas



(a)



(b)

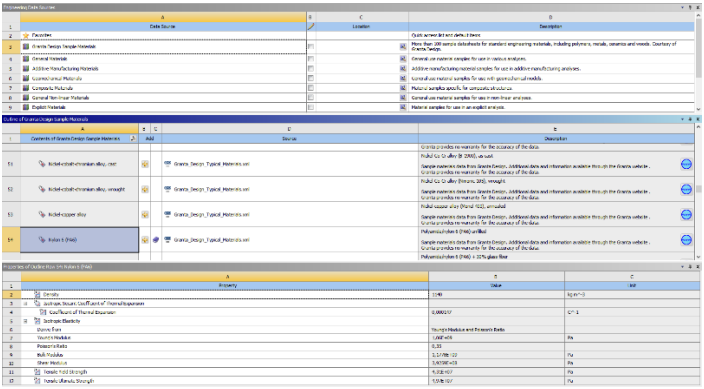
Gambar 3.7 Anatomi Geometri *Rhombus* (a) Tampak Depan (b) Tampak Atas

2. Pelaksanaan Analisis Numerik

Desain tiga dimensi dengan variasi geometri yang berbeda kemudian disimulasikan menggunakan *software* ANSYS dengan metode analisis statis struktur dengan rangkaian proses yang ditunjukkan diagram alir pada Gambar 3.12 Setelah dilakukan analisis hasil dari simulasi, desain tiga dimensi yang memiliki hasil terbaik akan dipilih sebagai desain yang ditetapkan untuk dicetak dengan kriteria memiliki sifat mekanika yang baik serta bobot yang ringan. Dalam melakukan pendeketan analisis numerik, terdapat beberapa tahapan penting dalam penelitian ini yaitu :

1) *Input* Material *Properties*

Pertama yaitu memasukan data material *properties* dimana data tersebut diambil dari *Engineering* Data pada Granta Materials. Dalam penelitian ini digunakan material *Nylon* (PA 6), dimana sifat dari material tersebut dijelaskan lebih rinci pada bagian *Engineering* Data.



Gambar 3.8 *Input* Material *Properties*

2) *Input* Geometri

Selanjutnya, memasukkan geometri dari *frame* yamg sudah dibuat. Input geometri dalam penelitian ini dengan memasukkan desain geometri yang sebelumnya telah dibuat di perangkat Solidworks dalam bentuk format *.x_t.*

3) Menentukan Tipe dan Ukuran Elemen

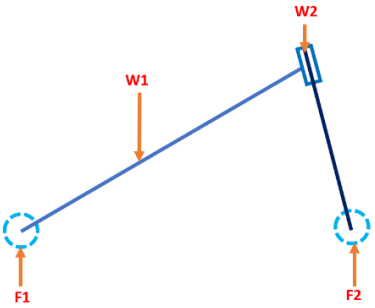
Dalam penelitian ini, ANSYS *Mechanical* untuk menentukan jenis dan ukuran elemen sesuai dengan metode yang digunakan. Pada penelitian ini tipe *mesh* yang digunakan adalah *coarse*, *medium*, dan *fine*, sedangkan untuk ukuran elemen juga menggunakan pengaturan *default*. Namun untuk meningkatkan kualitas hasil *meshing* digunakan pengaturan *high* pada *smoothing*.

Details of "Mesh"	
Display	
Display Style	Body Color
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
Element Size	Default
Sizing	
Use Adaptive Sizi...	Yes
Resolution	Default (2)
Mesh Defeaturing	Yes
Defeature Size	Default
Transition	Fast
Span Angle Center	Fine
Initial Size Seed	Assembly
Bounding Box Di...	0,71209 m
Average Surface ...	1,2715e-003 m²
Minimum Edge L...	3,3957e-004 m
Quality	
Check Mesh Qua...	Yes, Errors
Error Limits	Standard Mechanical
Target Quality	Default (0.050000)
Smoothing	High
Mesh Metric	None
Inflation	
Use Automatic In...	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0,272
Maximum Lay...	5
Growth Rate	1,2
Inflation Algorit...	Pre
View Advanced ...	No
Advanced	
Statistics	
Nodes	69647
Elements	39473

Gambar 3.9 Pengaturan untuk *Geometry Meshing*

4) Pengaturan *Boundary Conditions*

Pengaturan *boundary conditions* dilakukan untuk menentukan kondisi dalam simulasi stuktural statis. Penentuan titik pembebanan statis digambarkan sesuai dengan *free body* diagram pada sepeda yang diilustrasikan pada Gambar 3.10 dimana pada penelitian ini menggunakan titik W1 sebagai titik *force* dan titik F1 dan F2 sebagai titik *fixed support*.



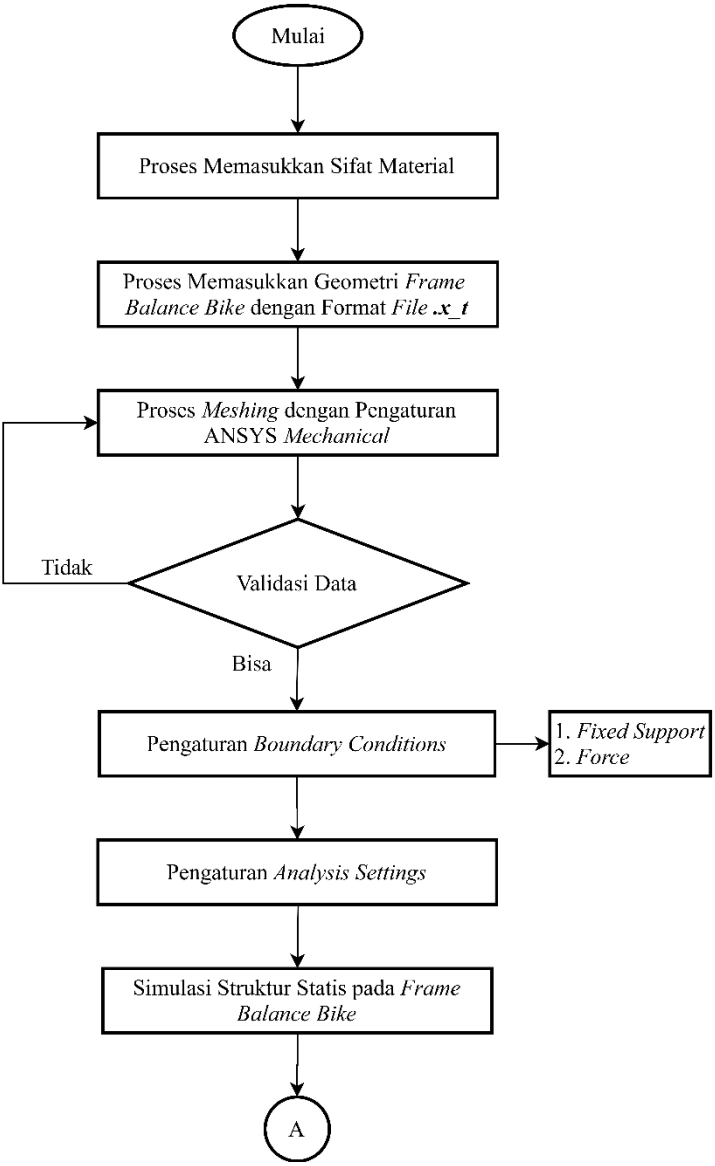
Gambar 3.10 *Free Body* Diagram Sepeda

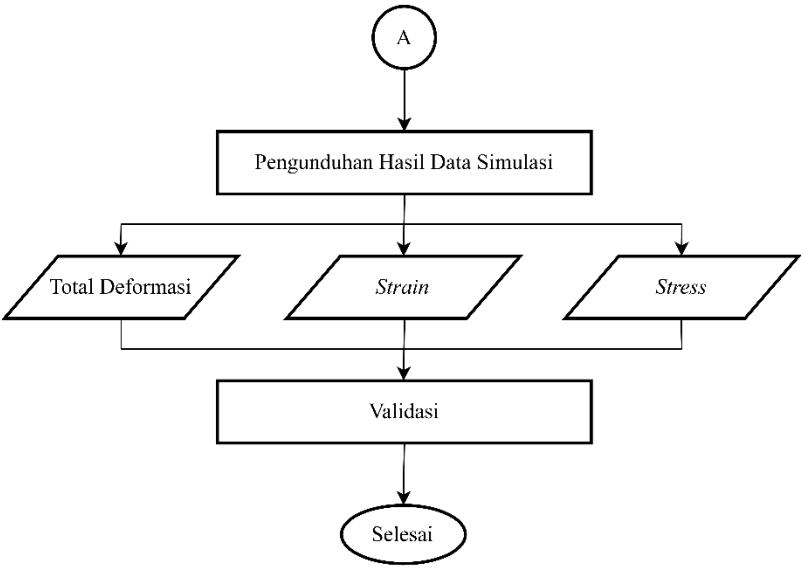
5) Pengaturan *Analysis Settings*

Pada tahap ini, *Analysis Settings* dilakukan untuk memantau dan menjaga simulasi sesuai dengan kondisi aslinya. Untuk pengaturan ini, semua metode harus disamakan untuk mencapai tujuan penelitian.

Details of "Analysis Settings"	
Step Controls	
Number Of Steps	2.
Current Step Number	1.
Step End Time	1. s
Auto Time Stepping	On
Define By	Substeps
Initial Substeps	20.
Minimum Substeps	20.
Maximum Substeps	100.
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Off
Solver Pivot Checking	Program Controlled
Large Deflection	Off
Inertia Relief	Off
Rotordynamics Controls	
Coriolis Effect	Off
Restart Controls	
Generate Restart Points	Program Controlled
Retain Files After Full Solve	No
Combine Restart Files	Program Controlled
Nonlinear Controls	
Newton-Raphson Option	Program Controlled
Force Convergence	Program Controlled
Moment Convergence	Program Controlled
Displacement Convergence	Program Controlled
Rotation Convergence	Program Controlled
Line Search	Program Controlled
Stabilization	Off
Output Controls	
Stress	Yes
Strain	Yes
Nodal Forces	No
Contact Miscellaneous	No
General Miscellaneous	No
Store Results At	All Time Points
Analysis Data Management	
Visibility	

Gambar 3.11 Pengaturan untuk *Analysis Settings*

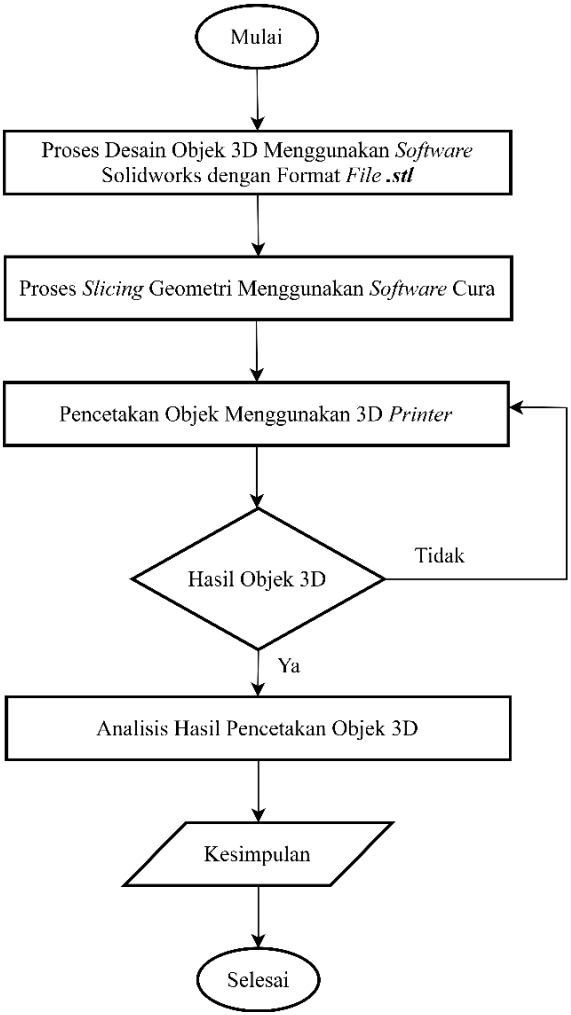

Mulai
Proses Memasukkan Sifat Material
Proses Memasukkan Geometri *Frame Balance Bike* dengan Format *File* ***.x_t***
Proses *Meshing* dengan Pengaturan ANSYS *Mechanical*
Tidak
Validasi Data
Bisa
Pengaturan *Boundary Conditions*
1. *Fixed Support*
2. *Force*
Pengaturan *Analysis Settings*
Simulasi Struktur Statis pada *Frame Balance Bike*
A



Gambar 3.12 Diagram Alir Simulasi

3. Printing Preparation

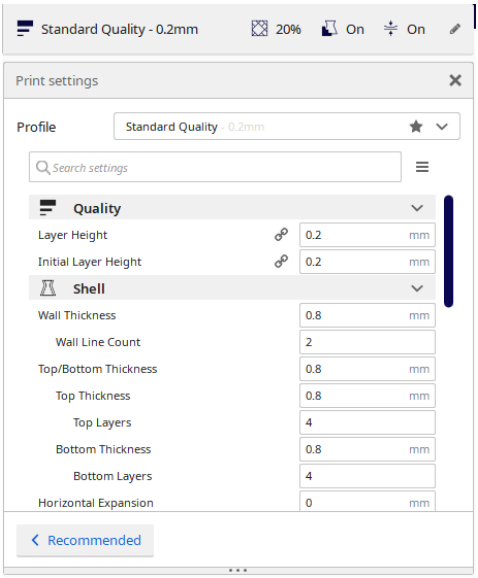
Objek tiga dimensi dengan ukuran yang telah ditentukan pada proses sebelumnya kemudian diubah format nya menjadi *.stl* menggunakan *software* Solidworks. Selanjutnya *file* objek tiga dimensi tersebut dibuka dengan *software* Cura yang digunakan untuk proses *slicing layers* dimana secara otomatis jumlah lapisan dari objek tiga dimensi yang akan dicetak dapat diketahui jumlahnya dan dapat ditentukan jumlahnya dengan mengatur ketebalan dari setiap lapisannya.



Gambar 3.13 Diagram Alir Proses 3D *Printing*

4. Pencetakan Objek 3D

Setelan dari objek yang telah valid pada *software* Cura kemudian dicetak menggunakan 3D *Printer* dengan panjang, massa filamen, durasi pencetakan serta ketebalan *thickness* per *layer* yang telah diatur menggunakan *software* Cura.



Gambar 3.14 *Print Setting Software* Cura

5. Perhitungan Massa Objek

Frame yang telah dicetak selanjutnya akan di timbang massanya menggunakan neraca massa yang memiliki ukuran sesuai dengan ukuran *frame*.

6. Real Testing

Hasil cetak objek tiga dimensi digabungkan dengan komponen lainnya, kemudian diuji coba untuk dikendarai oleh anak-anak yang memiliki bobot sebesar 20 kg.

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

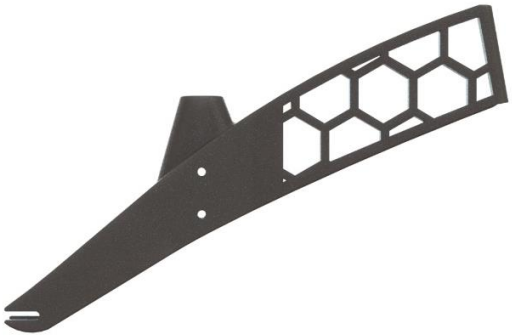
BAB IV
HASIL DAN ANALISIS DATA

4.1 Hasil Modelling Geometri

Proses pembuatan *modelling* geometri adalah tahap pertama dalam rangkaian penelitian ini. Objek digambar menggunakan *software* Solidworks yang dibagi menjadi tiga bentuk variasi yaitu *Honeycomb, Circle dan Rhombus*. Dimensi dari desain sepeda telah disesuaikan dengan dimensi *balance bike* pada umumnya seperti pada Gambar 2.8 Adapun hasil dari *modelling* geometri yang telah dibuat dengan sistem proyeksi eropa.

4.1.1 Geometri Honeycomb

(a)



(b)

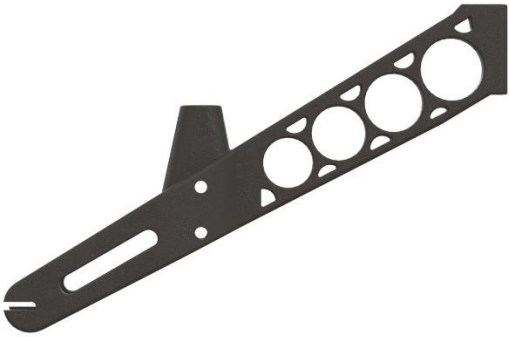
(c)

(d)

Gambar 4.1 Geometri *Honeycomb* (a) Tampak *Isometric* (b) Tampak Depan (c) Tampak Kanan (d) Tampak Atas

4.1.2 Geometri Circle

(a)



(b)

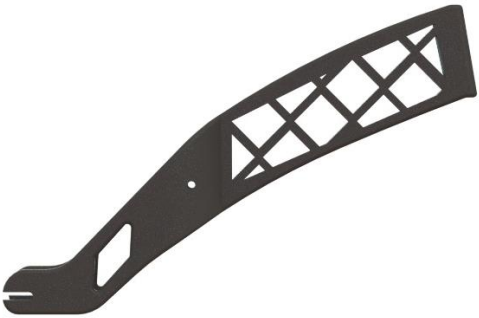
(c)

(d)

Gambar 4.2 Geometri *Circle* (a) Tampak *Isometric* (b) Tampak Depan (c) Tampak Kanan (d) Tampak Atas

4.1.3 Geometri Rhombus

(a)



(b)

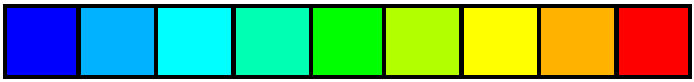
(c)

(d)

Gambar 4.3 Geometri *Rhombus* (a) Tampak *Isometric* (b) Tampak Depan (c) Tampak Kanan (d) Tampak Atas

4.2 Hasil Simulasi Statis

Dalam penelitian ini pendekatan secara numerik telah dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga untuk mengamati pengaruh bentuk geometri dan material filamen ePA-CF terhadap kekuatan dan berat dari *frame* sepeda. Simulasi dilakukan menggunakan *software* berbasis metode elemen hingga yaitu ANSYS *Workbench Mechanical R19.1*. Gambar 4.4 menampilkan kemungkinan lokasi terjadinya konsentrasi tegangan dengan spektrum warna. Perbedaan warna menunjukkan indikasi nilai tegangan yang mungkin terjadi pada titik-titik atau area tertentu. Warna paling kiri yaitu biru menandakan nilai terendah, apabila semakin ke kanan nilainya akan semakin besar dan berwarna merah apabila mencapai nilai maksimum.



Gambar 4.4 Spektrum Warna Nilai Tegangan

Dalam analisis numerik statis struktural pada penelitian ini menggunakan perhitungan tegangan berdasarkan kriteria von Mises. Von Mises (1913) menyatakan bahwa akan terjadi luluh apabila invarian kedua deviator tegangan melampaui harga kritis tertentu. Dengan kata lain luluh akan terjadi pada saat energi distorsi atau energi regangan geser dari material mencapai suatu nilai kritis tertentu. Secara sederhana dapat dikatakan bahwa energi distorsi adalah bagian dari energi regangan total per unit volume

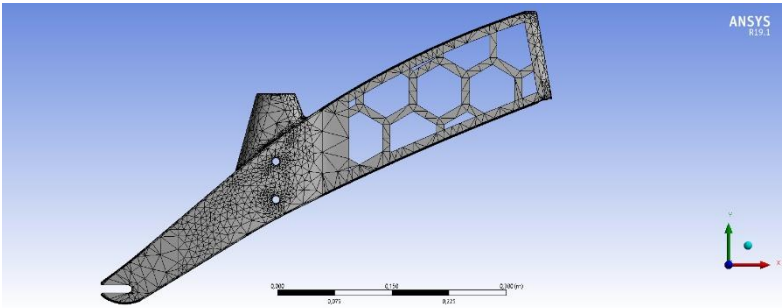
yang terlibat di dalam perubahan bentuk. Dalam ilmu material dan teknik, kriteria luluh von Mises dapat juga diformulasikan dalam von Mises *stress* atau *equivalent tensile stress*, nilai tegangan skalar dapat dihitung dari tensor tegangan. Dalam kasus ini, material dikatakan mulai luluh ketika tegangan von Mises mencapai nilai kritis yang diketahui sebagai *yield strength*. Tegangan von Mises digunakan untuk memprediksi tingkat keluluhan material terhadap kondisi pembebanan dari hasil pengujian tarik sampel uniaksial yang dinyatakan dalam Newton/mm^2 (MPa).

Tabel 4.1 Sifat material *Nylon 6* (PA 6)

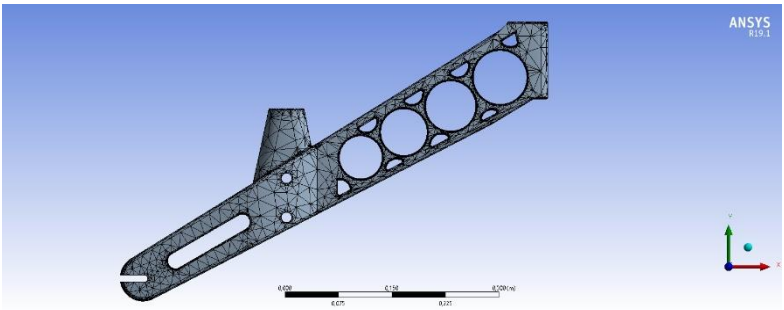
Nama	Keterangan
Density (kg/m^3)	1140
Coefficient of Thermal Expansion (^{0}C)$^{-1}$	0,000147
Young's Modulus (Pa)	1060000000
Poisson's Ratio	0,35
Bulk Modulus (Pa)	1,778 x 10^9
Shear Modulus (Pa)	3,9259 x 10^8
Tensile Yield Strength (Pa)	4,31 x 10^7
Tensile Ultimate Strength (Pa)	4,97 x 10^7
Isotropic Thermal Conductivity (J/ms^{0}C)	0,243
Spesific Heat (J/Kg^{0}C)	1500
Isotropic Resistivity (ohmm)	1,83 x 10^{12}

Terdapat beberapa tahapan penting sebelum melakukan simulasi menggunakan *software* ANSYS. Pertama yaitu mengkonversi hasil modelling geometri desain yang telah dibuat menjadi format file *Parasolid (_xt)*. Setelah itu memasukkan *properties* untuk geometri modelling yaitu material *Nylon 6* (PA 6) dimana *properties* material tersebut memiliki perbedaan dengan material filamen dikarenakan ketidaklengkapan data dari manufaktur filamen ePA-CF. Pada tabel dibawah dijelaskan

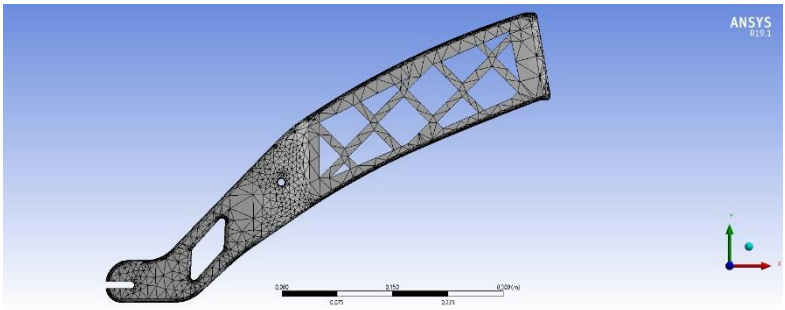
properties dari material *Nylon 6* (PA 6) yang memiliki beberapa sifat seperti massa jenis dan kekuatan tarik yang mendekati besaran nilai material *properties* dari filamen ePA-CF. Langkah selanjutnya adalah melakukan proses *meshing* terhadap geometri yang akan disimulasikan. Proses *meshing* dilakukan pada ketiga geometri yaitu *honeycomb*, *circle* dan *Rhombus* yang ditunjukkan pada Gambar 4.5. Dalam pendekatan numerik ini, terdapat tiga tipe *meshing* yang digunakan yaitu *coarse*, *medium*, dan fine. Hal tersebut berguna untuk mengetahui dan menganalisis perbandingan dari pengaruh variasi *meshing*.



(a)



(b)



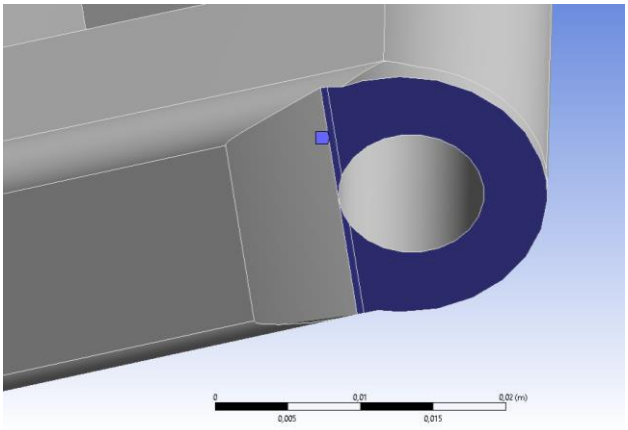
(c)

Gambar 4.5 Hasil *Meshing* Tampak Depan. (a) *Honeycomb*, (b) *Circle*, (c) *Rhombus*

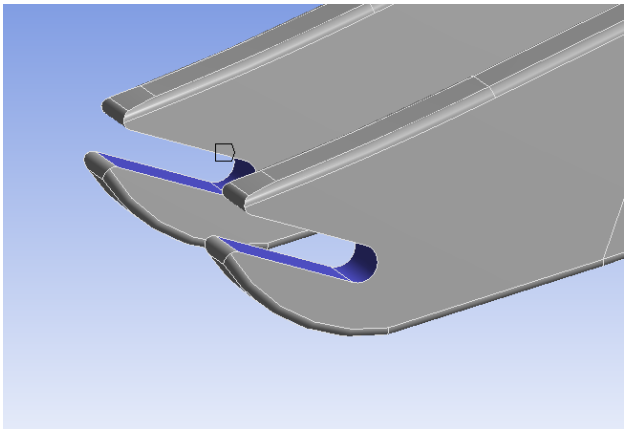
Selanjutnya dalam proses simulasi statis dilanjutkan dengan menetukan *analysis setting* pada geometri yang telah dimasukkan. Kemudian ditentukan posisi titik pada objek serta besarnya nilai pembebanan (*force)* dan menentukan letak *fixed support*. Untuk *analysis setting* yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.11, dimana setelah melakukan simulasi akan menghasilkan data berupa tabel *chart* yang digunakan sebagai data dalam menganalisis sifat mekanik dari geometri sesuai dengan *analysis setting* yang ditentukan.

Penentuan titik pada *fixed support* bergantung pada *free body* diagram dari *frame* sepeda. Peletakan titik *fixed support* dibagi menjadi dua bagian yaitu depan dan belakang. Pada bagian depan yakni lubang penghubung antara *frame* dengan *fork* sepeda, Kemudian pada bagian belakang tepatnya pada penempatan ass untuk roda belakang. Posisi tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.6 dan 4.7 yang ditandai dengan warna biru tua. Dalam simulasi statis ini, penentuan titik pembebanan (*force*) terletak pada lubang untuk *saddle seat* sepeda yang ditunjukkan pada Gambar 4.8. Besaran nilai beban diambil dari rata-rata berat badan dari anak-anak baik laki-laki maupun perempuan. Menurut data WHO, rata-rata berat badan anak laki-laki sebesar 18,3 Kg dan anak perempuan sebesar

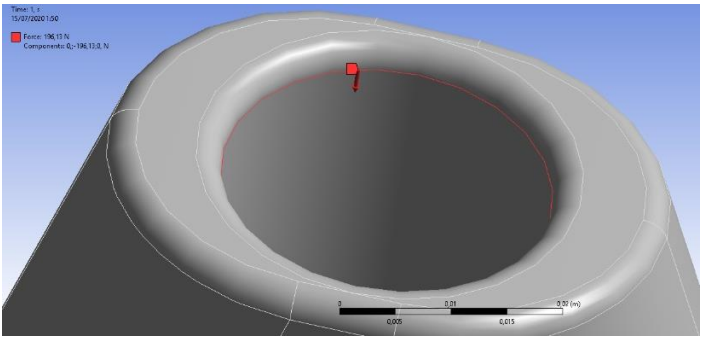
18,2 Kg. Data tersebut juga tercantum pada Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2020 tentang Standar Antropometri Anak.



Gambar 4.6 Peletakan titik *Fixed Support* bagian depan



Gambar 4.7 Peletakan titik *Fixed Support* bagian belakang



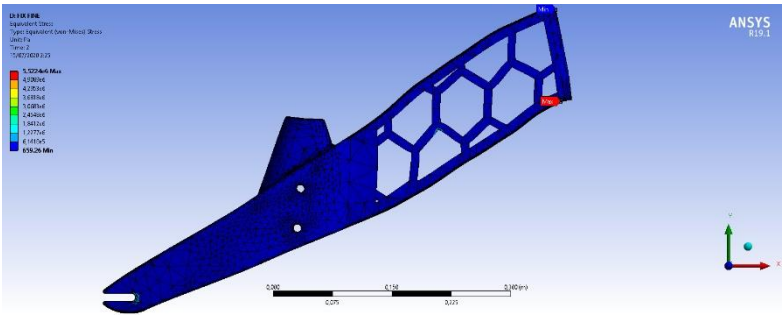
Gambar 4.8 Peletakan titik *Force* pada *Frame*

Dalam penelitian ini pendekatan secara numerik telah dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga untuk mengamati pengaruh bentuk geometri terhadap kekuatan dan mengetahui sifat mekanik material. Besaran nilai *stress*, *elastic strain* serta total deformasi maksimal hasil dari proses simulasi dipengaruhi oleh pengaturan pada tipe *meshing* berdasarkan *span angle center* yang dibagi menjadi *coarse*, *medium*, dan *fine* dimana semakin kecil ukuran *mesh*, maka nilai error yang dihasilkan semakin kecil pula, atau bisa dikatakan linier (Waas, 2019).

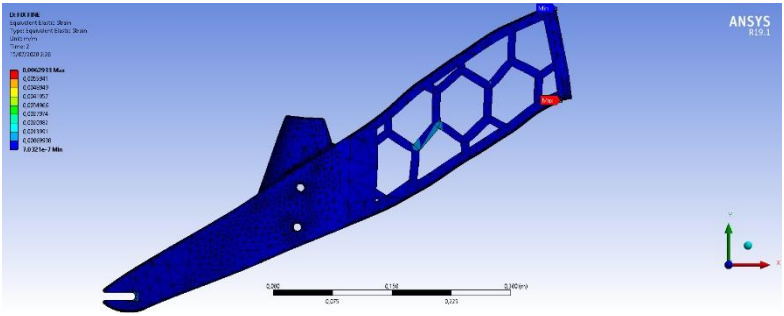
Tabel 4.2 Hasil Analisis *Mesh Sensitivty*

Geometri	*Span Angle Center*	Jumlah *Node*	Jumlah *Element*
Honeycomb	*Coarse*	19335	10503
	Medium	26782	14708
	Fine	69647	39473
Circle	*Coarse*	26016	14433
	Medium	37404	21098
	Fine	118182	67852
Rhombus	*Coarse*	14568	7682
	Medium	20213	10849
	Fine	57143	32123

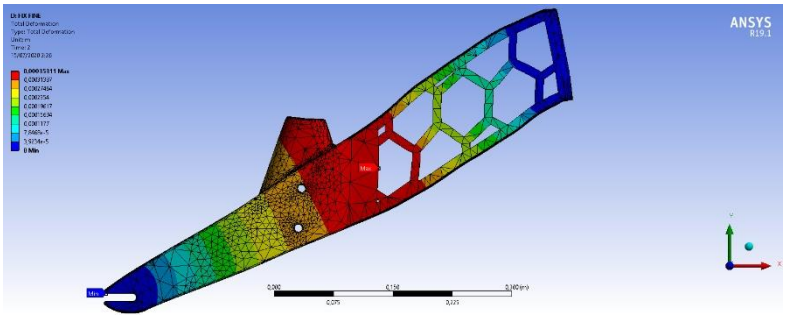
4.2.1 Hasil Simulasi Statis pada Geometri *Honeycomb*



(a)

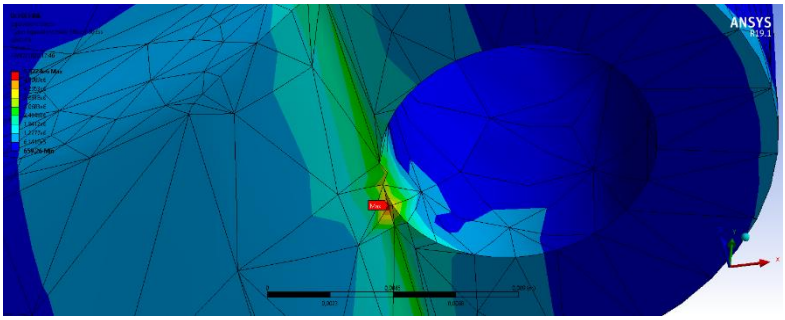


(b)

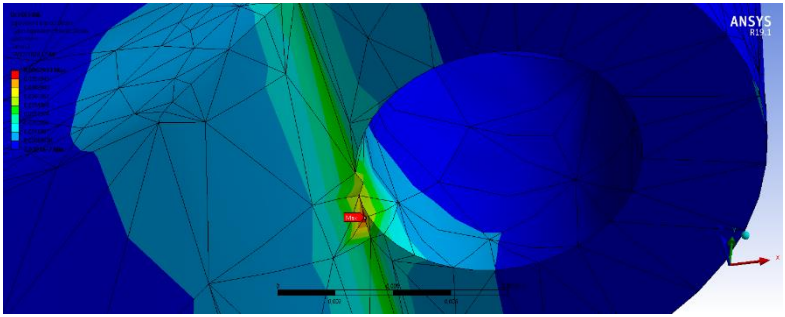


(c)

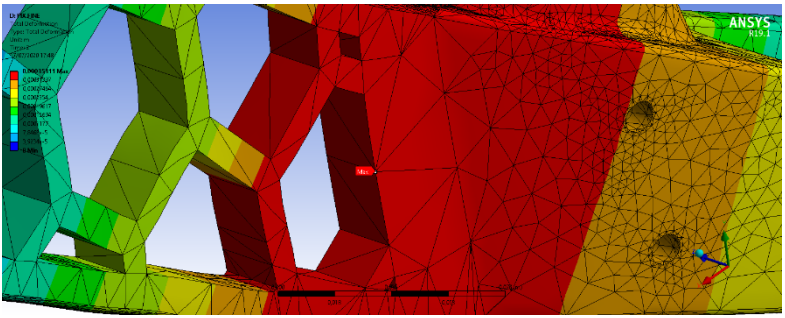
Gambar 4.9 Hasil Simulasi Statis pada *Frame Honeycomb* (a) *Equivalent Stress* (b) *Equivalent Elastic Strain* (c) *Total Deformation*



(a)



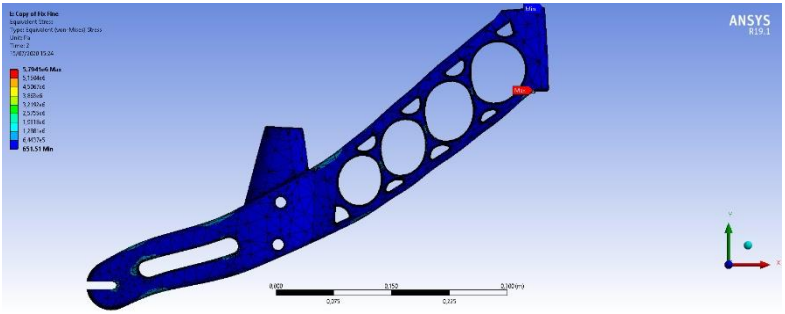
(b)



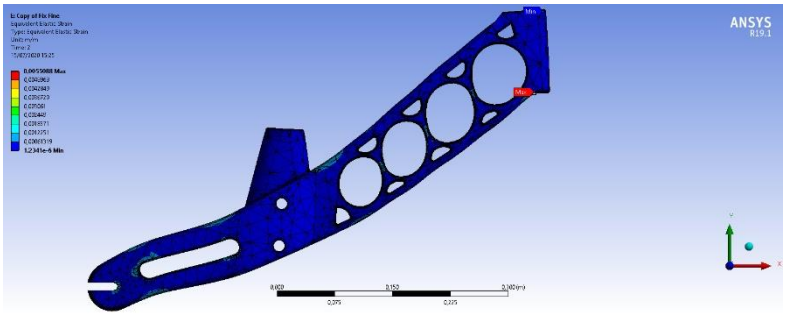
(c)

Gambar 4.10 Lokasi Maksimum pada *Frame Honeycomb* (a) *Equivalent Stress* (b) *Equivalent Elastic Strain* (c) *Total Deformation*

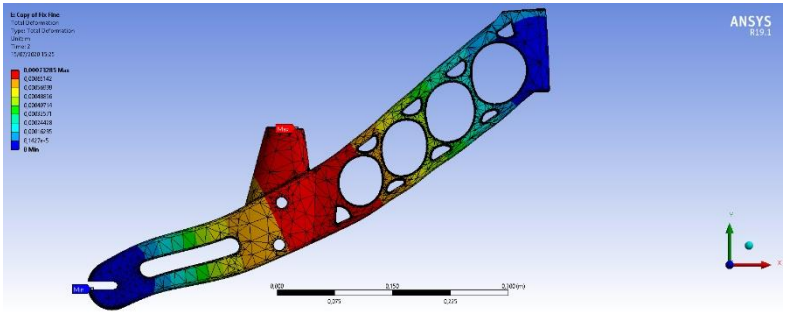
4.2.2 Hasil Simulasi Statis pada Geometri *Circle*



(a)

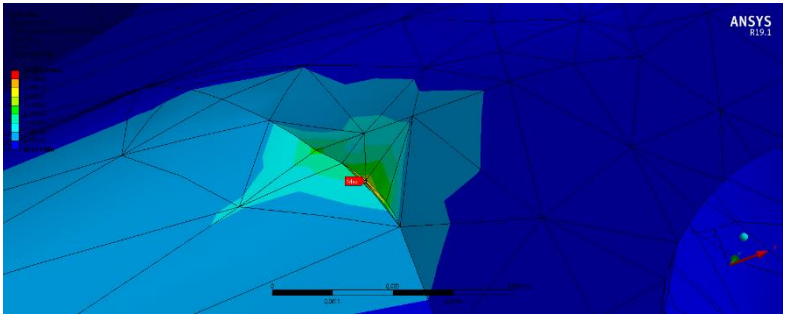


(b)

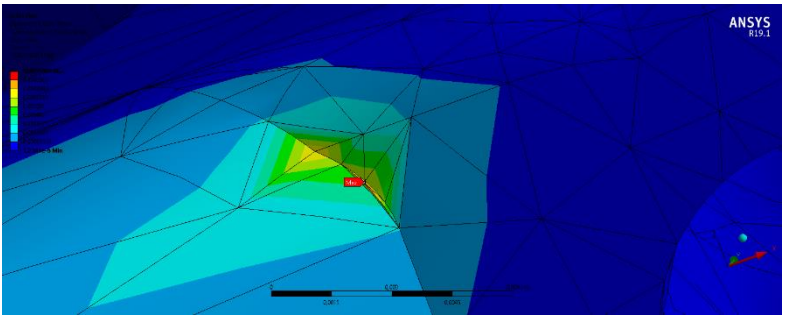


(c)

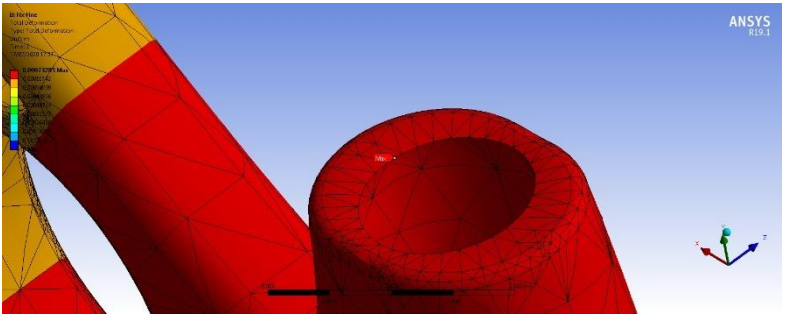
Gambar 4.11 Hasil Simulasi Statis pada *Frame Circle* (a) *Equivalent Stress* (b) *Equivalent Elastic Strain* (c) *Total Deformation*



(a)



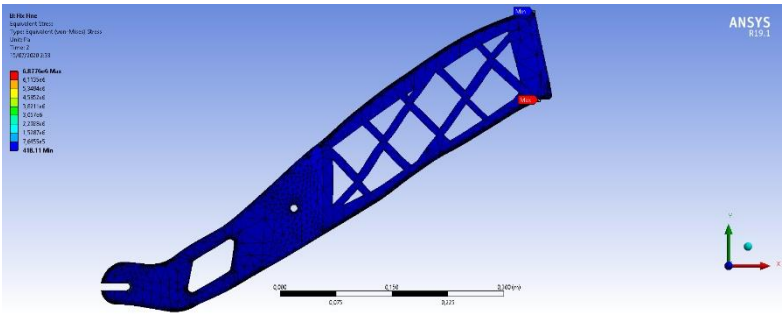
(b)



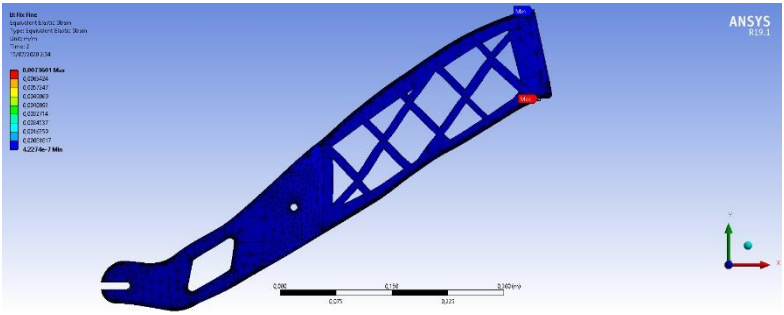
(c)

Gambar 4.12 Lokasi Maksimum pada *Frame Circle* (a) *Equivalent Stress* (b) *Equivalent Elastic Strain* (c) *Total Deformation*

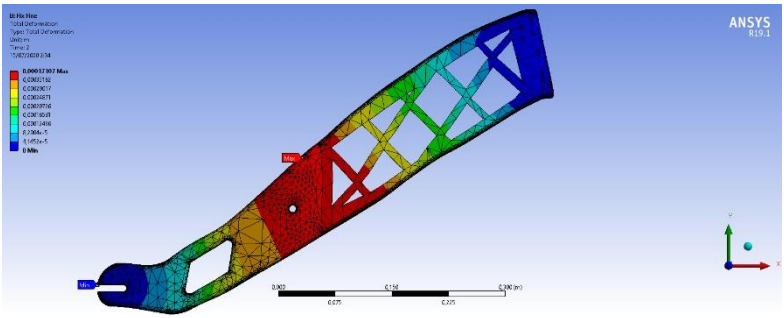
4.2.3 Hasil Simulasi Statis pada Geometri *Rhombus*



(a)

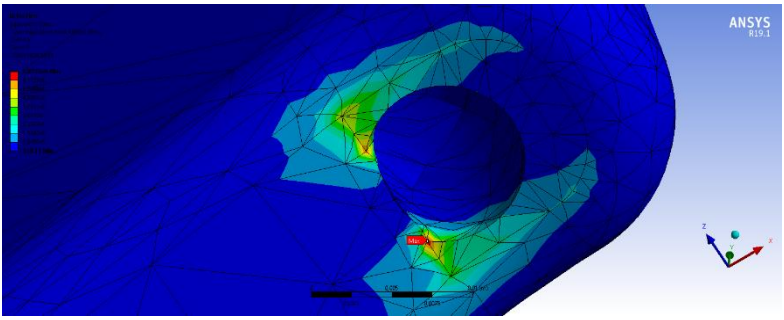


(b)

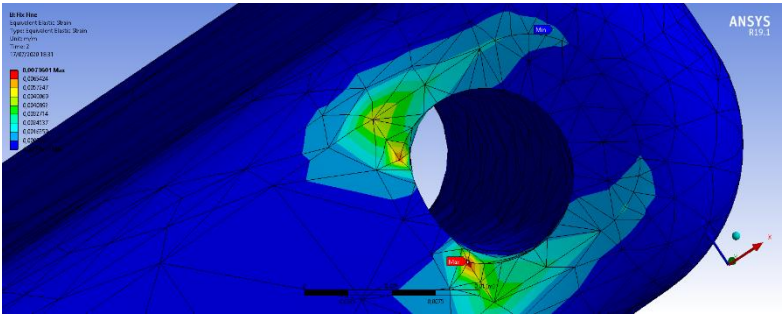


(c)

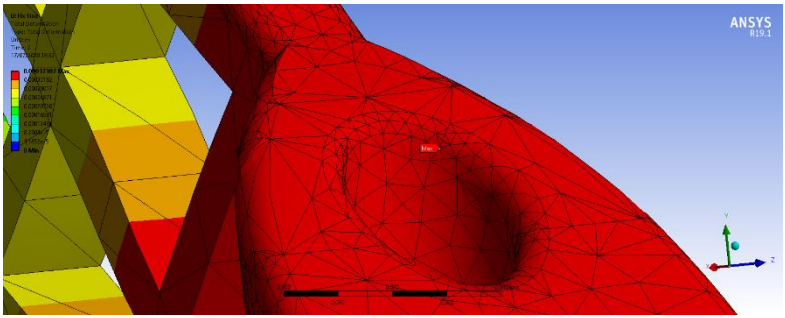
Gambar 4.13 Hasil Simulasi Statis pada *Frame Rhombus* (a) *Equivalent Stress* (b) *Equivalent Elastic Strain* (c) *Total Deformation*



(a)



(b)



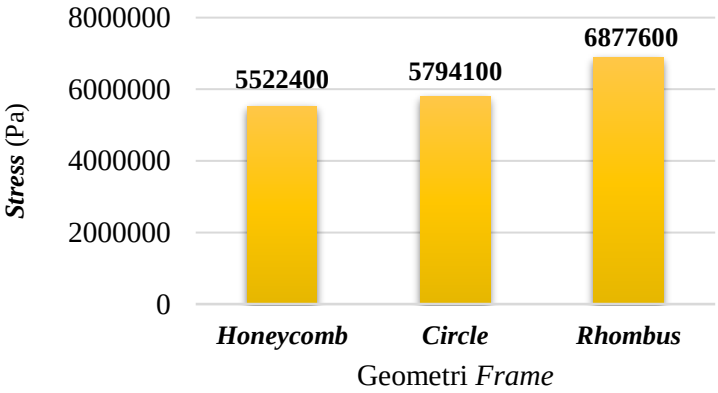
(c)

Gambar 4.14 Lokasi Maksimum pada *Frame Rhombus* (a) *Equivalent Stress* (b) *Equivalent Elastic Strain* (c) *Total Deformation*

4.3 Analisis Pengaruh Bentuk Geometri

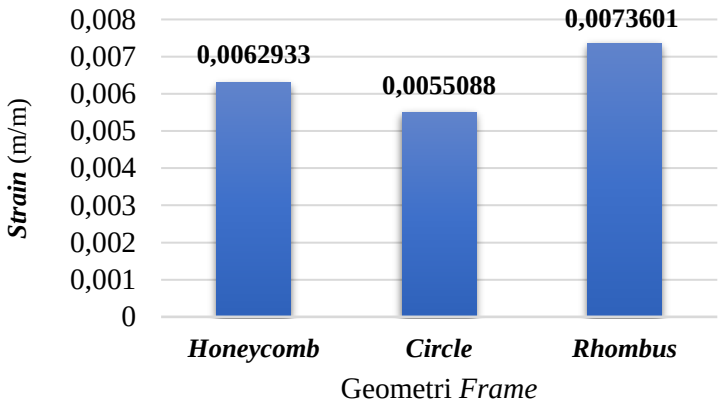
Simulasi statis pada *frame balance bike* dengan bentuk geometri yang berbeda yaitu *honeycomb*, *circle* dan *rhombus* telah dilakukan dan menunjukkan gambaran penyebaran konsentrasi tegangan pada masing-masing bentuk geometri. Penentuan titik beban disesuaikan dengan *free body* diagram pada Gambar 3.7. Penentuan nilai beban disesuaikan dengan rata-rata berat badan maksimal anak-anak pada umur 5 tahun sebesar 18,3 kg. Namun pada rancangan desain *frame* sepeda telah ditentukan nilai maksimal berat badan sebesar 20 kg, dimana nilai besaran beban yang didapat yaitu 196,133 N dengan gravitasi sebesar 9,8 m/s^2. Didapat hasil dimana semakin kecil nilai yang dihasilkan maka performa dari bentuk geometri tersebut semakin baik dibandingkan geometri lainnya. Pada Gambar 4.15 menunjukkan perbandingan besaran nilai *equivalent stress* pada masing-masing geometri. Dalam grafik tersebut menunjukkan bahwa geometri *rhombus* memiliki nilai *stress* maksimum sebesar 6,8776 MPa, sedangkan pada geometri *circle* sebesar 5,7941 MPa dan pada geometri *honeycomb* sebesar 5,5224 MPa. Tegangan maksimal yang dihasilkan dari semua geometri belum melebihi nilai tegangan ijin material sebesar 43,1 MPa. Hal tersebut membuktikan bahwa

desain struktur *frame balance bike* yang dikembangkan memenuhi kriteria aman pada simulasi pembebanan statis yang diberikan. Hal ini dapat ditunjukkan dengan hasil *equivalent von misses stress* yang dihasilkan masih dibawah *tensile yield strength* materialnya dimana geometri *honeycomb* memiliki sifat kekuatan menahan beban yang paling baik diantara geometri lainnya (Awwaluddin, 2013).



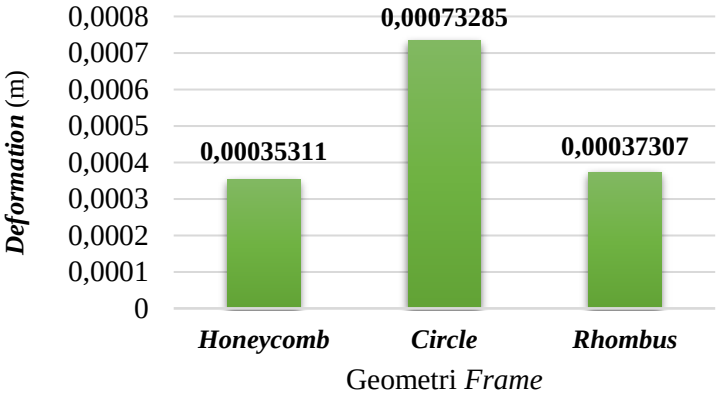
Gambar 4.15 Perbandingan nilai *Equivalent Stress* pada Geometri

Perbandingan besaran nilai *equivalent elastic strain* ditunjukkan pada Gambar 4.16, dimana nilai regangan elastis maksimal pada geometri *circle* menjadi yang terendah dengan nilai sebesar 0,0055088 m/m. Kemudian pada geometri *honeycomb* sebesar 0,0062933 m/m dan pada geometri *rhombus* sebesar 0,0073601 m/m. Geometri *circle* memiliki sifat elastisitas material yang paling baik dibandingkan dengan geometri lainnya.



Gambar 4.16 Perbandingan nilai *Equivalent Elastic Strain* pada Geometri

Pada Gambar 4.17 dapat dilihat perbandingan nilai besaran deformasi total pada masing-masing geometri. Perubahan bentuk terbesar terjadi pada geometri *circle* dimana terjadi deformasi sebesar 0,00073285 m. Kemudian pada geometri *rhombus* dan *honeycomb* terjadi perubahan bentuk yang tidak jauh berbeda, dimana pada geometri *rhombus* sebesar 0,00037307 m dan geometri *honeycomb* sebesar 0,00035311 m. Perubahan yang terjadi dihasilkan oleh tegangan yang diaplikasikan pada titik yang telah tentukan serta deformasi yang dihasilkan dengan nilai terendah merupakan bentuk geometri terbaik yang dapat digunakan dalam rancangan pembuatan *frame balance bike*. Berdasarkan nilai terendah dari deformasi total yang dihasilkan, geometri *honeycomb* merupakan yang terbaik apabila dibandingkan hasil deformasi bentuk geometri lainnya. Oleh karena itu, geometri *honeycomb* dianggap memiliki sifat mekanik material yang paling baik dibandingkan geometri lainnya.

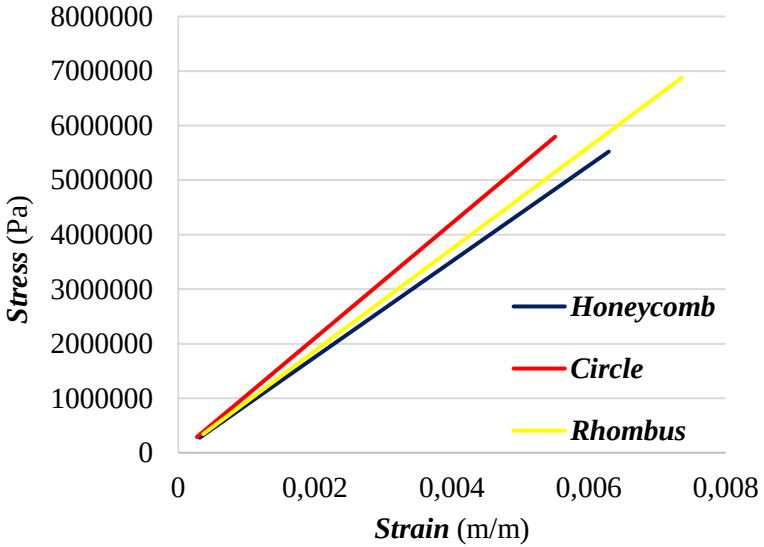


Gambar 4.17 Perbandingan nilai Total Deformasi pada Geometri

4.3.1 Analisis Pengaruh Bentuk Geometri terhadap Kurva *Stress-Strain*

Dalam subbab ini akan dibahas seberapa besar pengaruh bentuk geometri terhadap kurva *stress-strain* yang dihasilkan. Kurva tersebut digunakan sebagai langkah awal untuk menginspeksi dan mengevaluasi dengan membandingkan hasil kurva grafik dengan menggunakan material yang sama. Data yang digunakan pada kurva *stress-strain* merupakan hasil dari simulasi statis yang dilakukan menggunakan software ANSYS Workbench yang mengacu pada *Equivalent Stress* (von Mises *Stress*) dan *Equivalent Elastics Strain* (von Mises *Strain*). Pada Gambar 4.18 merupakan kurva *stress-strain* yang dihasilkan oleh perbandingan geometri *honeycomb, circle* dan *rhombus*. Tampak dari gambar dibawah, bahwa ketiga geometri mulanya sangat berhimpitan dan semakin kekanan kurva masing-masing garis mulai bercabang. Setelah melewati tegangan sebesar 2 MPa, geometri *honeycomb* mengalami peregangan yang paling signifikan. Kemudian geometri *circle* memiliki sifat elastisitas yang paling rendah,

karena sedikit mengalami peregangan. Kedua garis *honeycomb* dan *rhombus* memiliki nilai signifikansi yang rendah, dimana tegangan yang diterima oleh geometri *rhombus* lebih tinggi daripada geometri *honeycomb*. Hal tersebut didasari oleh sifat mekanika material dan respon terhadap beban yang diterima. Dapat disimpulkan bahwa geometri *honeycomb* memiliki hasil yang lebih baik dibandingkan dengan geometri lainnya dengan sifat mekanika material yang lebih baik.



Gambar 4.18 Grafik *Stress-Strain* basis Geometri *Honeycomb*, *Circle* dan *Rhombus*

4.3.2 Analisis Pengaruh Bentuk Geometri terhadap Bobot

Sebelum melakukan pencetakan objek, perlu ditinjau lebih lanjut bobot pada masing-masing geometri dengan material yang sama. Peninjauan bobot dilakukan dengan menghitung massa pada masing-masing geometri. Perhitungan dilakukan menggunakan *software* Solidworks, Cura dan ANSYS. Perhitungan

menggunakan software Solidworks dilakukan setelah proses *modelling* selesai dengan mengevaluasi *mass properties* pada objek. Dalam proses analisis bobot, digunakan material properties *Nylon* PA 6 pada *software* Solidworks dan ANSYS. Tabel 4.3 merupakan hasil perhitungan massa menggunakan *software* Solidworks, Cura dan ANSYS dimana *frame* sepeda dengan geometri *rhombus* memiliki bobot terberat. Sedangkan selisih bobot antara geometri *circle* dengan *honeycomb* tidak jauh berbeda yaitu 24,79 gram pada *software* Solidworks, 25,2 gram pada *software* ANSYS dan 22 gram pada software Cura.

Tabel 4.3 Estimasi Massa *Frame Balance Bike*

Geometri	Estimasi Massa (Gram)		
	Solidworks	ANSYS	Cura
Honeycomb	1562,8	1590,7	1727
Circle	1538,01	1565,5	1702
Rhombus	1786,51	1818,4	1972

Software Cura digunakan untuk menghitung total jumlah filamen yang digunakan untuk mencetak objek. Biasanya satu buah filamen memiliki berat sebesar 1 kg atau 1000 gram. Dalam perancangan pencetakan suatu objek, sangatlah penting untuk mengkalkulasikan estimasi jumlah filamen yang akan digunakan. *Material properties* dari filamen *carbon fiber-nylon* digunakan dalam proses analisis menggunakan *software* Cura. Pada Tabel 4.3 menunjukkan bahwa hasil perhitungan menggunakan tiga *software* berbeda memiliki hasil yang tidak jauh berbeda. Tingkat keakuratan dari perbedaan antara ketiga *software* tersebut didasari atas perbedaan *data properties* dari masing-masing *software* yang terbatas. Kurangnya kelengkapan *properties* pada *data sheet* yang dikeluarkan oleh manufakur filamen menjadi kesulitan dalam menginput data pada masing-masing *software*. Standar penginputan data pada masing-masing *software* juga berbeda, dimana penginputan menggunakan *software* Cura memiliki standar yang lebih simpel dan sesuai dengan sifat filamen ePA-CF. Namun

hal tersebut tidak menunjukan perbedaan massa yang signifikan antar geometri sehingga masih dapat digunakan untuk menjadi perbandingan dalam menganalisis bobot dari masing-masing geometri.

4.4 Analisis Aspek dalam Penentuan Desain

Hasil analisis pengaruh geometri terhadap kekuatan dan bobot yang telah dilakukan digunakan untuk menentukan objek geometri yang layak untuk dicetak. Penentuan objek juga menimbang unsur bentuk yang futuristik berdasarkan hasil survei yang telah dilakukan. Oleh karena itu geometri yang akan dicetak akan dinilai berdasarkan kriteria penilaian dari aspek-aspek yang telah ditentukan serta hasil analisis yang telah dilakukan. Aspek-aspek tersebut diklasifikasikan menjadi 5 yaitu *equivalent stress*, *equivalent elastic strain*, total deformasi, bobot dan hasil survei estetika. Dalam penilaian aspek tersebut disesuaikan dengan nilai tertinggi sampai terendah berdasarkan urutan *rank* satu sampai tiga yang ditunjukkan pada Tabel 4.4 di bawah ini.

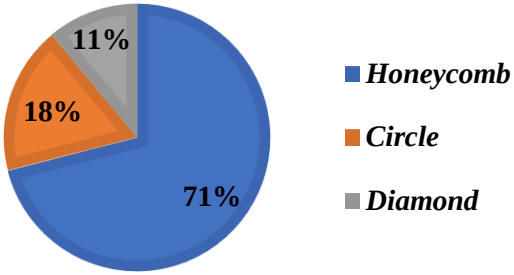
Tabel 4.4 Besaran Nilai berdasarkan *Rank*

Rank	**Nilai**
1	100
2	75
3	50

4.4.1 Hasil Survei Penentuan Desain

Sebelum mencetak objek, penentuan desain berdasarkan hasil survei sangatlah penting. Selain bentuk desain yang futuristik, bentuk desain yang berbeda pada umumnya juga menjadi pertimbangan dimana akan menjadi nilai lebih karena tidak pasaran. Survei dilakukan menggunakan *typeform* yang dibatasi untuk 100 responden. Responden berasal dari berbagai macam latar belakang dari siswa hingga mahasiswa yang berasal dari perguruan tinggi baik negeri maupun swasta. Ketertarikan dari masyakarat terhadap desain geometri *honeycomb* sangatlah tinggi.

Nilai yang diraih oleh geometri *honeycomb* sebesar 71% dari total responden yang diikuti oleh geometri *circle* sebesar 18% dan juga *rhombus* sebesar 11%. Hal tersebut menjadikan bentuk geometri *honeycomb* menjadi desain terbaik dan menarik karena sangat disukai oleh masyarakat.



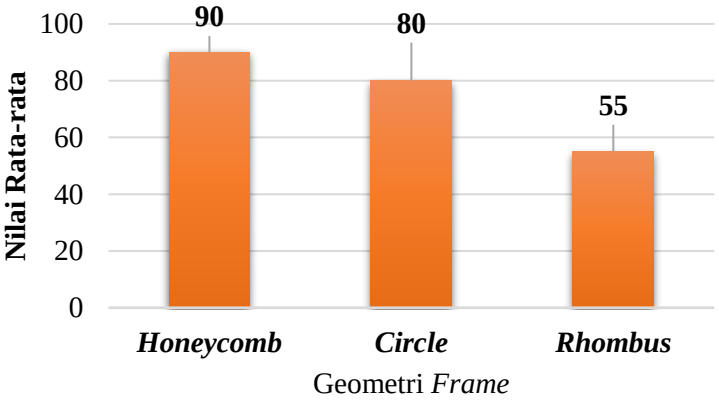
Gambar 4.19 Hasil Survei Desain *Frame Balance Bike*

4.4.2 Aspek Penilaian dalam Pentuan Desain

Pada tabel 4.5 menjelaskan secara detail hasil penilaian dari 5 aspek yang berbeda. Persentase dari masing-masing aspek dinilai sebesar 20%, kemudian nilai total akan dibagi menjadi 5 yang akan ditunjukkan pada Gambar 4.20. Penentuan desain berdasarkan hasil terbaik dari masing-masing aspek. Selain mengedepankan bentuk yang futuristik dan menarik, desain *frame* juga harus memiliki nilai kekuatan yang tinggi serta bobot yang ringan sehingga aman digunakan untuk anak-anak. Dari hasil perhitungan pada tabel dibawah, geometri *honeycomb* merupakan desain terbaik berdasarkan kriteria penilaian dari 5 aspek. Hasil penilaian akhir dari geometri *honeycomb* juga didukung dari keunggulan diberbagai aspek, sehingga geometri *honeycomb* menjadi desain yang ditetapkan untuk dicetak pada penelitan ini. Dalam penentuan nilai, masing-masing aspek memiliki bobot sebesar 20%.

Tabel 4.5 Hasil Penilaian dalam Aspek Penentuan Desain

Aspek	*Honeycomb*	*Circle*	*Rhombus*
Stress	100	75	50
Elastic Strain	75	100	50
Total Deformation	100	50	75
Bobot/Massa	75	100	50
Survei Estetika	100	75	50
Total Nilai	**450**	**400**	**275**



Gambar 4.20 Nilai Akhir Penentuan Desain *Frame Balance Bike*

4.5 Optimalisasi Pengaturan Pencetakann *Frame Balance Bike*

Sebelum dilakukan proses pencetakan objek tiga dimensi, desain modelling yang telah dibuat diubah menjadi file dengan jenis *.stl* atau *stereolithography* dengan menggunakan *software* solidworks. Kemudian file tersebut diinput pada *software* cura

untuk mengatur parameter pada pencetakan pada objek seperti jenis material cetak yang akan digunakan, ukuran *nozzle*, temperature *nozzle* dan *bed*. Parameter dalam pencetakan juga dibagi menjadi tiga yaitu *basic*, *advance* dan *expert*. Setelah pengaturan selesai, file disimpan dan otomatis akan menjadi file dengan jenis *.gcode* dimana file dengan jenis tersebut akan dimasukkan dan dibaca oleh mesin 3D *printer*. Sebelum mencetak objek, lebih baik dilakukan preheat terlebih dahulu pada *nozzle head* dan *bed printer*. Kemudian dilakukan uji coba pada proses ekstrusi untuk mengetahui apakah ada kerusakan material atau error pada mesin *extruder* maupun part lainnya. Filamen ePA-CF yang telah melting akan diekstrusi dari *nozzle head* dengan proses fabrikasi *layer by layer*. Filament dilunakkan di dalam liquifier diatas temperatur meltingnya dan ditekan melalui *nozzle die*. Saat liquifier bergerak, filamen yang terekstrusi akan turun pada bed yang terdapat pada mesin pencetak, kemudian *catridge* 3D *Printer* mengikuti pola dari desain yang akan dicetak.

4.5.1 Parameter Pencetakan *Frame Balance Bike*

Dalam pemilihan parameter pencetakan terdapat beberapa opsi parameter pada *software* 3D Cura yaitu *Basic, Advance* dan *Expert* dimana terdapat beberapa indikator yang berbeda antara satu sama lain. Beberapa faktor utama penentu kualitas objek hasil cetak adalah *layer height, shell thickness*, dan *rectraction*. *Layer height* adalah ketinggian dari lapisan penyusun setiap objek, nominalnya adalah 0,1 mm. Artinya apabila tebal *frame* sepeda sebesar 4 cm, maka terdapat 400 lapisan penyusun pada objek tersebut. Kemudian faktor yang tidak kalah penting adalah *infill* yang terdiri dari *density* dan *pattern*. *Infill density* adalah nominal persentase material pada setiap lapisan penyusun objek. Dengan *input density* sebesar 100 % artinya setiap layer tersusun dari 100 % *molten carbon fiber-nylon* yang terekstrusi dari *nozzle head printer*. Selanjutnya pada *infill pattern* terdapat 13 jenis bentuk dimana jenis terbaru *gyroid* merupakan *pattern* yang paling sering

digunakan karena dapat membentuk struktur yang kokoh dan kekuatan yang lebih tinggi.

Tabel 4.6 Parameter Pencetakan Menu *Basic* pada Cura 4.4

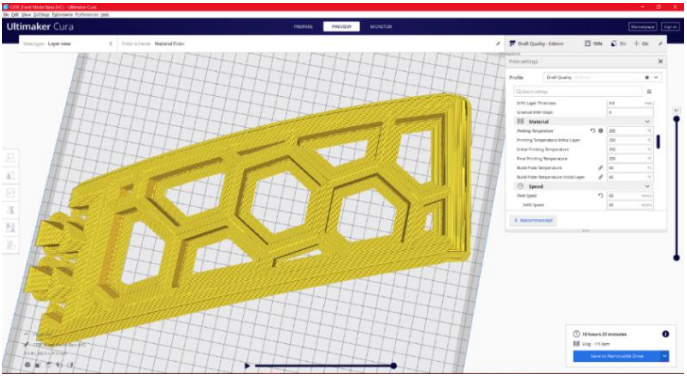
Submenu	***Parameter***	***Value***	***Unit***
Quality	*Layer Height*	0.6	mm
	Line Width	0.8	mm
Shell	*Wall Thickness*	1.6	mm
	Wall Line Count	10	
Infill	*Infill Density*	50	%
	Infill Pattern	*Gyroid*	
Material	*Printing Temperature*	250	°C
	Build Plate Temperature	70	°C
	Flow	100	%
Speed	*Print Speed*	65	mm/s
Travel	*Enable Retraction*	Yes	
	Z Hop When Retracted	Yes	
Cooling	*Enable Print Cooling*	No	
	Fan Speed	0	%
Support	*Generate Support*	Yes	
	Support Placement	*Everywhere*	
	Support Overhang Angle	33	°
Build Plate Adhesion	*Build Plate Adhesion Type*	*Brim*	

Selanjutnya dalam menentukan parameter lainnya bergantung pada jenis material dan geometri objek yang akan dicetak. Dalam penggunaan material dengan jenis *carbon fiber-nylon* terdapat beberapa perilaku khusus dimana material ini tergolong sulit untuk dicetak karena memiliki kriteria tertentu. Pada Tabel 4.6 terdapat sub menu *speed* yaitu untuk mengatur kecepatan pencetakan objek dan juga temperatur yang terbagi menjadi dua yaitu *printing* serta *build plate/bed*. Kriteria khusus untuk mencetak objek dengan material *carbon fiber-nylon* pertama yaitu temperatur pencetakan harus diatas 250 °C dan *bed* temperatur diatas 60 °C sesuai dengan standar material data sheet yang diberikan oleh pabrikan.

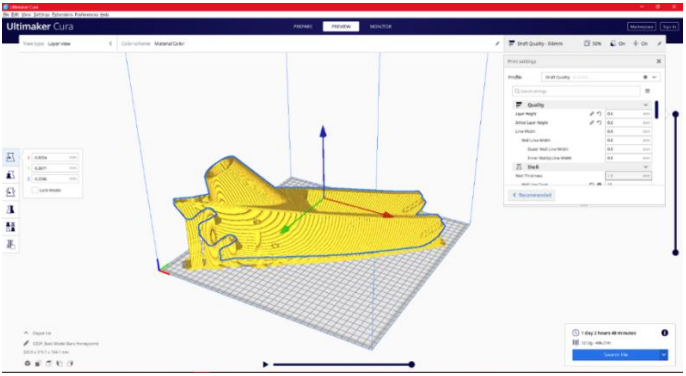
Karena temperatur yang digunakan tergolong tinggi, maka kapasitas mesinpun harus menyesuaikan dan juga part yang digunakan dalam proses ekstrusi material harus memiliki material dengan ketahanan abrasif yang tinggi. Oleh karena itu digunakan *all metal hotend kit* dari *micro swiss* yang terdiri dari *hotend, heat block* serta *nozzle*. Pemutus panas termal terbuat dari *Titanium Alloy Grade* 5 untuk memberikan isolasi termal yang sangat baik antara pemanas dan blok pendingin. Titanium adalah bahan yang sangat kuat dan menawarkan konduktivitas termal hampir tiga kali lebih rendah dari *stainless steel*, menciptakan *meltzone* lebih jelas sehingga sangat cocok dalam pencetakan objek material *carbon fiber-nylon*.

Kecepatan dalam mencetak disesuaikan dengan ukuran objek serta ukuran dari *nozzle* yang akan digunakan. Pada penelitian ini, keterbatasan dimensi yang dimiliki oleh mesin printer mengharuskan objek *frame* untuk dicetak harus dibagi menjadi dua bagian yaitu *front frame* dan *back frame*. Kemudian untuk menghemat waktu yang signifikan serta meminimalisir kesalahan hasil pada objek cetak maka digunakan *nozzle* dengan ukuran 0,8 mm. Untuk mencetak objek dengan ukuran yang besar maka sangat diperlukan dan dianjurkan untuk menggunakan *nozzle* dengan diameter yang lebih besar agar dapat menghindari *over load work* pada mesin dengan mengurangi intensitas waktu cetak.

Selain itu, kecepatan yang digunakan harus rendah apabila menggunakan *nozzle* dengan ukuran yang lebih besar. Hal ini akan berdampak pada hasil cetak dimana akan terdapat banyak *layer by layer* yang kurang menyatu.



Gambar 4. 21 Tampilan Pengaturan Cetak *Front Frame Balance Bike* pada *software* Cura 4.4



Gambar 4.22 Tampilan Pengaturan Cetak *Back Frame Balance Bike* pada *software* Cura 4.4

Opsi menu *basic* digunakan dalam proses cetak *front* dan *back frame balance bike*. Keuntungan menggunakan menu *basic*

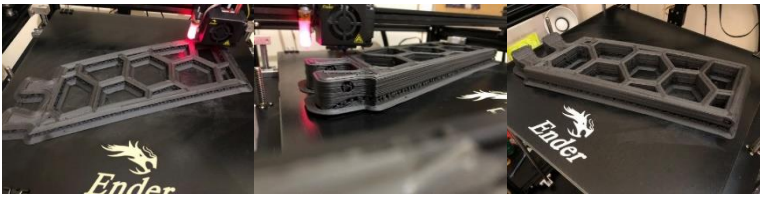
adalah tampilan parameter yang lebih familiar serta mudah untuk dimengerti oleh operator. Hal terpenting lainnya adalah pengaturan posisi cetak yang berpengaruh pada *support* untuk objek yang bergantung. Dalam penelitian ini, *frame* dibagi menjadi dua untuk memudahkan proses cetak. Selain itu, waktu untuk pencetakan juga lebih efektif dikarenakan *support* yang digunakan lebih sedikit. Dapat dilihat pada Gambar 4.21 dan 4.22 dimana durasi waktu untuk cetak lebih efektif dan juga penggunaan filamen yang lebih sedikit sehingga dapat disimpulkan dengan melakukan pembagian objek cetak menjadi dua merupakan solusi dalam penelitian ini.

4.6 Hasil Pencetakan *Frame Balance Bike*

Pada analisis struktur dan sifat termal yang dilakukan oleh stepashkin tahun 2018 pada material filament 3D *print* yakni PEEK dengan *carbon fiber* menunjukan bahwa semakin rendah kandungan dari serat *carbon fiber* pada matriks polimer, maka semakin rendah porositas serta daya serap air pada objek cetak 3D *print* tersebut. Oleh karena itu hipotesis tersebut sesuai dengan hasil cetak pada *frame balance bike*, dimana objek memiliki performa sifat mekanik material yang baik namun memiliki porositas yang tinggi karena mengandung kandungan *carbon fiber* sebesar 25 % (Stepashkin, 2018).

4.6.1 *Front Frame Balance Bike*

Proses pencetakan objek *front frame balance bike* memakan waktu selama 10 jam 23 menit dengan menghabiskan 513 gram filamen. Penggunaan ukuran *nozzle* sebesar 0,8 membuat durasi cetak lebih cepat serta pengaturan *infill density* sebesar 50 % membuat berat lebih ringan. Dalam proses pencetakan objek menggunakan kecepatan cetak 65 mm/s dengan *printing temperature* sebesar 250 ºC dan *bed temperature* sebesar 60 ºC.

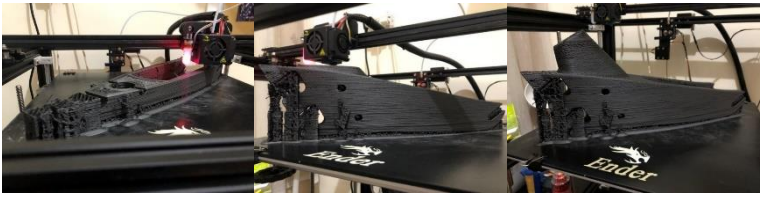


(a) (b) (c)

Gambar 4.23 Proses Pencetakan *Front Frame Balance Bike* (a) Proses Cetak Objek < 50 % (b) Proses Cetak Objek > 50 % (c) Pencetakan Objek Selesai

4.6.2 *Back Frame Balance Bike*

Proses pencetakan objek *back front frame balance bike* memakan waktu lebih lama dari sebelumnya yakni 1 hari 2 jam 48 menit dengan menghabiskan sebanyak 1212 gram filamen.



(a) (b) (c)

Gambar 4.24 Proses Pencetakan *Back Frame Balance Bike* (a) Proses Cetak Objek < 50 % (b) Proses Cetak Objek > 50 % (c) Pencetakan Objek Selesai

4.7 Analisis Hasil Pencetakan *Frame Balance Bike*

Setelah proses pencetakan selesai, kedua objek dibersihkan dari *support*. Kemudian, kedua objek dihaluskan seluruh permukaannyaa dari sisa pencetakan dan support yang masih menempel menggunakan kertas amplas *grade* 80. Objek memiliki kekerasan yang sangat tinggi sehingga diperlukan mini grinder untuk menghaluskan bagian permukaan agar lebih rata dan halus. Selanjutnya, dilakukan pengecekan terhadap seluruh permukaan dari objek sebelum dilakukan penimbangan bobot dari kedua objek

tersebut. Pada Gambar 4.25 menunjukan bahwa berat *frame* apabila digabungkan tidak sesuai dengan analisis pada subbab 4.3 dimana berat total objek sebesar 649 gram. Pengaturan *infill density* sebesar 50% digunakan untuk mengurangi bobot dari *frame* tersebut yang diperkirakan sebesar 1727 gram.

Dalam proses pencetakan objek *back frame balance bike* terdapat kendala pada saat pencetakan yang disebabkan oleh korslet/mati listrik. Hal tersebut menyebabkan kerusakan pada *mainboard* mesin cetak sehingga terjadi perbedaan signifikan dari hasil ekstrusi filamen. Terdapat rongga-rongga pada bagian atas objek dikarenakan bonding antar hasil ekstrusi yang kurang rekat. Akibat dari korsleting listrik menyebabkan mesin cetak mengalami *under extrusion*. Terjadi banyak cacat yang ditimbulkan setelah terjadi korsleting listrik pada mesin cetak diantaranya yaitu *gaps between infill and outline*, *gaps layer to layer*, *gaps in top layer*, *stringing* dan *blobs*. Hal tersebut disebabkan oleh ekstrusi yang tidak konsisten dikarenakan terjadi kerusakan mekanik pada ekstruder.

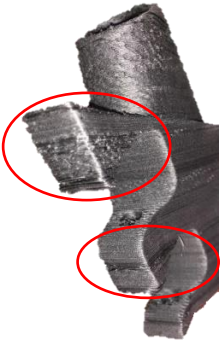
(a)

(b)

Gambar 4.25 Perhitungan Bobot *Frame Balance Bike* (a) Bagian Depan (b) Bagian Belakang

Faktor lainnya yang menyebabkan timbulnya cacat juga dikarenakan posisi cetak objek. Posisi vertikal dipilih untuk mengurangi jumlah filamen yang digunakan dan juga durasi cetak agar lebih efektif serta efisien. Sifat dari material ePA-CF yang memiliki *flexural strength* tinggi serta elastisitas yang tinggi membuat proses ekstrusi menjadi lebih kompleks. Apalagi diperlukan standar khusus seperti temperatur cetak yang tidak boleh dibawah 250 ºC dan *bed temperature* yang tinggi menyebabkan daya listrik yang dibutuhkan semakin besar. Pada Gambar 4.26 terlihat jarak antara lapisan satu dengan lainnya yang tunjukkan pada lingkaran merah. Hal tersebut menyebabkan kurangnya ikatan antar lapisan sehingga turunnya kekuatan pada bagian tersebut dan membuat bagian tersebut menjadi rapuh. Dapat dilihat lebih jelas pada gambar dibawah akibat *under extrusion* pada ekstruder yang menyebabkan *gaps layer to layer* dan *gaps in top layer*.

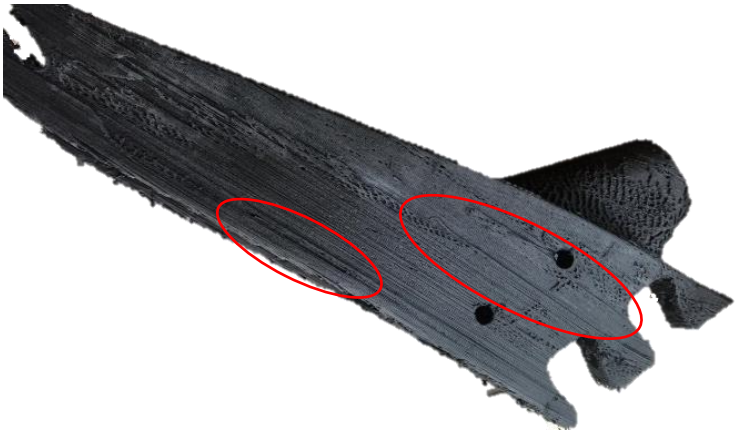
Gambar 4.26 Sampel dari cacat *Gaps Layer to Layer*



Gambar 4.27 *Printing Defects : Gaps Layer to Layer*

Gambar 4.28 *Printing Defects : Gaps in Top Layer*

Terdapat korelasi antara pengaturan cetak dengan cacat yang dihasilkan. Pada penelitian ini menggunakan opsi *retraction* pada proses pencetakan dimana hal tersebut menimbulkan cacat *blobs*. Gumpalan tersebut muncul pada saat ekstruder mulai mencetak *outer shell* objek pada lokasi yang menjadi tempat penyatuan antar lapisan. Pada Gambar 4.29 terlihat *blobs* terjadi hanya terdapat pada beberapa bagian objek. Akibat tingginya temperatur cetak menyebabkan timbulnya cacat *stringing* pada objek. *Stringing* merupakan cacat yang sering ditemukan pada saat mencetak objek. *Stringing* biasanya disebabkan oleh plastik yang keluar dari *nozzle* saat ekstruder bergerak ke lokasi baru, jarak serta kecepatan dari *retraction* juga mempengaruhi timbulnya *stringing*. *Retraction* merupakan fitur yang sangat berguna untuk mencegah terjadinya *stringing* karena ketika ekstruder selesai mencetak satu bagian dari objek, filamen akan ditarik mundur ke dalam *nozzle* untuk menanggulangi aliran dari *melt* filamen yang mengalir. Filamen akan didorong kembali ke *nozzle* ketika waktunya untuk mulai mencetak lagi. Menurunnya kecepatan *retraction* akibat kerusakan *mainboard* membuat proses pencetakan tidak maksimal dan menyebabkan timbulnya *stringing*.



Gambar 4.29 *Printing Defects : Blobs*

Gambar 4.30 *Printing Defects : Stringing*

Pengaturan letak posisi objek untuk dicetak merupakan hal yang sangat penting karena akan mempengaruhi durasi cetak, kebutuhan filamen serta *print support* dalam proses pencetakan. Dalam penelitian ini terdapat beberapa pertimbangan menggunakan posisi vertikal dalam peletakan objek yakni kebutuhan filamen yang lebih sedikit dibandingkan posisi horizontal. Dikarenakan kondisi pandemik seperti ini membuat harga filamen ePA-CF semakin tinggi dan sulit untuk ditemukan. Pertimbangan lainnya yaitu durasi cetak yang lebih cepat dikarenakan sedikit menggunakan *support* untuk mencetak objek. Namun hal tersebut juga mempunyai kerugian lain yakni dengan posisi vertikal membuat pencetakan lebih sulit dikarenakan terdapat bagian *overhang* pada sambungan yang sulit untuk dijangkau oleh *print support*. Keterbatasan tersebut membuat kualitas hasil cetak menurun dan juga faktor sifat dari material filamen yang berbeda dengan material pada umumnya. Konsekuensi dari penentuan posisi cetak tersebut menimbulkan cacat *gaps between infill and outline* pada bagian sambungan yang

tidak dapat dicover oleh *print support* pada sudut tertentu. Pada Gambar 4.31 menunjukkan terdapat celah pada bagian sudut-sudut akibar dari *overhang*. Dan dapat dilihat lebih jelas celah-celah tersebut pada Gambar 4.32.

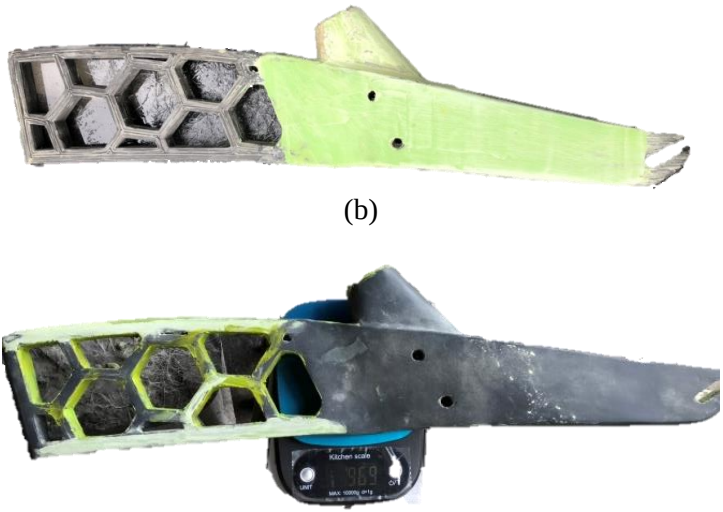
Gambar 4.31 Bagian *Overhang* pada Objek

Gambar 4.32 *Printing Defects : Gaps between Infill and Outline*

Setelah mengidentifikasi permasalahan tersebut, langkah selanjutnya untuk meningkatkan kualitas dari *frame balance bike* adalah melapisi bagian-bagian yang memiliki cacat dengan dempul. Proses pendempulan dilakukan sebanyak tiga kali, dimulai pada bagian sambungan *back frame balance bike*. Terdapat kesulitan dalam proses pendempulan dimana objek memiliki dimensi yang kecil sehingga membutuhkan waktu dan ketelitian dalam mengerjakannya. Selanjutnya dilakukan proses penggabungan antara bagian depan frame dengan bagian belakang menggunakan serat kaca yang dilapisi oleh resin. Pelapisan tersebut juga dilakukan pada bagian atas *saddle seat* untuk meningkatkan kekuatan dan kekakuan.

Pada Gambar 4.33 (b) merupakan hasil setelah dilakukan pelapisan dempul pada bagian belakang dan sambungan dari *frame*. Untuk menjaga berat dari *frame* agar tetap ringan dilakukan pengecekan berat secara rutin setelah proses pelapisan. Melapisi seluruh permukaan *frame* dengan dempul merupakan proses terakhir sebelum dicat menggunakan *epoxy*. Dalam penelitian ini terdapat peningkatan bobot akibat proses pendempulan sebanyak 320 gram.

(a)



(b)

(c)

Gambar 4.33 Proses Pendempulan (a) Sambungan *Back Frame Balance Bike* (b) Back *Frame Balance Bike* (c) Seluruh Permukaan *Frame Balance Bike*

Setelah seluruh permukaan sudah rata dan rapih, proses selanjutnya adalah pelapisan menggunakan cat *epoxy*. Pelapisan cat *epoxy* juga disebut sebagai cat dasar yang berguna untuk menutupi pori-pori pada permukaan. Hal tersebut sangatlah penting sebelum dilakukan proses *finishing* terakhir yaitu pelapisan *top coat* dan *clear coat*. Pelapisan top coat dilakukan untuk meningkatkan nilai estetika pada *frame*. Pengecatan pada lapisan top coat dilakukan sangat hati-hati untuk menjaga bobot dari *frame honeycomb*. Hasil pelapisan cat *epoxy* dapat dilihat pada Gambar 4.34.

Gambar 4.34 Hasil Proses Pelapisan Cat

Gambar 4.35 Susunan Lapisan *Frame Balance Bike*

Terdapat 5 lapisan yakni ePA-CF, dempul, cat *epoxy*, cat warna dan cat pernis. Pada Gambar 4.35 menjelaskan susunan lapisan pada *frame balance*. Pada susunan lapisan tersebut, *base coat* terdiri dari dempul dan cat *epoxy* yang berfungsi sebagai media lapisan dasar yang menghubungkan antara material dasar dengan *top coat*. *Base coat* juga menghilangkan sifat daya serap tinggi dari filamen ePA-CF. *Top coat* merupakan lapisan yang memberikan unsur warna pada *frame*, dimana warna gelap menjadi pilihan untuk menunjukkan karakter dari material dasar dalam penelitian ini. Dan lapisan terakhir yakni *clear coat* memiliki fungsi dalam melindungi lapisan dari debu atau kotoran yang menempel dan juga memblokir pigmen warna agar tidak menguap apabila terkena sinar matahari.

Perhitungan bobot dilakukan dengan menghitung seluruh komponen yang akan difabrikasi pada *frame* yang ditunjukkan pada tabel dibawah ini. Bobot dari *frame honeycomb* setelah

ditimbang sebesar 1050 gram. Dan setelah digabungkan dengan bagian *saddle seat* dan komponen lainnya menjadi 1731 gram.

Tabel 4.7 Perhitungan Bobot Total

Komponen	Massa (gram)
Frame Honeycomb	1050
Saddle Seat	561
Mur dan Baut	120
Total	1731

Gambar 4.36 Fabrikasi *Frame Honeycomb*

Setelah semua komponen difabrikasi menjadi satu, *frame* diberikan beban diatas 20 kg dalam proses *real testing*. Pengujian dilakukan dengan dinaiki oleh 5 orang anak dengan umur dan berat badan yang bervariasi dari 15 kg sampai 28 kg. Skema *real testing* ditunjukkan pada Gambar 4.37. Didapatkan hasil setelah pengujian bahwa *frame* tidak terlihat mengalami deformasi walaupun diberikan beban hingga 28 kg. Hal tersebut sesuai dengan hasil analisis simulasi statis dimana geometri *honeycomb* mengalami deformasi sebesar 0,00035311 m apabila diberikan beban sebesar 20 kg. Dapat disimpulkan bahwa geometri *honeycomb* cocok untuk dijadikan sebagai *frame* pada *balance bike* dimana geometri

tersebut memiliki keunggulan dengan bobot yang ringan serta dapat diproduksi dengan waktu yang cepat dan juga memiliki bentuk yang menarik.

Gambar 4.37 Skema *Real Testing Frame*

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan dalam penelitian berdasarkan hasil pengujian dan analisis data yang telah dibahas secara rinci adalah sebagai berikut:

1. Pengaruh bentuk geometri terhadap kekuatan *frame balance bike*:
   a. Perbedaan bentuk geometri *honeycomb*, *circle* dan *rhombus* mempengaruhi hasil simulasi statis yang ditinjau dari besaran nilai tegangan, regangan elastis, dan total deformasi.
   b. Berdasarkan hasil simulasi statis, Geometri *honeycomb* memiliki sifat mekanik terbaik dengan tegangan maksimal sebesar 5,5224 MPa, regangan elastis maksimal sebesar 0,0062933 m/m, dan total deformasi maksimal sebesar 0,00035311 m.
2. Pengaruh bentuk geometri terhadap bobot *frame balance bike*:
   a. Perbedaan bentuk geometri *honeycomb*, *circle*, dan *rhombus* mempengaruhi massa *frame* yang ditinjau menggunakan *software* ANSYS, Solidworks, dan Cura.
   b. Berdasarkan hasil analisis, Geometri *circle* memiliki massa paling rendah dengan berat 1538,01 gram pada *software* Solidworks, 1565,5 gram pada *software* ANSYS, dan 1702 gram pada *software* Cura.
3. Berdasarkan hasil survei estetika desain, geometri *honeycomb* menjadi desain yang paling diminati oleh masyarakat dengan persentase sebesar 71%.
4. Berdasarkan hasil analisis penentuan desain, geometri *honeycomb* memiliki keunggulan dalam aspek tegangan, regangan elastis, total deformasi, bobot dan hasil survei estetika.

5. Didapatkan hasil produksi *frame balance bike* sebagai berikut:
   a. Pencetakan geometri *honeycomb* memakan waktu 1 hari 13 jam dengan menghabiskan 1725 gram filamen *carbon fiber-nylon* (ePA-CF).
   b. Parameter utama dalam pengaturan pencetakan objek 3D menggunakan material filamen *carbon fiber-nylon* yakni *shell*, *infill*, *speed*, *travel* dan *print support*.
   c. Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan neraca massa, *frame honeycomb* memiliki bobot sebesar 1050 gram.

5.2 Saran

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut :

1. Melakukan penelitian lebih lanjut terkait proses produksi *balance bike* dengan menggunakan berbagai jenis data yang lebih spesifik, seperti material dan standar ukuran.
2. Penentuan parameter cetak ditentukan berdasarkan percobaan yang dilakukan secara berulang agar dapat menemukan parameter yang sesuai dan akurat.
3. Observasi terkait ukuran berbagai *part balance bike* perlu dilakukan agar dapat memudahkan peneliti dalam proses perancangan sepeda.

DAFTAR PUSTAKA

A.A. Stepashkin, D.I. Chukov, F.S. Senatov, A.I. Salimon, A.M. Korsunsky, S.D. 2018. "3D-printed PEEK-Carbon Fiber (CF) Composites: Structure and Thermal Properties." **Composites Science and Technology**, 164:319-326.

Ahmed, M. Zubair. 2014. **Material, Design & Analysis of a Bicycle Frame**. Haiderabad: Jawaharlal Nehru Technological University .

Anand.N, Bheemaiah.N.N, Vinay.K. 2014. **Rapid Prototyping Technology and its Applications.** Kushalnagar: Govt. Engineering College.

Andhy Rinanto, Wahyudi Sutopo. 2017. "Perkembangan Teknologi Rapid Prototyping: Study Literatur." **Jurnal Metris 18**, 105-112.

Andrew Becker, Seth E. Jenny. 2017. "No Need for Training Wheels: Ideas for Including Balance Bikes in Elementary Physical Education." **Journal of Physical Education, Recreation & Dance**, 88(4):14-21.

Awwaluddin, Muhammad. 2013. **Analisis Tegangan Statik Dan Dinamik Pada Perancangan Dan Pengembangan Struktur Bodi Monorail Produksi PT. MBW Menggunakan Finite Element Analysis (ANSYS).** Depok: Universitas Indonesia.

Bathe, Klaus-Jürgen. 2014. **Finite Element Procedures**. 2nd. USA: Prentice Hall, Pearson Education, Inc.

Brett G. Compton, Jennifer A. Lewis. 2014. " 3D-Printing of Lightweight Cellular Composites." **Advanced Materials**, 26:5930-5935.

Chris Edwards, Fionn Ruder, Joseph Hurley, Micah Thomas, Mitch Spinelli. 2018. **3D Printed Carbon Fiber Electric Mountain Bike Frame**. Santa Clara: Santa Clara University.

Ebubekir Çanti, Mustafa Aydin, Ferhat Yildrim. 2018. "Production and Characterization of Composite Filaments for 3D Printing." **Journal of Polytechnic**, 21:397-402.

FirstBIKE Co. 2020. **The Essential Learning Bike**, <URL:https://firstbike.com/features/>.

Fuda Ning, Weilong Cong, Jingjing Qiu, Junhua Wei, Shiren Wang. 2015. "Additive Manufacturing of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composites using Fused Deposition Modeling." **Composites Part B**, 80: 369-378.

G.R. Liu, S. S. Quek. 2013. **The Finite Element Method. A Practical Course**. 2nd. Philadelphia: Butterworth-Heinemann.

Gebhardt, Andreas. 2011. **Understanding Additive Manufacturing**. München: Hanser.

Halil L. Tekinalp, Vlastimil Kunc, Gregorio M. Velez-Garcia,..., Soydan Ozcan. 2014. "Highly Oriented Carbon Fiber–Polymer Composites via Additive Manufacturing." **Composites Science and Technology**, 105: 144-150.

Hartarto, Airlangga. 2018. **Making Indonesia 4.0.** Jakarta: Kementerian Perindustrian Republik Indonesia.

Izabela Hager, Anna Golonka, Roman Putanowicz. 2016. "3D Printing of Buildings and Building Components as The Future of Sustainable Construction?" **Procedia Engineering**, 151: 292-299.

Liang Hao, Raymond, D., Strano, G., & Dadbakhsh, S. 2010. "Enhancing the Sustainability of Additive Manufacturing." **5th International Conference on Responsive Manufacturing**, 390-395.

Martina Kohlhuber, Martin Kage, Michael Karg. 2017. **Additive Manufacturing**. München: Acatech – National Academy of Science and Engineering.

Martins, N. 2019. **Balance Bikes: The Authoritative Sizing and Buying Guide**, <URL:https://www.twowheelingtots.com/how-to-choose-balance-bikes/>.

Mary Kathryn Thompson, Giovanni Moroni, Tom Vaneker, Georges Fadel, R. Ian Campbell, Ian Gibson,....,Filomeno Martina. 2016. "Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints." **CIRP Annals Manufacturing Technology**, 2:65.

Mehrshad Mehrpouya, Amir Dehghanghadikolaei, Behzad Fotovvati, Alireza Vosooghnia, Sattar S. Emamian, Annamaria Gisario. 2019. "The Potential of Additive Manufacturing in the Smart." **Applied Sciences**, 9:3865.

O.S. Carneiro, A.F. Silva, R. Gomes. 2015. "Fused deposition modeling with polypropylene." **Materials & Design**, 83: 768-776.

Pambudi, Arif Imbang. 2017. **Analisis Pengaruh Internal Geometri terhadap Sifat Mekanik Material Polylactic Acid (PLA) Dipreparasi menggunakan 3D Printing**. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Rianto Adhy Sasongko, Leonardo Gunawan, Sin Kimsay. 2010. "Pemodelan dan Simulasi Dinamik Untuk Pengembangan." **Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) ke-9**.

Rojko, Andreja. 2017. "Industry 4.0 Concept: Background and Overview." **International Journal of Interactive Mobile Technologies (iJIM)**, 5:11.

Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel,. 2015. **Industry 4.0 : The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries**. Boston: The Boston Consulting Group.

Schuler, M. 2014. **Look Ma, No Training Wheels! The Best Balance Bikes**, <URL:https://www.outsideonline.com/1924246/look-ma-no-training-wheels-best-balance-bikes/>.

Shenzhen BXT Technology Co., Ltd. 2018. **2018 BXT Pedal-less Carbon Kids Balance Bike**, <URL:https://storegol.com/product/2018-bxt-pedal-less-

balance-bike-carbon-kids-balance-bicycle-for-26-years-old-children-complete-bike-for-kids-carbon-bicycle/>.

Shenzhen BXT Technology Co., Ltd. 2020. **BXT 12 Inch Kids Balance Bike Carbon Frame**, <URL:https://indonesian.alibaba.com/product-detail/12-inch-kids-balance-bike-frame-carbon-frame-ultralight-kinderen-baby-bike-frame-sport-balans-fiets-fiets-frame-1600079148456>.

Shenzhen Esun Industrial Co., Ltd. 2016. **Filament ePA-CF (Carbon Fiber Based Nylon).** <URL:http://www.esun3d.net/DownLoad/>.

Shih-Wen Hsiao, Rong-Qi Chen, Wan-Lee Leng. 2015. "Applying Riding-Posture Optimization on Bicycle Frame Design." **Applied Ergonomics**, 51:67-79.

Strider Sports International. 2020. **Strider 12 Sport**, <URL: https://striderbikes.com/buy/shop-all/balance-bikes/12-sport/>.

Waas, Victor D., Mas Irfan P. Hidayat, dan Lukman Noerochiem. 2019. "Finite Element Simulation of Delamination in Carbon Fiber/Epoxy Laminate Using Cohesive Zone Model: Effect of Meshing Variation." **Material Science Forum,** 964:257-262.

Xin Wang, Man Jiang, Zuowan Zhou, Jihua Gou, David Hui. 2017. "3D Printing of Polymer Matrix Composites: A Review and Prospective." **Composites Part B**, 110:442-458.

Ahmed, M. Zubair. 2014. **Material, Design & Analysis of a Bicycle Frame**. Haiderabad: Jawaharlal Nehru Technological University .

Anand.N, Bheemaiah.N.N, Vinay.K. 2014. **Rapid Prototyping Technology and its Applications.** Kushalnagar: Govt. Engineering College.

Andhy Rinanto, Wahyudi Sutopo. 2017. "Perkembangan Teknologi Rapid Prototyping: Study Literatur." **Jurnal Metris 18** 105-112.

Andrew Becker, Seth E. Jenny. 2017. “No Need for Training Wheels: Ideas for Including Balance Bikes in Elementary Physical Education.” **Journal of Physical Education, Recreation & Dance**. 88(4):14-21

Awwaluddin, Muhammad. 2013. **Analisis Tegangan Statik Dan Dinamik Pada Perancangan Dan Pengembangan Struktur Bodi Monorail Produksi PT. MBW Menggunakan Finite Element Analysis (ANSYS).** Depok: Universitas Indonesia.

Bathe, Klaus-Jürgen. 2014. **Finite Element Procedures**. 2nd. USA: Prentice Hall, Pearson Education, Inc.

Brett G. Compton, Jennifer A. Lewis. 2014. “ 3D-Printing of Lightweight Cellular Composites.” **Advanced Materials** 26: 5930-5935.

Chris Edwards, Fionn Ruder, Joseph Hurley, Micah Thomas, Mitch Spinelli. 2018. **3D Printed Carbon Fiber Electric Mountain Bike Frame**. Santa Clara: Santa Clara University.

Ebubekir Çanti, Mustafa Aydin, Ferhat Yildrim. 2018. “Production and Characterization of Composite Filaments for 3D Printing.” **Journal of Polytechnic** 21: 397-402.

Fuda Ning, Weilong Cong, Jingjing Qiu, Junhua Wei, Shiren Wang. 2015. “Additive Manufacturing of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composites using Fused Deposition Modeling.” **Composites Part B** 80: 369-378.

FirstBIKE Company. 2020. **The Essential Learning Bike**, <URL:https://firstbike.com/features/>.

G.R. Liu, S. S. Quek. 2013. **The Finite Element Method. A Practical Course**. 2nd ed. Philadelphia: Butterworth-Heinemann.

Gebhardt, Andreas. 2011. **Understanding Additive Manufacturing**. München: HANSER.

Halil L. Tekinalp, Vlastimil Kunc, Gregorio M. Velez-Garcia,..., Soydan Ozcan. 2014. “Highly Oriented Carbon Fiber–

Polymer Composites via Additive Manufacturing." **Composites Science and Technology** 105: 144-150.

Hartarto, Airlangga. 2018. **Making Indonesia 4.0.** Jakarta: Kementerian Perindustrian Republik Indonesia.

Izabela Hager, Anna Golonka, Roman Putanowicz. 2016. "3D Printing of Buildings and Building Components as The Future of Sustainable Construction?" **Procedia Engineering** 151: 292-299.

Liang Hao, Raymond, D., Strano, G., & Dadbakhsh, S. 2010. "Enhancing the Sustainability of Additive Manufacturing." **5th International Conference on Responsive Manufacturing**. 390-395

Martina Kohlhuber, Martin Kage, Michael Karg. 2017. **Additive Manufacturing**. München: acatech – National Academy of Science and Engineering.

Mary Kathryn Thompson, Giovanni Moroni, Tom Vaneker, Georges Fadel, R. Ian Campbell, Ian Gibson,....,Filomeno Martina. 2016. "Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints." **CIRP Annals Manufacturing Technology** 2: 65.

Mehrshad Mehrpouya, Amir Dehghanghadikolaei, Behzad Fotovvati, Alireza Vosooghnia, Sattar S. Emamian, Annamaria Gisario. 2019. "The Potential of Additive Manufacturing in the Smart." **Applied Sciences** 9: 3865.

O.S. Carneiro, A.F. Silva, R. Gomes. 2015. "Fused deposition modeling with polypropylene." **Materials & Design** 83: 768-776.

Pambudi, Arif Imbang. 2017. **Analisis Pengaruh Internal Geometri terhadap Sifat Mekanik Material Polylactic Acid (PLA) Dipreparasi menggunakan 3D Printing**. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Rianto Adhy Sasongko, Leonardo Gunawan, Sin Kimsay. 2010. "Pemodelan dan Simulasi Dinamik Untuk Pengembangan." **Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) ke-9**.

Rojko, Andreja. 2017. “Industry 4.0 Concept: Background and Overview.” **International Journal of Interactive Mobile Technologies (iJIM)** 5:11.

Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel,. 2015. **Industry 4.0 : The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries**. Boston: The Boston Consulting Group.

Shenzhen Esun Industrial Co., Ltd. 2016. **Filament ePA-CF (Carbon Fiber Based Nylon).** <URL:http://www.esun3d.net/DownLoad/>

Shih-Wen Hsiao, Rong-Qi Chen, Wan-Lee Leng. 2015. “Applying Riding-Posture Optimization on Bicycle Frame Design.” **Applied Ergonomics**. 51: 67-79

Waas, Victor D., Mas Irfan P. Hidayat, dan Lukman Noerochiem. 2019. “Finite Element Simulation of Delamination in Carbon Fiber/Epoxy Laminate Using Cohesive Zone Model: Effect of Meshing Variation.” **Material Science Forum 964**: 257-262.

Xin Wang, Man Jiang, Zuowan Zhou, Jihua Gou, David Hui. 2017. “3D Printing of Polymer Matrix Composites: A Review and Prospective.” **Composites Part B** 110: 442-458.

Zixiang Weng, Jianlei Wang, T. Senthil, Lixin Wu. 2016. “Mechanical and Thermal Properties of ABS/Montmorillonite Nanocomposites for Fused Deposition Modeling 3D Printing.” **Materials and Design**, 102:276-283.

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Hasil Pengujian Simulasi Statis

Geometri *Honeycomb*				
No	***Time* (s)**	***Total Deformation Max* (m)**	***Stress Max* (Pa)**	***Elastic Strain Max* (m/m)**
		Coarse Mesh		
1	0,05	1,76E-05	1,73E+05	1,95E-04
2	0,1	3,51E-05	3,45E+05	3,89E-04
3	0,15	5,27E-05	5,18E+05	5,84E-04
4	0,2	7,02E-05	6,90E+05	7,79E-04
5	0,25	8,78E-05	8,63E+05	9,74E-04
6	0,3	1,05E-04	1,04E+06	1,17E-03
7	0,35	1,23E-04	1,21E+06	1,36E-03
8	0,4	1,40E-04	1,38E+06	1,56E-03
9	0,45	1,58E-04	1,55E+0b6	1,75E-03
10	0,5	1,76E-04	1,73E+06	1,95E-03
11	0,55	1,93E-04	1,90E+06	2,14E-03
12	0,6	2,11E-04	2,07E+06	2,34E-03
13	0,65	2,28E-04	2,24E+06	2,53E-03
14	0,7	2,46E-04	2,42E+06	2,73E-03
15	0,75	2,63E-04	2,59E+06	2,92E-03
16	0,8	2,81E-04	2,76E+06	3,12E-03
17	0,85	2,98E-04	2,93E+06	3,31E-03
18	0,9	3,16E-04	3,11E+06	3,51E-03

19	0,95	3,34E-04	3,28E+06	3,70E-03
20	1	3,51E-04	3,45E+06	3,89E-03
21	2	3,51E-04	3,45E+06	3,89E-03
		Medium Mesh		
1	0,05	1,76E-05	1,50E+05	1,66E-04
2	0,1	3,51E-05	3,01E+05	3,32E-04
3	0,15	5,27E-05	4,51E+05	4,98E-04
4	0,2	7,03E-05	6,01E+05	6,64E-04
5	0,25	8,79E-05	7,52E+05	8,30E-04
6	0,3	1,05E-04	9,02E+05	9,96E-04
7	0,35	1,23E-04	1,05E+06	1,16E-03
8	0,4	1,41E-04	1,20E+06	1,33E-03
9	0,45	1,58E-04	1,35E+06	1,49E-03
10	0,5	1,76E-04	1,50E+06	1,66E-03
11	0,55	1,93E-04	1,65E+06	1,83E-03
12	0,6	2,11E-04	1,80E+06	1,99E-03
13	0,65	2,28E-04	1,95E+06	2,16E-03
14	0,7	2,46E-04	2,10E+06	2,32E-03
15	0,75	2,64E-04	2,26E+06	2,49E-03
16	0,8	2,81E-04	2,41E+06	2,66E-03
17	0,85	2,99E-04	2,56E+06	2,82E-03
18	0,9	3,16E-04	2,71E+06	2,99E-03
19	0,95	3,34E-04	2,86E+06	3,15E-03
20	1	3,51E-04	3,01E+06	3,32E-03
21	2	3,51E-04	3,01E+06	3,32E-03
		Fine Mesh		
1	0,05	1,77E-05	2,76E+05	3,15E-04
2	0,1	3,53E-05	5,52E+05	6,29E-04
3	0,15	5,30E-05	8,28E+05	9,44E-04

4	0,2	7,06E-05	1,10E+06	1,26E-03
5	0,25	8,83E-05	1,38E+06	1,57E-03
6	0,3	1,06E-04	1,66E+06	1,89E-03
7	0,35	1,24E-04	1,93E+06	2,20E-03
8	0,4	1,41E-04	2,21E+06	2,52E-03
9	0,45	1,59E-04	2,49E+06	2,83E-03
10	0,5	1,77E-04	2,76E+06	3,15E-03
11	0,55	1,94E-04	3,04E+06	3,46E-03
12	0,6	2,12E-04	3,31E+06	3,78E-03
13	0,65	2,30E-04	3,59E+06	4,09E-03
14	0,7	2,47E-04	3,87E+06	4,41E-03
15	0,75	2,65E-04	4,14E+06	4,72E-03
16	0,8	2,82E-04	4,42E+06	5,03E-03
17	0,85	3,00E-04	4,69E+06	5,35E-03
18	0,9	3,18E-04	4,97E+06	5,66E-03
19	0,95	3,35E-04	5,25E+06	5,98E-03
20	1	3,53E-04	5,52E+06	6,29E-03
21	2	3,53E-04	5,52E+06	6,29E-03

Geometri *Cirlce*				
No	***Time* (s)**	***Total Deformation Max* (m)**	***Stress Max* (Pa)**	***Elastic Strain Max* (m/m)**
		Coarse Mesh		
1	0,05	3,59E-05	1,02E+05	1,03E-04
2	0,1	7,17E-05	2,04E+05	2,06E-04
3	0,15	1,08E-04	3,06E+05	3,08E-04
4	0,2	1,43E-04	4,07E+05	4,11E-04

5	0,25	1,79E-04	5,09E+05	5,14E-04
6	0,3	2,15E-04	6,11E+05	6,17E-04
7	0,35	2,51E-04	7,13E+05	7,20E-04
8	0,4	2,87E-04	8,15E+05	8,22E-04
9	0,45	3,23E-04	9,17E+05	9,25E-04
10	0,5	3,59E-04	1,02E+06	1,03E-03
11	0,55	3,94E-04	1,12E+06	1,13E-03
12	0,6	4,30E-04	1,22E+06	1,23E-03
13	0,65	4,66E-04	1,32E+06	1,34E-03
14	0,7	5,02E-04	1,43E+06	1,44E-03
15	0,75	5,38E-04	1,53E+06	1,54E-03
16	0,8	5,74E-04	1,63E+06	1,64E-03
17	0,85	6,10E-04	1,73E+06	1,75E-03
18	0,9	6,45E-04	1,83E+06	1,85E-03
19	0,95	6,81E-04	1,94E+06	1,95E-03
20	1	7,17E-04	2,04E+06	2,06E-03
21	2	7,17E-04	2,04E+06	2,06E-03
Medium Mesh				
1	0,05	3,63E-05	1,07E+05	1,21E-04
2	0,1	7,26E-05	2,13E+05	2,42E-04
3	0,15	1,09E-04	3,20E+05	3,63E-04
4	0,2	1,45E-04	4,27E+05	4,84E-04
5	0,25	1,81E-04	5,33E+05	6,05E-04
6	0,3	2,18E-04	6,40E+05	7,26E-04
7	0,35	2,54E-04	7,47E+05	8,47E-04
8	0,4	2,90E-04	8,53E+05	9,68E-04
9	0,45	3,27E-04	9,60E+05	1,09E-03
10	0,5	3,63E-04	1,07E+06	1,21E-03

11	0,55	3,99E-04	1,17E+06	1,33E-03
12	0,6	4,35E-04	1,28E+06	1,45E-03
13	0,65	4,72E-04	1,39E+06	1,57E-03
14	0,7	5,08E-04	1,49E+06	1,69E-03
15	0,75	5,44E-04	1,60E+06	1,82E-03
16	0,8	5,80E-04	1,71E+06	1,94E-03
17	0,85	6,17E-04	1,81E+06	2,06E-03
18	0,9	6,53E-04	1,92E+06	2,18E-03
19	0,95	6,89E-04	2,03E+06	2,30E-03
20	1	7,26E-04	2,13E+06	2,42E-03
21	2	7,26E-04	2,13E+06	2,42E-03
Fine Mesh				
1	0,05	3,66E-05	2,90E+05	2,75E-04
2	0,1	7,33E-05	5,79E+05	5,51E-04
3	0,15	1,10E-04	8,69E+05	8,26E-04
4	0,2	1,47E-04	1,16E+06	1,10E-03
5	0,25	1,83E-04	1,45E+06	1,38E-03
6	0,3	2,20E-04	1,74E+06	1,65E-03
7	0,35	2,57E-04	2,03E+06	1,93E-03
8	0,4	2,93E-04	2,32E+06	2,20E-03
9	0,45	3,30E-04	2,61E+06	2,48E-03
10	0,5	3,66E-04	2,90E+06	2,75E-03
11	0,55	4,03E-04	3,19E+06	3,03E-03
12	0,6	4,40E-04	3,48E+06	3,31E-03
13	0,65	4,76E-04	3,77E+06	3,58E-03
14	0,7	5,13E-04	4,06E+06	3,86E-03
15	0,75	5,50E-04	4,35E+06	4,13E-03
16	0,8	5,86E-04	4,64E+06	4,41E-03
17	0,85	6,23E-04	4,93E+06	4,68E-03

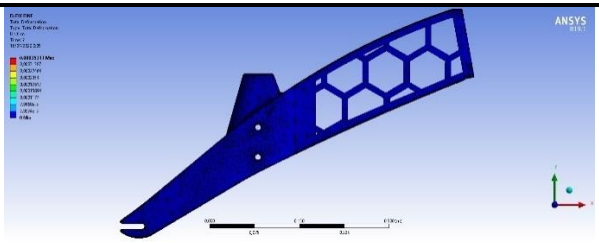
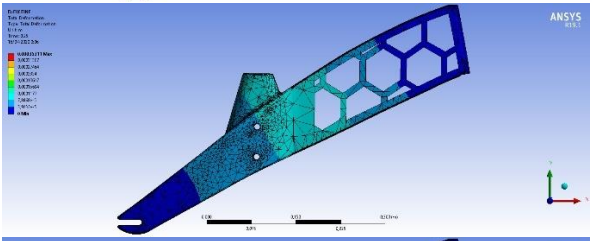
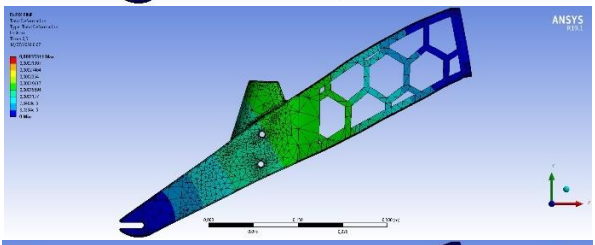
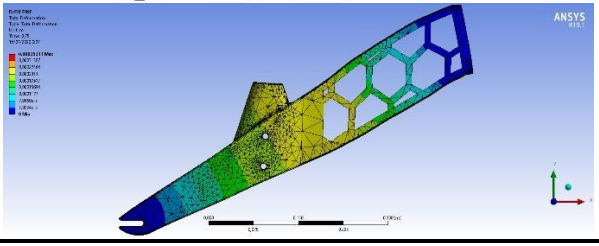
18	0,9	6,60E-04	5,21E+06	4,96E-03
19	0,95	6,96E-04	5,50E+06	5,23E-03
20	1	7,33E-04	5,79E+06	5,51E-03
21	2	7,33E-04	5,79E+06	5,51E-03

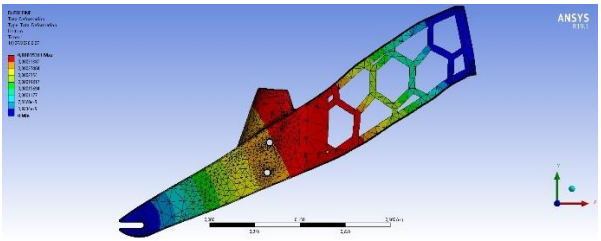
Geometri *Rhombus*				
No	***Time* (s)**	***Total Deformation Max* (m)**	***Stress Max* (Pa)**	***Elastic Strain Max* (m/m)**
		Coarse Mesh		
1	0,05	1,83E-05	1,20E+05	1,25E-04
2	0,1	3,66E-05	2,40E+05	2,50E-04
3	0,15	5,50E-05	3,60E+05	3,76E-04
4	0,2	7,33E-05	4,81E+05	5,01E-04
5	0,25	9,16E-05	6,01E+05	6,26E-04
6	0,3	1,10E-04	7,21E+05	7,51E-04
7	0,35	1,28E-04	8,41E+05	8,77E-04
8	0,4	1,47E-04	9,61E+05	1,00E-03
9	0,45	1,65E-04	1,08E+06	1,13E-03
10	0,5	1,83E-04	1,20E+06	1,25E-03
11	0,55	2,02E-04	1,32E+06	1,38E-03
12	0,6	2,20E-04	1,44E+06	1,50E-03
13	0,65	2,38E-04	1,56E+06	1,63E-03
14	0,7	2,56E-04	1,68E+06	1,75E-03
15	0,75	2,75E-04	1,80E+06	1,88E-03
16	0,8	2,93E-04	1,92E+06	2,00E-03
17	0,85	3,11E-04	2,04E+06	2,13E-03

18	0,9	3,30E-04	2,16E+06	2,25E-03
19	0,95	3,48E-04	2,28E+06	2,38E-03
20	1	3,66E-04	2,40E+06	2,50E-03
21	2	3,66E-04	2,40E+06	2,50E-03
Medium Mesh				
1	0,05	1,84E-05	9,15E+04	1,16E-04
2	0,1	3,69E-05	1,83E+05	2,33E-04
3	0,15	5,53E-05	2,75E+05	3,49E-04
4	0,2	7,38E-05	3,66E+05	4,66E-04
5	0,25	9,22E-05	4,58E+05	5,82E-04
6	0,3	1,11E-04	5,49E+05	6,98E-04
7	0,35	1,29E-04	6,41E+05	8,15E-04
8	0,4	1,48E-04	7,32E+05	9,31E-04
9	0,45	1,66E-04	8,24E+05	1,05E-03
10	0,5	1,84E-04	9,15E+05	1,16E-03
11	0,55	2,03E-04	1,01E+06	1,28E-03
12	0,6	2,21E-04	1,10E+06	1,40E-03
13	0,65	2,40E-04	1,19E+06	1,51E-03
14	0,7	2,58E-04	1,28E+06	1,63E-03
15	0,75	2,77E-04	1,37E+06	1,75E-03
16	0,8	2,95E-04	1,46E+06	1,86E-03
17	0,85	3,14E-04	1,56E+06	1,98E-03
18	0,9	3,32E-04	1,65E+06	2,10E-03
19	0,95	3,50E-04	1,74E+06	2,21E-03
20	1	3,69E-04	1,83E+06	2,33E-03
21	2	3,69E-04	1,83E+06	2,33E-03
Fine Mesh				
1	0,05	1,87E-05	3,44E+05	3,68E-04
2	0,1	3,73E-05	6,88E+05	7,36E-04

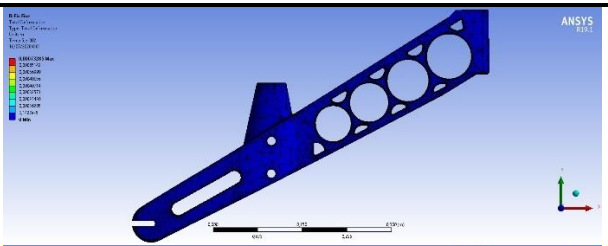
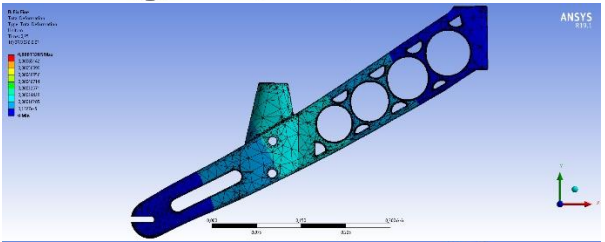
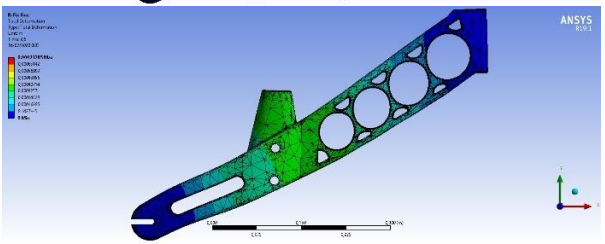
3	0,15	5,60E-05	1,03E+06	1,10E-03
4	0,2	7,46E-05	1,38E+06	1,47E-03
5	0,25	9,33E-05	1,72E+06	1,84E-03
6	0,3	1,12E-04	2,06E+06	2,21E-03
7	0,35	1,31E-04	2,41E+06	2,58E-03
8	0,4	1,49E-04	2,75E+06	2,94E-03
9	0,45	1,68E-04	3,09E+06	3,31E-03
10	0,5	1,87E-04	3,44E+06	3,68E-03
11	0,55	2,05E-04	3,78E+06	4,05E-03
12	0,6	2,24E-04	4,13E+06	4,42E-03
13	0,65	2,43E-04	4,47E+06	4,78E-03
14	0,7	2,61E-04	4,81E+06	5,15E-03
15	0,75	2,80E-04	5,16E+06	5,52E-03
16	0,8	2,98E-04	5,50E+06	5,89E-03
17	0,85	3,17E-04	5,85E+06	6,26E-03
18	0,9	3,36E-04	6,19E+06	6,62E-03
19	0,95	3,54E-04	6,53E+06	6,99E-03
20	1	3,73E-04	6,88E+06	7,36E-03
21	2	3,73E-04	6,88E+06	7,36E-03

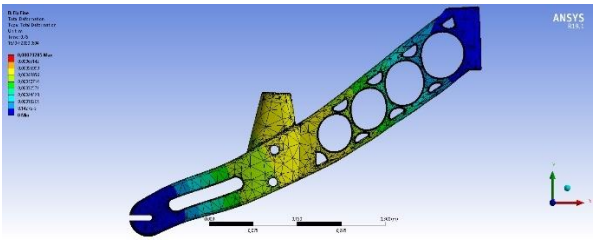
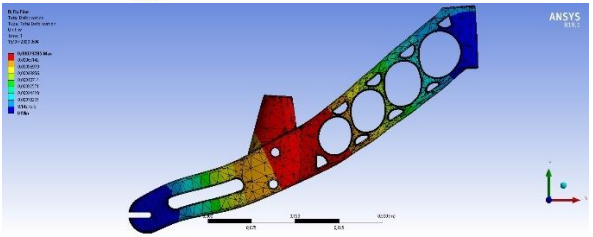
Lampiran 2. Data Deformasi Bentuk per *Time-Step*

Geometri *Honeycomb*	
Time-step	Visual Deformasi Bentuk
0	
0,25	
0,5	
0,75	

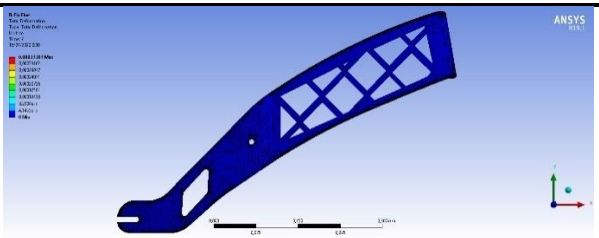
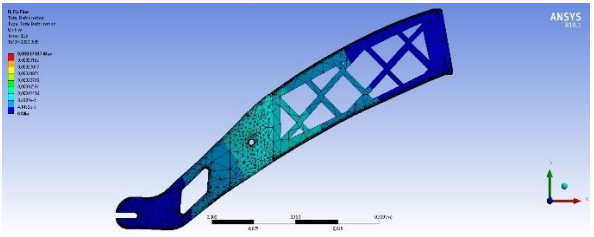
1	

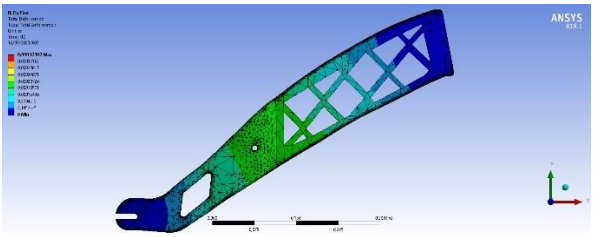
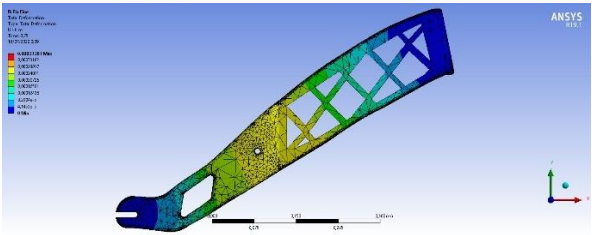
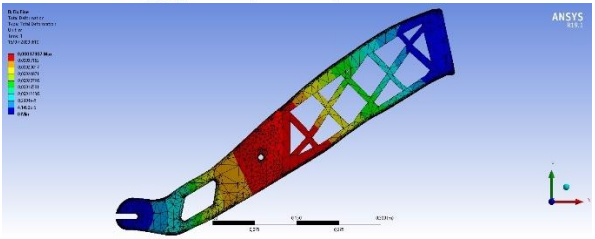
Geometri *Circle*

Time-step	Visual Deformasi Bentuk
0	
0,25	
0,5	

0,75	
1	

Geometri *Rhombus*

Time-step	Visual Deformasi Bentuk
0	
0,25	

0,5	
0,75	
1	

Lampiran 3. Data *Mass Properties* Geometri

- **Solidworks**

Mass properties of Honeycomb
Configuration: Default
Coordinate system: -- default --

Density = 1.12 grams per cubic centimeter

Mass = 1562.80 grams

Volume = 1395.36 cubic centimeters

Surface area = 2165.67 square centimeters

Center of mass: (centimeters)
X = -8.93
Y = 15.36
Z = 50.00

Principal axes of inertia and principal moments of inertia: (grams * square centimeters)
Taken at the center of mass.

Ix = (0.86, 0.51, 0.00)	Px = 27607.47
Iy = (-0.51, 0.86, 0.00)	Py = 352721.74
Iz = (0.00, 0.00, 1.00)	Pz = 363151.79

Moments of inertia: (grams * square centimeters)
Taken at the center of mass and aligned with the output coordinate system.

Lxx = 110898.54	Lxy = 141921.51	Lxz = -0.17
Lyx = 141921.51	Lyy = 269430.67	Lyz = -0.04
Lzx = -0.17	Lzy = -0.04	Lzz = 363151.79

Moments of inertia: (grams * square centimeters)
Taken at the output coordinate system.

Ixx = 4386402.95	Ixy = -72358.80	Ixz = -697718.28
Iyx = -72358.80	Iyy = 4301026.30	Iyz = 1199900.43
Izx = -697718.28	Izy = 1199900.43	Izz = 856259.98

Mass properties of Circle
Configuration: Default
Coordinate system: -- default --

Density = 1.12 grams per cubic centimeter

Mass = 1538.01 grams

Volume = 1373.22 cubic centimeters

Surface area = 2153.43 square centimeters

Center of mass: (centimeters)
X = -7.25
Y = 13.99
Z = 50.00

Principal axes of inertia and principal moments of inertia: (grams * square centimeters)
Taken at the center of mass.

Ix = (0.87, 0.50, 0.00)	Px = 25856.36
Iy = (-0.50, 0.87, 0.00)	Py = 434141.52
Iz = (0.00, 0.00, 1.00)	Pz = 441204.44

Moments of inertia: (grams * square centimeters)
Taken at the center of mass and aligned with the output coordinate system.

Lxx = 127866.90	Lxy = 176757.57	Lxz = 0.07
Lyx = 176757.57	Lyy = 332130.98	Lyz = 0.05
Lzx = 0.07	Lzy = 0.05	Lzz = 441204.44

Moments of inertia: (grams * square centimeters)
Taken at the output coordinate system.

Ixx = 4273958.69	Ixy = 20727.65	Ixz = -557593.53
Iyx = 20727.65	Iyy = 4258006.08	Iyz = 1075940.09
Izx = -557593.53	Izy = 1075940.09	Izz = 823142.57

Mass properties of Rhombus
Configuration: Default
Coordinate system: -- default --

Density = 1.12 grams per cubic centimeter

Mass = 1786.51 grams

Volume = 1595.10 cubic centimeters

Surface area = 2288.12 square centimeters

Center of mass: (centimeters)
X = -6.46
Y = 14.78
Z = 50.00

Principal axes of inertia and principal moments of inertia: (grams * square centimeters)
Taken at the center of mass.

Ix = (0.84, 0.54, 0.00)	Px = 30106.52
Iy = (-0.54, 0.84, 0.00)	Py = 506683.33
Iz = (0.00, 0.00, 1.00)	Pz = 513783.14

Moments of inertia: (grams * square centimeters)
Taken at the center of mass and aligned with the output coordinate system.

Lxx = 167939.95	Lxy = 216079.06	Lxz = 0.21
Lyx = 216079.06	Lyy = 368849.90	Lyz = -0.14
Lzx = 0.21	Lzy = -0.14	Lzz = 513783.14

Moments of inertia: (grams * square centimeters)
Taken at the output coordinate system.

Ixx = 5024362.24	Ixy = 45450.73	Ixz = -577315.16
Iyx = 45450.73	Iyy = 4909755.08	Iyz = 1320030.58
Izx = -577315.16	Izy = 1320030.58	Izz = 978548.84

- **ANSYS**

Honeycomb

Details of "Geometry"	
Definition	
Source	C:\Users\Abyan\Desktop\TA LUR\Sepeda ...
Type	Parasolid
Length Unit	Meters
Element Control	Program Controlled
Display Style	Body Color
Bounding Box	
Properties	
Volume	1,3953e-003 m³
Mass	1,5907 kg
Scale Factor Va...	1,
Statistics	
Update Options	
Basic Geometry Options	
Advanced Geometry Options	

Circle

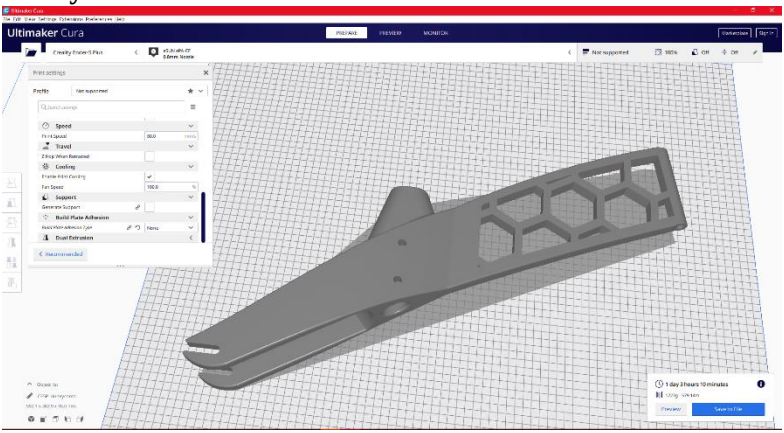
Details of "Geometry"	
Definition	
Source	C:\Users\Abyan\Desktop\...
Type	Parasolid
Length Unit	Meters
Element Control	Program Controlled
Display Style	Body Color
Bounding Box	
Properties	
Volume	1,3732e-003 m³
Mass	1,5655 kg
Scale Factor Value	1,
Statistics	
Update Options	
Basic Geometry Options	
Advanced Geometry Options	
CAD Attributes	

Rhombus

Details of "Geometry"	
Definition	
Source	C:\Users\Abyan\Desktop\TA LUR\Sepeda ...
Type	Parasolid
Length Unit	Meters
Element Control	Program Controlled
Display Style	Body Color
Bounding Box	
Properties	
Volume	1,5951e-003 m³
Mass	1,8184 kg
Scale Factor Va...	1,
Statistics	
Update Options	
Basic Geometry Options	
Advanced Geometry Options	

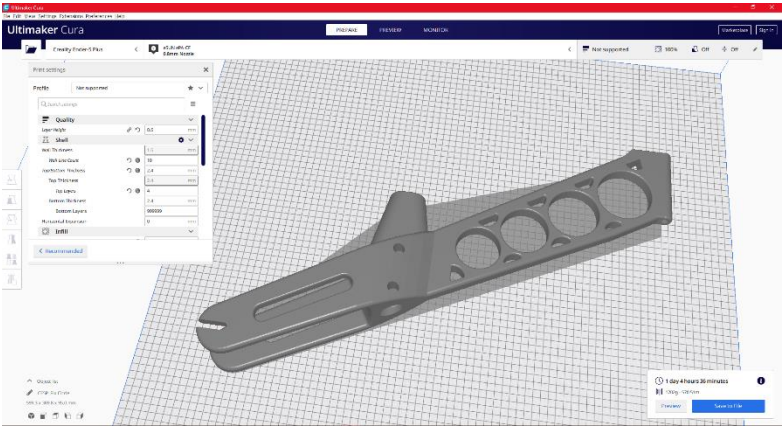
- **Cura**

Honeycomb



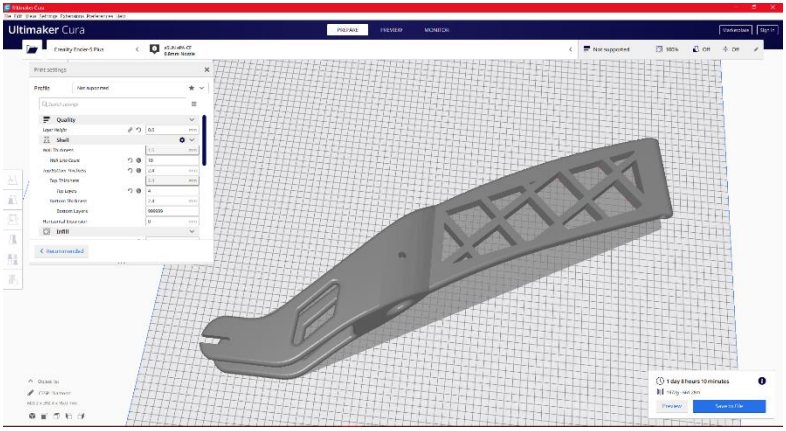
Mass : 1727 gram

Circle



Mass : 1702 gram

Rhombus



Mass : 1972 gram

Lampiran 4. Dokumentasi Proses Real Testing

Lampiran 5. Biaya Produksi Frame Balance Bike

Komponen	Volume	Unit	Harga per Satuan	Jumlah
Bahan				
Filamen Esun ePA-CF (Carbon Fiber-Nylon)	2	Kg	Rp 802.000	Rp 1.604.000
Alkohol 96%	1	Liter	Rp 50.000	Rp 50.000
Dempul Alfaglos	3	Kg	Rp 30.000	Rp 90.000
Cat Epoxy	1	Liter	Rp 30.000	Rp30.000
Resin	1	Liter	Rp 50.000	Rp 50.000
Fiberglass	1x1	Meter	Rp 35.000	Rp 35.000
Peralatan				
Micro Swiss MK8 Plated A2 Tool Steel Wear Resistant Nozzle	1	Pcs	Rp 450.000	Rp 450.000
Micro Swiss All Metal Hotend Kit	1	Pcs	Rp 1.450.000	Rp 1.450.000
Amplas Grade 80-400	5	Pcs	Rp 5.000	Rp 25.000
Biaya Langsung Non Personel				
Listrik	20	Kwh	Rp 1.500	Rp 30.000
Jasa Cat	1	Kali	Rp 300.000	Rp 300.000
TOTAL BIAYA				**Rp 4.114.000**

Lampiran 6. *Material Safety Data Sheet* Filamen ePA-CF

eSUN易生

Safety Data Sheet(SDS)

According to GHS

Product name: ePA-CF filament
Revision Date: 2018.3.1
Initial date: 2016.6.15

Prepared by GB/T 16483 and GB/T 17951
SDS Number: YS3D416001
Version: 3.1

Section 1 - Identification of the substance/preparation and of the company/undertaking

Product identifier

Product name: ePA-CF filament

Relevant identified uses of the substance or mixture and uses advised against

Details of the supplier of the safety data sheet

Manufacture/Supplier : Shenzhen Esun Industrial Co., Ltd.
Address: Wuhan University Building A403-I, No.6 Yuexing2Road,Nanshan District, Shenzhen, China
Tel: 135 3064 5059
Emergency number : 135 3064 5059
E-mail : cdm@brightcn.net
Fax : 2603 1982

Further information obtainable from: Shenzhen Esun Industrial Co.,Ltd

Section 2 - Hazards Identification

	Min		Max
Flammability	1		0=Minimum
Toxicity	0		1=Low
Body Contact	2		2=Moderate
Reactivit	1		3=High
Chronic	2		4=Extreme

GHS classification

Not Applicable

Label elements:

GHS label elements

Not Applicable

SIGNAL WORD:

Not Applicable

Product name: **ePA-CF filament** **SDS Number:YS3D416001**
Revision Date: **2018.3.1**

Section 3 –Composition/Information on Ingredients

Ingredient Name	CAS No.	EC No.	Content (%)
PA	32131-17-2	--	74
CF	7782-42-5	231-955-3	25
Additives	--	--	1

Section 4 - First Aid Measures

INGESTION

- Immediately give a glass of water.
- First aid is not generally required. If in doubt, contact a Poisons Information Centre or a doctor.

EYE

If this product comes in contact with eyes:

- Wash out immediately with water.
- If irritation continues, seek medical attention.
- Removal of contact lenses after an eye injury should only be undertaken by skilled personnel.

SKIN

If skin or hair contact occurs:

- Flush skin and hair with running water (and soap if available).
- Seek medical attention in event of irritation.

Inhalation

- If dust is inhaled, remove from contaminated area.
- Encourage patient to blow nose to ensure clear passage of breathing.
- If irritation or discomfort persists seek medical attention.

Indication of any immediate medical attention and special treatment needed

- Treat symptomatically.

Section 5 - Firefighting Measures

EXTINGUISHING MEDIA

- Do NOT direct a solid stream of water or foam into burning molten material; this may cause spattering and spread the fire.
- Foam.
- Dry chemical powder.
- BCF (where regulations permit).

FIRE FIGHTING

Product name: ePA-CF filament **SDS Number:YS3D416001**
Revision Date: 2018.3.1

- Alert Fire Brigade and tell them location and nature of hazard.
- Wear breathing apparatus plus protective gloves.
- Prevent, by any means available, spillage from entering drains or water courses.
- Use water delivered as a fine spray to control fire and cool adjacent area.

FIRE/EXPLOSION HAZARD

- Combustible solid which burns but propagates flame with difficulty.
- Organic powders when finely divided over a range of concentrations regardless of particulate size or shape and suspended in air or some other oxidizing medium may form explosive dust-air mixtures and result in a fire or dust explosion (including secondary explosions).

FIRE INCOMPATIBILITY

- Avoid contamination with oxidising agents i.e. nitrates, oxidising acids, chlorine bleaches, pool chlorine etc.as ignition may result

Section 6 –Accidental Release Measures

MINOR SPILLS

- Generally not applicable

MAJOR SPILLS

- Generally not applicable

Personal Protective Equipment advice is contained in Section 8 of the SDS.

Section 7 - Handling and Storage

PROCEDURE FOR HANDLING

- Limit all unnecessary personal contact.
- Wear protective clothing when risk of exposure occurs.
- Use in a well-ventilated area.
- Avoid contact with incompatible materials.
- Store in original containers.
- Keep containers securely sealed.
- Store in a cool, dry, well-ventilated area.
- Store away from incompatible materials and foodstuff containers.

SUITABLE CONTAINER

- Multi-ply paper bag with sealed plastic liner or heavy gauge plastic bag.
- NOTE: Bags should be stacked, blocked, interlocked, and limited in height so that they are stable and secure against sliding or collapse. Check that all containers are clearly labelled and free from leaks.

Product name: ePA-CF filament **SDS Number:YS3D416001**
Revision Date: 2018.3.1

Packing as recommended by manufacturer.

STORAGE INCOMPATIBILITY

- Avoid reaction with oxidising agents

Section 8 - Exposure Controls, Personal Protection

EXPOSURE CONTROLS

Appropriate engineering controls

For molten materials:

Provide mechanical ventilation; in general such ventilation should be provided at compounding/ converting areas and at fabricating/ filling work stations where the material is heated. Local exhaust ventilation should be used over and in he vicinity of machinery involved in handling the molten material.

Keep dry!!

Processing temperatures may be well above boiling point of water, so wet or damp material may cause a serious steam explosion if used in unvented equipment.

Engineering controls are used to remove a hazard or place a barrier between the worker and the hazard.

Personal protection

Eye and face protection

- Safety glasses with side shields.
- Chemical goggles.
- Contact lenses may pose a special hazard; soft contact lenses may absorb and concentrate irritants. A written policy document, describing the wearing of lenses or restrictions on use, should be created for each workplace or task.

Skin protection

See Hand protection below

Hands/feet protection

The selection of suitable gloves does not only depend on the material, but also on further marks of quality which vary from manufacturer to manufacturer. Where the chemical is a preparation of several substances, the resistance of the glove material can not be calculated in advance and has therefore to be checked prior to the application.

The exact break through time for substances has to be obtained from the manufacturer of the protective gloves and.has to be observed when making a final choice.

Product name: ePA-CF filament **SDS Number:YS3D416001**
Revision Date: 2018.3.1

Suitability and durability of glove type is dependent on usage.

Body protection

See Other protection below

Other protection

- Overalls.
- P.V.C. apron.
- Barrier cream.

Section 9 - Physical and Chemical Properties

Information on basic physical and chemical properties

Odour	**Odorlessness**
Form	Solid
Melting Range (°C)	No data
Boiling Range (°C)	No data
Flash Point (°C)	No data
Decomposition Temp (°C)	No data
Autoignition Temp (°C)	No data
Upper Explosive Limit (%)	No data
Lower Explosive Limit (%)	No data
Volatile Component (%vol)	No data
Solubility in water (g/L)	Insoluble in water
p H (1% solution)	No data
p H (as supplied)	No data
Print Temp (°C)	230-260
Bed Temp(°C)	80-90
Density(g/cm^3)	1.24
Heat Distortion Temp（℃,0.45MPa）	120
Melt Flow Index（g/10min）	**6**（250℃/5kg）
Tensile Strength（MPa）	**85**
Elongation at Break（%）	26
Flexural Strength（MPa）	98
Flexural Modulus（MPa）	2300
IZOD Impact Strength（kJ/m^2）	15.5

Product name: ePA-CF filament **SDS Number:YS3D416001**
Revision Date: 2018.3.1

Section 10 - Stability and Reactivity

Reactivity

See section 7

Chemical stability

- Unstable in the presence of incompatible materials.
- Product is considered stable.
- Hazardous polymerisation will not occur.

Section 11 - Toxicological Information

Information on toxicological affects

Acute Toxicity

LD/LC50 values relevant for classification

No data.

Primary irritant effect

On the skin

No data.

On the eyes

No data.

Inhaled

No data.

Sensitization: No data.

Section 12 - Ecological Information

Ingredient	Persistence:Water/Soil	Persistence: Air	Bioaccumulation	Mobility
PA	LOW	LOW	LOW	LOW
CF	LOW	LOW	LOW	LOW
Additives	LOW	LOW	LOW	LOW

Section 13 - Disposal Considerations

Legislation addressing waste disposal requirements may differ by country, state and/ or territory. Each user must refer to laws operating in their area. In some areas, certain wastes must be tracked.

A Hierarchy of Controls seems to be common - the user should investigate:

- Reduction
- Reuse
- Recycling

Product name: **ePA-CF filament** **SDS Number:YS3D416001**
Revision Date: **2018.3.1**

- Disposal (if all else fails)

This material may be recycled if unused, or if it has not been contaminated so as to make it unsuitable for its intended use.

Section 14 - Transport Information

Labels Required

Marine Pollutant: NO

NOT REGULATED FOR TRANSPORT OF DANGEROUS GOODS: ADR, IATA, IMDG,ADN

Section 15 - Regulatory Information

REGULATIONS

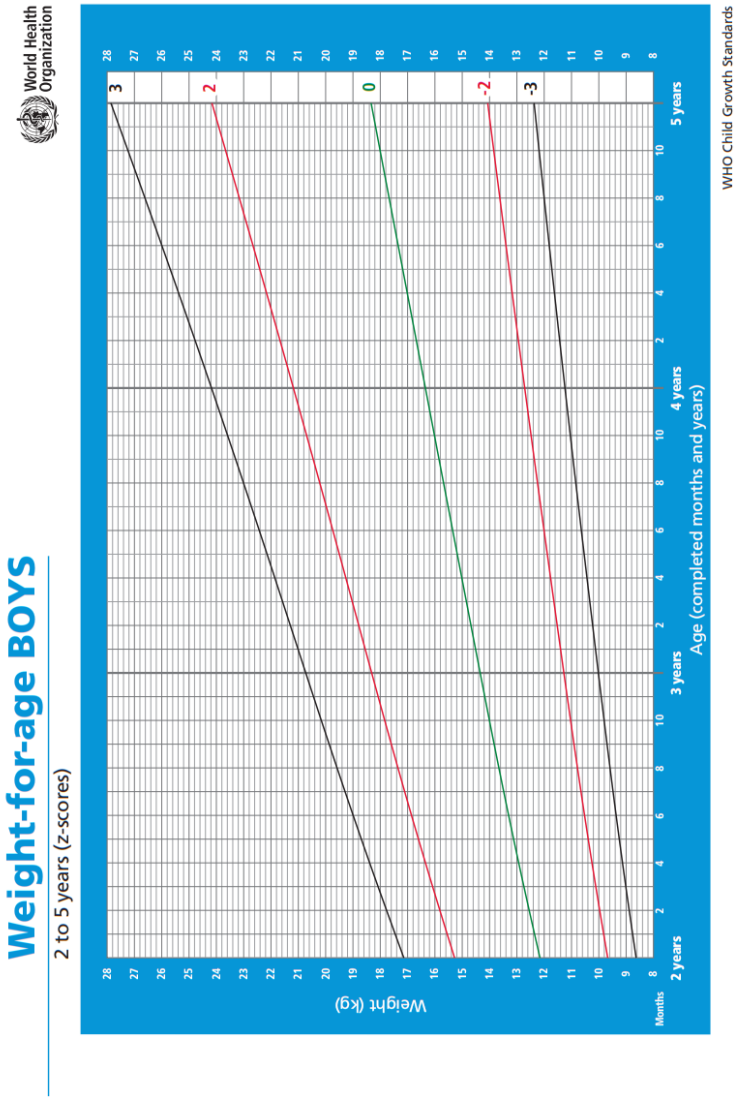
The product needs to follow local regulations.

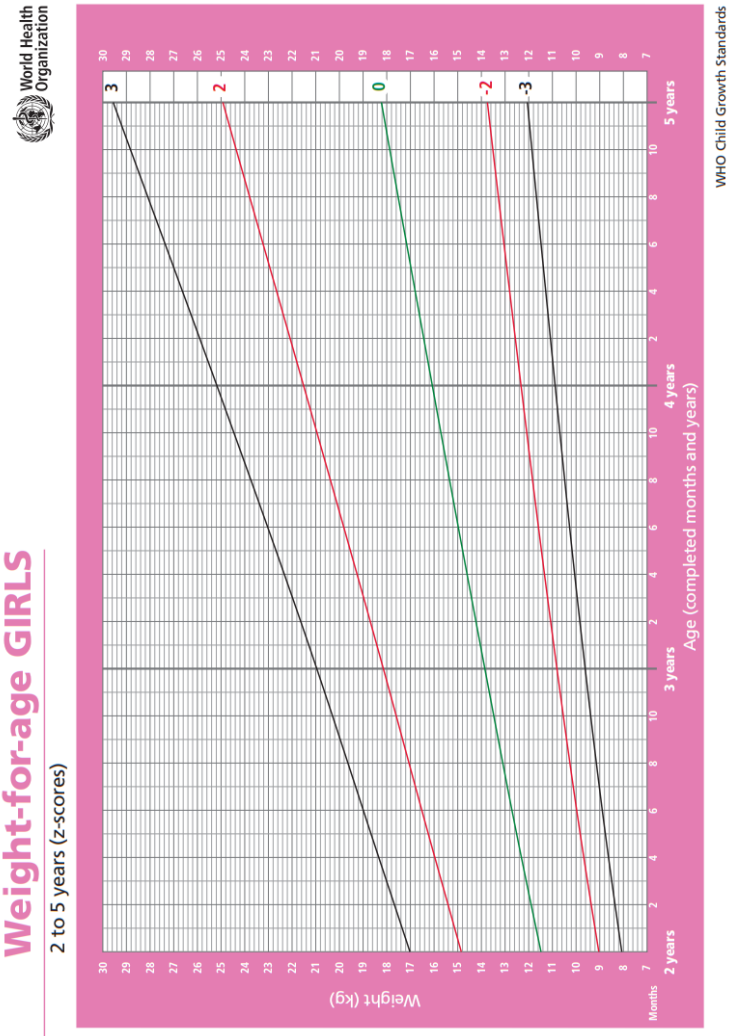
Section 16 - Other Information

This information is based on our present knowledge. However, this shall not constitute a guarantee for any specific product features and shall not establish a legally valid contractual relationship.

***End ***

Lampiran 7. Standar Berat Badan Anak Usia 1-5 Tahun




World Health Organization
Weight-for-age GIRLS
2 to 5 years (z-scores)
Weight (kg)
Months
2 years
3 years
4 years
5 years
Age (completed months and years)
3
2
0
-2
-3
WHO Child Growth Standards

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam penyusunan skripsi ini tidak terlepas dukungan dari berbagai pihak. Peneliti secara khusus mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu dalam proses penelitian dan penyusunan laporan Tugas Akhir ini. Peneliti banyak menerima bimbingan, petunjuk dan bantuan serta dorongan dari berbagai pihak baik yang bersifat moral maupun material. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT yang selalu menjadi sumber perlindungan dan kekuatan bagi penyusun dalam melaksanakan penelitian Tugas Akhir.
2. Orang tua, adik serta sepupu yang selalu membantu dan mendukung serta memberikan doa selama penelitian Tugas Akhir dan penyusunan laporan.
3. Bapak Mas Irfan Purbawanto Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D selaku dosen pembimbing 1 Tugas Akhir yang telah membimbing, membantu, dan memberikan banyak ilmu, serta kesabaran yang luar biasa kepada penulis, serta juga membantu memfasilitasi media untuk Tim Antasena ITS berkembang.
4. Bapak Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D., selaku dosen pembimbing 2 Tugas Akhir sekaligus Kepala Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS yang telah membimbing, membantu, serta memberikan banyak ilmu pengetahuan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini maupun ilmu pengetahuan lain yang sangat berguna bagi penulis.
5. Bapak Dr. Eng. Hosta Ardhyananta ST., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Departemen Teknik Material FTIRS-ITS.
6. Bapak Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T., selaku dosen wali yang telah membimbing serta memberikan arahan kepada penulis dalam segala kegiatan perkuliahan.

7. Bapak Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T., Bapak Fakhreza Abdul, S.T., M.T., Bapak Dr. Agung Purniawan, M,Eng., dan Bu Dr. Widyastuti S.Si., M.Si., selaku dosen pembimbing yang telah membimbing, membantu, memfasilitasi, dan memberikan banyak masukan serta ilmu pengetahuan kepada penulis maupun Tim Antasena ITS.
8. Bu Amaliya Rasyida, S.T., M.Sc, selaku dosen yang membantu penulis dalam mendapatkan konsep dan ide dalam penelitian ini.
9. Pak Anto, Mas Ridha, Pak Moko, dan seluruh karyawan Departemen Teknik Material FTIRS-ITS yang telah memberikan banyak ilmu kepada penulis.
10. Keluarga Besar MT 18, Tim Antasena ITS, HMMT FTIRS-ITS dan ISOMETRIC 2018 yang secara langsung memberikan ilmu yang sangat bermanfaat kepada penulis baik *softskill* maupun *hardskill*.
11. Agustien Bayu Ristanti, S. Ked., yang telah mendukung dan memotivasi penulis dalam penelitian ini.
12. Segenap dosen dan seluruh staf akademik yang selalu membantu dalam memberikan fasilitas, ilmu, serta pendidikan pada peneliti hingga dapat menunjang dalam penyelesaian skripsi ini.
13. Semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung memberikan dukungan dan membantu kelancaran proses pengerjaan Tugas Akhir ini.

BIODATA PENULIS

Ghalib Abyan lahir pada tanggal 29 Oktober 1998 di Jakarta. Ia merupakan anak pertama dari tiga bersaudara, putra kandung dari Bapak Murtanto dan Ibu Siti Rahayu. Penulis telah menempuh pendidikan formal dimulai dari TK Al-Muhajirin (2002-2004), SD Barunawati IV (2004-2010), SMPN 173 Jakarta (2010-2013) dan SMAN 13 Jakarta (2013-2016). Penulis melanjutkan studinya di Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2016.

Selama menjalankan pendidikan strata satu, penulis aktif dalam berbagai macam organisasi dan kepanitiaan. Pada kepengurusan 2017/2018, Penulis berkecimpung dalam organisasi internal departemen yakni HMMT FTI-ITS sebagai Staff Departemen Hubungan Luar dan Ash-Haabul Kahfi sebagai Staff Kaderisasi. Kemudian pada tahun 2018, Penulis berperan aktif dalam kepanitiaan ISOMETRIC 2018 sebagai *Project Officer* dan berpartisipasi dalam kegiatan internasional yakni Kumamoto University Summer Program di Jepang.

Dalam pengembangan ilmu riset inovasi dan teknologi, penulis berperan sebagai *General Manager* tim Antasena ITS pada kepengurusan 2018/2019. Penulis pernah mengikuti kompetisi baik ditingkat nasional maupun internasional seperti IYIA 2018, KMHE 2018, Shell Eco-Marathon Asia 2019 dan Shell Eco-Marathon Eropa 2019. Penulis juga bergabung sebagai *Training Consultant* dalam Indonesian Invention and Innovation Promotion Association (INNOPA) chapter Surabaya. Penulis juga aktif dalam penyediaan *face shield* untuk tenaga medis dalam menangani virus COVID-19.