

**ANALISIS KEKUATAN STRUKTUR RAKITAN MAINAN EDUKASI 3D
PRINTING MENGGUNAKAN FILAMENT BERBAHAN *POLYLACTIC
ACID (PLA) DAN ACRYLONITRILE BUTADINE STYRENE (ABS)***

(Skripsi)

Oleh:

Giova Gariska Barqu

1955021005



**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2024**

ABSTRAK

ANALISIS KEKUATAN STRUKTUR RAKITAN MAINAN EDUKASI 3D PRINTING MENGGUNAKAN FILAMENT BERBAHAN *POLYLACTIC ACID (PLA)* DAN *ACRYLONITRILE BUTADINE STYRENE (ABS)*

Oleh

GIOVA GARISKA BARQU

Pemanfaatan 3D *Printer* pada dunia industri cukup luas, salah satunya pada proses *prototyping* karena dapat menekan biaya produksi dan pengembangan. Kualitas hasil produk 3D printer dipengaruhi oleh beberapa faktor, terutama material penyusun komponen 3D *Printing* atau filamen. Penggunaan filamen beragam tergantung dengan komponen yang akan dibuat dan karakteristik komponen yang diinginkan. Penelitian ini membahas tentang rancangan mainan jembatan dengan *truss* dan tanpa *truss* dengan variasi material *Polyactic Acid (PLA)* dan *Acrylonitrile Butadine Styrene (ABS)*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui rancangan terbaik dan material terbaik yang optimal pada proses produksi mainan jembatan. Telah banyak dilakukan penelitian tentang komponen 3D *Printing*, namun sedikit pembahasan tentang kekuatan rancangan mainan jembatan 3D *printing*. Proses analisis dilakukan dengan metode elemen hingga (*finite element method*) menggunakan *software* ANSYS. Berdasarkan hasil analisis menggunakan *software* ANSYS didapat bahwa struktur jembatan dengan *truss* lebih baik karena terdapat komponen tambahan untuk meminimalisir deformasi pada saat beban diaplikasikan. Pada uji material, PLA memiliki keunggulan dibanding ABS karena memiliki modulus elastisitas dan modulus geser yang lebih baik.

Kata Kunci : 3D *Print*, *truss*, ABS, PLA, metode elemen hingga.

ABSTRACT

STRUCTURAL STRENGTH ANALYSIS OF 3D PRINTING EDUCATIONAL TOY ASSEMBLIES USING FILAMENT MADE OF POLYLACTIC ACID (PLA) AND ACRYLONITRILE BUTADIENE STYRENE (ABS)

By

GIOVA GARISKA BARQU

The use of 3D Printers in the industrial world is quite wide, one of which is in the prototyping process because it can reduce production and development costs. The quality of 3D printer products is affected by several factors, especially the materials that make up the 3D Printing components or filaments. The use of filaments varies depending on the component to be made and the characteristics of the desired component. This study discusses the design of bridge toys with and without truss with variations of Polyactic Acid (PLA) and Acrylonitrile Butadine Styrene (ABS) materials. This research aims to find out the best design and the best optimal material in the production process of bridge toys. There has been a lot of research on the components of 3D Printing, but there is little discussion about the strength of 3D printing bridge toy designs. The analysis process is carried out using the finite element method using ANSYS software. Based on the results of the analysis using ANSYS software, it was found that the bridge structure with truss is better because there are additional components to minimise deformation when the load is applied In material tests, PLA has advantages over ABS because it has a better modulus of elasticity and shear modulus.

Keyword : 3D Print, truss, ABS, PLA, finite element method.

Judul Skripsi : **ANALISIS KEKUATAN STRUKTUR RAKITAN MAINAN EDUKASI 3D PRINTING MENGGUNAKAN FILAMENT BERBAHAN POLYLACTID ACID (PLA) DAN ACRYLONITRILE BUTADINE STYRENE (ABS)**

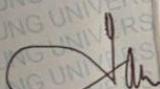
Nama Mahasiswa : **Giova Gariska Barqu**

Nomor Pokok Mahasiswa : **1955021005**

Program Studi : **S1 Teknik Mesin**

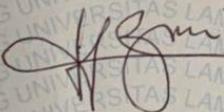
Fakultas : **Teknik**

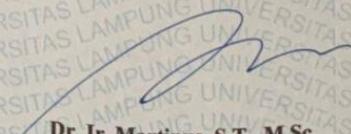
MENYETUJUI
Komisi Pembimbing


Dr. Ir. Yanuar Burhanuddin, M.T.
NIP. 196405062000031001


Dr. Eug. Shirley Savetlana, S.T., M. Met.
NIP. 197005012000031001

MENGETAHUI

Ketua Jurusan Teknik Mesin,

Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 197108171998021003

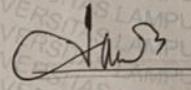
Ketua Program Studi S1. Teknik Mesin,

Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc.
NIP. 197908212003121003

CS Scanned iv

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

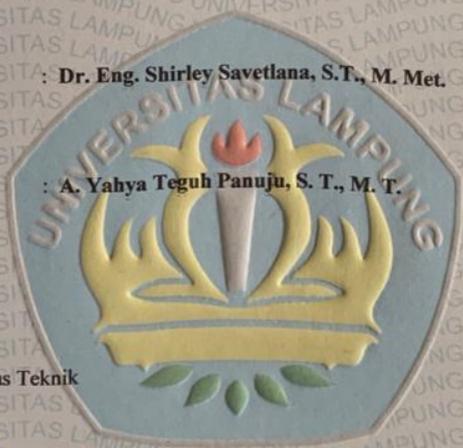
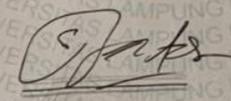
Ketua : **Dr. Ir. Yanuar Burhanuddin, M.T.**



Anggota Penguji : **Dr. Eng. Shirley Savetlana, S.T., M. Met.**



Penguji Utama : **A. Yahya Teguh Panuju, S. T., M. T.**



2. Dekan Fakultas Teknik

Dr. Eng. H. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.
NIP. 19750928 200112 1 002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi: **08 Agustus 2024**

LEMBAR PERNYATAAN

TUGAS AKHIR INI DIBUAT SENDIRI OLEH PENULIS DAN BUKAN HASIL
PLAGIAT SEBAGAIMANA DIATUR DALAM PASAL 36 PERATURAN
AKADEMIK UNIVERSITAS LAMPUNG DENGAN PERATURAN REKTOR
No. 13 TAHUN 2019

Bandar Lampung, 21 Agustus 2024

Pembuat Pernyataan



Giova Gariska Barqu

NPM 1955021005

HALAMAN PERSEMBAHAN

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Puji dan syukur penulis ucapkan kepada Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas segala Rahmat dan Karuna-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan lancar. Shalawat serta Salam semoga selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW.

KARYA TULIS INI KUPERSEMBAHKANKAN KEPADA

Ayahanda dan Ibunda Tercinta

Yang senantiasa memberikan semangat dan melantunkan do'a yang selalu menyertaiku. Terima kasih yang sebesar-besarnya kuucapkan karena telah mendidik dan membersarkanku dengan penuh kasih sayang, dukungan, dan perngorbanan yang sampai kapanpun tidak akan bisa terbalaskan.

Seluruh Keluarga Besar Teknik Mesin 2019

Serta

Almamater Tercinta, Universitas Lampung dan Jurusan Teknik Mesin

SANWACANA

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarokatuh.

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas berkah dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan lancar dan dalam keadaan sehat. Shalawat serta salam semoga tetap tercurah limpahkan kepada junjungan besar kita, Nabi Muhammad Shallallahu 'Alaihi Wassalam, beserta keluarga dan sahabat. Semoga kita sebagai umatnya, selalu mendapatkan syafaat beliau di akhirat kelak. Skripsi ini dibuat sebagai tanda selesai pelaksanaan skripsi. Karya tulis ini diharapkan dapat menjadi ilmu yang bermanfaat dan juga dapat dikembangkan khususnya dalam bidang perancangan dan produksi. Skripsi ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung. Dalam penyusunan skripsi ini tentunya penulis mendapatkan pengalaman dan pembelajaran dari beberapa pihak. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dan perkuliahan ini dengan baik.
2. Orang tua penulis, Ayahanda Ir. Julian Kudus, M.H., dan Ibunda Mardiana yang selalu mendampingi, mendidik, mendoakan, mendukung, dan juga memberi restu pada penulis agar tetap semangat dalam menjalankan serta menyelesaikan studi Teknik Mesin di Universitas Lampung.
3. Saudara penulis, Alfudiafarrah, S.E., M.M., dan Nasya Insyro, S.E. yang selalu memberikan doa, motivasi, dan masukan selama penulis menjalan perkuliahan.

4. Seluruh keluarga besar penulis yang telah memberikan doa, dukungan, dan motivasi sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan baik
5. Bapak Hadi Prayitno, S.T., M.T. selaku Pembimbing akademik yang telah membimbing dan membina saya selama perkuliahan.
6. Bapak Dr. Ir. Yanuar Burhanuddin, M.T. selaku Pembimbing I yang telah membina saya selama perkuliahan dan juga membimbing skripsi ini.
7. Ibu Dr. Eng. Shirley Savetlana, S.T., M. Met. selaku Dosen Pembimbing II yang telah membimbing selama perkuliahan dan mengerjakan skripsi ini.
8. Bapak Achmad Yahya TP, S.T., M.T. selaku Dosen Pembahas yang telah membimbing selama perkuliahan dan mengerjakan skripsi ini.
9. Seluruh Dosen di Teknik Mesin Universitas Lampung yang telah menjadi guru dan mengajarkan dasar pengetahuan yang dibutuhkan kepada penulis.
10. Seluruh staff dan karyawan di Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
11. Keluarga pertama penulis di Teknik Mesin, Yafizham, Michael, Raihan, Panji, Yuda, dan Rio. Terimakasih telah menjadi keluarga pertama yang telah memberikan kebahagiaan, dukungan, dan pengalaman yang tidak akan pernah saya lupakan selama perkuliahan hingga kedepannya.
12. Nabila Puspitasari Santoso S.H., yang telah mendengarkan keluh kesah, memberikan semangat, motivasi, serta arahan kepada penulis.
13. Tegar Ramadhan dan Radifan Nezra selaku kerabat yang telah memberi dukungan kepada penulis dalam proses pembuatan skripsi.
14. Kedua sahabat, Bagas Satriawan S.H. dan Daffa Lambelli. Terima kasih telah berbagi kebahagiaan dengan penulis
15. Budro dan Hasbi yang telah banyak berkontribusi dalam pembuatan skripsi.

16. Teman-teman Teknik Mesin Angkatan 2019 yang telah bersama-sama berjuang meraih mimpi, memberikan motivasi, dan memberikan semangat selama perkuliahan.
17. Seluruh kakak dan adik tingkat Teknik Mesin yang telah bertukar dan berbagi ilmu selama perkuliahan.
18. Serta semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung telah membantu menyelesaikan Skripsi ini.
19. *Last but not least, I wanna thank me. I wanna thank me for believing in me. I wanna thank me for all doing this hard work. I wanna thank me for having no days off. I wanna thank me for never quitting. I wanna thank me for just being me at all times.*

Penulis menyadari bahwa penulisan laporan ini masih jauh dari kata sempurna, sehingga kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi kemajuan ilmu pengetahuan di masa mendatang. Akhir kata penulis sangat berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat khususnya bagi penulis dan bagi pembaca.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Giova Gariska Barqu, lahir pada tanggal 10 Mei 2001 di Kota Bandar Lampung, Provinsi Lampung. Penulis merupakan anak ke tiga dari Bapak Ir. Julian Kudus, M.H. dan Ibu Mardiana. Penulis menempuh pendidikan dasar di SDN 2 Rawa Laut hingga tahun 2013, Sekolah Menengah Pertama di SMPN 1 Bandar Lampung hingga tahun 2016, dan Sekolah Menengah Akhir di SMAN 10 Kota Bandar Lampung hingga tahun 2019. Pada tahun 2019, penulis melanjutkan studi S1 Teknik Mesin di Universitas Lampung melalui jalur SMMPTN. Selama melaksanakan studi, penulis aktif dalam Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai Ketua Bidang Hubungan dan Masyarakat (HUMAS) 2021-2022. Tahun 2021 penulis berkesempatan untuk melaksanakan Kerja Praktek (KP) sekaligus Magang Belajar Kampus Merdeka (MBKM) di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) pada bagian Pusat Riset Teknologi Industri dan Proses Manufaktur (PRTIPM) Serpong, Kota Tangerang Selatan, Provinsi Banten dengan judul laporan **“ANALISIS PERBANDINGAN DIAMETER DAN PANJANG BORING BAR TERHADAP DEFLEKSI MENGGUNAKAN SOLIDWORKS”**. Pada tahun 2024 penulis menyelesaikan program studi S1 Teknik Mesin dengan judul skripsi **“ANALISIS KEKUATAN STRUKTUR RAKITAN MAINAN EDUKASI 3D PRINTING MENGGUNAKAN FILAMENT BERBAHAN POLYLACTIC ACID (PLA) DAN ACRYLONITRILE BUTADINE**

STYRENE (ABS)” dengan bimbingan Dr. Ir. Yanuar Burhanuddin, M.T.

DAFTAR ISI

ABSTRAK	ii
ABSTRACT	iii
LEMBAR PENGESAHAN	v
SANWACANA	viii
RIWAYAT HIDUP	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xviii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Sistematika Penulisan.....	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 <i>3D Printer</i>	6
2.2 Jenis-jenis <i>3D Printer</i>	8
2.2.1 <i>Printer 3D Direct</i>	8
2.2.2 <i>Printer 3D Binder</i>	8
2.2.3 <i>Printer 3D Photopolymerization</i>	9
2.2.4 <i>Printer 3D Sintering</i>	10
2.3 Aplikasi Produk <i>3D Printer</i>	11
2.3.1 Kesehatan.....	11
2.3.2 Otomotif.....	13
2.3.3 Seni.....	13
2.3.4 <i>Aerospace</i>	14
2.3.5 Konstruksi.....	15
2.3.6 <i>Fashion</i>	16

2.3.7 Pendidikan.....	17
2.4 Filament.....	18
2.4.1 <i>Polylactic Acid (PLA)</i>	18
2.4.2 <i>Acrylonitrile Butadine Styrene (ABS)</i>	22
2.4.3 <i>Nylon</i>	24
2.4.4 <i>Polyethylene (PET)</i>	26
2.4.5 <i>Polycarbonate</i>	27
2.4.6 <i>Thermoplastic Elastomer (TPE)</i>	29
2.5 Mainan.....	30
2.5.1 <i>Mainan Building Blocks</i>	30
2.5.2 <i>Mainan Edukasi STEM</i>	31
III. METODOLOGI PENELITIAN.....	33
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	33
3.1.1 Tempat.....	33
3.1.2 Waktu.....	33
3.2 Alat dan Bahan.....	34
3.2.1 <i>Laptop Acer Nitro 5 AN515-44</i>	34
3.2.2 <i>Software Autodesk Inventor</i>	35
3.2.3 <i>Software Ansys</i>	35
3.3 Alur Penelitian.....	36
3.4 Prosedur Penelitian.....	37
3.4.1 Perencanaan.....	37
3.4.2 Perakitan menggunakan <i>software Autodesk Inventor</i>	37
3.4.3 Tahap simulasi menggunakan <i>software ANSYS</i>	37
3.5 Metode Penelitian.....	39
3.6 Parameter Pengujian.....	42
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	43
4.1 Proses Simulasi.....	43
4.1.1 <i>Pre-Processing</i>	43
4.1.2 <i>Solutions</i>	48
4.2 Data Hasil Simulasi.....	51
4.3 Pembahasan.....	52

V. PENUTUP.....	64
5.1 Kesimpulan.....	64
5.2 Saran.....	65
DAFTAR PUSTAKA.....	66
LAMPIRAN.....	71

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.	Printer 3D <i>Direct</i>	8
Gambar 2.	Printer 3D <i>Binder</i>	9
Gambar 3.	Printer 3D <i>Photopolymerization</i>	10
Gambar 4.	Printer 3D <i>Sintering</i>	11
Gambar 5.	<i>Prototype</i> organ jantung.....	12
Gambar 6.	<i>Prototype</i> roda gigi.....	13
Gambar 7.	Karya seni 3D printer.....	14
Gambar 8.	Miniatur pesawat.....	15
Gambar 9.	Miniatur rumah.....	16
Gambar 10.	3D printer dalam bidang <i>fashion</i>	17
Gambar 11.	Filament PLA (<i>Polylactic Acid</i>)	21
Gambar 12.	Filament ABS (<i>Acrylonitrile Butadine Styrene</i>)	23
Gambar 13.	Filament <i>nylon carbon fibre</i>	25
Gambar 14.	Filament PET.....	26
Gambar 15.	Filament <i>Polycarbonate</i>	28
Gambar 16.	Filament <i>Thermoplastic Elastomer</i> (TPE).....	29
Gambar 17.	Laptop Acer Nitro 5 AN515-44.....	34
Gambar 18.	<i>Flowchart</i> penelitian.....	36
Gambar 19.	Komponen <i>beam</i>	39
Gambar 20.	Komponen H lock.....	40
Gambar 21.	Komponen X lock.....	40
Gambar 22.	Rakitan jembatan tanpa truss.....	41
Gambar 23.	Rakitan jembatan menggunakan truss.....	42
Gambar 24.	<i>Assembly</i> jembatan tanpa truss.....	44
Gambar 25.	<i>Assembly</i> jembatan menggunakan truss.....	44
Gambar 26.	Proses <i>meshing</i> jembatan tanpa truss.....	46
Gambar 27.	Proses <i>meshing</i> jembatan menggunakan truss.....	46
Gambar 28.	<i>Fixed Support</i> pada jembatan tanpa truss.....	47
Gambar 29.	<i>Fixed Support</i> pada jembatan menggunakan truss.....	47
Gambar 30.	<i>Insert force</i> pada jembatan tanpa truss.....	48
Gambar 31.	<i>Insert force</i> pada jembatan menggunakan truss.....	48
Gambar 32.	<i>Total deformation</i> jembatan tanpa truss.....	49
Gambar 33.	<i>Total deformation</i> jembatan menggunakan truss.....	49
Gambar 34.	<i>Equivalent strain</i> jembatan tanpa truss.....	50
Gambar 35.	<i>Equivalent strain</i> jembatan menggunakan truss.....	50
Gambar 36.	<i>Equivalent stress</i> jembatan tanpa truss.....	50
Gambar 37.	<i>Equivalent stress</i> jembatan menggunakan truss.....	51
Gambar 38.	Grafik <i>total deformation</i>	52
Gambar 39.	Grafik <i>equivalent strain</i>	53
Gambar 40.	Grafik <i>equivalent stress</i>	54
Gambar 41.	Posisi beban distribusi pada jembatan tanpa truss.....	57

Gambar 42. Posisi beban distribusi pada jembatan menggunakan truss.....	57
Gambar 43. <i>Total deformation</i> beban distribusi jembatan tanpa truss.....	58
Gambar 44. <i>Total deformation</i> beban distribusi jembatan menggunakan truss..	58
Gambar 45. <i>Equivalent strain</i> beban distribusi jembatan tanpa truss.....	59
Gambar 46. <i>Equivalent strain</i> beban distribusi jembatan menggunakan truss..	59
Gambar 47. <i>Equivalent stress</i> beban distribusi jembatan tanpa truss.....	60
Gambar 48. <i>Equivalent stress</i> beban distribusi jembatan menggunakan truss..	60
Gambar 49. Grafik perbandingan <i>total deformation</i>	62
Gambar 50. Grafik perbandingan <i>equivalent strain</i>	62
Gambar 51. Perbandingan <i>equivalent stress</i>	63

DAFTAR TABEL

Tabel	1. Spesifikasi filament PLA merek esun.....	21
Tabel	2. Spesifikasi filament ABS merek esun.....	24
Tabel	3. Spesifikasi filament <i>nylon carbon fibre</i> merek esun.....	25
Tabel	4. Spesifikasi filament PET merek esun.....	27
Tabel	5. Spesifikasi filament <i>polycarbonate</i> merek esun.....	28
Tabel	6. Spesifikasi filament TPE merek esun.....	30
Tabel	7. Waktu Penelitian.....	33
Tabel	8. Spesifikasi Laptop Acer Nitro 5 AN515-44.....	34
Tabel	9. Spesifikasi minimum untuk <i>softAutodesk Inventor</i>	35
Tabel	10. Spesifikasi minimum untuk <i>software ANSY</i>	35
Tabel	11. <i>Properties</i> PLA dan ABS.....	45
Tabel	12. Data hasil pengujian ANSYS.....	51
Tabel	13. Data sifat mekanik ABS <i>injection molding</i> dan 3D printing.....	56
Tabel	14. Data hasil simulasi ANSYS dengan beban distribusi.....	61

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Printer 3D, atau juga dikenal sebagai pencetak tiga dimensi, adalah sebuah teknologi di dalam dunia manufaktur yang memiliki keunggulan unik di dalamnya. Mesin 3D Printer memiliki keunggulan khusus yang memungkinkan benda yang akan dicetak untuk memiliki kesamaan dengan gambar atau bentuk dalam format *digital*. Proses pencetakan dengan menggunakan 3D printer melibatkan metode produksi, material, dan peralatan yang telah dikembangkan secara khusus, sehingga sangat mempermudah proses manufaktur. Teknologi Manufaktur Tambahan (*Additive-Manufacturing*) ini telah diadopsi secara luas dalam berbagai sektor industri, seperti konstruksi, kesehatan, *prototyping*, dan biomekanik. Hal ini menunjukkan bahwa teknologi ini memiliki beragam aplikasi yang luas dan signifikan dalam memajukan berbagai bidang industri tersebut. (Ngo et al, 2018).

Teknologi 3D Printer dapat diklasifikasikan atau dibedakan menjadi berbagai jenis berdasarkan bahan yang digunakan dalam pencetakan serta mekanisme yang digunakan dalam proses pencetakan. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Hasdiansyah dan Herianto (2018), salah satu jenis teknologi 3D Printer yang paling umum digunakan adalah FDM (*Fused Deposition Modeling*) karena alasan biaya operasional yang lebih terjangkau. *Fused Deposition Modeling* merupakan metode pencetakan 3D Printer yang melibatkan pelelehan bahan berupa termoplastik menggunakan mekanisme ekstruder, dengan proses penambahan lapisan demi lapisan. (Noorani, 2006).

Gebisa et al, (2019) menjelaskan bahwa kinerja 3D printer dapat dipengaruhi oleh berbagai parameter, termasuk waktu pembuatan, kualitas permukaan,

akurasi dimensi, dan karakteristik mekanis dari bagian yang dihasilkan. Tidak hanya itu, selama proses pencetakan, pembentukan lapisan (*layer*) juga dipengaruhi oleh beberapa faktor tambahan, seperti kecepatan gerakan printer (*print speed*), tinggi layer yang disebut sebagai *layer height* yang mengatur ketinggian dan ketebalan setiap lapisan, dan juga faktor suhu pencetakan (*printing temperature*). (Ivandiaz, 2020).

Penggunaan 3D printer memungkinkan proses pembuatan prototipe produk secara cepat dengan menggunakan data *computer aided design* (CAD) tiga dimensi. Menurut Lubis dkk (2016), metode *rapid prototyping* dapat memungkinkan visualisasi suatu gambar 3D menjadi benda 3 dimensi asli yang memiliki volume. Salah satu contoh penggunaan 3D printer yaitu untuk pembuatan prototipe mainan edukasi. Mainan edukatif adalah semua bentuk mainan yang dirancang untuk memberikan pengalaman pendidikan atau pengalaman belajar kepada penggunanya, termasuk permainan tradisional dan modern yang diberi muatan pendidikan dan pengajaran yang dapat meningkatkan aspek aspek kreatifitas dan perkembangan anak. (Saputra, 2019).

Menurut Koswara dan Prihadianto (2020), mainan anak harus memiliki kekuatan yang cukup kuat agar tidak mudah rusak dan mampu menopang beban. Pada penelitian ini dilakukan analisis kekuatan rakitan mainan edukasi dalam menopang beban menggunakan *software* Ansys dan juga menganalisis pengaruh material filament yang akan digunakan dalam produksi mainan edukasi menggunakan mesin 3D printer. Hal ini dilakukan agar dapat mengetahui beban maksimal yang diperbolehkan struktur rakitan mainan edukasi tersebut.

Material PLA dan ABS digunakan dalam penelitian ini karena mudah dibentuk dan juga tidak memerlukan temperatur yang tinggi. PLA dan ABS juga terbilang relatif murah dan cukup kuat untuk digunakan untuk proyek hobi ataupun edukasi. Material ini cocok untuk mencetak desain yang rumit dan banyak digunakan di sekolah, universitas dan industri. Menurut Drpic (2023), biokompabilitas, degradibilitas, dan non toksisitas produk adalah

karakteristik yang menjadikan PLA sebagai material unggul untuk berbagai keperluan.

Pembuatan mainan dengan metode konvensional dilakukan dengan metode *injection molding*. Proses manufaktur ini yaitu dengan melelehkan biji plastik dengan panas lalu menginjeksikannya ke dalam suatu cetakan lalu didinginkan sehingga plastik cair berubah ke bentuk padat dan menyesuaikan bentuk dengan cetakan. Teknologi ini memungkinkan diperolehnya produk dan bentuk dengan ukuran yang dirancang khusus. Cetakan yang telah dikembangkan memungkinkan produksi komponen plastik secara berulang-ulang. (Czepiel et al, (2023).

Pada pembuatan mainan menggunakan *injection molding*, kekuatan produk yang dihasilkan sangat bergantung dengan parameter yang digunakan. Material yang digunakan, temperatur pelelehan, tekanan, dan *holding time* dapat mempengaruhi kekuatan produk yang dihasilkan. Pada penelitian yang dilakukan Lay et al, (2019), menggunakan material PLA menunjukkan *tensile strength* sebesar 60 MPa.

Perbandingan penggunaan metode *injection molding* dan *3D printing* yaitu *injection molding* adalah proses manufaktur massal yang menggunakan cetakan untuk menekan bahan mentah menjadi bentuk yang diinginkan. Sedangkan *3D printing* adalah proses manufaktur aditif yang membangun objek dengan menumpuk lapisan-lapisan bahan secara bertahap. Perbedaan lainnya adalah pada mode produksi, metode *injection molding* membutuhkan cetakan injeksi, sedangkan *3D printing* membutuhkan model 3D yang dibuat dengan perangkat lunak komputer.

Simulasi mainan edukasi adalah cara yang sangat penting dalam proses pengembangan, karena dapat membantu memastikan keamanan, efisiensi, efektivitas pendidikan, keberlanjutan, dan kepatuhan terhadap regulasi. Dengan menggunakan simulasi pembuatan produk dapat mengurangi biaya, mengurangi resiko, sekaligus memastikan bahwa mainan edukasi yang dihasilkan dapat bermanfaat dan aman. Pada penelitian ini akan membahas tentang penggunaan simulasi FEM (*Finite Element Method*) untuk

mengetahui perilaku mainan struktur STEM (*Science Technology Engineering Mathematics*) ketika mendapatkan pembebanan eksternal.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang timbul adalah bagaimana kekuatan struktur rangkaian mainan edukasi berbahan PLA dan ABS yang diproduksi menggunakan alat 3D printer ketika mendapatkan beban eksternal.

1.3 Tujuan Penelitian

1. Membandingkan kekuatan struktur rakitan mainan edukasi berbentuk jembatan tanpa truss dan jembatan yang menggunakan truss.
2. Menganalisis pengaruh material PLA dan ABS terhadap kekuatan struktur rakitan mainan edukasi dengan cara simulasi.

1.4 Batasan Masalah

Pada penelitian Analisis kekuatan struktur rakitan mainan edukasi 3D printing menggunakan filament berbahan PLA dan ABS diberikan batasan-batasan sebagai berikut :

1. Pengujian ini hanya dilakukan dengan cara simulasi menggunakan *software* Ansys.
2. Produk yang akan dianalisis merupakan produk dengan *infill* 100% saja.
3. Material yang digunakan adalah PLA dan ABS.

1.5 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika dalam penulisan skripsi ini adalah sebagai berikut:

I. PENDAHULUAN

Merupakan pendahuluan yang terdiri dari latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, Batasan masalah dan sistematika penulisan sebagai pokok bahasan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Merupakan tinjauan pustaka yang berkaitan dengan teori-teori secara singkat pendukung penelitian dan juga parameter yang berhubungan dengan penelitian.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Merupakan metodologi penelitian yang terdiri dari waktu dan tempat penelitian, tahapan atau alur penelitian, serta metode-metode yang digunakan dalam melakukan penelitian.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Merupakan hasil dan pembahasan yang berisikan tentang data-data yang diperoleh setelah dilakukan pengujian serta pembahasan dari tiap data-data tersebut.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Merupakan penutup yang berisi kesimpulan yang didapat hasil penelitian dan saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 3D Printer

Charles Hull memperkenalkan teori *Stereolithography* pada tahun 1984, yang menjelaskan metode untuk mencetak objek dalam bentuk tiga dimensi dari data *digital*. Selama akhir tahun 1980-an, teori *Stereolithography* mendapatkan popularitas yang signifikan. Teknologi 3D Printer, yang juga dikenal sebagai manufaktur aditif, memanfaatkan mesin yang mampu mencetak objek tiga dimensi dengan cara menumpuk lapisan bahan secara berurutan. Proses *3D printing*, atau yang juga disebut *Additive Manufacturing (AM)*, melibatkan penggunaan kendali komputer untuk membentuk objek tiga dimensi dengan merakit lapisan-lapisan material secara berturut-turut. Hasil cetakan 3D ini bisa sangat mirip dengan bentuk atau geometri yang diinginkan, karena dibuat berdasarkan data model digital, seperti *Additive Manufacturing File (AMF)* atau model 3D dalam bentuk file elektronik.

Pencetakan 3D adalah salah satu dari berbagai proses di mana materi digabungkan atau dipadatkan dalam kontrol komputer untuk menciptakan objek tiga dimensi secara berlapis. Seperti yang dinyatakan oleh Jacobs and Paul Francis (1992), teknik ini juga dikenal sebagai *prototyping* cepat atau manufaktur aditif, dan telah mengalami perkembangan yang sangat signifikan dalam dunia manufaktur dalam dua dekade terakhir. Berbeda dengan metode tradisional di mana bahan diambil dari stok dalam proses pemesinan,

manufaktur berlapis membangun objek berbentuk padat dari model CAD dengan cara menambahkan lapisan bahan satu per satu secara berturut-turut. Orientasi dalam pembangunan memegang peran kunci dalam proses manufaktur berlapis karena dapat berdampak pada kualitas objek dalam hal akurasi dan kualitas permukaan, mengurangi kebutuhan untuk struktur penyangga, mendukung bidang kontak, dan waktu produksi. Selain itu, orientasi ini juga memengaruhi sifat kekuatan objek dan biaya keseluruhan produksi.

Manufaktur aditif disebut juga dengan sejumlah istilah lain seperti pencetakan 3D, manufaktur berlapis, atau fabrikasi bentuk bebas. Ini adalah proses yang menggabungkan bahan untuk menciptakan objek berdasarkan data model tiga dimensi (3D), seringkali dengan metode lapis demi lapis, yang berbeda dari metode manufaktur subtraktif seperti permesinan. Ada berbagai teknologi manufaktur aditif yang berbeda, seperti stereolitografi, laser *sintering*, pencetakan multi-jet, dan lain-lain. Standar terminologi manufaktur aditif dari ASTM mengelompokkan teknologi ini ke dalam tujuh kategori proses yang berbeda, termasuk aliran binder, deposisi energi terarah, ekstrusi material, aliran material, fusi bubuk, laminasi lembaran, dan fotopolimerisasi tong. Parameter pemrosesan adalah variabel masukan ke mesin yang mengatur prosesnya, contohnya, daya laser dalam laser *sintering*.

Mesin 3D Printer adalah suatu alat cetak yang efektif digunakan pada era revolusi industri 4.0. sebenarnya, alat ini sudah dikembangkan sedari lama. Mulanya penciptaan mesin 3D Printer (3D Printing) tepatnya pada tahun 1980 yang ditemukan oleh Dr.Kodama, seorang ilmuwan yang berkebangsaan Jepang. Alat yang diciptakan pertama kali yaitu alat yang dapat mencetak sebuah produk yang berbentuk tumpukan lapisan-lapisan yang dihasilkan dari gambar dalam bentuk *file digital* (Shears, 2016).

STereoLithography (STL) merupakan *file* yang dapat dibaca oleh printer 3D yang umum digunakan. Dalam membuat suatu objek memerlukan gambar model 3D *digital* yang dipindai melalui satu set model 3D, atau dibuat menggunakan sebuah program 3D desain misalnya melalui program

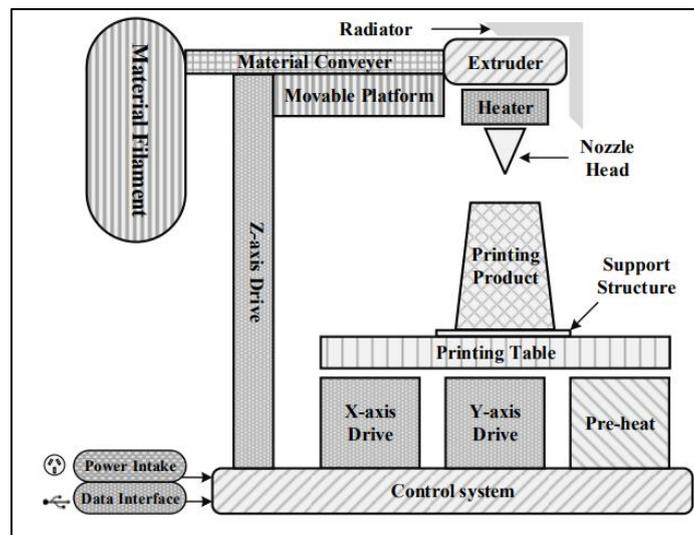
AutoCAD, program 3dMax, program SketchUp, Inventor dan lain-lain. Dan dapat juga diunduh dari internet.

2.2 Jenis-jenis 3D Printer

Adapun jenis-jenis 3D printer antara lain:

2.2.1 Printer 3D *Direct*

Stereolithography (STL) merupakan *file* yang dapat dibaca oleh printer 3D yang umum digunakan. Dalam membuat suatu objek memerlukan gambar model 3D digital yang dipindai melalui satu set model 3D, atau dibuat menggunakan sebuah program 3D desain misalnya melalui program AutoCAD, program 3dMax, program SketchUp, Inventor dan dapat juga diunduh dari internet. Pada gambar 1 merupakan skema printer 3D *Direct*.

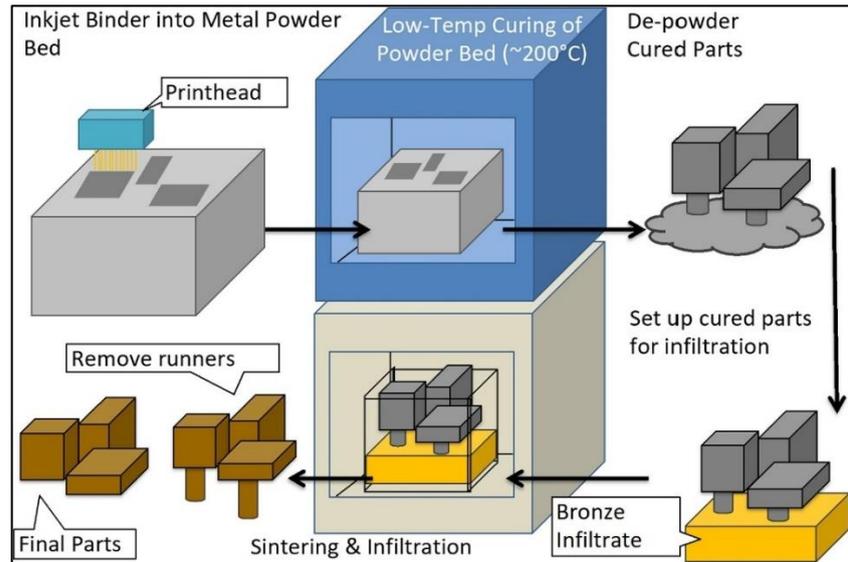


Gambar 1. Printer 3D *Direct* (Peng,2016).

2.2.2 Printer 3D *Binder*

Printer 3D *binder* sering digunakan dalam membentuk lapisan, akan tetapi printer 3D ini mempunyai perbedaan dengan jenis *direct*. Jenis

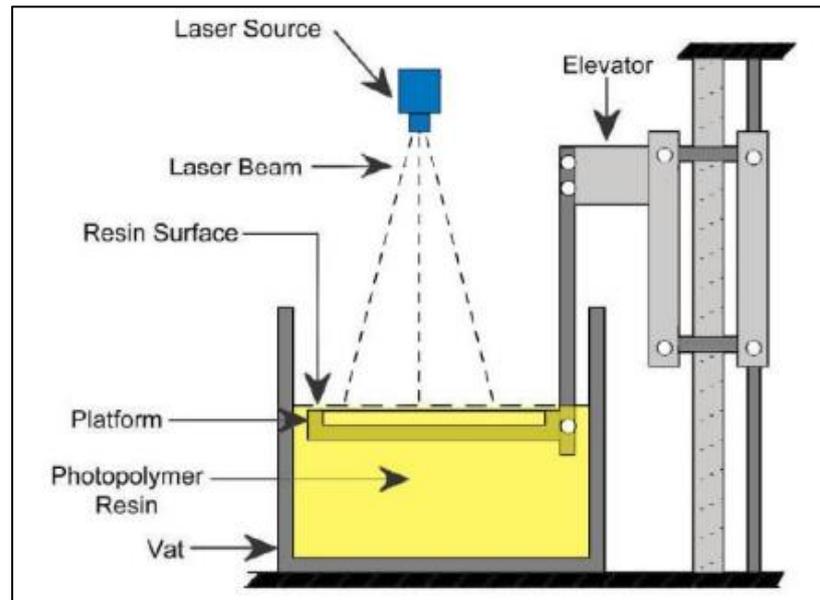
binder yang digunakan untuk melakukan pencetakan menggunakan dua bahan yang terpisah yaitu bubuk kering dan lem cair. Dimana cara kerjanya yaitu yang pertama bubuk kering dituangkan kemudian ditambahkan dengan lem cair agar mampu mengikat. Begitu seterusnya hingga seluruh proses selesai (Nugroho dan Ardiansyah, 2018). Pada gambar 2 merupakan skema printer 3D *Binder*.



Gambar 2. Printer 3D *Binder* (Mostafei et al, 2021).

2.2.3 Printer 3D *Photopolymerization*

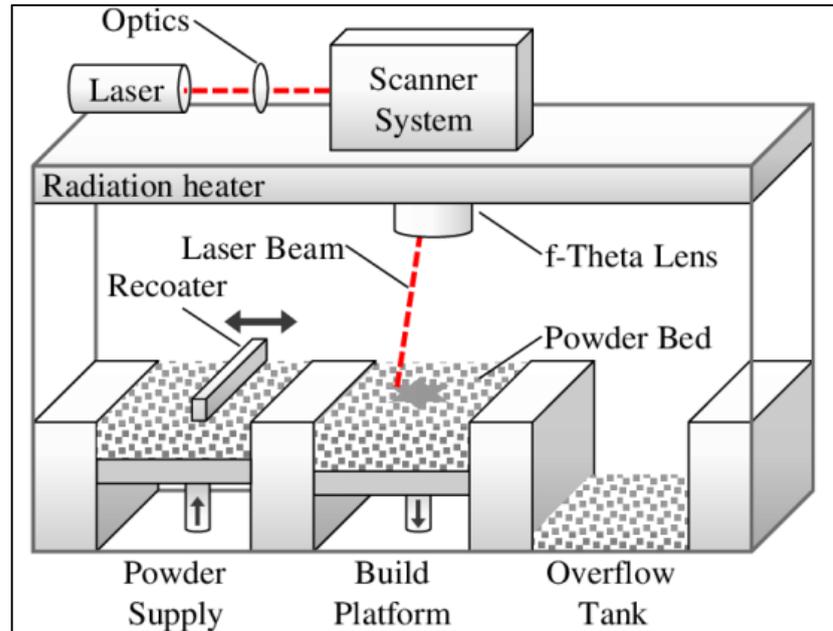
3D Printer *Photopolymerization* berasal dari kata *Photo* yang memiliki arti cahaya dan *polimer* yang mempunyai arti senyawa kimioplastik. Maka dapat dikatakan sebagai jenis printer 3D yang mempunyai cara kerja yaitu dengan meneteskan cairan plastik kemudian diberikan penyinaran laser berupa ultraviolet, dan saat proses penyinaran mampu merubah cairan menjadi padat (Nugroho dan Adriansyah, 2018). Pada gambar 3 merupakan skema printer 3D *Photopolymerization*.



Gambar 3. Printer 3D *Photopolymerization* (Kumaresan et al, 2021).

2.2.4 Printer 3D *Sintering*

Printer 3D ini merupakan jenis printer yang melibatkan partikel padat yang kemudian diberikan penyinaran. Proses tersebut dinamakan *Selective Laser Sintering* (SLS) yaitu proses printer 3D untuk mencairkan bubuk plastik dengan menggunakan laser, kemudian bubuk tersebut akan mencair dan kembali padat membentuk lapisan cetak. *Sintering* mampu bekerja mencetak benda-benda yang berasal dari logam. Penggunaan proses sintering menghasilkan keuntungan berupa tingkat presisi yang tinggi (Nugroho dan Adriansyah, 2018). Pada gambar 4 merupakan gambar skema printer 3D *sintering*.



Gambar 4. Printer 3D *Sintering* (Kumaresan et al, 2021).

2.3 Aplikasi Produk 3D Printer

Aplikasi produk mesin 3D Printer banyak merambah diberbagai bidang, diantaranya kesehatan, otomotif, seni, *aerospace*, konstruksi, *fashion*, dan pendidikan. Berikut adalah penjelasan lebih detail:

2.3.1 Kesehatan

Dalam dunia kesehatan, para dokter juga bisa menggunakan teknologi 3D printer. Penerapan mesin 3D Printer dalam dunia kesehatan digunakan dalam pencetakan replika organ tubuh manusia serta alat perencanaan pra-operasi. Pembuatan replika tubuh manusia dalam bidang kesehatan dimanfaatkan untuk proses pemahaman, baik pada saat pendidikan atau digunakan untuk menjelaskan mengenai kondisi organ kepada pasien. Mesin 3D printer dapat dengan sangat rinci atau detail dan dapat mencetak produk sampai di titik terkecil sehingga sangat bermanfaat

untuk dunia kesehatan. Pembuatan produk ini diharapkan mampu memberi pemahaman yang jelas kepada orang lain mengenai produk yang dibuat. Proses penjelasan di dunia kesehatan harus disertai produk nyata agar mudah dipahami.

Selain itu rekayasa jaringan telah menjadi bidang penelitian yang menjanjikan, menawarkan harapan untuk melandasi kesenjangan antara kekurangan organ dan kebutuhan transplantasi. (Ozbolat, 2013). Teknologi 3D printer dalam bidang kesehatan juga sering disebut dengan istilah bioprinting. Tren di masa yang akan datang, bioprinting ini mengarah pada proses pencetakan suatu sel maupun proses pencetakan dengan bio material lainnya.

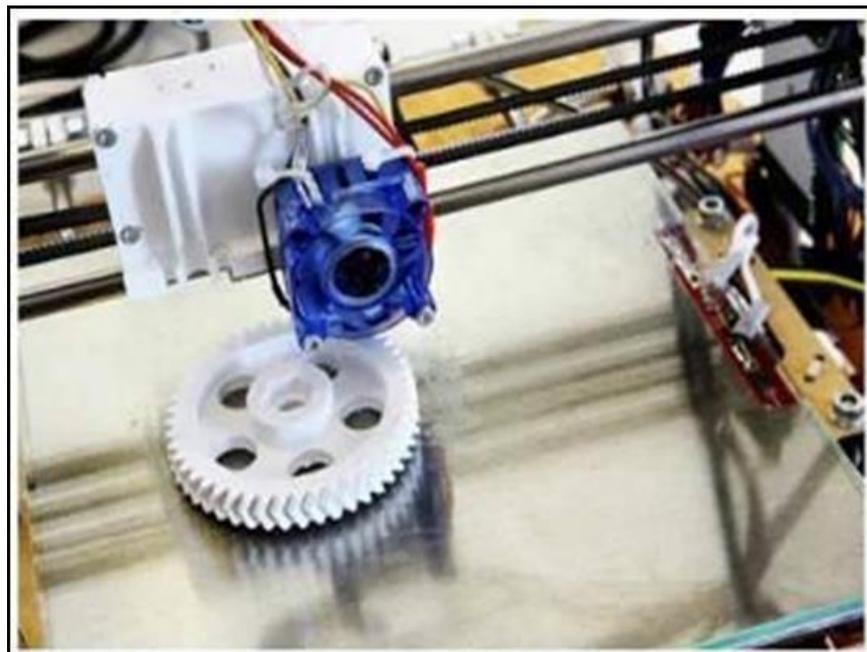
Teknologi bioprinting dalam bidang kesehatan merupakan tantangan tersendiri yang harus terus dikembangkan. Jadi, teknologi bioprinting ini sangat menjanjikan pada proses pembuatan organ tubuh manusia secara nyata. Walaupun demikian, teknologi ini masih dalam tahap awal dan masih akan terus dikembangkan. Pada gambar 5 merupakan contoh penggunaan 3D printer pada bidang kesehatan.



Gambar 5. *Prototype* organ jantung (Mukosera et al, 2014).

2.3.2 Otomotif

Perkembangan teknologi otomotif yang semakin pesat menuntut adanya perkembangan teknologi dalam pembuatannya. Teknologi mesin serta teknologi desain juga harus mengikutinya. Perkembangan desain diharuskan sampai dengan pencetakan prototype. Pada tahap ini seringkali desainer menemui kesulitan dalam pencetakan produk. Tetapi, pada saat ini menggunakan mesin 3D Printer mampu mengatasi semua masalah tersebut. Kelebihan Dari mesin 3d ini yaitu kecepatan dalam pencetakan prototype, keakurasian, dan biaya saat pencetakan sangat berbeda dengan metode manual. Penggunaan 3D printer akan sangat membantu dalam proses *prototyping*. Pada gambar 6 merupakan contoh penggunaan 3D printer dalam otomotif.



Gambar 6. *Prototype* roda gigi (Giffi et al, 2014).

2.3.3 Seni

Karya seni saat ini juga sudah bisa dibuat menggunakan cetak 3D. Dengan bantuan mesin 3D, manusia dapat membuat sebuah karya seni yang indah. Contoh dari karya seni yang dapat dihasilkan yaitu hiasan dinding. Pada gambar 7 merupakan salah satu contoh aplikasi karya seni

yang dicetak dengan mesin cetak 3D.



Gambar 7. Karya seni 3D printer (Fatchurrohman dkk, 2023)

2.3.4 *Aerospace*

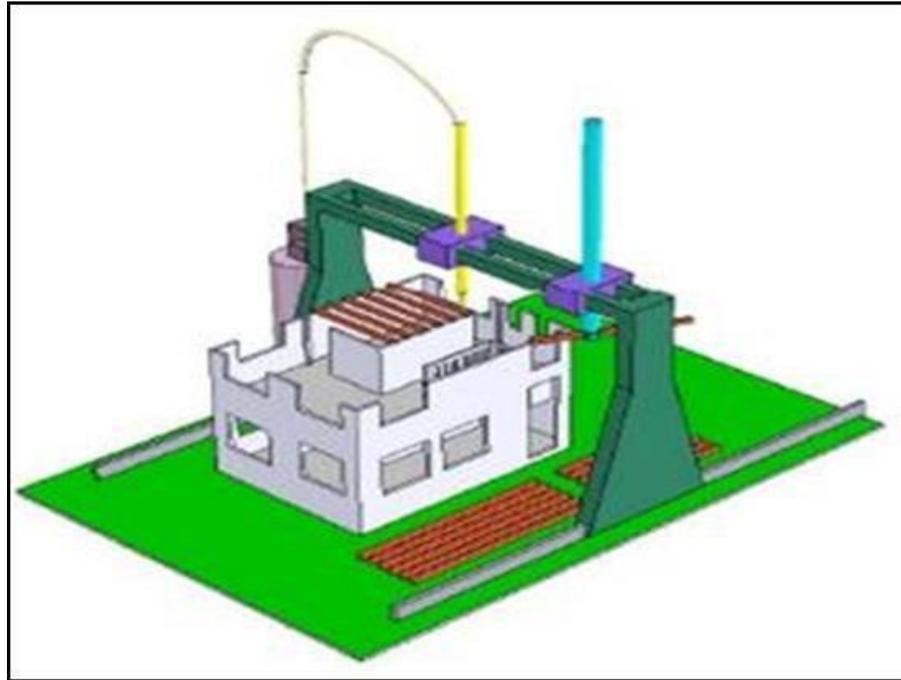
Aerospace adalah cabang keilmuan tentang pesawat terbang. Perkembangan pesawat terbang ternyata tidak lepas juga dari pemanfaatan teknologi mesin cetak tiga dimensi. Pemanfaatan mesin 3D printer yakni untuk pembuatan *secondary structure*. Bagian Pendukung ini biasanya berupa *skin*, *rib* dan lain sebagainya. Alasan penggunaan mesin 3D adalah waktu yang dibutuhkan untuk pembuatan komponen menjadi lebih efisien, efektif, bersih, dan aman. Banyaknya pilihan material yang tersedia dalam mesin cetak 3D ternyata juga mampu mereduksi berat sebuah pesawat terbang. Pada gambar 8 merupakan contoh penerapan 3D printer dalam bidang *aerospace*.



Gambar 8. Miniatur pesawat (Nugroho dan Ardiansyah, 2018).

2.3.5 Konstruksi

Mesin 3D Printer juga dapat digunakan dalam dunia konstruksi. Mesin ini digunakan untuk mencetak bidang yang tidak beraturan sehingga dapat mempermudah proses pembangunan serta mengurangi limbah hasil perakitan. Mesin 3D printer dalam dunia konstruksi masih dalam tahap pengembangan dan belum banyak digunakan secara umum. Proses penggunaan mesin 3D printer untuk pembangunan sebuah bangunan dengan konsep pada gambar 9.



Gambar 9. Miniatur rumah (Bosscher et al, 2007).

2.3.6 Fashion

Bidang *fashion* mempunyai kesamaan dengan perhiasan. Produk sengaja dibuat dengan desain yang berbeda dan menarik agar terkesan eksklusif. Pencetakan produk yang berbeda-beda dengan menggunakan konsep manufaktur tradisional akan memerlukan biaya yang tinggi, oleh karena itu dengan bantuan mesin 3D printer akan sangat membantu proses produksi menjadi efisien. Bahan yang dibutuhkan pada produk *fashion* sangat variatif, oleh karena itu dengan memanfaatkan mesin cetak 3D, akan sangat membantu dalam proses pembuatannya. Pada gambar 10 merupakan contoh penggunaan 3D printer dalam bidang *fashion*.



Gambar 10. 3D printer dalam bidang *fashion* (Yap and Yeong, 2014).

2.3.7 Pendidikan

Dunia pendidikan sering kali membutuhkan gambaran pembelajaran secara nyata, contohnya seperti susunan struktur dan miniatur pesawat sederhana. Dengan menggunakan teknologi 3D printer, siswa diharapkan mampu mengeluarkan kreativitas dan ide-idenya. Hasil ide yang dimiliki oleh siswa dapat langsung dicetak menjadi bentuk fisik atau bentuk nyata. Salah satu contoh penerapan 3D printer di bidang pendidikan yaitu mainan edukasi sederhana seperti *puzzle* tiga dimensi atau yang biasa dikenal dengan lego. Dengan menggunakan mesin 3D printer, bentuk tersebut dapat dicetak sesuai dengan desain yang sudah dibuat.

2.4 Filament

Filament 3D printer adalah bahan dasar yang digunakan dalam proses pencetakan 3D menggunakan printer 3D berbasis filament. Filament ini biasanya terbuat dari plastik, seperti PLA (*Polylactic Acid*), ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*), PETG (*Polyethylene Terephthalate Glycol*), dan sejumlah bahan lainnya. Filament digunakan sebagai "tinta" atau material dasar yang akan dicetak menjadi objek 3D. Proses kerja 3D printing dengan filament melibatkan pemanasan filament hingga menjadi cair dalam *nozzle* (nozel) printer, dan kemudian secara bertahap menumpahkan atau mengekstrusi cairan plastik ini untuk membentuk objek dalam lapisan-lapisan. Setiap lapisan material yang ditumpahkan ini akan saling menempel saat mendingin, sehingga membentuk objek 3D yang solid.

Ketersediaan berbagai jenis filament dengan karakteristik fisik dan mekanis yang berbeda memungkinkan pencetakan objek 3D dengan sifat dan kegunaan yang beragam. Sebagai contoh, PLA filament adalah bahan yang umum digunakan dan mudah dicetak, sementara ABS filament memiliki kekuatan mekanis yang lebih tinggi tetapi memerlukan suhu cetak yang lebih tinggi. Dalam konteks 3D printing, pemilihan filament yang tepat sangat penting karena akan mempengaruhi hasil akhir objek yang dicetak, kekuatan, ketahanan terhadap panas, dan karakteristik lainnya. Material-material tersebut antara lain.

2.4.1 *Polylactic Acid* (PLA)

Filament *polylactic acid* (PLA) adalah termoplastik *biodegradeable*, yang terbuat dari pati jagung. Selain pemakaian untuk filament 3D, PLA juga dipakai sebagai implan medis, kemasan makanan dan peralatan makanan sekali pakai. Keunggulan yang dimiliki PLA yaitu mudah dicetak.

Kelebihan dari filament PLA juga dapat dipanaskan hingga meleleh pada suhu 120 °C - 200 °C tanpa harus memanaskan alas printer *bed* terlebih dahulu. Tetapi disarankan alas printer *bed* mempunyai panas 60 °C. PLA tidak terlalu sensitif terhadap perubahan suhu. Jika beberapa model 3D printer mempunyai desain yang tidak tertutup pada bagian pencetaknya kemungkinan besar penggunaan PLA akan lebih baik. Kekurangan apabila menggunakan filament PLA ialah memiliki sifat lengket dan mengembang saat sedang dipanaskan, karna hal itu dapat menyebabkan penyumbatan pada *nozzle* printer 3D. Kemudian untuk mengatasi masalah tersebut ialah berikan sedikit minyak pada ujung *nozzle*, kemudian baca kembali pengaturan pada setiap petunjuk printer mengenai *setting* panas dan lainnya, kelebihan dari filamen PLA sendiri yaitu tidak perlu cemas mengenai hasil cetak pada printer *bed* saat dilepaskan hasil cetakaan tersebut tidak akan pecah dan tidak mengalami penyusutan. PLA sedikit lebih rapuh dibandingkan dengan plastik lainnya. Namun jika dijatuhkan dengan sengaja dibebepada bagian saja barulah akan terjadinya retakan, untuk retakan sendiri juga tergantung desain dan ketebalan dari hasil cetakan tersebut. Kemudian hasil cetakan tersebut akan rusak apabila dilakukannya *stress test* atau sengaja di bengkokkan pada benda hasil printer 3D memakai filamen PLA.

Asap dari proses pencetakan 3D memakai PLA memiliki aroma menyengat, hal ini dikarenakan bahan yang terkandung pada filment PLA ialah pati jagung. Filament PLA adalah bioplastik yang dapat didaur ulang dan pemakaian filament PLA sangat cocok dibentuk sebagai kotak, sebagai hadiah, model *figure*, bagian-bagian *prototype*. Pemakaian PLA tidak terlalu sensitif dengan suhu ruangan dan tidak larut juga dengan air. Untuk model-model dengan kerumitan atau *detail* yang lebih tinggi PLA bisa menghadapinya dengan baik walaupun ABS bisa melakukannya juga, akan tetapi butuh konfigurasi yang sesuai dan temperatur printer yang sesuai. Jika membuat suatu objek yang

penggunaannya pada suhu lebih dari 60°C dan sering bergesekan atau berbenturan maka disarankan untuk tidak disarankan menggunakan PLA.

Karakteristik secara umum dari PLA adalah tidak beracun, menyempit pada saat dipanaskan sehingga cocok dipakai sebagai bahan pembungkus dan dapat dipakai untuk aplikasi pencetakan Printer 3D. Namun disisi lain suhu transisi yang relatif rendah menjadikan material ini tidak cocok dipakai untuk aplikasi yang bersentuhan dengan cairan panas yang berlebih. Dengan demikian aplikasi yang cocok dengan PLA adalah dipakai untuk membuat prototipe perangkat medis, yang sangat menarik adalah PLA dapat mengalami degradasi atau pelapukan pada waktu tertentu. Menurut beberapa literatur waktu pelapukannya berkisar antara 6 hingga 24 bulan. Dengan kondisi ini, sampah botol yang dibuat dengan PLA akan mengalami pelapukan sehingga menjadi lebih ramah lingkungan.

Kelebihan *Polylactic Acid* (PLA) yang bersifat *biodegradable* dan mempunyai karakteristik yang sangat mirip dengan *polypropylene*, *polyethylene*, atau *polystyrene* yang bisa diproduksi dari peralatan manufaktur yang sudah ada sehingga bisa menekan biaya produksi. Dengan demikian filament PLA mempunyai volume produksi yang besar di bidang bioplastik. PLA lebih disukai untuk membuat benda yang lebih kecil. PLA lebih dipilih untuk dipakai pada bidang pendidikan terutama di sekolah tahap dasar kerana aman, tidak mengandung racun dan mempunyai aroma yang wangi sehingga cocok dipakai peserta didik. (Ramadhani, 2019). Pada gambar 11 merupakan gambar filament PLA.



Gambar 11. Filament PLA (*Polylactic Acid*) (esun3d.com)

Pada tabel 1 di bawah merupakan spesifikasi filament PLA dengan merek esun.

Tabel 1. Spesifikasi filament PLA merek esun

Temperatur Print	210-230°C
Temperatur base	45-60°C
<i>Printing speed</i>	40-100mm/s
<i>Density</i>	1.23g/cm ³
<i>Fan speed</i>	100%
<i>Melt Index</i>	5(190°C/2.16kg) g/10 min
<i>Tensile strength</i>	60 MPa
<i>Elongation at break</i>	20%
<i>Bending strength</i>	74 MPa
<i>Flexural modulus</i>	1973 MPa
<i>Izod notched impact strength</i>	6 kJ/m ²
<i>Heat distortion temperature</i>	53°C (0.45 MPa)
<i>Filament diameter</i>	1.75 mm

2.4.2 *Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)*

Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) adalah polimer yang dibuat oleh polimerisasi stirena dan akrilonitril dengan adanya polibutadiena. Proporsi dapat bervariasi dari 15 hingga 35% akrilonitril, 5 hingga 30% butadiena dan 40 hingga 60% stirena. Hasilnya adalah rantai panjang polibutadiena berselang-seling dengan rantai poli (stirena-ko-akrilonitril) yang lebih pendek. Kelompok nitril dari rantai tetangga, menjadi kutub, menarik satu sama lain dan mengikat rantai bersama-sama, membuat ABS lebih kuat dari polistirena murni. *Styrene* memberikan permukaan yang mengkilap dan tahan. Polibutadiena memberikan ketangguhan bahkan pada suhu rendah. Sifat mekanis yang sangat penting dari ABS adalah ketahanan dan ketangguhan impak.

Berbagai modifikasi dapat dilakukan untuk meningkatkan benturan, ketahanan, ketangguhan, dan ketahanan panas. Resistensi impak dapat diperkuat dengan meningkatkan proporsi polibutadiena dalam kaitannya dengan *styrene* dan juga akrilonitril, meskipun ini menyebabkan perubahan pada properti lainnya. Nilai resistensi *dampak* tidak turun dengan cepat pada suhu yang lebih rendah. Dengan demikian, dengan mengubah proporsi komponennya ABS dapat disiapkan di tempat yang berbeda. Penggunaan utama filament ABS adalah untuk ekstrusi dan ABS untuk cetak injeksi, lalu resistensi dampak tinggi dan sedang. Polimer ABS juga tahan terhadap asam berair, alkali, asam hidroklorat, fosfat pekat, alkohol, minyak hewani dan nabati.

Meskipun plastik ABS dipakai sebagian besar untuk tujuan mekanis, plastik ABS juga mempunyai sifat listrik yang cukup konstan pada berbagai frekuensi. Sifat-sifat ini sedikit dipengaruhi oleh suhu dan kelembaban atmosfer dalam rentang operasi temperatur yang dapat diterima. Filament ABS memiliki sifat mudah terbakar ketika terkena suhu tinggi. Karena ABS murni tidak mengandung halogen, pembakarannya biasanya tidak menghasilkan polutan organik dan

produk yang beracun dari pembakaran atau pirolisis seperti karbon monoksida dan hidrogen sianida. (Putra, 2019).

ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*) mempunyai sifat keuletan yang tinggi, kemampuan proses yang baik dan tahan terhadap beban kejutan. Akan tetapi kekuatan tarik dari ABS lebih rendah dari PLA dan beberapa termoplastik lain. *Nanocrystalline cellulose* (NCC) mempunyai nilai kristalinitas tinggi dan karakteristik yang sangat menarik untuk dapat dipakai sebagai bahan penguat dalam komposit. (Pramono dan Kusmono, 2020). Pada gambar 12 merupakan gambar filament ABS.



Gambar 12. Filament ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*)
(esun3d.com).

Pada tabel 2 merupakan spesifikasi filament ABS dengan merek esun.

Tabel 2. Spesifikasi filament ABS merek esun

<i>Density</i>	1.06 g/cm ³
<i>Heat distortion temp</i>	73°C (0.45 MPa)
<i>Melt flow index</i>	15 (220°C/10kg) g/10 min
<i>Tensile strength</i>	40 MPa
<i>Elongation at break</i>	30 %
<i>Flexural strength</i>	68 MPa
<i>Flexural modulus</i>	1203 MPa
<i>Izod impact strength</i>	42 kJ/m ²
<i>Extruder temperature</i>	230-270°C
<i>Bed temperature</i>	95-110°C
<i>Fan speed</i>	0%
<i>Printing speed</i>	40-100 mm/s
<i>Filament diameter</i>	1.75 mm

2.4.3 Nylon

Nylon adalah bahan serbaguna karena struktur *nylon* yang fleksibel tetapi tebal dan kaku. *Nylon* merupakan pilihan yang baik untuk bagian fungsional, tetapi harus berhati-hati untuk arah lapisan dan bagian mana yang paling lemah. *Nylon 618* dan *nylon 645* adalah dua formulasi yang tersedia (angkanya mengacu pada struktur molekul formulasi tertentu). Filamen *nylon* sangat rentan untuk menyerap kelembaban dari udara. *Nylon* membutuhkan nozzle dengan suhu yang tinggi dan permukaan platform khusus yang tidak dipanaskan misalnya, *garolite* dan sebagainya. Pada gambar 13 merupakan gambar filament *nylon carbon fibre*.



Gambar 13. Filament *nylon carbon fibre* (esun3d.com).

Pada tabel 3 di bawah merupakan spesifikasi filament *nylon carbon fibre* dengan merek esun.

Tabel 3. Spesifikasi filament *nylon carbon fibre* merek esun

<i>Density</i>	1.24 g/cm ³
<i>Heat distortion temp</i>	155°C (0.45 MPa)
<i>Melt flow index</i>	11.46 (275°C/5 kg) g/10 min
<i>Tensile strength</i>	140 MPa
<i>Elongation at break</i>	10.61 %
<i>Flexural strength</i>	140 MPa
<i>Flexural modulus</i>	4363 MPa
<i>Izod impact strength</i>	18.67 kJ/m ²
<i>Extruder temperature</i>	260-300°C
<i>Bed temperature</i>	45-60°C
<i>Fan speed</i>	0%
<i>Printing speed</i>	40-100 mm/s
<i>Filament diameter</i>	1.75 mm

2.4.4 Polyethylene (PET)

Polyethylene (PET) adalah plastik bening yang biasa digunakan pada kemasan botol air mineral. Selain itu, material PET adalah bahan yang sangat transparan, bagian yang dicetak 3D tidak akan terlihat jelas di semua arah karena garis-garis lapisan, tetapi akan tembus cahaya, terutama pada benda berdinding tipis. PET memiliki titik leleh yang relatif rendah, dengan demikian PET tidak boleh digunakan untuk bagian yang akan berada di lingkungan yang panas. Pada gambar 14 merupakan gambar filament PET.



Gambar 14. Filament PET (esun3d.com).

Pada tabel 4 merupakan spesifikasi filament PET dengan merek esun.

Tabel 4. Spesifikasi filament PET merek esun

<i>Density</i>	1.27 g/cm ³
<i>Heat distortion temp</i>	64°C (0.45 MPa)
<i>Melt flow index</i>	20 (250°C/2.16kg) g/10 min
<i>Tensile strength</i>	52.2 MPa
<i>Elongation at break</i>	83%
<i>Flexural strength</i>	58.1 MPa
<i>Flexural modulus</i>	1073 MPa
<i>Izod impact strength</i>	4.7 kJ/m ²
<i>Extruder temperature</i>	230-250°C
<i>Bed temperature</i>	75-90°C
<i>Fan speed</i>	100%
<i>Printing speed</i>	40-100 mm/s
<i>Filament diameter</i>	1.75 mm and 2.85 mm

2.4.5 Polycarbonate

Polycarbonate adalah bahan yang sangat kuat tetapi masih dalam proses eksperimental untuk penggunaan pencetakan 3D konsumen. Oleh karena itu sulit untuk menempel pada *platform build*. *Polycarbonate* adalah bahan pengembangan yang harus diperhatikan untuk masa depan dan baik untuk bahan-bahan industri. Pada gambar 15 merupakan gambar filament *polycarbonate*.



Gambar 15. Filament *polycarbonate* (esun3d.com).

Pada tabel 5 di bawah merupakan spesifikasi filament *polycarbonate* dengan merek esun.

Tabel 5. Spesifikasi filament *polycarbonate* merek esun

<i>Density</i>	1.12 g/cm ³
<i>Heat distortion temp</i>	80°C (0.45 MPa)
<i>Melt flow index</i>	19.5 (300°C/1.2kg) g/10min
<i>Tensile strength</i>	54.88 MPa
<i>Elongation at break</i>	150.24 %
<i>Flexural strength</i>	63.41 MPa
<i>Flexural modulus</i>	1073 MPa
<i>Izod impact strength</i>	13.2 kJ/m ²
<i>Extruder temperature</i>	240-270°C
<i>Bed temperature</i>	80-120°C
<i>Fan speed</i>	0%
<i>Printing speed</i>	20-50 mm/s
<i>Filament diameter</i>	1.75 mm

2.4.6 *Thermoplastic Elastomers (TPE)*

Elastomer adalah kombinasi dari termoplastik dan karet. Cetakan yang dibuat dengan TPE bersifat kuat dan fleksibel. Namun, cetakan harus dibuat sangat lambat untuk menghindari peregangan berlebihan pada filamen selama pencetakan. Karena filamen yang lebih tipis cenderung melentur dan sulit untuk diolah. Hal ini karena filamen TPE mungkin terlalu banyak melentur di antara roda gigi dan nozel. Namun, kualitas unik material TPE akan memungkinkan banyak hal baru untuk pencetakan 3D. Cetakan filament TPE memiliki sifat tipis dan berdinding lebih tebal cetakan seperti sol sepatu keras namun fleksibel (Horvath, 2014). Berikut merupakan gambar filament TPE.



Gambar 16. Filament *Thermoplastic Elastomer (TPE)* (esun3d.com)

Pada tabel 6 di bawah merupakan spesifikasi filament TPE dengan merek esun.

Tabel 6. Spesifikasi filament TPE merek esun

<i>Density</i>	1.14 g/cm ³
<i>Tensile strength</i>	32 MPa
<i>Elongation at break</i>	420%
<i>Extruder temperature</i>	220-250°C
<i>Bed temperature</i>	45-60°C
<i>Fan speed</i>	100%
<i>Printing speed</i>	20-50mm/s
<i>Filament diameter</i>	1.75 mm

2.5 Mainan

Mainan adalah sesuatu yang digunakan dalam permainan oleh anak-anak, orang dewasa, ataupun binatang. Berbagai jenis benda dihasilkan untuk digunakan sebagai mainan, dan barang yang diproduksi untuk tujuan lain dapat pula digunakan sebagai mainan. Mainan memiliki manfaat yang penting bagi pembelajaran anak, seperti meningkatkan kemampuan motorik, menimbulkan kegembiraan dan menjadi tempat untuk mengekspresikan apa yang anak rasakan. Menurut Kusumo (2018), Mainan anak adalah mainan yang dapat digunakan untuk bermain dan dapat difungsikan untuk edukasi dalam tumbuh kembangnya dan dapat memaksimalkan proses belajarnya. Mainan terdiri dari berbagai jenis diantaranya sebagai berikut.

2.5.1 Mainan *Building Blocks*

Mainan *building blocks* adalah mainan konstruksi yang terdiri dari

berbagai blok bangunan yang dapat disusun dan disusun ulang untuk membentuk berbagai bentuk dan struktur. Blok-blok ini biasanya memiliki bentuk dan ukuran yang berbeda, dan mereka dapat dihubungkan satu sama lain untuk membuat konstruksi yang kreatif dan beragam.

Mainan *building blocks* sangat populer di kalangan anak-anak karena mereka tidak hanya menyediakan hiburan, tetapi juga membantu dalam pengembangan berbagai keterampilan. Beberapa manfaat dari bermain dengan mainan *building blocks* melibatkan pengembangan keterampilan motorik halus, pemecahan masalah, kreativitas, dan pemahaman konsep matematis dan ilmiah dasar. Selain itu, mainan ini juga dapat meningkatkan koordinasi mata dan tangan serta kemampuan spasial. Menurut Asari et al (2023), mainan *building blocks* memfasilitasi konseptualisasi beragam desain arsitektur, zoologi, dan lingkungan. Memainkan mainan ini juga terbukti dapat mengurangi stres serta dapat meningkatkan konsentrasi serta ketekunan dalam melakukan suatu pekerjaan.

2.5.2 Mainan Edukasi STEM

STEM (*Science, Technology, Engineering, and Mathematics*) adalah suatu media pembelajaran yang dianggap mampu untuk mengintegrasikan keterampilan (*hard skills* dan *soft skills*) yang diperlukan oleh anak yang sedang belajar (Nurjanah, 2020). STEM (*Science, Technology, Engineering, and Mathematics*) mendorong anak untuk membangun pengetahuan tentang dunia di sekeliling anak melalui kegiatan mengamati, menyelidiki, dan bertanya (Aktürk et al., 2017). STEM dianggap sebagai metode belajar yang berharga dan bermakna bagi anak. Tenaga pengajar meyakini bahwa pembelajaran STEM akan membuat siswa lebih aktif dan berfikir kritis dalam pembelajarannya (Tippett & Milford, 2017).

Pembelajaran pada anak usia sekolah untuk menstimulasi kemampuan berkreasi dilakukan dengan dengan berbagai program yang

bervariasi. Pembelajaran yang cocok diterapkan pada abad 21 adalah STEM karena kandungan sains, teknologi, *engineering*, dan matematika. Sains didefinisikan sebagai suatu pengetahuan yang diperoleh secara sistematis melalui observasi, studi, dan eksperimen. Ketika diterapkan pada dunia alami, itu mencakup fisika, kimia, dan biologi serta turunan dan cabang mereka seperti astronomi, geologi, oseanografi, ekologi, botani, dan zoologi. Teknologi itu istilah lain dari alat. Orang dewasa berpikir teknologi itu berupa barang elektronik atau peralatan digital seperti kamera, komputer atau mesin-mesin canggih di pabrik. Padahal krayon, pensil, penggaris, dan gunting juga alat. Peralatan apapun yang digunakan anak untuk bermain adalah teknologi, dari mulai teknologi sederhana sampai pada teknologi modern, dari mesin-mesin sederhana yang dapat ditemui anak dalam kehidupan sehari-hari. Perlu dipastikan bahwa teknologi tersebut sesuai usia anak dan dapat digunakan sesuai kemauan anak serta memberikan kesempatan untuk memecahkan masalah (Jackman, 2009).

Teknik (*Engineering*) dapat diartikan sebagai sebuah rekayasa terhadap teknologi. *Engineering* dimulai dengan mengidentifikasi masalah, kemudian mencoba memecahkan masalah itu. Sebagai contoh, anak-anak mengalami proses ketika mereka mencoba mencari tahu bagaimana membuat fondasi yang kuat agar bangunan balok mereka dapat lebih tinggi. Matematika mencakup berbagai sub bidang, keterampilan, dan sistem, yang banyak diantaranya sesuai untuk dipelajari dalam beberapa bentuk oleh anak kecil. Di antara topik yang lebih umum diajarkan adalah klasifikasi, seriasi, perhitungan, pengukuran, geometri, grafik, dan aritmatika (Krogh, S.L and Slentz, K.L., 2008).

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

3.1.1 Tempat

Adapun tempat pelaksanaan penelitian yang dilaksanakan penulis di Laboratorium CNC Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung.

3.1.2 Waktu

Waktu penelitian ini berlangsung kurang lebih selama lima bulan (Februari 2024 – Juni 2024). Adapun uraian waktu kegiatan penelitian ini terdapat pada tabel 7.

Tabel 7. Waktu Penelitian

No.	Kegiatan Penelitian	Feb	Maret	April	Mei	Juni
1.	Studi Literatur	■				
2.	Perancangan, Perakitan		■			
3.	Pengujian			■		
4.	Analisis Hasil				■	
5.	Laporan Akhir					■

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Laptop Acer Nitro 5 AN515-44

Dalam penelitian ini penulis menggunakan laptop untuk melakukan perancangan dan perakitan desain mainan edukasi. Pada gambar 17 merupakan gambar laptop yang digunakan.



Gambar 17. Laptop Acer Nitro 5 AN515-44.

Pada tabel 8 merupakan spesifikasi Laptop Acer Nitro 5 AN515-44 yang digunakan

Tabel 8. Spesifikasi Laptop Acer Nitro 5 AN515-44

CPU	Ryzen 5 4600H <i>Processor</i>
OS	Windows 10 Home
LCD	15.6 FHD IPS, non-glare (144Hz)
<i>MEMORY</i>	16 GB DDR4 memory at 2933 MHz
<i>STORAGE</i>	512GB SSD NVMe
<i>GRAPHIC</i>	NVIDIA GeForce GTX 1650Ti 4GB of GDDR6

3.2.2 *Software* Autodesk Inventor

Autodesk Inventor merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk melakukan desain dalam bentuk 2 dimensi maupun 3 dimensi. Pada perangkat lunak ini akan dilakukan desain dan perakitan mainan edukasi yang akan dibuat. Tabel 9 di bawah ini menampilkan spesifikasi minimum komputer atau laptop untuk menjalankan *software* Autodesk Inventor.

Tabel 9. Spesifikasi minimum untuk Autodesk Inventor

<i>OPERATING SYSTEM</i>	64-bit Microsoft® Windows® 11 and Windows 10
CPU	2.5 GHz or greater
<i>MEMORY</i>	16 GB RAM for less than 500-part assemblies
<i>DISK SPACE</i>	40 GB
<i>GRAPHIC</i>	1 GB GPU with 29 GB/S Bandwidth and DirectX 11 compliant
<i>DISPLAY RESOLUTION</i>	1280 x 1024

3.2.3 *Software* Ansys

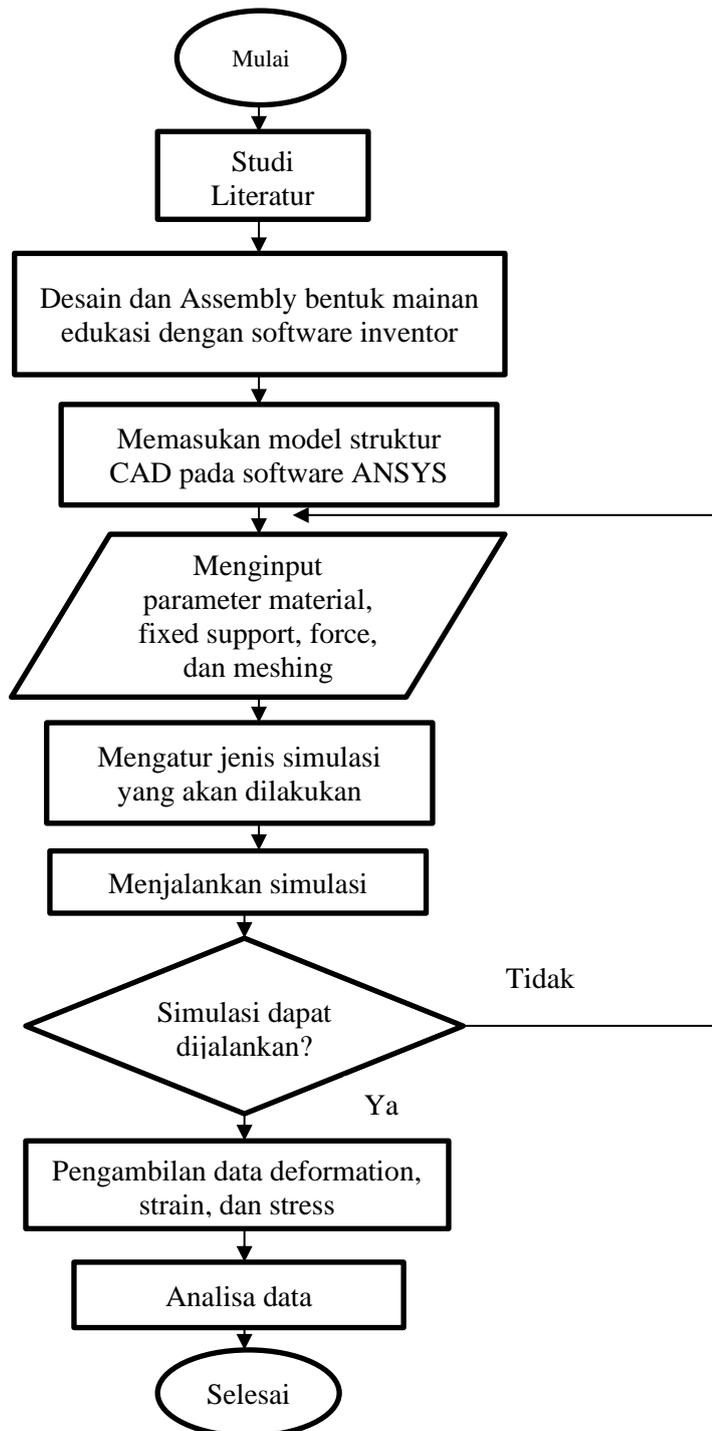
Ansys merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk melakukan simulasi dan desain teknik dari produk produk 3 dimensi. Pada perangkat lunak ini akan dilakukan simulasi terhadap mainan edukasi yang telah dirakit. Tabel 10 di bawah ini menampilkan spesifikasi minimum komputer atau laptop untuk menjalankan *software* ANSYS.

Tabel 10. Spesifikasi minimum untuk *software* ANSYS

<i>OPERATING SYSTEM</i>	Windows 7/8/9/10/11
RAM	3GB
<i>STORAGE</i>	25 GB

3.3 Alur Penelitian

Berikut ini merupakan *flowchart* pelaksanaan penelitian dari awal sampai selesai yang ditunjukkan dalam gambar 18.



Gambar 18. *Flowchart* Penelitian

3.4 Prosedur Penelitian

Adapun prosedur dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.4.1 Perencanaan

1. Studi literatur mengenai mainan edukasi
2. Menentukan spesifikasi komponen-komponen mainan edukasi.
3. Menentukan desain produk rakitan mainan edukasi

3.4.2 Perakitan menggunakan *software* Autodesk Inventor

1. Menyiapkan perangkat lunak inventor untuk merakit komponen-komponen mainan edukasi.
2. Pilih format assembly pada perangkat lunak inventor.
3. Memasukan desain komponen beam, H lock, dan X lock.
4. Pilih komponen beam sebagai ground agar komponen tersebut menjadi base dari rakitan.
5. Gunakan fitur constrain pada perangkat lunak inventor untuk merakit komponen-komponen mainan edukasi menjadi bentuk jembatan tanpa truss.
6. Merakit kembali komponen menjadi bentuk jembatan dengan menggunakan truss.
7. Menyimpan *file* rakitan mainan menggunakan format SAT.

3.4.3 Tahap simulasi menggunakan *software* ANSYS.

1. Menyiapkan *software* Ansys untuk melakukan simulasi pada rakitan mainan edukasi.
2. Membuka *software* Ansys workbench kemudian memilih simulasi static structural.
3. Menentukan data material pla dan abs dengan menggunakan *engineering data*.
4. Memilih geometri yang akan digunakan dengan fitur insert

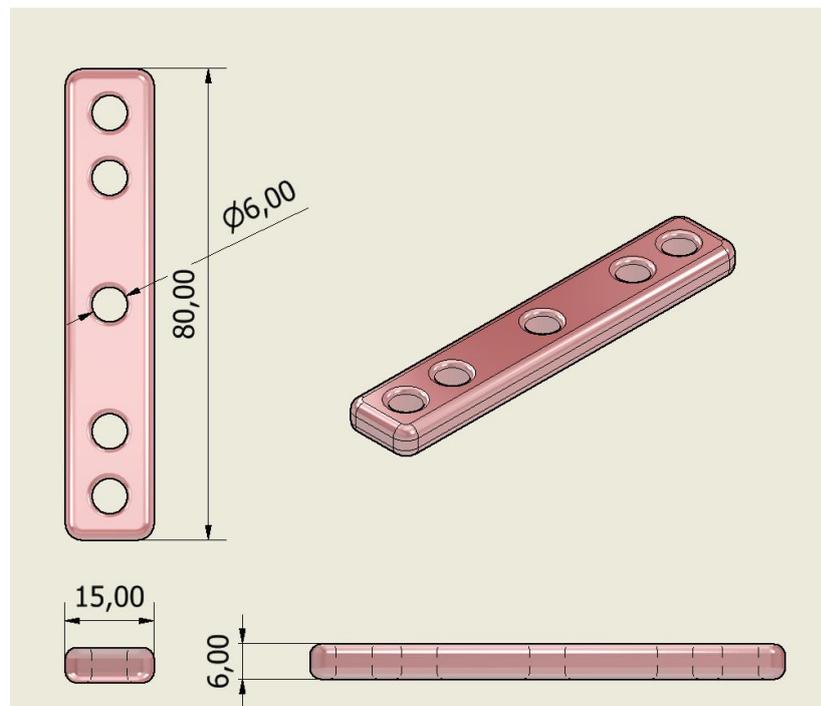
geometri, kemudian klik desain jembatan tanpa truss yang telah dibuat sebelumnya

5. Menggunakan fitur model yang akan membuka tampilan simulasi.
6. Mengubah material pada geometri dengan menggunakan material yang telah dibuat yaitu *pl*.
7. Melakukan *meshing* dengan menggunakan fitur *generate mesh*.
8. Menggunakan *fixed support* pada kaki jembatan sebagai titik tumpu beban.
9. Memasukan fitur *insert force* pada bagian tengah jembatan.
10. Memasukan data *force* yang akan bekerja pada jembatan serta arah *force*.
11. Memilih *Output* yang ingin dihasilkan yaitu *stress* dan *strain*.
12. Menjalankan simulasi dengan fitur *solve*.
13. Mengulangi dari tahapan 4 tetapi pilih jembatan yang menggunakan truss.

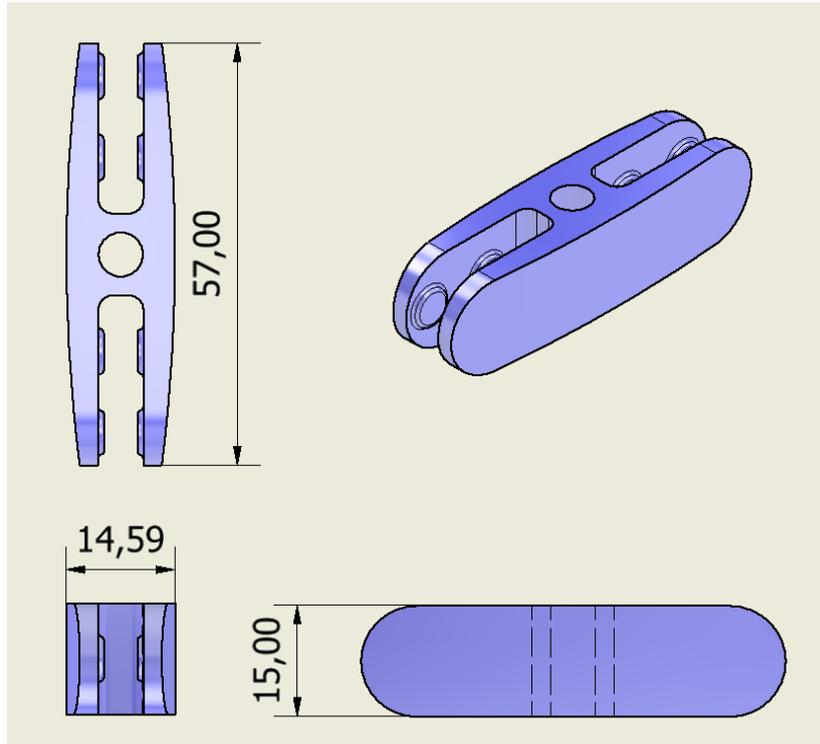
3.5 Metode Penelitian

Adapun metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu, simulasi struktur rakitan mainan edukasi menggunakan metode CAE (*Computer Aided Engineering*). Simulasi ini diawali dengan melakukan *assembly* menggunakan komponen-komponen yang telah dibuat. Dalam perakitan mainan edukasi menggunakan 3 komponen yaitu Beam, H Lock, dan X lock. Ketiga komponen tersebut dirakit menjadi dua bentuk yaitu jembatan tanpa truss dan jembatan yang menggunakan truss. Simulasi yang dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS. Perangkat lunak ANSYS digunakan dalam penelitian ini dikarenakan memiliki fitur simulasi yang cukup lengkap.

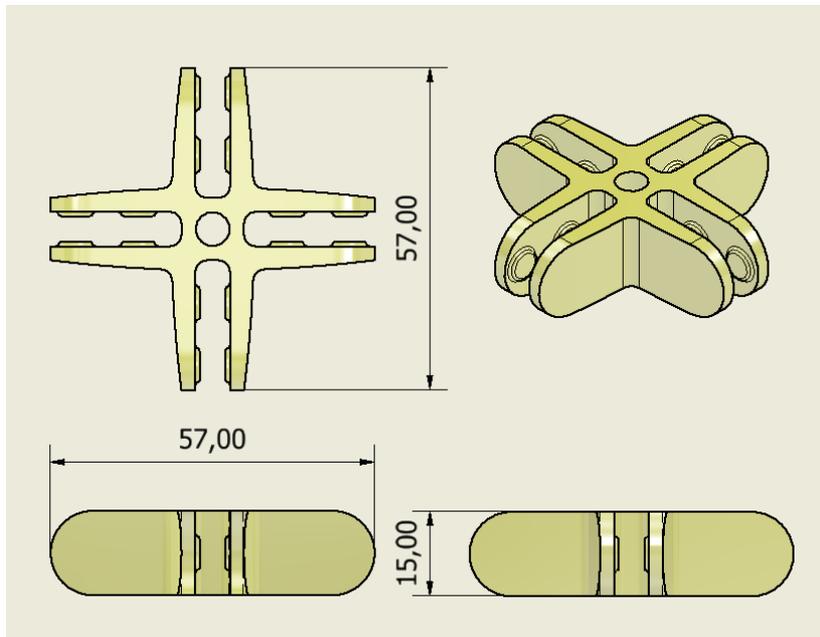
Pada penelitian ini penulis melakukan *assembly* menggunakan 3 komponen yang sebelumnya telah dibuat. Pembuatan desain komponen mainan ini terinspirasi dari mainan bernama Bricketz yaitu sebuah mainan yang berbentuk *building blocks*. Bentuk dan ukuran dari komponen-komponen yang digunakan terdapat pada gambar 19, 20, 21 sebagai berikut.



Gambar19. Komponen Beam

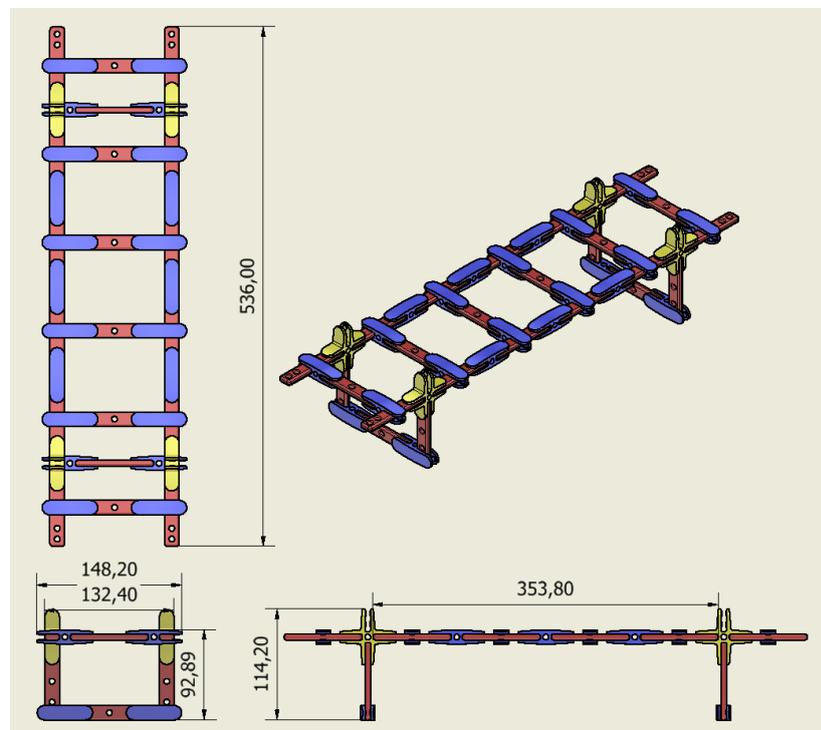


Gambar 20. Komponen H Lock

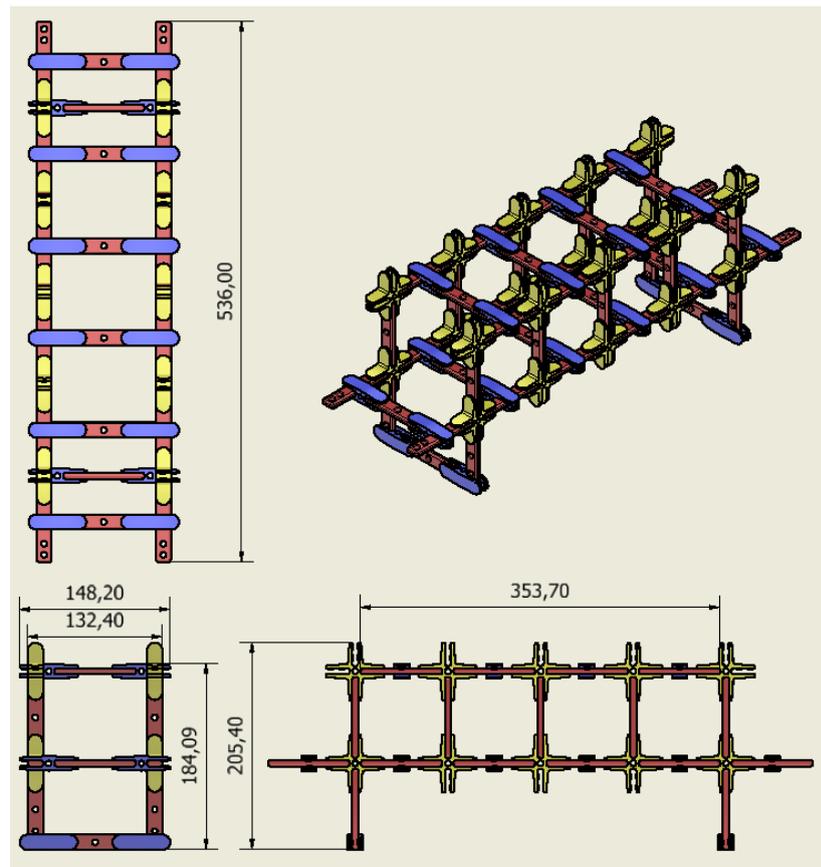


Gambar 21. X Lock

Ketiga komponen tersebut kemudian dirakit menjadi dua bentuk jembatan. Jembatan yang pertama yaitu jembatan yang tidak menggunakan truss dan jembatan kedua dengan menggunakan truss. Pemilihan rakitan berbentuk jembatan bertujuan agar model mainan dapat digunakan sebagai miniatur peraga dalam pembelajaran. Jembatan truss adalah jenis jembatan yang menggunakan struktur rangka untuk mendistribusikan beban secara merata. Berikut merupakan gambar dan ukuran rakitan jembatan tanpa truss pada gambar 22 dan jembatan yang menggunakan truss pada gambar 23.



Gambar 22. Rakitan jembatan tanpa truss.



Gambar 23. Rakitan Jembatan Menggunakan truss.

3.6 Parameter Pengujian

Dalam konteks simulasi, parameter merujuk pada nilai-nilai yang digunakan untuk mendefinisikan model atau sistem yang akan disimulasikan. Estimasi parameter diperlukan dalam pemodelan simulasi untuk menggambarkan karakteristik sistem yang akan disimulasikan. Parameter dalam simulasi dapat mencakup berbagai nilai numerik yang digunakan untuk menggambarkan sifat-sifat sistem yang sedang dimodelkan. *Input* parameter yang digunakan dalam penelitian ini yaitu sifat mekanis material yang digunakan, *fixed support*, *force* pada struktur, dan *meshing* pada struktur.

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilaksanakan, kesimpulan yang dapat ditarik adalah sebagai berikut:

1. Struktur rakitan mainan edukasi berbentuk jembatan menggunakan truss memiliki kekuatan struktur yang lebih kuat dibandingkan dengan struktur rakitan mainan edukasi berbentuk jembatan tanpa truss. Hal ini disebabkan struktur jembatan tanpa truss tidak memiliki elemen tambahan seperti jembatan yang menggunakan truss yang dapat meningkatkan kekuatan. Struktur truss memungkinkan distribusi beban yang lebih merata.
2. Pada hasil simulasi *static structural* yang dilakukan dengan menggunakan *software* ANSYS, didapatkan kesimpulan bahwa material PLA memiliki kekuatan yang lebih baik dibandingkan dengan material ABS. Hal ini disebabkan karena material PLA memiliki modulus elastisitas yang lebih tinggi yaitu 3450 Mpa dibandingkan dengan material ABS yaitu 2390 Mpa. Material PLA juga memiliki modulus geser yang lebih tinggi yaitu 1241 Mpa sedangkan material ABS memiliki nilai 854,18 Mpa.

5.2 Saran

Setelah proses penelitian dilaksanakan terdapat beberapa saran yang diberikan untuk kebutuhan pengembangan penelitian ini. Adapun saran yang diberikan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Melakukan uji eksperimen secara langsung dengan susunan material yang sama untuk mengetahui kekuatan struktur pada kondisi sebenarnya.
2. Melakukan simulasi dengan kondisi infill yang bervariasi.
3. Melakukan simulasi dengan material lain yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

Asari, Fadli Fizari Abu Hassan, Azlina Mat Saad, Ar-Rayyan Fikri Fadli Fizari, Irhamna Fikri Fadli Fizari, Azlina Zid, dan Salwani Affandi. 2023."Stress Management During Ph.D. Studies: A Share of Real Experiences." *International Journal of Education, Psychology, and Counselling (IJEPC)*, vol. 8, issue 51, 163-176. DOI: 10.35631/IJEPC.851011.

Shears, Andrew, Lee Stocks Jr., and Jonathan Bagg. 2016."3D Printing Raised Relief/Topographic Maps: A Cartographically Sound Method." MUEarthlab Working Paper, Department of Geosciences, Mansfield University. DOI: 10.5281/zenodo.15912.

Ata Aktürk, A., Demircan, H. özlen, Şenyurt, E., & Çetin, M. 2017." Turkish early childhood education curriculum from the perspective of STEM education" A document analysis. *Journal of Turkish Science Education*, 14(4), 16–34. <https://doi.org/10.12973/tused.10210a>

Bosscher, Paul, Robert L. Williams II, L. Sebastian Bryson, dan Daniel Castro-Lacouture.2007."Cable-suspended Robotic Contour Crafting System." *Automation in Construction*, Volume 17, Issue 1, November 2007, 45-55. Department of Mechanical Engineering, Ohio University, Athens, Ohio 45701, United States.

Czepiel, Mateusz, Magdalena Bańkosz, and Agnieszka Sobczak-Kupiec. 2023. "Advanced Injection Molding Methods: Review." Department of Materials

Engineering, Faculty of Materials Engineering and Physics, Cracow University of Technology, 37 Jana Pawła II Av., 31-864 Krakow, Poland.

Dawoud, M., Taha, I., & Ebeid, S. J. (2016). Mechanical behaviour of ABS: An experimental study using FDM and injection moulding techniques. *Journal of Manufacturing Processes*, 21, 39-45. Retrieved from <http://www.elsevier.com/locate/manpro>

Drpić, Aleksandar D. 2023. "Characteristics of Composite Materials Based on Polylactic Acid (PLA)." Professional Paper, IMS Institute, a.d, Belgrade. DOI: 10.5937/tehnika2306633D.

Fatchurrohman, Nanang, Mutiara Yetrina, dan Mohammad Farid. "Perancangan dan Pengembangan Produk Baru Kerajinan Lokal di Kampung Akrilik." Jurusan Teknik Industri, Universitas Putra Indonesia YPTK Padang, Indonesia. *Majalah Ilmiah UPI YPTK*, vol. 30, no. 2, 2023, 52-58.

Gebisa, A.W. and Lemu, H. G. 2019."Influence of 3D Printing FDM Process Parameters on Tensile Property of ULTEM 9085". *Procedia Manufacturing*, vol. 30, pp. 331–338.

Giffi, Craig A., Bharath Gangula, and Pandarinath Illinda. 2014. "3D opportunity in the automotive industry." *Additive manufacturing hits the road: Deloitte University Press* : 24.

Hasdiansah & Herianto. 2018. Pengaruh Parameter Proses 3D Printing Terhadap Elastisitas Produk Yang Didapatkan. Seminar Nasional Inovasi Teknologi. e-ISSN: 2549-7952. p-ISSN: 2580-3336.

Ivandiaz. 2020. "Analisis Parameter 3D Printing Material ABS Terhadap Kekasaran Permukaan Produk Memakai Metode Taguchi". Malang. Skripsi. Jurusan Teknik Industri, Universitas Brawijaya.

- Jackman, H. L. 2009. "Early Education Curriculum A Child's Connection to the World Fourth Edition". USA: WADSWORTH CENGAGE LEARNINGS.
- Jacobs, Paul Francis. 1992." Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of Stereolithography". Society of Manufacturing Engineers.
- Koswara, A. R. dan Prihadianto, B. D. 2020. "Redesign dan Analisa Kekuatan Rangka Mobil Mainan Anak Jenis BMW PMB M9818 Dengan Metode Elemen Hingga". Universitas Gadjah Mada.
- Krogh, S.L & Slentz, K. L. (2008). The Early Childhood Curriculum. New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Kumaresan, Rajan, Mahendran Samykan, Kumaran Kadirgama, Devarajan Ramasamy, Ngui Wai Keng, dan Adarsh Kumar Pandey. 2021. "3D Printing Technology for Thermal Application: A Brief Review." Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, vol. 83, no. 2, 2021,84-97.
- Kusumo, RA.MM. Pandansari.2018. "Perancangan Produk Mainan Statis untuk Meningkatkan Kecerdasan Anak." Productum: Jurnal Desain Produk (Pengetahuan dan Perancangan Produk), vol. 3, no. 4, 141-148. ISSN 2477-7900 | ISSN 2579-7328.
- Lay, Makara, Nur Laila Najwa Thajudin, Zuratul Ain Abdul Hamid, Arjulizan Rusli, Muhammad Khalil Abdullah, dan Raa Khimi Shuib. 2019. "Comparison of physical and mechanical properties of PLA, ABS, and nylon fabricated using fused deposition modeling and injection molding." School of Materials and Mineral Resources Engineering, USM Engineering Campus, Universiti Sains Malaysia, 14300, Nibong Tebal, Penang, Malaysia.

- Lubis, S., Djamil, S., & Yolanda. (2016). Pengaruh orientasi objek pada proses 3D printing bahan polymer PLA dan ABS terhadap kekuatan tarik dan ketelitian dimensi produk. *SINERGI: Jurnal Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Tarumanagara*, 20(1), 27-35. ISSN: 1410-2331.
- Mostafaei, Amir, Amy M. Elliott, John E. Barnes, Fangzhou Li, Wenda Tan, Corson L. Cramer, Peeyush Nandwana, dan Markus Chmielus. 2021. "Binder Jet 3D Printing—Process Parameters, Materials, Properties, Modeling, and Challenges." Department of Mechanical, Materials and Aerospace Engineering, Illinois Institute of Technology, 10 W 32nd Street, Chicago, IL 60616, USA.
- Ngo, T. D., Et all. 2018. "Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges". *Composite Part B: Engineering Science Direct*, Volume 143, pages 172-196.
- Noorani, R. 2006. "Rapid Prototyping Principles and Applications". New York: John Willey & Sons, Inc.
- Nugroho, A., & Ardiansyah, R. 2018. "Pembuatan Komponen LSU (Lapan Surveillance Uav) Dengan Menggunakan 3D Printer (Lapan Surveillance Uav (LSU) Part Manufacturing With 3D Printer)". *Berita Dirgantara*.
- Nurjanah, N. E. 2020. "Pembelajaran Stem Berbasis Loose Parts Untuk Meningkatkan Kreativitas Anak Usia Dini". *Jurnal Ilmiah Kajian Ilmu Anak Dan Media Informasi PUD*, 1(1), 19–31.
- Ozbolat, Ibrahim T. and Yin Yu. 2013. "Bioprinting Toward Organ Fabrication: Challenges and Future Trends. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*". Volume 60 No 3.

Peng, Tao. 2016. "Analysis of Energy Utilization in 3D Printing Processes." The State Key Lab of Fluid Power Transmission and Control, Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology of Zhejiang Province, School of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China.

Pramono Permata Aji dan Kusmono. 2020. "Fabrikasi Dan Karakterisasi Filamen Komposit ABS/NCC Untuk Aplikasi 3D Printing". Skripsi. Universitas Gadjah Mada.

Putra Kurniawan Eko. 2019. "Pengaruh Kekuatan Tarik Dan Tekan Pada Bahan DI 3D Printer". Skripsi. Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Saputra Andy. 2019. "Pengoprasian Mesin Cetak 3D". Wade Group.

Sobron Lubis, Sofyan Djamil, Yolanda. 2016. "Pengaruh Orientasi Objek pada Proses 3D Printer Bahan Polymer PLA dan ABS terhadap Kekuatan Tarik dan Ketelitian Dimensi Produk", *Sinergi*, 20(1), 27-35.

Tippett, Christine D., dan Todd M. Milford. 2017. "Findings from a Pre-kindergarten Classroom: Making the Case for STEM in Early Childhood Education." *International Journal of Science and Mathematics Education*, vol. 15, 67-86. DOI: 10.1007/s10763-017-9812-8.

Y. L. Yap and W. Y. Yeong. 2014. "Additive manufacture of fashion and jewellery products: a mini review" *Virtual Phys. Prototyp.* 9(3), 195-201.