

**ANALISIS PARAMETER PENCETAKAN 3D TERHADAP KEKUATAN
TEKAN BAHAN *POLYLACTIC ACID* MENGGUNAKAN METODE
TAGUCHI UNTUK APLIKASI MAINAN EDUKASI**

Skripsi

Oleh

**MUHAMMAD FADHIL ICHSAN RINALDY
NPM 2015021006**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

**ANALISIS PARAMETER PENCETAKAN 3D TERHADAP KEKUATAN
TEKAN BAHAN *POLYLACTIC ACID* MENGGUNAKAN METODE
TAGUCHI UNTUK APLIKASI MAINAN EDUKASI**

Oleh

MUHAMMAD FADHIL ICHSAN RINALDY

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2024

ABSTRAK

ANALISIS PARAMETER PENCETAKAN 3D TERHADAP KEKUATAN TEKAN BAHAN *POLYLACTIC ACID* MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI UNTUK APLIKASI MAINAN EDUKASI

Oleh

MUHAMMAD FADHIL ICSHAN RINALDY

Teknologi pencetakan 3D dapat digunakan dalam berbagai bidang untuk membuat benda dengan bentuk yang beragam karena kemampuannya yang dapat menghasilkan bagian-bagian geometris kecil dan kompleks secara cepat dengan biaya rendah. Parameter proses pencetakan yang beragam dapat memengaruhi kekuatan dan sifat mekanik pada produk hasil pencetakan 3D. Oleh karena itu, penelitian ini akan mengidentifikasi parameter pencetakan yang sesuai untuk mengoptimalkan nilai kekuatan tekan pada produk hasil pencetakan 3D berbahan *polylactic acid* menggunakan metode Taguchi, sehingga dapat diterapkan pada produk fungsional seperti mainan edukasi. Penelitian ini menggunakan desain orthogonal array Taguchi L₉ dengan empat faktor dan tiga level. Faktor yang diteliti adalah parameter suhu cetak, *infill density*, *layer height*, dan orientasi cetak.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengaturan parameter proses pencetakan terbaik untuk mengoptimalkan kekuatan tekan produk pencetakan 3D adalah dengan pengaturan suhu cetak 205 °C, *infill density* 50%, *layer height* 0,12 mm, dan orientasi cetak 90°. Dimana parameter *infill density* memiliki pengaruh paling signifikan terhadap kekuatan tekan dengan kontribusi 53,06%, diikuti oleh parameter orientasi cetak dengan kontribusi 38%. Parameter *layer height* memiliki pengaruh kurang signifikan dengan kontribusi 8,20%. Sementara parameter suhu cetak memiliki pengaruh yang terendah terhadap kekuatan tekan dengan kontribusi 0,74%.

Desain mainan edukasi dilakukan simulasi *finite element analysis* menggunakan data sifat mekanik berdasarkan hasil uji konfirmasi produk pencetakan 3D. Dimana simulasi mengukur tegangan komponen mainan edukasi saat diberikan beban tekan. Batas beban tertinggi dicapai pada komponen X *lock*

dengan nilai 2947 N. Sementara batas beban terendah dicapai pada komponen beam pendek dengan nilai 290 N

Kata Kunci: pencetakan 3D, kekuatan tekan, metode Taguchi

ABSTRACT

ANALYSIS OF 3D PRINTING PARAMETERS ON THE COMPRESSIVE STRENGTH OF *POLYLACTIC ACID* MATERIALS USING THE TAGUCHI METHOD FOR EDUCATIONAL TOY APPLICATIONS

By

MUHAMMAD FADHIL ICSHAN RINALDY

3D printing technology can be utilized in various fields to create objects with diverse shapes due to its ability to produce small and complex geometric parts and at low cost. The printing parameters can influence the strength and mechanical properties of 3D-printed products. This research aims to identify the appropriate printing parameters to optimize the compressive strength of 3D-printed products made from polylactic acid using the Taguchi method, so it can be applied to functional products such as educational toys. This study uses a Taguchi L₉ orthogonal array design, with four factors and three levels. The results show that the best printing process parameter settings to optimize the compressive strength of 3D-printed products are printing temperature at 205 °C, infill density of 50%, layer height at 0.12 mm, and print orientation of 90°. The parameter of infill density has the most significant effect contributing 53.06%, followed by the print orientation which contributes 38%. Layer height has a less significant effect, contributing 8.20%, while the printing temperature has the lowest effect on compressive strength, contributing 0.74%. The educational toy design underwent finite element analysis simulation using mechanical property data based on the confirmation test results of the 3D-printed product. The simulation measured the stress on the educational toy components when subjected to compressive loads. The highest load limit was measured in the X lock component with a value of 2947 N, while the lowest load limit was in the short beam with a value of 290 N.

keywords: 3D printing, compressive strength, Taguchi method

Judul Skripsi : **ANALISIS PARAMETER PENCETAKAN 3D TERHADAP KEKUATAN TEKAN BAHAN POLYLACTIC ACID MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI UNTUK APLIKASI MAINAN EDUKASI**

Nama Mahasiswa : **Muhammad Fadhil Ichsan Rinaldy**

Nomor Pokok Mahasiswa : 2015021006

Program Studi : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

Komisi Pembimbing

Dr. Ir. Yanuar Burhanuddin, M.T.
NIP 19640506 200003 1 001

Prof. Mohammad Badaruddin, S.T., M.T., Ph.D.
NIP 19721211 199803 1 002

Ketua Jurusan Teknik Mesin

Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D.
NIP 19710817 199802 1 003

Ketua Program Studi
S1 Teknik Mesin

Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc.
NIP 19790821 200312 1 003

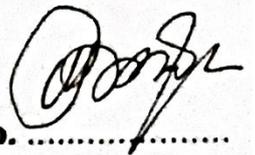
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

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



Anggota Penguji : **Prof. Mohammad Badaruddin, S.T., M.T., Ph.D.**



Penguji Utama : **Dr. Eng. Suryadiwansa Harun, S.T., M.T.**



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.

NIP-19750928 200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **19 November 2024**

PERNYATAAN SKRIPSI MAHASISWA

Saya **Muhammad Fadhil Ichsan Rinaldy** dengan NPM. **2015021006**.

Dengan ini menyatakan bahwa apa yang tertulis dalam skripsi ini adalah hasil karya ilmiah saya. Berdasarkan pada pengetahuan dan informasi yang telah didapatkan, Skripsi dengan judul “Analisis Parameter Pencetakan 3D terhadap kekuatan tekan bahan *Polylactic Acid* Menggunakan Metode Taguchi Untuk Aplikasi Mainan Edukasi” merupakan karya ilmiah yang belum pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain. Karya ilmiah ini berisikan material yang saya buat sendiri, serta bimbingan dari para dosen pembimbing dan hasil rujukan beberapa sumber yang telah dipublikasikan dan dicatut dalam daftar pustaka sebagai acuan dalam membuat skripsi ini.

Demikian pernyataan ini saya buat dan dapat dipertanggungjawabkan, Apabila terdapat hal yang tidak dapat diterima dalam skripsi ini, maka saya siap melakukan tanggung jawab sesuai dengan peraturan yang berlaku.

Bandar Lampung, 19 November 2024

Pembuat pernyataan



Muhammad Fadhil Ichsan Rinaldy
NPM.2015021006

PRAKATA

Segala puji bagi Allah Tuhan seluruh alam, atas rahmat dan hidayah-Nya skripsi yang berjudul “Analisis Parameter Pencetakan 3D Terhadap Kekuatan Tekan Bahan Polylactic Acid Menggunakan Metode Taguchi Untuk Aplikasi Mainan Edukasi” dapat diselesaikan untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan sarjana teknik mesin di Universitas Lampung. Penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan bantuan, arahan, bimbingan, dan dukungan dalam pelaksanaan penelitian serta penyusunan skripsi. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tua dan keluarga yang selalu memberikan dukungan moral dan doa yang tulus untuk kelancaran pelaksanaan penyusunan skripsi.
2. Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
4. Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc., selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Lampung.
5. Ibu Novri Tanti S.T., M.T., selaku dosen pembimbing akademik penulis.
6. Dr. Ir. Yanuar Burhanuddin, M.T., selaku dosen pembimbing I atas kesediannya untuk memberikan bimbingan pada pelaksanaan penelitian dan penyusunan skripsi.
7. Prof. Mohammad Badaruddin, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing II atas kesediannya untuk memberikan bimbingan pada pelaksanaan penelitian dan penyusunan skripsi.

8. Dr. Eng. Suryadiwansa Harun, S.T., M.T., selaku dosen pembahas atas kesediannya untuk memberikan masukan pada penyusunan skripsi ini.
9. Seluruh dosen pengajar di jurusan teknik mesin Universitas Lampung yang telah memberikan pengetahuan dan ilmu yang bermanfaat.
10. Seluruh tenaga pendidik di Universitas Lampung yang telah banyak membantu penulis sebagai mahasiswa.
11. Rekan-rekan mahasiswa jurusan teknik mesin khususnya angkatan 2020.

Terima kasih juga disampaikan kepada semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu namun memberikan kontribusi penting dalam kelancaran pelaksanaan penelitian dan penyusunan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki banyak kekurangan dan ruang untuk perbaikan. Oleh karena itu, penulis dengan rendah hati menerima segala kritik dan saran untuk meningkatkan kualitas penulisan. Akhir kata, penulis berharap skripsi ini dapat memberikan kontribusi berguna dengan memberikan informasi dan pengetahuan yang bermanfaat tentang penelitian yang dilakukan. Terima Kasih.

Bandar Lampung, Desember 2024



Muhammad Fadhil Ichsan Rinaldy

NPM. 2015021006

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
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 Printing</i>	6
2.1.1. <i>Fused deposition modelling</i>	6
2.1.2. <i>Komponen 3D printer FDM</i>	7
2.2. <i>Slicer</i>	10
2.3. <i>Polylactic Acid</i>	13
2.4. <i>Kekuatan Tekan</i>	15
2.5. <i>Mainan Edukasi</i>	17
2.6. <i>Metode Taguchi</i>	18
2.7 <i>Finite Element Analysis</i>	22
III. METODOLOGI PENELITIAN	24
3.1. <i>Tempat dan Waktu</i>	24

3.2. Alat dan Bahan.....	25
3.3. Desain Mainan Edukasi.....	28
3.4. Metode Penelitian.....	30
3.4.1. Parameter proses pencetakan	30
3.4.2. Metode Taguchi	31
3.4.3. Pengujian tekan	33
3.5. Prosedur Pelaksanaan.....	34
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	37
4.1 Hasil Pencetakan 3D Spesimen.....	37
4.2 Hasil Pengujian Tekan	39
4.3 Analisis Taguchi.....	43
4.4 Simulasi Pembebanan Tekan Mainan Edukasi	50
V. SIMPULAN DAN SARAN	59
5.1 Simpulan	59
5.2 Saran.....	60
DAFTAR PUSTAKA	62

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 Proses <i>3D Printing</i> FDM.....	7
2.2 Bagian dalam <i>Extruder</i>	8
2.3 Komponen <i>3D printer</i> FDM.....	9
2.4 Orientasi cetak.....	12
2.5 Pola <i>infill</i>	13
2.6 Bahan PLA dalam bentuk (a) filamen dan (b) pelet.....	15
2.7 Skema uji tekan.....	16
2.8 Contoh mainan edukasi.	18
2.9 Perbandingan jumlah eksperimen desain Taguchi.....	19
2.10 <i>finite element meshes</i>	23
3.1 <i>3D Printer</i>	25
3.2 <i>Software slicer</i>	26
3.3 Filamen PLA 1.75 mm.....	27
3.4 <i>Universal testing machine</i>	28
3.5 Dimensi desain mainan edukasi.....	29
3.6 Model 3D mainan edukasi.	30
3.7 Variasi parameter orientasi cetak.....	31
3.8 Dimensi spesimen uji tekan.....	33
3.9 Skema proses simulasi FEA.....	34
3.10 Flowchart penelitian.....	36
4.1 Hasil pencetakan spesimen.....	37
4.2 Spesimen dengan parameter orientasi cetak 90°.....	38
4.3 Proses pengujian tekan.....	39
4.4 Spesimen setelah uji tekan.....	40

Gambar	Halaman
4.5 Grafik kekuatan tekan.....	41
4.6 Hasil uji tekan spesimen dengan orientasi cetak 0°.....	41
4.7 Hasil uji tekan spesimen dengan orientasi cetak 45°.....	42
4.8 Hasil uji tekan spesimen dengan orientasi cetak 90°.....	43
4.9 <i>Main effect plot</i> untuk <i>S/N ratio</i>	45
4.10 Grafik uji konfirmasi kekuatan tekan.....	49
4.11 Perbandingan Nilai Prediksi dan Uji Konfirmasi.....	50
4.12 Hasil uji konfirmasi replikasi pertama.....	51
4.13 Hasil uji konfirmasi replikasi kedua.....	51
4.14 Hasil uji konfirmasi replikasi ketiga.....	52
4.15 Simulasi FEA beam panjang.....	53
4.16 Simulasi FEA beam sedang.....	54
4.17 Simulasi FEA beam pendek.....	54
4.18 Simulasi FEA <i>X lock</i>	55
4.19 Simulasi FEA <i>H Lock</i>	55
4.20 Simulasi FEA <i>Short H Lock</i>	56
4.21 Simulasi FEA <i>V Pin Lock</i>	56
4.22 Simulasi FEA <i>Pin Lock</i>	57
4.23 Simulasi FEA <i>Short pin lock</i>	57

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
3.1 Jadwal pelaksanaan penelitian.....	24
3.2 Spesifikasi <i>3D Printer</i>	26
3.3 Karakteristik filamen PLA.....	27
3.4 Pengaturan parameter cetak tetap.....	30
3.5 Faktor dan level parameter pencetakan.....	31
4.1 Data hasil pencetakan spesimen.....	39
4.2 Data hasil pengujian tekan.....	40
4.3 <i>S/N Ratio</i> kekuatan tekan.....	43
4.4 Respon pengujian tekan	44
4.5 Parameter proses pencetakan terbaik.....	46
4.6 ANOVA Parameter cetak.....	46
4.7 Hasil uji konfirmasi.....	48
4.8 Data simulasi FEA.....	52
4.9 Pengaturan karakteristik material.....	53
4.9 Hasil simulasi FEA	58
4.10 Batas beban mainan edukasi.....	59

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pendidikan *science, technology, engineering, and mathematics* (STEM) memegang peranan penting dalam persiapan generasi muda menghadapi tantangan global yang semakin kompleks. Salah satu pendekatan inovatif yang dapat digunakan untuk mendukung pendidikan STEM adalah melalui penggunaan mainan edukasi. Mainan edukasi muncul sebagai alat pembelajaran yang potensial untuk meningkatkan minat dan kecintaan anak-anak terhadap sains, teknologi, rekayasa, dan matematika. Pengetahuan intelektual dapat ditingkatkan melalui kegiatan bermain menggunakan mainan anak-anak untuk menstimulasi pengetahuan melalui berbagai kondisi yang memberikan manfaat bagi pembelajaran dan pemahaman konten melalui kegiatan bermain yang sesuai, sebagai prosedur metode pembelajaran yang tepat untuk generasi mendatang (Egwutvongsa, 2020).

Hadirnya teknologi pencetakan 3D dapat digunakan dalam berbagai bidang untuk membuat benda dengan bentuk yang beragam karena kemampuannya yang dapat menghasilkan bagian-bagian geometris kecil dan kompleks secara cepat dengan biaya rendah. *3D Printer* hadir sebagai alat yang dapat mewujudkan objek rancangan sehingga sebuah rancangan dapat direalisasikan sesuai dengan fungsi yang sebenarnya secara cepat dan ekonomis. *3D Printer* sudah banyak digunakan bukan hanya sebatas purwarupa namun hasil cetaknya dapat langsung digunakan (Budianto dkk., 2020). Mainan edukasi juga dapat dibuat menggunakan *3D printer* untuk menciptakan mainan yang tidak hanya menarik, tetapi juga mendukung pembelajaran teknis dan kreativitas. Bahan

polylactic acid (PLA) dapat digunakan untuk mencetak produk karena sifatnya yang ramah lingkungan. Penggunaan *3D printer* dan bahan PLA memungkinkan pembuatan produk seperti mainan edukasi akan menjadi lebih mudah, fleksibel, dan cepat.

Salah satu aspek penting dalam pembuatan mainan edukasi melalui penggunaan *3D printer* adalah kekuatan mekanik pada produk hasil pencetakan. Kekuatan mekanik menjadi hal yang harus diperhatikan karena mainan harus mempertimbangkan aspek keamanan. Parameter proses pada teknologi manufaktur aditif untuk pembuatan mainan khusus, memiliki pengaruh terhadap sifat mekanik produk (Martínez-García et al., 2019). Kekuatan mekanik dapat dioptimalkan dengan melakukan pengaturan pada parameter proses pencetakan.

Penelitian yang telah dilakukan sebelumnya pada produk hasil pencetakan 3D menunjukkan bahwa beberapa parameter proses seperti pemilihan material, suhu *nozzle*, keseragaman suhu *extruder* dan *bed*, *layer height*, *wall thickness*, *infill pattern*, orientasi cetak, sudut *raster*, celah antara *raster* yang diekstrusi, dan desain produk akan memengaruhi kekakuan, kekuatan, akurasi dimensional, dan waktu produksi dari produk (Chen et al., 2022). Bakhtiari et al. (2023) melakukan penelitian pada pengaruh produk pencetakan 3D berbahan PLA terhadap kekuatan tekan. Penelitian tersebut menentukan optimasi parameter *layer height* dengan tinggi 0,05, 0,15, dan 0,25 mm, *extrusion width* pada lebar 0,45, 0,55, dan 0,65 mm, suhu *nozzle* pada 190, 205, dan 220 °C, serta kecepatan cetak pada 30, 50, 70 mm/s. Hasil eksperimen menyatakan bahwa pengaruh paling signifikan dari parameter yang diteliti disebabkan oleh *layer height*. Pengurangan *layer height* menghasilkan peningkatan kekuatan tekan dan nilai modulus tekan. Berdasarkan hasil optimasi pada penelitian, kekuatan tekan tertinggi didapatkan dengan menggunakan parameter *layer height* 0,05 mm, *extrusion width* 0,65 mm, suhu *nozzle* 220 °C, dan kecepatan cetak 70 mm/s. Sementara Abbas et al. (2022) melakukan eksperimen pada parameter pencetakan 3D dengan empat faktor

parameter proses yang berpengaruh terhadap sifat tekan. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa *infill density* yang banyak akan menaikkan massa material per satuan volume, sehingga akan meningkatkan sifat tekan yang disebabkan karena gaya resistif. Selain itu kekuatan dapat ditingkatkan dengan memperbesar *shell thickness*, yang memiliki pengaruh lebih besar pada ketahanan tekan dibandingkan pola *infill* dan *layer thickness*.

Penggunaan produk yang dicetak menggunakan *3D printer* memiliki keterbatasan pada sifat-sifat mekanik serta kualitas permukaan produk. Tetapi keterbatasan tersebut dapat diatasi dengan mempelajari pengaruh berbagai parameter proses pencetakan yang memengaruhi sifat mekanik, sehingga proses pencetakan dapat lebih efisien dalam menghasilkan produk dengan sifat-sifat yang baik. Berbagai parameter proses pencetakan memiliki pengaruh signifikan terhadap sifat mekanik dan tribologi dari produk hasil *3D printing*. Keterlibatan berbagai parameter dalam teknologi pencetakan 3D serta pengaruhnya yang besar terhadap sifat-sifat produk, membuat perancangan standar pencetakan pada aplikasi tertentu menjadi penting. Kumpulan beberapa parameter yang dioptimalkan dapat menghasilkan produk pencetakan 3D dengan rasio kekuatan terhadap berat yang lebih baik, serta sifat lainnya yang diinginkan sesuai dengan aplikasi yang dibutuhkan (Rouf et al., 2022).

Penelitian tentang sifat mekanik pada produk hasil pencetakan 3D dengan berbagai macam parameter proses sudah banyak dilakukan. Namun pada umumnya penelitian yang sudah dilakukan tersebut tidak diterapkan pada produk fungsional yang dapat digunakan seperti mainan edukasi yang di cetak menggunakan *3D printer*. Parameter proses pencetakan yang beragam dapat memengaruhi kekuatan dan sifat mekanik pada produk hasil pencetakan 3D. Oleh karena itu, penelitian ini akan mengidentifikasi parameter pencetakan yang sesuai untuk mengoptimalkan nilai kekuatan tekan pada produk hasil pencetakan 3D berbahan *polylactic acid* menggunakan metode Taguchi, sehingga dapat diterapkan pada produk mainan edukasi.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh parameter proses pencetakan terhadap kekuatan tekan produk hasil pencetakan 3D?
2. Bagaimana cara mengoptimalkan sifat mekanik pada produk pencetakan 3D seperti mainan edukasi?

1.3. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis parameter proses pencetakan terbaik untuk mengoptimalkan nilai kekuatan tekan pada produk pencetakan 3D berbahan *polylactic acid*.
2. Menganalisis parameter proses pencetakan yang memiliki pengaruh terhadap nilai kekuatan tekan produk pencetakan 3D.
3. Mengidentifikasi batas beban pada produk mainan edukasi berbahan *polylactic acid*.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah yang terdapat pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. *3D Printer* yang digunakan merupakan jenis *fused deposition modelling*.
2. Bahan pencetakan 3D menggunakan filamen *polylactic acid* dengan diameter 1,75 mm.
3. Parameter cetak yang dilakukan analisis adalah suhu cetak, *infill density*, *layer height*, dan orientasi cetak.
4. Mainan edukasi menggunakan desain bentuk mainan dirancang untuk remaja berusia 12-15 tahun yang dikembangkan dengan peneliti lain.

5. Sifat mekanik yang diukur adalah kekuatan tekan maksimal menggunakan spesimen standar pengujian tekan.
6. Proses pencetakan 3D dan pengujian tekan tidak dilakukan pengamatan pada kondisi lingkungan.
7. Batas beban mainan edukasi ditentukan melalui simulasi beban statis *finite element analysis*.

1.5. Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

I. PENDAHULUAN

Bagian ini memberikan gambaran umum tentang topik penelitian berupa latar belakang yang menjelaskan masalah secara jelas, tujuan yang memaparkan alasan dilakukannya penelitian, dan batasan masalah yang akan diteliti.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Bagian ini berisikan landasan teori yang relevan dan terkait dengan topik penelitian berupa tinjauan *3D printing*, *licer*, *polylactic acid*, kekuatan tekan, metode Taguchi, dan *finite element analysis*.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Bagian ini menjelaskan secara rinci tentang pelaksanaan penelitian yang meliputi tempat dan waktu penelitian, penggunaan alat dan bahan yang dipakai, metode penelitian, serta prosedur penelitian yang dilakukan.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini memaparkan hasil-hasil penelitian yang telah didapatkan dari data yang diperoleh pada pengujian yang dilakukan.

V. SIMPULAN DAN SARAN

Bagian ini merupakan kesimpulan dari keseluruhan penelitian serta saran yang dapat disampaikan dari penelitian.

II. TINJAUAN PUSTAKA

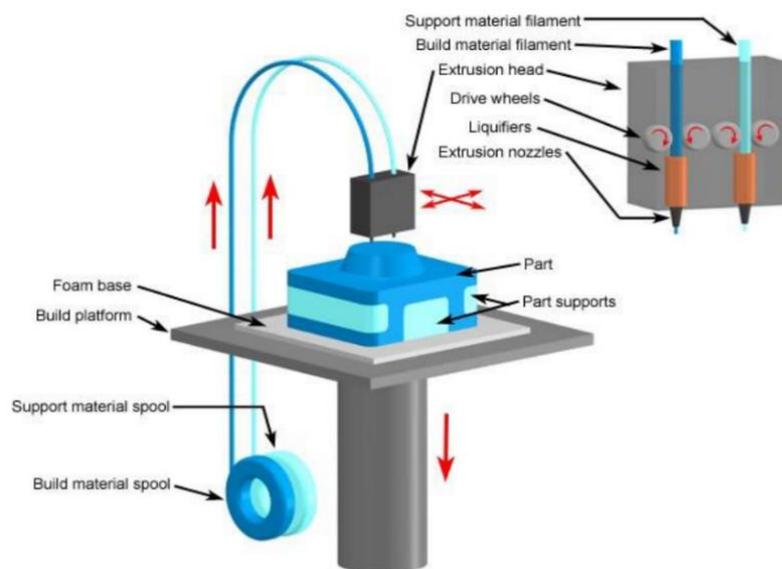
2.1. *3D Printing*

3D printing atau pencetakan 3 dimensi yang juga dapat disebut sebagai manufaktur aditif adalah proses pembuatan objek 3D dengan bentuk beragam dari model 3D atau sumber data elektronik lainnya melalui proses aditif di mana lapisan-lapisan berturut-turut dari bahan ditumpuk menggunakan kendali komputer. *3D printing* memiliki kemampuan untuk menghasilkan bentuk atau geometri yang sangat kompleks yang tidak mungkin dibuat dengan tangan, seperti bagian berongga atau bagian dengan struktur rangka internal yang dapat mengurangi berat sekaligus mengurangi limbah material. Pelopor untuk pencetakan 3D pertama adalah Charles W. Hull melalui proses pencitraan solid yang dikenal sebagai stereolitografi dan format file STL (*stereolithographic*), yang masih banyak digunakan dalam pencetakan 3D hingga saat ini. Hull juga dianggap memulai *rapid prototyping* komersial yang bersamaan dengan pengembangan pencetakan 3D. Sejak tahun 1984 ketika *3D printer* pertama dirancang dan direalisasikan oleh Charles W. Hull melalui perusahaan 3D Systems, teknologi ini telah berkembang dan mesin-mesin pencetakan 3D menjadi lebih berguna dimana harganya semakin rendah, sehingga menjadi lebih terjangkau (Kumar, 2022).

2.1.1. *Fused deposition modelling*

Teknologi *3D printing* yang paling umum digunakan adalah jenis proses *fused deposition modelling* (FDM). Dalam teknik ini, model 3D diproduksi dengan mengekstrusi butiran kecil bahan yang mengeras membentuk lapisan. Filamen atau kawat termoplastik yang dililit

menjadi gulungan, diulurkan untuk menyediakan bahan ke *nozzle* ekstrusi. *Nozzle* memanaskan bahan hingga suhu tertentu. Pada umumnya motor stepper digunakan untuk menggerakkan *extruder* ke arah sumbu X, Y, dan Z yang menyesuaikan aliran bahan sesuai kebutuhan. *Extruder* dapat bergerak dalam arah horizontal dan vertikal, dan pengendalian mekanisme dilakukan oleh perangkat lunak yang berjalan pada mikrokontroler. Keunggulan dari proses *fused deposition modelling* adalah penggunaan bahan yang mudah untuk ditangani dan diganti, berbagai material yang dapat dipilih, produk yang dicetak tidak melengkung dan mengalami deformasi, serta material memiliki kekuatan dan ketangguhan yang sangat baik. *3D printer* FDM memiliki tingkat opsi kustomisasi tinggi yang memungkinkan pengguna untuk mengatur kecepatan cetak, suhu, dan *layer height* dengan lebih baik. Sehingga pada umumnya *3D printer* FDM dianggap lebih ramah pengguna karena memerlukan waktu pengaturan yang lebih singkat (Kantaros et al., 2023).



Gambar 2.1 Proses *3D Printing* FDM.

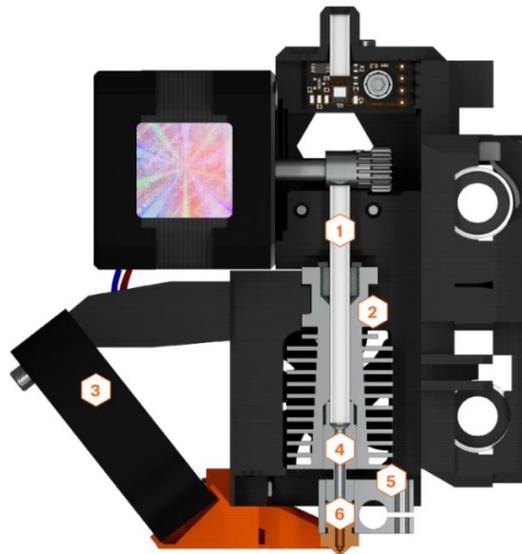
(Kumar, 2022)

2.1.2. Komponen *3D printer* FDM

Hampir semua *3D printer* FDM memiliki konstruksi yang sama. Umumnya pada *3D printer* FDM memiliki beberapa komponen penting seperti *extruder*, *heatbed*, rangka, motor stepper, dan *mainboard*.

1. *Extruder*

Extruder atau juga dapat disebut sebagai *print head* merupakan bagian *3D printer* yang berfungsi untuk mendorong filamen melewati *nozzle* untuk menghasilkan lapisan pada produk yang dicetak. *Extruder* juga melakukan pengaturan suhu pencetakan, laju aliran filamen, serta pendinginan pada proses pencetakan. Bagian yang terdapat pada *extruder* diantaranya adalah *heat sink* yang berfungsi mendisipasikan panas, kipas pendingin, *heat break*, *heater block* yang memiliki fungsi untuk memanaskan filamen, dan *nozzle* sebagai tempat keluarnya filamen.



Gambar 2.2 Bagian dalam *Extruder*.

(Střiteský et al., 2019)

2. *Heatbed*

Heatbed adalah komponen *3D printer* yang berfungsi untuk memanaskan permukaan tempat mencetak objek. *Heatbed* berfungsi untuk mencegah produk yang dicetak agar tidak terlepas dari permukaan. *Heatbed* biasanya terbuat dari bahan logam atau kaca yang dilapisi dengan lapisan perekat atau magnetik yang terhubung dengan pemanas dan *thermistor*, sehingga suhu permukaan pencetakan dapat diatur sesuai dengan jenis material yang digunakan.

3. Rangka

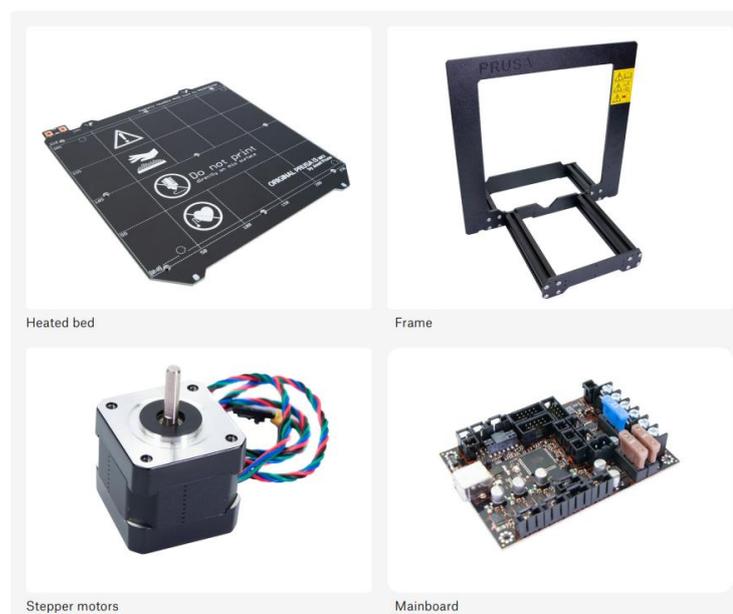
Rangka adalah struktur yang menopang *3D printer*. Rangka yang kaku dan dibuat secara presisi memiliki dampak yang positif pada kualitas pencetakan. Rangka yang kokoh akan meminimalkan getaran dan memungkinkan pencetakan yang lebih cepat tanpa menimbulkan masalah kualitas pada cetakan yang dihasilkan.

4. Motor stepper

Motor stepper merupakan komponen yang mengatur pergerakan di semua sumbu termasuk pergerakan *print head*, *heatbed*, maupun pergerakan filamen yang diekstrusikan. Penggunaan motor stepper pada *3D printer* memiliki keunggulan karena setiap langkah pergerakan dapat diatur dengan presisi.

5. Mainboard

Mainboard adalah komponen elektronik dengan sirkuit terintegrasi yang mengatur keseluruhan *3D printer*. *Mainboard* memiliki fungsi utama berupa pembacaan file instruksi (*G-code*) yang mengendalikan motor, *heatbed* dan pemanas berdasarkan instruksi yang terdapat dalam *G-code* (Střiteský et al., 2019).



Gambar 2.3 Komponen *3D printer FDM*.

(Střiteský et al., 2019)

2.2. Slicer

Slicer dalam konteks pencetakan 3D merupakan perangkat lunak komputer yang digunakan untuk membaca dan mengonversi model *3D digital* menjadi instruksi cetak yang dapat dipahami oleh *3D printer*. Proses ini dikenal sebagai *slicing*, karena model 3D dibagi menjadi lapisan-lapisan tipis yang kemudian dicetak satu per satu untuk membentuk objek tiga dimensi. *Slicer* digunakan untuk membuat pengaturan parameter pencetakan. Selain itu, pada perangkat lunak *slicer* juga dapat menentukan posisi dan orientasi produk cetak serta menggunakan fitur simulasi untuk melihat hasil cetak sebelum dilakukan pencetakan 3D.

Pada proses pencetakan 3D, data dari model 3D akan dibaca terlebih dahulu menggunakan sebuah *software slicer* untuk mengubah data stl atau obj menjadi sebuah data yang dapat dibaca mesin *3D printer* berupa *file G-code*. Terdapat beberapa aplikasi *slicer* yang biasa digunakan yaitu TinkerCAD, Cura, Sculptris, Sketchup, Meshmixer, Ideamaker, 3D slash, Freecad, RepetierHost, dan lainnya. Semakin lengkap suatu pengaturan pada aplikasi *slicer* maka akan membuat ketelitian produk semakin tinggi, tetapi semakin singkatnya suatu pengaturan pada aplikasi *slicer* maka waktu pembuatan produk juga akan semakin singkat (Cahyati dan Haris, 2021).

Dalam integrasi dengan *3D printer*, perangkat lunak *slicer* yang baik sangat diperlukan. Jika perangkat lunak *slicer* yang baik digunakan, hasilnya pasti akan lebih baik walaupun menggunakan *3D printer* yang biasa. Umumnya perangkat lunak *slicer* yang baik akan membuat geometri berdasarkan *file STL*, menyesuaikan koordinat, kecepatan cetak, temperature *nozzle* dan *bed*, akurasi dimensi, penggunaan *support* yang sesuai, dan variabel akurasi lainnya. Proses FDM dengan printer komersial dapat digunakan untuk membuat beberapa model prototipe cepat. Penerapan perangkat lunak *slicer* yang sesuai untuk proses pencetakan memiliki dampak langsung pada kualitas produk yang dicetak (Šljivic et al., 2019).

Pengaturan parameter pencetakan pada program *slicer* sangatlah penting karena setiap *3D printer*, filamen yang digunakan, kondisi pencetakan, dan model 3D yang dicetak tidak selalu sama. Sehingga setiap pencetakan memerlukan pengaturan parameter yang berbeda untuk mencapai kualitas cetak yang baik. Berikut ini beberapa parameter penting yang dapat diatur pada perangkat lunak *slicer*:

1. Suhu

Suhu merupakan parameter yang sangat penting karena tanpa pengaturan panas yang tepat, pencetakan tidak dapat dilakukan. Secara umum terdapat dua pengaturan suhu yang harus diatur, yaitu suhu *nozzle* dan suhu *bed* pencetakan. Suhu *nozzle* akan memengaruhi ekstrusi *filament*, sehingga dapat disebut sebagai suhu cetak. Sementara suhu *bed* akan memengaruhi adhesi permukaan produk cetak pada bidang tempat pencetakan.

2. *Layer height*

Layer height atau *layer thickness* mengacu pada ketinggian setiap lapisan pada produk yang dicetak. Semakin pendek *layer height* maka akan semakin banyak lapisan yang dibutuhkan dalam keseluruhan cetakan. Sehingga *3D printer* akan memiliki lebih banyak ruang untuk menghasilkan detail pada bagian-bagian seperti miniatur. Di sisi lain, lebih banyak lapisan akan membuat waktu pencetakan lebih lama dan mengurangi kekuatan komponen.

3. Kecepatan

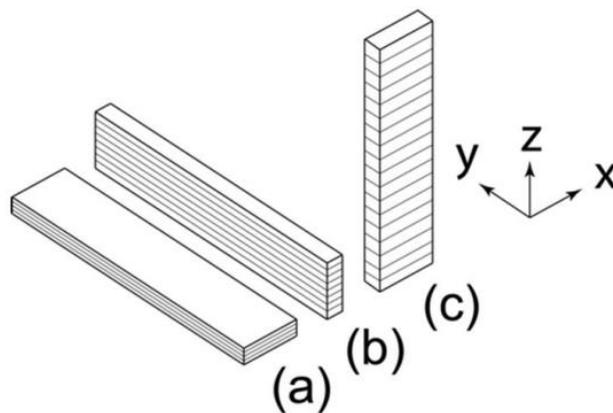
Kecepatan pergerakan *3D printer* dapat diatur pada *slicer*. Parameter kecepatan tersebut dapat diatur sesuai dengan bagian produk cetak, misalnya kecepatan *inner shell*, *outer shell*, *infill speed*, *travel speed*, *overhang*, dan kecepatan lainnya. Mempercepat kecepatan pencetakan *infill* dapat menghemat waktu yang signifikan karena bagian ini tidak terlihat, sementara pengaturan *shell* dengan kecepatan yang lebih lambat akan menghasilkan kualitas permukaan cetakan yang lebih baik. Biasanya pengaturan kecepatan yang tinggi akan membuat proses pencetakan lebih cepat, tetapi kualitas pencetakan akan menjadi lebih buruk dibandingkan pengaturan kecepatan yang lebih lambat.

4. *Shell Layers*

Shell layers atau pada beberapa *software slicer* menyebutnya sebagai *wall* atau *perimeter* merupakan jumlah garis dan lapisan pada dinding produk cetakan, baik pada sisi bagian samping, bagian atas, dan bagian bawah. Jika *infill* adalah bagian dalam dari cetakan, *shell layers* adalah jumlah lapisan pada bagian terluar benda pencetakan. *Shell layers* diatur berdasarkan jumlah lapisan dinding yang akan dicetak, namun juga dapat diatur dalam ketebalan milimeter yang disebut *shell thickness*.

5. Orientasi cetak

Orientasi cetak merupakan arah rotasi orientasi dari produk pencetakan dimana produk berkontak dengan *build plate*. Orientasi cetak dapat memengaruhi proses pencetakan seperti waktu pencetakan, adesi permukaan, dan penggunaan *support* pada produk cetak. Orientasi cetak juga memiliki pengaruh yang besar pada kekakuan dan kekuatan produk untuk sistem manufaktur aditif tingkat pemula maupun tingkat produksi. Pada sistem tingkat produksi, orientasi pencetakan dapat secara signifikan meningkatkan biaya penggunaan mesin (Chen et al., 2022).



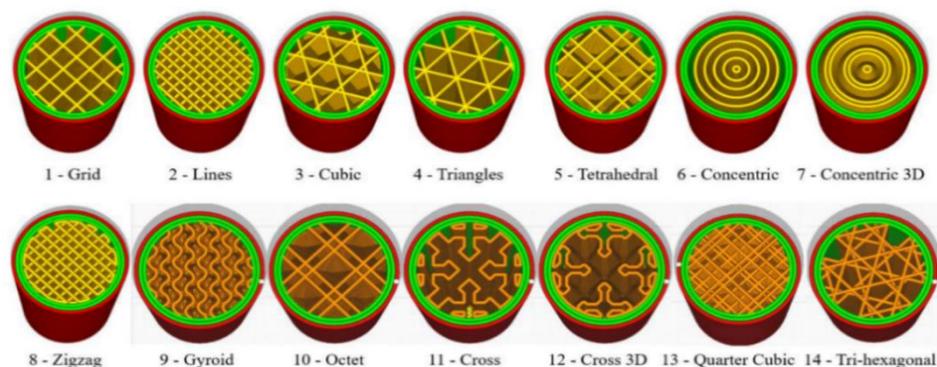
Gambar 2.4 Orientasi Cetak.

(Chen et al., 2022)

6. *Infill*

Infill adalah isi pada bagian internal dalam produk cetakan 3D. *Infill* memberikan pengaruh pada kekuatan, berat, konsumsi material, dan struktur internal suatu komponen tanpa harus menyesuaikan tampilan atau

fitur eksternalnya. *Infill* dapat dikontrol dengan menentukan kepadatan dalam persentase yang disebut sebagai *infill density* serta pola yang merupakan struktur atau bentuk pengisi. Pola yang lebih kuat dan kepadatan yang lebih banyak akan meningkatkan waktu pencetakan dan mengonsumsi lebih banyak material, namun juga meningkatkan kekuatan dan berat produk cetak. Ada berbagai pola *infill* yang tersedia di *software slicer*, masing-masing memiliki tujuan serta sifat mekanis yang berbeda seperti kekakuan dan kekuatan. Tujuan utama dari pemilihan pola *infill* adalah untuk meniru atau bahkan meningkatkan sifat mekanis seperti kekakuan dan kekerasan dari produk, bersamaan dengan penghematan penggunaan material dan waktu manufaktur. Sehingga akan memengaruhi biaya yang diperlukan. Ada dua kategori utama pola *infill*, yaitu 2D dan 3D. Pola *infill* 2D identik pada setiap lapisan dan memberikan sebagian besar *support* dalam satu dimensi. Sementara pola *infill* 3D membentuk struktur *infill* 3D yang memberikan kekuatan pada produk secara lebih seragam. Sebagian besar pola *infill* 3D disebut sebagai isotropik, yang berarti memiliki kekuatan yang sama dalam semua arah (Pernet et al., 2022).



Gambar 2.5 Pola *infill*.

(Pernet et al., 2022)

2.3. Polylactic Acid

Polylactic acid (PLA), atau dapat disebut sebagai *poly(lactic acid)* maupun *polylactide* merupakan bahan berbasis biologis dimana umumnya

menggunakan tanaman seperti jagung, tebu, dan singkong sebagai bahan bakunya. Sehingga PLA merupakan bahan yang ramah lingkungan dan dapat terurai secara hayati (*bio-degradable*). Penggunaan PLA memiliki beberapa keterbatasan seperti ketangguhan yang rendah, kerapuhan, dan sensitivitas terhadap air. Tetapi PLA memiliki sifat kimia, mekanis, dan fisik yang menarik seperti kemampuan terurai secara biologis, kekakuan dan kekuatan tarik yang tinggi serta mudah untuk diproses. Karena kemampuan yang diinginkan tersebut, PLA adalah polimer berbasis bio yang paling banyak digunakan untuk berbagai aplikasi seperti kemasan, otomotif, pembuatan prosthesis, dan industri elektronik. Karena PLA dapat efektif menggantikan polimer berbasis minyak bumi. Selain itu, PLA memiliki titik leleh yang relatif rendah, antara 150 dan 160 °C. Sehingga memiliki kemudahan untuk diproses, yang membuatnya lebih menarik bagi pengguna *prosumer 3D printer*. PLA juga banyak digunakan sebagai *binder* untuk bahan komposit dimana bahan aditif dapat berupa perunggu, serbuk gergaji, butiran keramik, dan berbagai bubuk logam (Hanon and Zsidai, 2021).

Polylactic Acid dapat digunakan sebagai bahan filamen dalam pencetakan 3D. Secara umum bahan PLA merupakan filamen yang paling sering digunakan. Karena PLA mudah untuk dicetak sehingga memberikan kualitas permukaan yang baik pada model cetak yang detail dan kecil. Ekspansi termal pada PLA termasuk rendah jika dibandingkan material lainnya, Sehingga dapat melekat pada tempat pencetakan dengan baik dan tidak mengalami *warping*. Selain itu PLA tidak menimbulkan bau yang tidak sedap saat proses pencetakan. PLA juga ditawarkan dengan warna yang beragam dan merupakan salah satu material yang murah.

Penggunaan filamen PLA memiliki keterbatasan pada sifat mekanis yang keras dan getas karena memiliki kecenderungan untuk pecah dan hancur di bawah tekanan. PLA juga tidak tahan terhadap cuaca dibandingkan material lain, serta tidak tahan terhadap suhu yang panas. Karena PLA mulai mengalami pelunakan pada suhu sekitar 60°C. Sehingga pada situasi tersebut, filamen

dengan bahan lain seperti PETG dan ASA merupakan pilihan yang lebih baik dibandingkan filamen PLA (Šljivic et al., 2019).



Gambar 2.6 Bahan PLA dalam bentuk (a) filamen dan (b) pelet.
(Kantaros et al., 2023).

2.4. Kekuatan Tekan

Kekuatan tekan adalah kemampuan suatu struktur atau material untuk menahan beban yang menyebabkan deformasi dengan cenderung memperkecil ukuran saat dilakukan penekanan. Pengujian kekuatan tekan sangat penting untuk menentukan seberapa baik suatu material dapat menahan beban tekan sebelum mengalami kegagalan. Salah satu standar pengujian yang dapat digunakan untuk pengujian tekan adalah ASTM D695, yang secara khusus menguraikan prosedur untuk mengukur kekuatan tekan material plastik. Hasil pengujian ini memberikan data penting mengenai sifat mekanis material, seperti modulus elastisitas tekan dan tegangan tekan maksimum, yang bermanfaat dalam perancangan dan analisis struktural.

Pada pengujian tekan, tegangan didefinisikan sebagai benda uji yang diberikan beban penekanan per satuan luas penampang benda uji tersebut. Sehingga untuk mengukur kekuatan tekan dapat menggunakan persamaan (1)

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

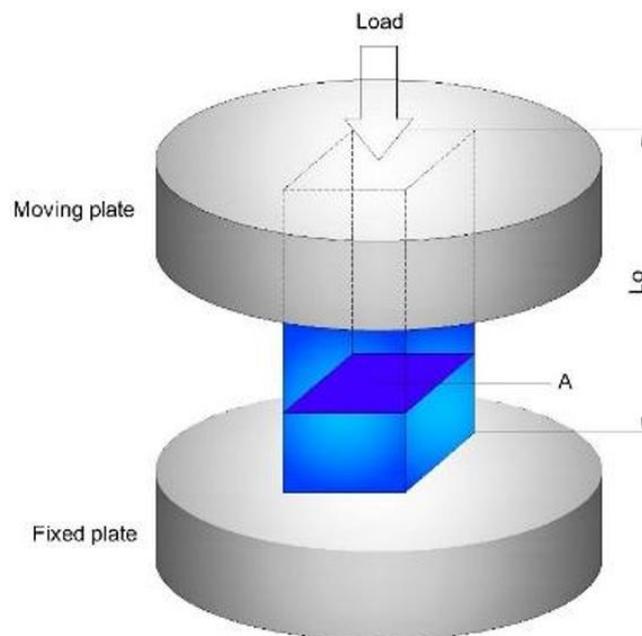
dimana:

σ = Kekuatan tekan (*MPa*)

F = Beban penekanan (*N*)

A = Luas penampang spesimen (*mm²*)

Perilaku suatu material ketika diberikan beban tekan pada laju pembebanan yang relatif rendah dan seragam dapat dijelaskan oleh sifat tekannya. Meskipun produk plastik diberikan beban tekan dalam berbagai aplikasi, kekuatan tekan pada plastik memiliki desain yang terbatas. Uji tekan adalah metode yang umum dipakai untuk mendapatkan data riset dan pengembangan, kontrol kualitas, penerimaan atau penolakan sesuai spesifikasi, dan tujuan khusus lainnya. Kekuatan tekan, regangan tekan, tegangan luluh, dan modulus elastisitas adalah contoh sifat tekan. Kekuatan tekan merupakan parameter desain yang umum digunakan dan ditentukan. Kompresi terjadi ketika dua gaya antiparalel dengan nilai yang sama bekerja di suatu objek hanya pada satu dimensinya, menyebabkan objek tersebut tetap diam (Abbas et al., 2022).



Gambar 2.7 Skema uji tekan.

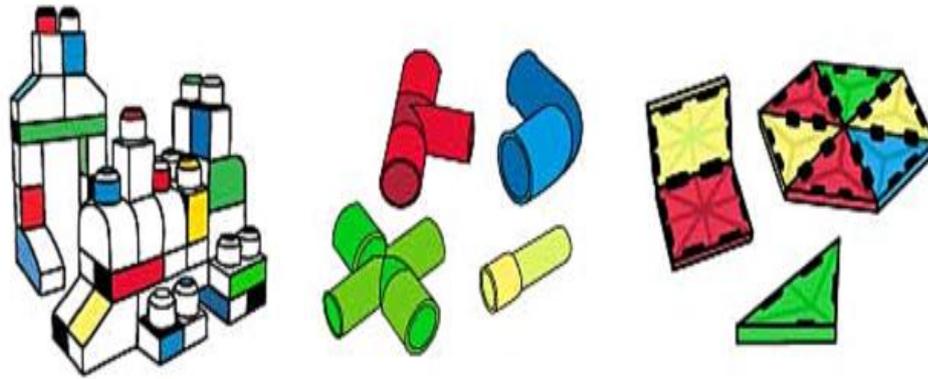
(Abbas et al., 2022)

2.5. Mainan Edukasi

Mainan edukasi adalah jenis mainan yang spesifik dirancang untuk mendorong pembelajaran dan perkembangan anak-anak. Dengan fokus pada aspek-aspek kognitif, sosial, motorik, dan emosional, mainan ini bertujuan untuk menyediakan pengalaman belajar yang menyenangkan bagi anak-anak. Salah satu karakteristik utama mainan edukasi adalah tujuan pendidikan yang melekat pada desainnya. Mainan ini membantu dalam pengembangan keterampilan kognitif, seperti berpikir logis, kreativitas, dan pemahaman konsep matematika atau bahasa.

Mainan edukatif tak hanya berfungsi sebagai hiburan bagi anak, namun juga membantu merangsang tumbuh kembang serta melatih sensoris anak. Mainan edukatif yang dapat mendukung kegiatan bermain sambil belajar anak ketika di rumah menjadi salah satu faktor untuk mengenalkan suatu pembelajaran kepada anak secara menyenangkan. Mainan edukatif memberikan kesempatan belajar tertentu kepada pengguna. Mainan edukatif merupakan salah satu cara untuk mengenalkan anak pada pembelajaran melalui media yang menarik, tanpa ada paksaan dari guru atau orang tua. (Permana dan Djatmiko, 2021).

Mainan edukasi dapat dijadikan sebagai alat pembelajaran *STEAM* (*science, technology, engineering, art, and math*). Akses terhadap pendidikan *STEAM* berkualitas mulai dari periode prasekolah diketahui sebagai prediktor kesuksesan akademis di masa depan. Oleh karena itu, interaksi bermain merupakan investasi yang berharga untuk meningkatkan kesuksesan pendidikan dengan penuh sukacita dan efektif dalam konteks informal, mengingat bukti yang kuat pada keterkaitan antara kognisi spasial yang berkembang baik dan prestasi dalam bidang yang terkait dengan *STEAM*. Banyak penelitian menunjukkan bahwa bermain dengan mainan edukasi konstruksi meningkatkan penalaran spasial. Sehingga membuat mainan konstruksi menjadi alat yang dapat diakses dan memiliki kontribusi pada pengembangan *STEAM* secara informal (Ileri et al., 2023).



Gambar 2.8 Contoh mainan edukasi.
(Ileri et al., 2023)

2.6. Metode Taguchi

Metode Taguchi adalah suatu pendekatan statistik yang ditemukan oleh Dr. Genichi Taguchi, seorang insinyur dan statistikawan Jepang. Konsep utama dalam metode ini melibatkan desain eksperimen ortogonal, dimana serangkaian pengujian diatur sedemikian rupa untuk meminimalkan jumlah percobaan yang diperlukan sambil memberikan informasi yang relevan tentang faktor-faktor yang memengaruhi suatu sistem. Metode Taguchi mengenalkan konsep parameter desain dan toleransi, yang membantu mengelola variasi dalam suatu produk.

Untuk mencapai kualitas produk yang diinginkan dengan desain, Taguchi merekomendasikan tiga tingkat proses berupa desain sistem, desain parameter, dan desain toleransi. Fokus dari tahap desain sistem adalah menentukan tingkat kerja yang sesuai untuk faktor-faktor desain yang mencakup rancangan dan pengujian sistem berdasarkan penilaian terhadap bahan, bagian, dan parameter proses atau produk nominal yang dipilih berdasarkan teknologi saat ini yang melibatkan inovasi dan pengetahuan di bidang ilmu pengetahuan dan teknologi yang relevan. Sementara desain parameter bertujuan menentukan tingkat faktor yang menghasilkan kinerja terbaik dari produk atau proses yang sedang diteliti. Kondisi optimum dipilih sehingga pengaruh faktor-faktor yang tidak terkontrol

(faktor *noise*) menyebabkan variasi minimum dari kinerja sistem. Desain toleransi adalah langkah yang digunakan untuk menyempurnakan hasil desain parameter dengan mengencangkan toleransi faktor-faktor yang berpengaruh signifikan pada produk (Roy, 2010).

2.6.1. *Orthogonal array*

Taguchi menggunakan perancangan eksperimen sebagai alat untuk menjadikan produk lebih kokoh, di mana produk tersebut tidak terpengaruh oleh faktor *noise*. Perancangan eksperimen digunakan untuk mengurangi variasi pada karakteristik kualitas produk dan proses. Penerapan metode Taguchi dalam desain eksperimen didasarkan pada *orthogonal array* (OA) untuk memperoleh jumlah informasi maksimum dengan minimal percobaan (Djami dan Sunaryo, 2014). Pendekatan Taguchi menentukan serangkaian *orthogonal array* yang dapat digunakan untuk banyak situasi eksperimental. Taguchi merancang metode standar untuk menganalisis hasil. Kombinasi teknik desain eksperimen standar dan metode analisis dalam pendekatan Taguchi menghasilkan tingkat konsistensi dan produktifitas prediksi kinerja yang lebih tinggi. Pendekatan desain Taguchi yang digunakan dapat mengurangi jumlah eksperimen jika dibandingkan dengan desain faktorial penuh. Contoh perbandingan jumlah eksperimen desain taguchi dengan faktorial penuh dapat dilihat pada gambar 2.10.

FACTORS	LEVELS	TOTAL NUMBER OF EXPERIMENTS	
		FULL FACTORIAL DESIGN	TAGUCHI DESIGN
2	2	4 (2^2)	4
3	2	8 (2^3)	4
4	2	16 (2^4)	8
7	2	128 (2^7)	8
15	2	32,768 (2^{15})	16
4	3	81 (3^4)	9

Gambar 2.9. Perbandingan jumlah eksperimen desain Taguchi.
(Roy, 2010)

Desain eksperimen *orthogonal array* dapat berguna karena efisiensi pengujiannya, tetapi memiliki sejumlah potensi kekurangan. Secara umum, eksperimen *orthogonal array* berfungsi baik ketika interaksi antara faktor-faktor minimal. Sehingga ketika hasil secara langsung berkaitan proporsional dengan kombinasi linier dari efek utama faktor individu, desain *orthogonal array* mengidentifikasi kondisi optimum dan memperkirakan kinerja pada kondisi tersebut secara akurat. Sementara itu jika faktor-faktor saling berinteraksi masih ada kemungkinan bahwa kondisi optimum akan teridentifikasi secara akurat, namun perkiraan kinerja optimal dapat meleset secara signifikan. Tingkat ketidakakuratan dalam perkiraan kinerja akan tergantung pada tingkat kompleksitas interaksi di antara semua faktor. (Roy, 2010).

2.6.2. *Analysis of variance*

Analisis varian atau *analysis of variance* (ANOVA) pada metode Taguchi digunakan sebagai suatu metode statistik untuk menginterpretasikan data-data hasil eksperimen. ANOVA adalah teknik perhitungan yang memungkinkan secara kuantitatif memperkirakan kontribusi dari setiap faktor pada semua pengukuran respon untuk mencari faktor-faktor yang memengaruhi nilai respon. ANOVA yang digunakan pada desain parameter berguna untuk mengidentifikasi kontribusi faktor, sehingga akurasi perkiraan model dapat ditentukan (Soejanto, 2009). Teknik ini tidak langsung menganalisis data, tetapi lebih menentukan variabilitas atau varians dari data. Analisis ini menyediakan variansi dari faktor yang dapat dikontrol dan faktor *noise*. Dengan memahami sumber dan besarnya variansi, kondisi operasi kokoh dapat diprediksi.

Analysis of variance memiliki berbagai kuantitas yang disusun dalam format tabel standar. Beberapa kuantitas pada ANOVA tersebut diantaranya adalah *degree of freedom*, *sum of square*, *mean square*, *f-ratio* dan persen kontribusi.

1. *Degree of Freedom* (DF)

Degree of Freedom atau derajat kebebasan adalah ukuran dari jumlah informasi yang dapat ditentukan secara unik dari sekumpulan data yang diberikan. DF untuk data yang berkaitan dengan suatu faktor, sama dengan jumlah tingkat yang dikurang satu. Persamaan *degree of Freedom* adalah sebagai berikut:

$$DF_i = n - 1 \quad (2)$$

dimana:

n = jumlah level

2. *Sum of Squares* (SS)

Sum of Squares atau jumlah kuadrat merupakan ukuran penyimpangan data eksperimen dari nilai rata-rata data dengan menjumlahkan masing-masing deviasi kuadrat untuk menekankan deviasi total. Sehingga memiliki persamaan:

$$SS = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (3)$$

dimana,

\bar{Y} = rata – rata nilai dari Y_i

3. *Mean Square* (MS)

Mean Squares atau kuadrat tengah adalah hasil dari *sum of squares* berdasarkan *degree of freedom* masing-masing yang dihitung dengan cara membagi *sum of square* dengan *deegree of freedom*. *Mean square* pada suatu faktor dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$MS_i = \frac{SS_i}{DF_i} \quad (4)$$

4. *F-Ratio*

F-Ratio digunakan untuk melihat perbedaan yang signifikan pada faktor-faktor dan interaksi antar faktor. Rumus uji *F-Ratio* adalah sebagai berikut:

$$F_{ratio} = \frac{MS_i}{MS_{error}} \quad (5)$$

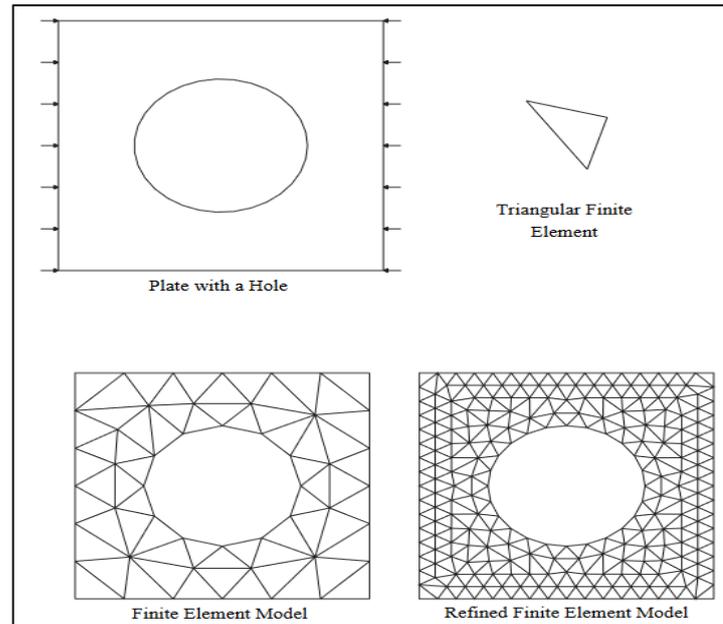
5. Persen Kontribusi

Persen kontribusi dari faktor dapat diperoleh dengan membagi *sum of square* untuk faktor tersebut dengan *total sum of square*. Persen kontribusi dilambangkan dengan P dan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$P_i = \frac{SS_i}{SS_T} \quad (6)$$

2.7 *Finite Element Analysis*

Finite element analysis (FEA) atau *finite element method* (metode elemen hingga) adalah teknik komputasi yang digunakan untuk memprediksi bagaimana objek akan bereaksi terhadap gaya eksternal, panas, aliran fluida, dan efek fisik lainnya. Teknik ini melibatkan pembagian objek yang kompleks menjadi bagian-bagian yang lebih kecil dan sederhana yang disebut elemen hingga. Elemen tersebut terhubung di titik-titik yang disebut *nodes*. Titik-titik *nodes* membentuk *mesh* yang mewakili geometri objek. Geometri tersebut disebut sebagai *finite element mesh* dan proses dalam membentuk *mesh* disebut *mesh generation*. Oleh karena itu penggunaan *mesh* tersebut dapat mendekati perkiraan geometri suatu objek, seperti yang terlihat pada gambar 2.11



Gambar 2.10 *finite element meshes*.

(Fish and Belytschko, 2007)

Banyak fenomena fisik dalam *engineering* dan sains dapat dijelaskan dalam bentuk persamaan diferensial parsial. Secara umum, menyelesaikan persamaan-persamaan ini dengan metode analisis klasik untuk bentuk-bentuk arbitrer hampir tidak mungkin dilakukan. Metode elemen hingga menggunakan pendekatan numerik yang memungkinkan persamaan diferensial parsial dapat diselesaikan secara mendekati perkiraan. Dari sudut pandang *engineering*, FEA adalah metode yang dapat menyelesaikan masalah teknik seperti analisis tegangan, perpindahan panas, aliran fluida, dan elektromagnetika melalui simulasi komputer. *Finite element analysis* menyediakan metodologi sistematis di mana solusi dapat ditentukan oleh program komputer. Untuk mendapatkan solusi yang cukup akurat biasanya dibutuhkan ribuan *nodes*, sehingga kemampuan komputer sangat penting untuk menyelesaikan persamaan ini. Secara umum, akurasi solusi meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah elemen dan *nodus*, tetapi waktu yang dibutuhkan komputer juga meningkat. Program elemen hingga menentukan hasil perhitungan di setiap *nodes* melalui setiap elemen. Hasil metode elemen hingga biasanya disajikan dalam bentuk visualisasi komputer seperti plot kontur. Informasi ini kemudian digunakan dalam proses desain teknik (Fish and Belytschko, 2007).

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Tempat dan Waktu

Tempat dan waktu pelaksanaan penelitian adalah sebagai berikut:

1. Tempat

Tempat pelaksanaan penelitian dilakukan di Laboratorium CNC dan Laboratorium Material Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung.

2. Waktu

Waktu penelitian berlangsung selama empat bulan (Mei 2024 – Agustus 2024). Jadwal pelaksanaan penelitian dapat dilihat pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Jadwal pelaksanaan penelitian

No.	Kegiatan	Mei 2024				Juni 2024				Juli 2024				Agustus 2024			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Penentuan parameter, desain eksperimen Taguchi dan proses manufaktur produk pencetakan 3D																
2	Pengujian tekan produk pencetakan 3D																
3	Analisis metode Taguchi dan ANOVA																
4	Simulasi FEA mainan edukasi																
5	Penyusunan Laporan																

3.2. Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. 3D Printer

Mesin *3D printer* yang digunakan untuk mencetak produk penelitian merupakan jenis *fused deposition modelling* dengan tipe pergerakan *cartesian*. Mesin yang digunakan adalah Anycubic Kobra 2 dengan modifikasi *firmware* dan modifikasi berupa peningkatan beberapa instrumen *hardware*. Mesin ini memiliki kapasitas volume pencetakan $225 \times 225 \times 250 \text{ mm}^3$ sehingga dapat digunakan untuk mencetak spesimen penelitian. Alat pendukung yang digunakan pada *3D printer* adalah *single board computer*, laptop, dan *router wifi*. Mesin *3D printer* yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 3D Printer.

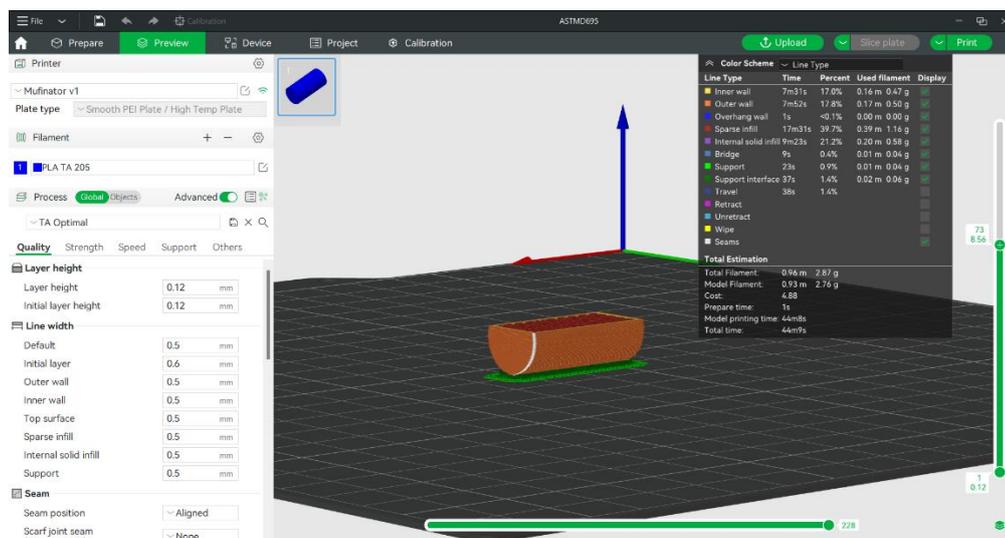
Adapun spesifikasi lengkap dari mesin *3D printer* yang digunakan dapat dilihat pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 Spesifikasi 3D Printer

Spesifikasi	Data
<i>Firmware</i>	Klipper 0.12
Kapasitas volume pencetakan	225 × 225 × 250 mm ³
Ukuran <i>nozzle</i>	0.4 mm
Suhu maksimal <i>nozzle</i>	260°C
Suhu maksimal <i>hotbed</i>	110°C
Akselerasi maksimal	8000 mm/s ²
Kecepatan maksimal	400 mm/s

2. Software Slicer

Parameter pencetakan diatur di dalam *software slicer* untuk menghasilkan *file G-code* yang dapat dibaca oleh *firmware* pada mesin 3D printer. *Slicer* yang digunakan adalah Bambu Studio. Bambu Studio dipilih karena merupakan perangkat lunak bebas dengan sumber terbuka (*open-source*) yang diluncurkan pada tahun 2021.



Gambar 3.2 Software Slicer.

3. Filamen PLA

Produk pencetakan penelitian dicetak menggunakan filamen berbahan *polylactic acid (PLA)* dengan diameter 1,75 mm. PLA merupakan material yang berasal dari bahan *biodegradable thermoplastic aliphatic polyester* yang terbentuk dari campuran tanaman. Produk filamen yang digunakan adalah ELEGOO PLA Filament 1.75mm Colored 1KG. Semua spesimen penelitian

dicetak menggunakan filamen yang sama. Karakteristik dari filamen PLA yang digunakan dapat dilihat pada tabel 3.3.

Tabel 3.3 Karakteristik filamen PLA

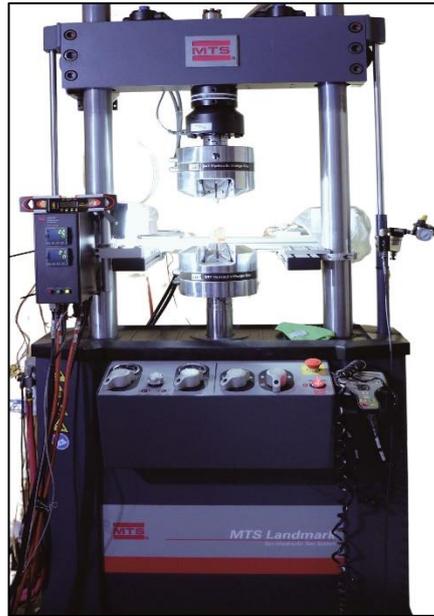
Karakteristik	Nilai
Diameter	1,75 mm +/- 0.02mm
Suhu deformasi termal	53°C (0.45 MPa)
Suhu <i>Nozzle</i>	190-220 °C
Suhu <i>Hotbed</i>	50-65 °C
Modulus <i>bending</i>	1913 Mpa
<i>Bending strength</i>	91 Mpa
<i>Elongation at break</i>	11,2%
<i>Tensile Strength</i>	≥ 55 Mpa
<i>Charpy impact strength</i>	5,4kj/m ²
Kekerasan Rockwell	88
Massa Jenis	1,20 g/cm ³



Gambar 3.3 Filamen PLA 1,75 mm.

4. *Universal Testing Machine*

Universal testing machine digunakan sebagai alat uji tekan untuk mengukur sifat mekanis kekuatan tekan pada spesimen penelitian yang dicetak menggunakan *3D printer*. Alat yang digunakan adalah MTS Landmark Servohydraulic Test Systems.



Gambar 3.4 *Universal Testing Machine*

5. *Software CAD/CAE*

Software CAD/CAE digunakan untuk melakukan pembuatan desain produk *3D printing* dan melakukan simulasi FEA. *Software* yang digunakan adalah Autodesk Inventor 2024 dan Solidworks 2025.

3.3. **Desain Mainan Edukasi**

Mainan edukasi pada penelitian ini menggunakan desain khusus berupa produk mainan edukasi struktur yang dikembangkan dengan peneliti lain, sesuai dengan fungsi yang dirancang. Mainan edukasi struktur yang diteliti memiliki beberapa bagian sebagai berikut:

1. *Beam*

Komponen *beam* terdiri dari *beam* panjang, *beam* sedang, dan *beam* pendek.

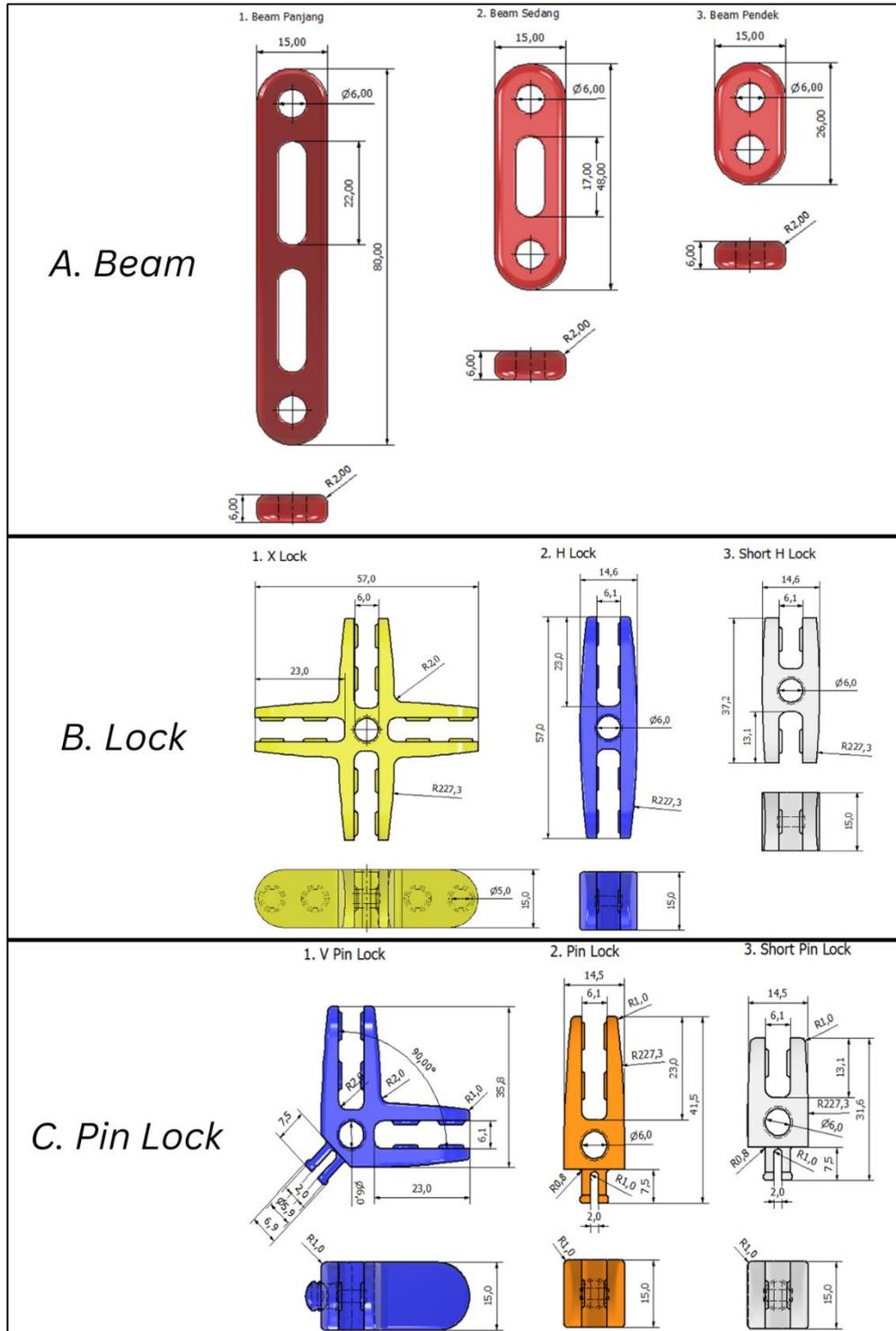
2. *Lock*

Komponen *lock* terdiri dari bentuk desain *X Lock*, *H Lock*, dan *Short H Lock*.

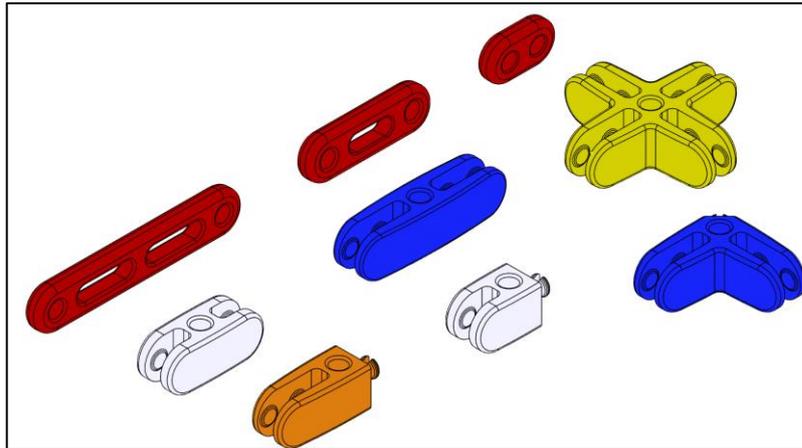
3. *Pin lock*

Komponen *pin lock* terdiri dari bentuk desain *V Pin Lock*, *Pin Lock*, dan *Short Pin Lock*.

Ukuran dimensi dari desain mainan edukasi dapat dilihat pada gambar 3.5. Sementara Model 3D dari seluruh desain mainan edukasi dapat dilihat pada gambar 3.6.



Gambar 3.5 Dimensi desain mainan edukasi



Gambar 3.6 Model 3D mainan edukasi

3.4. Metode Penelitian

Penelitian dilakukan dengan metode yang dimulai dari pemilihan parameter pencetakan, proses manufaktur aditif, pengujian mekanik, hingga analisis data hasil pengujian.

3.4.1. Parameter proses pencetakan

Model 3D CAD spesimen produk penelitian dicetak menggunakan filamen berbahan PLA pada *3D printer* dengan ukuran ekstrusi *nozzle* 0,4 mm. Model 3D tersebut dibuka pada *software slicer* untuk membuat *G-code* menggunakan pengaturan parameter tetap yang ditunjukkan pada tabel 3.4.

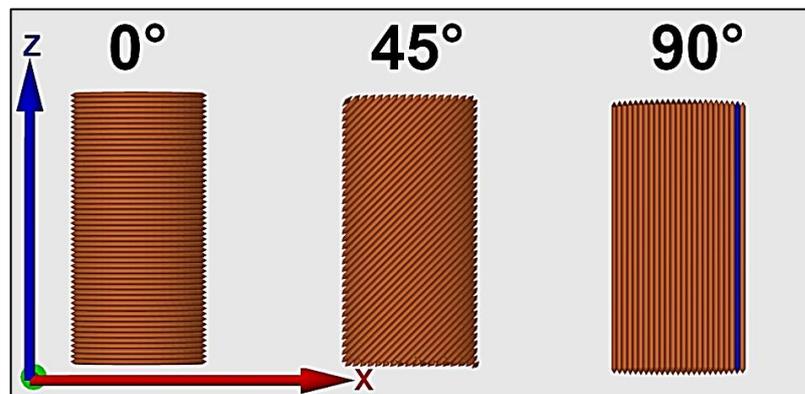
Tabel 3.4 Pengaturan parameter tetap

Parameter	Nilai
Suhu <i>hotbed</i>	60 °C
Kecepatan cetak (Maksimal)	150 mm/s
Akselerasi cetak	3000 mm/s ²
<i>Min. layer time</i>	25 s
<i>Fan speed</i>	100 %
<i>Line width</i>	0,5 mm
<i>Wall loops</i>	2
<i>Top/Bottom shell thickness</i>	1 mm
Pola <i>infill</i>	<i>Gyroid</i>
Arah sudut <i>infill</i>	45°

Parameter proses pencetakan yang divariasikan untuk penelitian ini adalah Suhu cetak, *infill density*, dan *layer height*. Selain itu juga divariasikan parameter orientasi cetak pada sudut 0° , sudut 45° , dan sudut 90° . Sudut 0° yang merupakan sudut normal merupakan orientasi cetak dengan susunan ikatan antar lapisan yang tegak lurus dengan beban penekanan. Sementara sudut 90° memiliki susunan ikatan antar lapisan yang searah dengan beban penekanan. Pengaturan Orientasi cetak yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.7. Pemilihan parameter tersebut didasarkan pada studi literatur serta hasil penelitian yang telah dilakukan peneliti lain. Faktor parameter proses pencetakan dan level yang dipilih dapat dilihat pada tabel 3.5.

Tabel 3.5 Faktor dan level parameter pencetakan

Faktor	Parameter	Level		
		1	2	3
A	Suhu cetak	190 °C	205 °C	220 °C
B	<i>Infill density</i>	10%	30%	50%
C	<i>Layer height</i>	0,12 mm	0,20 mm	0,28 mm
D	Orientasi cetak	0°	45°	90°



Gambar 3.7 Variasi Parameter orientasi cetak

3.4.2. Metode Taguchi

Metode Taguchi digunakan pada penelitian ini untuk mengoptimalkan nilai kekuatan tekan dari variasi parameter proses pencetakan yang diteliti. Pada metode Taguchi, *orthogonal array* digunakan untuk menyesuaikan rata-rata hasil dan mengurangi varian dengan menyusun

faktor-faktor dan tingkatannya. Metode Taguchi dipilih karena memiliki keunggulan dalam mengoptimalkan parameter penelitian secara efisien dan dapat meminimalkan variabilitas hasil penelitian. Penelitian menganalisis parameter proses pencetakan dengan empat faktor dan tiga level yang memiliki derajat kebebasan berjumlah delapan. Sehingga penelitian dapat menggunakan desain *orthogonal array* Taguchi $L_9 (3^4)$ dengan 9 variasi pengaturan parameter proses pencetakan yang dapat dilihat pada tabel 3.6.

Tabel 3.6 Variasi parameter proses

Spesimen	Variasi Parameter			
	Suhu Cetak (°C)	<i>infill density</i> (%)	<i>Layer height</i> (mm)	Orientasi cetak
1	190	10	0,12	0°
2	190	30	0,20	45°
3	190	50	0,28	90°
4	205	10	0,20	90°
5	205	30	0,28	0°
6	205	50	0,12	45°
7	220	10	0,28	45°
8	220	30	0,12	90°
9	220	50	0,20	0°

Dalam metode Taguchi, *signal-to-noise ratio* (*S/N ratio*) digunakan untuk membuat proses lebih kebal terhadap perubahan dalam faktor *noise*. Terdapat tiga jenis *S/N ratio* berdasarkan karakteristik kualitas, yaitu *smaller is better*, *nominal is better*, atau *larger is better*. Dalam pengujian tekan, kekuatan struktur yang semakin tinggi akan semakin baik. Sehingga jenis *S/N ratio* yang digunakan pada penelitian adalah MSD *larger is better* yang memiliki persamaan (7)

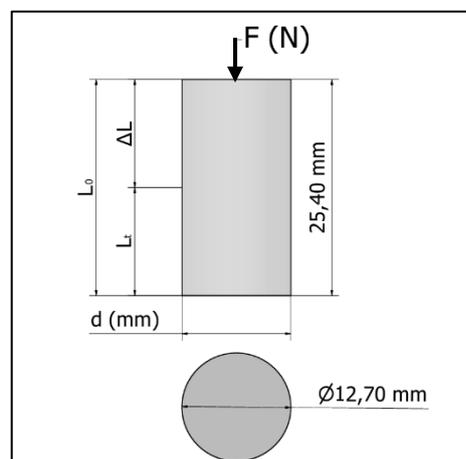
$$S/N = -10 \text{Log}_{10} \left(\frac{1}{y^2} \right) \quad (7)$$

Data *S/N ratio* dari pengujian tekan kemudian dilakukan analisis untuk mengetahui pengaturan parameter proses pencetakan terbaik. Selain itu

diterapkan proses ANOVA untuk mengidentifikasi pengaruh yang signifikan dari parameter yang diteliti terhadap kekuatan tekan spesimen pencetakan. Uji konfirmasi dilakukan untuk membandingkan nilai prediksi dengan nilai aktual kekuatan tekan spesimen yang dicetak menggunakan parameter proses pencetakan terbaik. Komputasi analisis metode Taguchi dilakukan menggunakan *software spreadsheet* dengan validasi pada *software* Minitab.

3.4.3. Pengujian tekan

Pengujian tekan dilakukan untuk mengukur pengaruh parameter proses pencetakan yang divariasikan terhadap kekuatan tekan produk *3D printing*. Nilai kekuatan tekan yang dihasilkan menentukan parameter proses pencetakan terbaik. Pengujian tekan dilakukan dengan menggunakan adaptasi spesimen berdasarkan standar ASTM D695 yang memiliki bentuk berupa silinder dengan diameter 12,7 mm dan tinggi 25,4 mm. Skema proses pengujian tekan dan dimensi spesimen yang dicetak untuk dilakukan pengujian tekan dapat dilihat pada gambar 3.8.

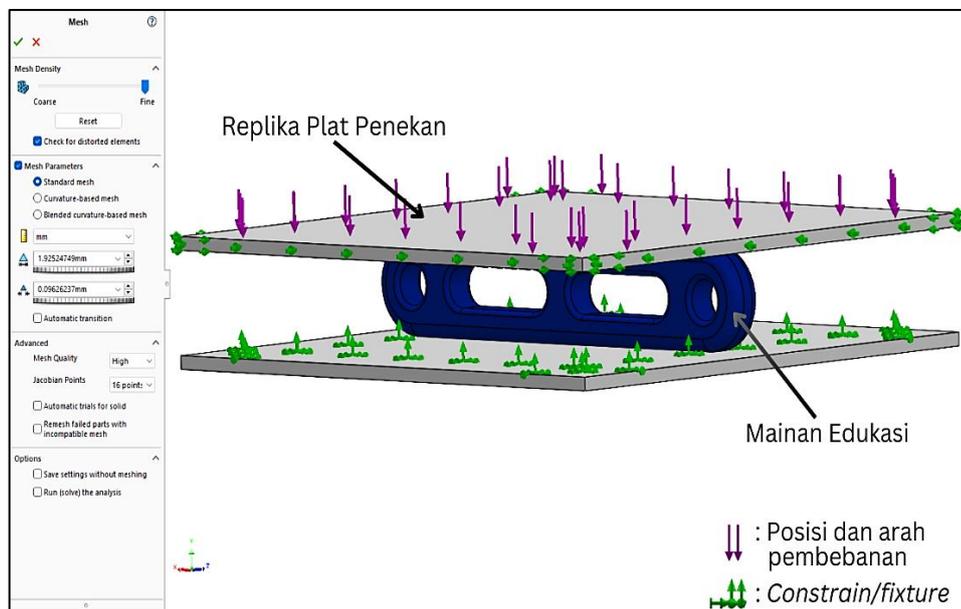


Gambar 3.8 Dimensi spesimen uji tekan

3.4.3. Simulasi FEA

Seluruh bagian desain mainan edukasi struktur dilakukan simulasi pembebanan tekan dengan *finite element analysis* untuk mengetahui batas beban yang dapat diterima oleh struktur mainan edukasi. Simulasi

FEA dijalankan menggunakan data sifat mekanik berdasarkan hasil dari uji konfirmasi parameter proses pencetakan terbaik untuk mengoptimalkan kekuatan tekan. Simulasi FEA dilakukan dengan memberikan asumsi beban awal yang akan menghasilkan tegangan Von Mises dan nilai *factor of safety* pada hasil *mesh* desain komponen mainan edukasi struktur. *Mesh density* model 3D untuk simulasi FEA dibuat dengan pengaturan paling halus (*fine*). Skema proses simulasi pembebanan tekan pada desain mainan edukasi dapat dilihat pada gambar 3.9.



Gambar 3.9 Skema proses simulasi FEA.

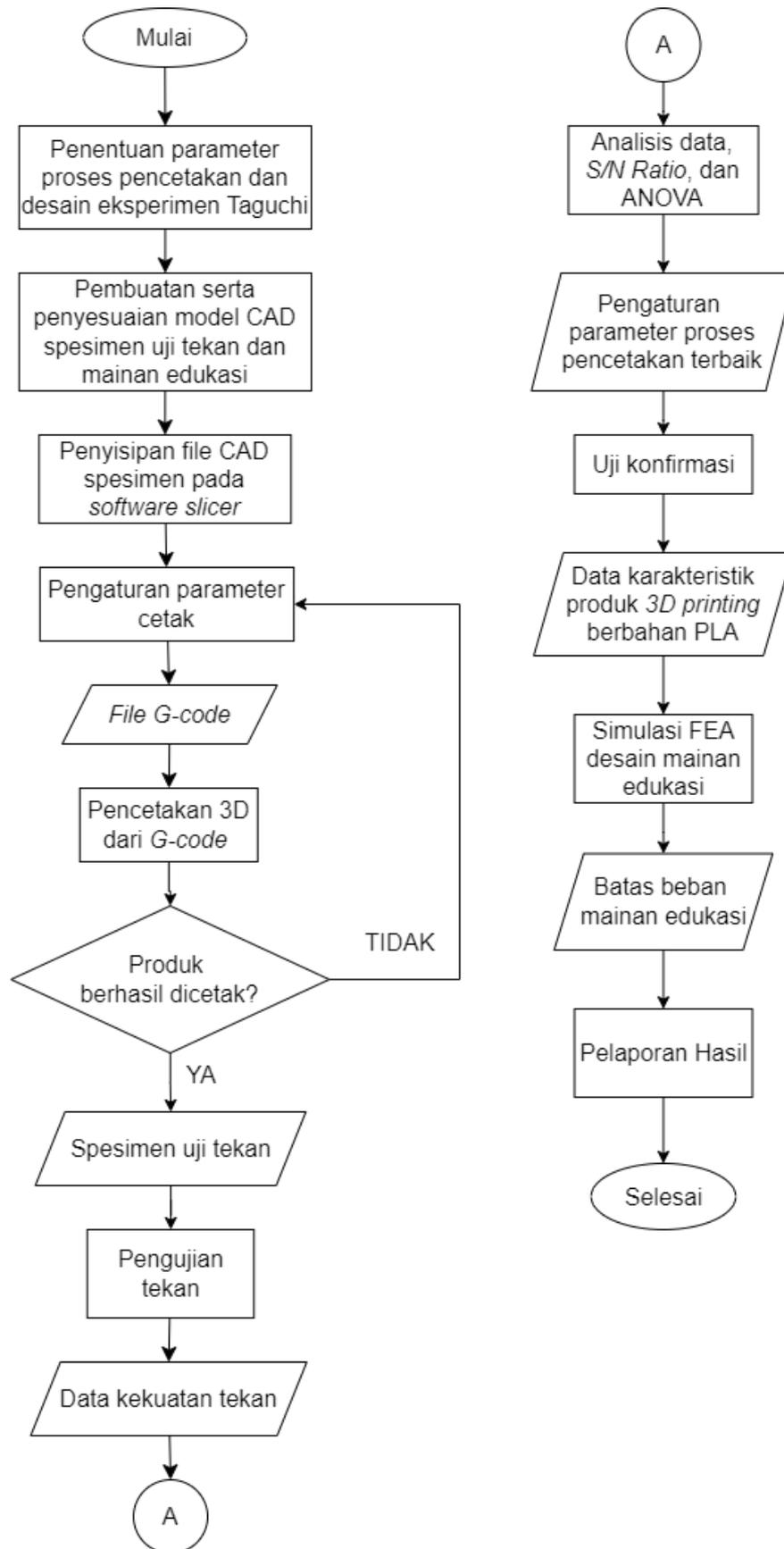
3.5. Prosedur Pelaksanaan

Prosedur pelaksanaan yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan parameter proses pencetakan dan desain eksperimen Taguchi
2. Membuat desain CAD spesimen uji tekan ASTM D695 dan menyesuaikan desain CAD mainan edukasi.
3. Membuka file CAD spesimen uji tekan pada *software slicer*.

4. Melakukan pengaturan parameter proses pencetakan sesuai dengan *orthogonal array* desain eksperimen Taguchi yang telah ditentukan.
5. Membuat *file G-code* spesimen uji tekan.
6. Mengirim *file G-code* ke dalam sistem mesin *3D print*.
7. Menyiapkan mesin *3D printer* dengan melakukan kalibrasi serta membersihkan tempat pencetakan dan *nozzle*.
8. Melakukan proses pencetakan 3D spesimen pengujian tekan.
9. Mengamati proses pencetakan hingga spesimen berhasil dicetak.
10. Melepas spesimen pengujian dari *hotbed* pencetakan.
11. Mencatat jenis spesimen sesuai dengan variasi parameter yang digunakan.
12. Mengulangi langkah 4-11 menggunakan variasi parameter cetak lainnya.
13. Melakukan pengujian tekan pada spesimen penelitian.
14. Mencatat data yang diperoleh dari pengujian tekan.
15. Melakukan penghitungan *S/N ratio* dan respon kekuatan tekan.
16. Melakukan proses ANOVA.
17. Menentukan parameter proses pencetakan terbaik berdasarkan analisis hasil pengujian tekan.
18. Melakukan proses pencetakan spesimen uji konfirmasi menggunakan pengaturan parameter proses pencetakan terbaik.
19. Melakukan uji konfirmasi.
20. Menganalisis hasil uji konfirmasi.
21. Mencari nilai *yield strength*, *young modulus*, dan *ultimate strength* hasil uji konfirmasi sebagai data karakteristik material pada simulasi FEA
22. Melakukan simulasi FEA pada desain mainan edukasi.
23. Menentukan batas beban pada desain mainan edukasi.
24. Melaporkan hasil penelitian.

Adapun alur pelaksanaan penelitian dapat dilihat pada gambar 3.10.



Gambar 3.10 *Flowchart* penelitian.

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Simpulan yang dihasilkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Parameter proses pencetakan terbaik untuk mengoptimalkan kekuatan tekan produk pencetakan 3D berbahan *polylactic acid* adalah dengan pengaturan parameter suhu cetak 205 °C, *infill density* 50%, *layer height* 0,12 mm, dan orientasi cetak 90°. Pengaturan parameter tersebut dapat menghasilkan kekuatan tekan hingga 13,496 MPa.
2. Parameter proses pencetakan yang memiliki pengaruh secara signifikan terhadap kekuatan tekan produk pencetakan 3D berbahan *polylactic acid* adalah *infill density* dengan kontribusi 53,06%, diikuti oleh parameter orientasi cetak dengan kontribusi 38%. Parameter *layer height* memiliki pengaruh kurang signifikan dengan kontribusi 8,20%. Sementara parameter suhu cetak memiliki pengaruh yang terendah terhadap kekuatan tekan dengan kontribusi 0,74%.
3. Hasil numerik batas beban mainan edukasi dengan pendekatan simulasi beban statis *finite element analysis* menggunakan data sifat mekanik hasil uji konfirmasi produk pencetakan 3D berbahan *polylactic acid* untuk mengukur tegangan komponen mainan edukasi saat diberikan beban tekan, dengan hasil nilai tegangan yang berbeda disebabkan oleh perbedaan bentuk struktur dan dimensi setiap komponen mainan edukasi. Batas beban tertinggi dicapai pada komponen *X lock* dengan nilai 2947 N. Sementara batas beban terendah dicapai pada komponen beam pendek dengan nilai 290 N.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Disarankan untuk melakukan penelitian pada variasi parameter proses pencetakan lainnya seperti ukuran *nozzle*, arah *infill*, atau suhu lingkungan untuk mendapatkan pengaturan parameter yang lebih optimal.
2. Disarankan untuk melakukan pengujian pada produk hasil pencetakan 3D menggunakan jenis uji mekanik lainnya seperti pengujian *fatigue* untuk mengetahui ketahanan produk pencetakan 3D terhadap beban yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR PUSTAKA

- Abbas, T.F., Mansor, K.K., and Ali, H.B. 2022. The Effect of FDM Process Parameters on the Compressive Property of ABS Prints. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)* Vol. 49 No. 7
- Bakhtiari, H., Nikzad, M., and Tolouei-Rad, M. 2023. Influence of Three-Dimensional Printing Parameters on Compressive Properties and Surface Smoothness of Polylactic Acid Specimens. *Polymers* 2023, 15, 3827
- Budianto, Y.T., Soewono., A.D., dan Darmawan, M. 2020. Rancang Bangun Mesin 3D Printer dan Laser Engraver Berbasis Arduino. *Jurnal Rekayasa Mesin* 15(3): 183-190.
- Cahyati, S. dan Aziz, H.R. 2021. The Influence of Different Slicer Software On 3d Printing Products Accuracy And Surface Roughness. *Rekayasa Mesin* 12(2): 371-380.
- Chen, R., Baich, L. Lauer, J., Senesky, D.G., and Manogharan, G. 2022. Effects of Part Orientation, Printer Selection, and Infill Density on Mechanical Properties and Production Cost of 3D Printed Flexural Specimens. *Manufacturing Letters* 33: 549–560
- Djami, R.J. dan Sunaryo, S. 2014. Metode Pcr-Topsis Untuk Optimasi Taguchi Multirespon. *Statistika* 2(1): 46-55

- Egwutvongsa, S. 2021. Toys for Children With the Concept of STEM: Study of the Result from Children's Playing Activities. *Journal for the Education of Gifted* 9(2): 77-90.
- Fish, J. and Belytschko, T. 2007. *A First Course in Finite Elements*. John Wiley & Sons, Ltd. Sussex Barat. 313 Hlm.
- Gawel A., Kuciel, S., Liber-Knec, A., Mierzwinski, D. 2023. Examination of Low-Cyclic Fatigue Tests and Poisson's Ratio Depending on the Different Infill Density of Polylactide (PLA) Produced by the Fused Deposition Modeling Method. *Polymers* 2023, 15, 1651.
- Hanon, M.M. and Zsidai, L. 2021. Comprehending the role of process parameters and filament color on the structure and tribological performance of 3D printed PLA. *Journal of Materials Research and Technology* 15: 647-660
- İleri, Ç. İ., Erşan, M., Kalaça, D., Coşkun, A. Göksun, T., and Küntay, A.C. 2023. Malleability of spatial skills: bridging developmental psychology and toy design for joyful STEAM development. *Front. Psychol.* 14:1137003
- Kumar, A.V., Teja, D.R., Reddy, K.N., and Madhusudhan, K. 2022. A Review paper on 3D-Printing and Various Processes Used in the 3D-Printing. *IJSREM* 6(5)
- Kantaros, A., Soulis, E., Petrescu, F.I.T., and Ganetsos, T. 2023. Advanced Composite Materials Utilized in FDM/FFF 3D Printing Manufacturing Processes: The Case of Filled Filaments. *Materials* 2023, 16, 6210
- Martínez-García, A., Sandoval-Pérez, I., Ibáñez-García, A., Pernías-Peco, K., Varela-Gandia, F.J., and Galvañ-Gisbert, J. 2019. Influence of process parameters of different additive manufacturing techniques on mechanical

properties and safety of customised toys. *Procedia Manufacturing 41*: 106–113

Permana, D. dan Djatmiko, M.D. 2021. Perancangan Mainan Anak Usia 3-6 Tahun Berbasis Metode Pendidikan Montessori. *e-Proceeding Institut Teknologi Nasional – Bandung*.

Pernet, B., Nagel, J.K., and Zhang, H. 2022. Compressive Strength Assessment of 3D Printing Infill Patterns. *Procedia CIRP 105*: 682-687

Rouf, S., Raina, A., Haq, M.I.U., Naveed, N., Jeganmohan, S., and Kichloo, A.F. 2022. 3D printed parts and mechanical properties: Influencing parameters, sustainability aspects, global market scenario, challenges and applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research 5*: 143-158.

Roy, R.K. 2010. *A Primer on the Taguchi Method*. Second Edition. Society of Manufacturing Engineers. Michigan. 291 Hlm.

Šljivic, M., Pavlovic, A., Kraišnik, M., and Ilić, J. 2019. Comparing the accuracy of 3D slicer software in printed end-use parts. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 659 01208*

Soejanto, I. 2009. *Desain Eksperimen Metode Taguchi*. Cetakan Pertama. Graha Ilmu. Yogyakarta. 292 Hlm.

Stříteský, O., Průša, J., and Bach, M. 2019. *Basics of 3D Printing with Josef Prusa*. Prusa Research a.s. Praha. 62 Hlm.