

TUGAS AKHIR - TM234802

**ANALISA PENGARUH RASTER ANGLE DAN ORIENTASI
PRINTING TERHADAP AKURASI STRUT DIAMETER
DAN SIFAT MEKANIK *LATTICE BODY CENTERED
CUBIC***

MUHAMMAD SALMAN
NRP 5007201101

Dosen Pembimbing
Dr.Eng.Yohanes, S.T., M.Sc.
NIP 198006272012121003

Program Studi Sarjana

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2024



TUGAS AKHIR - TM234802

**ANALISA PENGARUH *RASTER ANGLE* DAN ORIENTASI
PRINTING TERHADAP AKURASI STRUT DIAMETER
DAN SIFAT MEKANIK *LATTICE BODY CENTERED
CUBIC***

MUHAMMAD SALMAN
NRP 5007201101

Dosen Pembimbing
Dr.Eng.Yohanes, S.T., M.Sc.
NIP 198006272012121003

Program Studi Sarjana

Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2024



FINAL PROJECT - TM234802

**ANALYSIS OF THE EFFECT OF RASTER ANGLE AND
PRINTING ORIENTATION ON THE STRUT DIAMETER
ACCURACY AND MECHANICAL PROPERTIES OF BODY
CENTERED CUBIC LATTICE STRUCTURE**

MUHAMMAD SALMAN
NRP 5007201101

Advisor

Dr.Eng.Yohanes, S.T., M.Sc.
NIP 198006272012121003

Study Program Undergraduate

Department of Mechanical Engineering
Faculty of Technology and Industrial System
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2024

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISA PENGARUH *RASTER ANGLE* DAN ORIENTASI *PRINTING* TERHADAP AKURASI STRUT DIAMETER DAN SIFAT MEKANIK *LATTICE BODY CENTERED CUBIC*

TUGAS AKHIR

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

Oleh: **MUHAMMAD SALMAN**

NRP. 5007201101

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr.Eng. Ir. Yohanes, S.T., M.Sc., IPM, AEng.
2. Dr.Ir. Agus Sigit Pramono, DEA.
3. Dr.Ir. Muhammad Nur Yuniarto, S.T., IPM, AEng.
4. Dr.Eng.Ir. Sutikno, S.T., M.T., IPM, AEng.

Pembimbing

Penguji

Penguji

Penguji

SURABAYA
Juli, 2024

APPROVAL SHEET

ANALYSIS OF THE EFFECT OF RASTER ANGLE AND PRINTING ORIENTATION ON THE STRUT DIAMETER ACCURACY AND MECHANICAL PROPERTIES OF BODY CENTERED CUBIC LATTICE

FINAL PROJECT

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

By: **MUHAMMAD SALMAN**

NRP. 5007201101

Approved by Final Project Examiner Team:

1. Dr.Eng. Ir. Yohanes, S.T., M.Sc., IPM, AEng.
2. Dr.Ir. Agus Sigit Pramono, DEA.
3. Dr.Ir. Muhammad Nur Yuniarto, S.T., IPM, AEng.
4. Dr.Eng.Ir. Sutikno, S.T., M.T., IPM, AEng.

Advisor

Examiner

Examiner

Examiner

SURABAYA
July, 2024

PERNYATAAN ORISINALITAS


Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Muhammad Salman / 5007201101
Program studi : S1
Dosen Pembimbing / NIP : Dr.Eng.Yohanes, S.T., M.Sc., IPM, AEng. /
198006272012121003

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Analisa Pengaruh *Raster Angle* dan Orientasi *Printing* terhadap Akurasi Diameter Strut dan Sifat Mekanik *Lattice Body Centered Cubic*” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

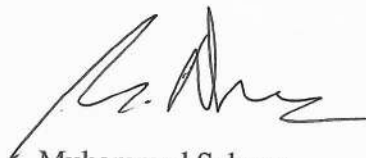
Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Mengetahui
Dosen Pembimbing


Dr.Eng. Yohanes, S.T.,
M.Sc., IPM, AEng.
NIP. 198006272012121003

Surabaya, 6 Agustus 2024

Mahasiswa


Muhammad Salman

NRP. 5007201101

ABSTRAK

ANALISA PENGARUH RASTER ANGLE DAN ORIENTASI PRINTING TERHADAP AKURASI DIAMETER STRUT DAN SIFAT MEKANIK LATTICE BODY CENTERED CUBIC

Nama Mahasiswa / NRP : Muhammad Salman / 5007201101
Departemen : Teknik Mesin FTIRS - ITS
Dosen Pembimbing : Dr.Eng. Yohanes, S.T., M.Sc.

Abstrak

Metode 3D printing *Fused Deposition Modeling* (FDM) membentuk lapisan demi lapisan plastik yang dilelehkan, menciptakan cacat proses berupa *step layer*. Cacat ini pada strut struktur *lattice* dapat mengurangi sifat mekanik *lattice* dan membuat perbedaan geometri diameter dan area kontak yang lebih sempit. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan *orientation angle* dan *raster angle* yang mendekati hasil uji struktur *lattice* BCC ideal. Dalam penelitian ini, digunakan dua variasi *orientation angle* (0° dan 15°) serta dua variasi *raster angle* (0° dan 45°). Metode eksperimen *compression test* diterapkan untuk mengukur beban maksimum, kekakuan, dan energi ketahanan dari *lattice*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi *orientation angle* dan *raster angle* terbaik dalam hal beban maksimum adalah 101 N pada orientasi 0° dan *raster angle* 45° . Struktur yang paling kaku memiliki nilai kekakuan tertinggi sebesar 95,26 N/mm pada orientasi 0° dan *raster angle* 45° , sedangkan serapan energi terbanyak tercatat sebesar 63,61 N.mm. Analisis fenomena deterministik dilakukan untuk mengetahui manakah yang lebih kuat menahan beban geser dan beban normal. Hasil ini juga mendekati hasil dengan geometri CAD. Penelitian ini memberikan rekomendasi yang berharga bagi *design engineer* dalam mengaplikasikan struktur *lattice* pada berbagai bidang. Dengan memahami pengaruh sudut pencetakan dan *raster angle* terhadap sifat mekanik, struktur yang lebih kuat dan efisien dapat dirancang, meminimalkan dampak negatif dari cacat proses.

Kata kunci: Beban Kompresi, *Lattice Structure*, Metode Elemen Hingga

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE EFFECT OF RASTER ANGLE AND PRINTING ORIENTATION ON THE DIAMETER STRUT ACCURACY AND MECHANICAL PROPERTIES OF BODY CENTERED CUBIC LATTICE

Student Name / NRP : **Muhammad Salman / 5007201101**
Department : **Teknik Mesin FTIRS - ITS**
Advisor : **Dr.Eng. Yohanes, S.T., M.Sc.**

Abstract

The Fused Deposition Modeling (FDM) 3D printing method forms layer by layer of melted plastic, creating process defects known as step layers. These defects in the lattice structure struts can reduce the mechanical properties of the lattice and create differences in diameter geometry and narrower contact areas. This research aims to determine the orientation angle and raster angle that approach the ideal BCC lattice structure test results. In this study, two variations of orientation angles (0° and 15°) and two variations of raster angles (0° and 45°) were used. The compression test experimental method was applied to measure the maximum load, stiffness, and energy absorption of the lattice. The results showed that the best combination of orientation angle and raster angle in terms of maximum load was 101 N at 0° orientation and 45° raster angle. The stiffest structure had the highest stiffness value of 95.26 N/mm at 0° orientation and 45° raster angle, while the highest energy absorption was recorded at 63.61 N.mm. A deterministic phenomenon analysis was conducted to determine which combination better withstands shear and normal loads. These results also closely approach the CAD geometry results. This research provides valuable recommendations for design engineers in applying lattice structures in various fields. By understanding the influence of printing angles and raster angles on mechanical properties, stronger and more efficient structures can be designed, minimizing the negative impact of process defects.

Keywords: Compression Load, Lattice Structure, Finite Element Method

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT, atas berkat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan Laporan “Tugas Akhir” sesuai dengan waktu yang telah ditentukan. Penulis berharap laporan ini dapat bermanfaat bagi para pembaca dan penulis agar dapat memahami pertimbangan apa saja yang dijadikan acuan dalam membuat pernyataan tentang penelitian tugas akhir dan pengumpulan data pada suatu perusahaan 3D *printing* tertentu. Tidak lupa penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan penyusunan laporan ini sehingga dapat terwujud antara lain:

1. Orang tua, ayah dan ibu yang selalu mensupport saya untuk menyelesaikan tugas akhir ini dengan tepat waktu.
2. Bapak Dr.Eng. Yohanes, S.T. sebagai dosen pembimbing yang selalu sabar membimbing saya hingga dipenghujung tugas akhir ini.
3. Kevano Danendra, Diyon Adi Santoso, dan Panser yang membantu saya untuk menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik.
4. Kak Alexander Kevin, mentor yang selalu mensupport saya untuk menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik dan tepat waktu.
5. Para circle “Konco-konco kentel”, Bang Jek, Epindonta, Zavier, Rizqullah Irwanto, Aan Dz, Farid Asyam yang selama 4 tahun perkuliahan membantu akademik saya agar baik hasilnya dan mengajarkan tentang prospek karier kedepan seperti apa.
6. Para teman teman Lab MBP dan Dosen Lab MBP yang selalu percaya dengan saya bahwa saya mampu sampai titik dimana skripsi ini selesai.
7. Angkatan M63 Mesin ITS yang selalu solid dengan semangat *uber alles* nya.
8. Mas Haikal Pramono, Alumni PWK ITS angkatan 2019, yang selalu percaya dengan kemampuan saya di ITS, dari awal masuk ITS.
9. Mas Affin, Alumni Teknik Industri ITS angkatan 2019 yang juga menjadi mentor saat di kampus dan pasca kampus.
10. Darussalam Fattah, anak yang selalu ambis untuk mensupport saya untuk meraih yang lebih baik kedepannya.
11. Mantan teman seperjuangan UTBK 2020 dari SMAN 4 Surabaya, Farrel, Handy, Hanif Setiawan yang masih menyempatkan support satu sama lain walaupun umur pertemanannya sudah lama.
12. Mantan saya dan mantan perempuan yang pernah saya kagumi, terima kasih sudah dibolehkan putus hubungan tahun lalu, terima kasih sudah *dighosting*. Akhirnya saya mampu untuk lulus tepat waktu dari Teknik Mesin ITS.
13. Dan teman-teman saya yang lain yang tidak sempat disebutkan satu-persatu, terima kasih sudah bertemu dalam hidup saya.

Penulis berharap dengan penulisan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dan memberikan informasi kepada pembaca. Karena keterbatasan penulis, kritik dan saran yang membangun sangat diperlukan demi kesempurnaan laporan ini.

Surabaya, Juli 2024

Muhammad Salman

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	1
APPROVAL SHEET	ii
PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
ABSTRAK.....	iv
ABSTRACT.....	5
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	x
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	2
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Hasil Penelitian Terdahulu	3
2.2 Energy Capacity	3
2.3 Stress-Strain	4
2.4 Safety Factor	5
2.5 Stiffness	6
2.5 Finite Element Method	7
2.6 ANSYS Software	10
BAB 3 METODOLOGI	12
3.1 Diagram Alir Tugas Akhir	13
3.2 Jenis Penelitian yang Digunakan	13
3.3 Pendekatan Penelitian	14
3.4 Desain Penelitian	14
3.5 Identifikasi Masalah	14
3.6 Studi Literatur	15
3.7 Penentuan Data Awal	15
3.7.1 Dimensi <i>Lattice Structure</i>	15
3.7.2 Material <i>Lattice Structure</i>	17
3.8 Pembuatan Geometri Model	17
3.8.1 Gambar CAD	17

3.8.2 3D Printing	18
3.9 FEM Simulation	19
3.9.1 Pemodelan Geometri	19
3.9.2 Pemilihan Model Material	20
3.9.3 Proses <i>Meshing</i>	20
3.9.4 Penentuan Data Awal	21
3.9 Verifikasi Hasil	22
3.10 Metodologi untuk Mencari Mechanical Properties	23
3.10.1 <i>Stiffness Methodology</i>	23
3.10.2 <i>Maximum Load Methodology</i>	24
3.10.3 <i>Energy Capacity Methodology</i>	25
3.10.4 Pengukuran Diameter Ideal VS Diameter <i>as-printed</i>	25
3.11 Rencana Simulasi dan Pengamatan	27
3.12 Analisa dan Pembahasan	27
3.12 Kesimpulan dan Saran.....	28
3.13 Jadwal Kegiatan	28
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	29
4.1 Hasil Data Penelitian.....	29
4.2 Analisa Fenomena	30
4.3 Pengaruh Parameter Printing terhadap Mechanical Properties	32
4.3.1 Pengaruh Raster Angle dan Orientasi Printing terhadap Maximum Load.....	32
4.3.2 Pengaruh Raster Angle dan Orientasi Printing terhadap Stiffness.....	32
4.3.3 Pengaruh Raster Angle dan Orientasi <i>Printing</i> terhadap <i>Energy Capacity</i>	33
4.3.4 Analisa <i>Maximum Load</i> Model Ansys Dengan Eksperimen 3D Printing.....	34
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	35
5.1 Kesimpulan	35
5.2 Saran.....	35

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Hasil 3D <i>printing</i> Menggunakan <i>Lattice Structure</i>	1
Gambar 2.1 Orientasi Posisi 3D <i>Printing</i> FDM Pada kasus <i>Tensile Test</i> 3	
Gambar 2.2 Kurva Stress-Strain	4
Gambar 2.3 Metode untuk mencari Stiffness dengan Menggunakan Gradien	6
Gambar 2.4 Finite Element Method Simulation pada <i>Lattice Structure</i>	7
Gambar 2.5 Prosedur Metode Elemen Hingga	8
Gambar 3.1 Flowchart Penelitian Akhir 13	
Gambar 3.2 Kondisi <i>Lattice Structure</i> pada Orientasi 0 Derajat terhadap Sumbu X	15
Gambar 3.3 Kondisi <i>Lattice Structure</i> pada Orientasi 15 Derajat terhadap Sumbu-X	15
Gambar 3.4 <i>Lattice Body Centered Cubic Solid</i> Ukuran 30x30 mm	18
Gambar 3.5 Hasil Slicing dengan Orientasi 0 Derajat terhadap Sumbu-X.....	18
Gambar 3.6 Hasil 3D <i>Printing</i> dengan Sudut 0 Derajat terhadap Sumbu-X.....	19
Gambar 3.7 Model Beam Geometri Ideal pada Ansys Spaceclaim	20
Gambar 3.8 Tampilan Ansys Untuk Memilih Material	20
Gambar 3.9 Fitur Meshing pada ANSYS 2023 R1.....	21
Gambar 3.10 Hasil Meshing <i>Lattice Structure</i> 3x3 cm.....	21
Gambar 3.11 Pengaturan Boundary Conditions	21
Gambar 3.12 Free Body Diagram <i>Lattice Structure</i>	22
Gambar 3.13 Model <i>Lattice Beam</i> sebelum Dikompressi	22
Gambar 3.14 Model <i>Lattice Beam</i> Setelah Terkompresi	22
Gambar 3.15 Grafik Perbandingan Model ANSYS dengan Model 3D-Printing Orientasi 0-Raster Angle 0	23
Gambar 3.16 Hasil pemrotetan spesimen strut as printed.....	25
Gambar 3.17 Interface Webplotdigitizer	26
Gambar 3.18 Hasil titik-titik pada strutnya.....	26
Gambar 3.19 Hasil Ekesperimen Sementara.....	27
Gambar 4.2 Free Body Diagram Kondisi Ideal ANSYS 30	
Gambar 4.3 Free Body Diagram Kondisi Orientasi 0 Derajat terhadap sumbu-X	31
Gambar 4.4 Free Body Diagram Kondisi Orientasi 15 Derajat terhadap sumbu-X	31
Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Pengaruh Orientasi <i>Printing</i> dan Raster Angle terhadap Maximum Load pada Empat Variasi Berbeda	32
Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Pengaruh Orientasi <i>Printing</i> dan Raster Angle terhadap stiffness pada Empat Variasi Berbeda	32
Gambar 4.7 Grafik Perbandingan Pengaruh Orientasi <i>Printing</i> dan Raster Angle terhadap Energy Capacity pada Empat Variasi Berbeda	33
Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Maximum Load Model ANSYS Dengan Model 3D-Printing...34	

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Lattice Structure Dimensi 1	16
Tabel 3.2 Lattice Structure Dimensi 2	16
Tabel 3.3 Lattice Structure Dimensi 3	16
Tabel 3.4 Lattice Structure Dimensi 4	17
Tabel 3.5 Data Material Properties PLA.....	17
Tabel 3.6 Spesifikasi 3D Printing Creality Ender 3 v2.....	19
Tabel 3.7 Metodologi Koreksi Error Diameter as-printed terhadap Diameter CAD.....	26
Tabel 3.8 Rancangan Penelitian Eksperimental.....	27
Tabel 3.9 Jadwal Kegiatan Penelitian	28

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada umumnya, *lattice structure* juga dikenal sebagai struktur rangka ruang ringan yang termasuk dalam ruang lingkup struktur berpori dan terdiri dari simpul, batang, dan panel (He Gang, 2022). Struktur *lattice* menawarkan kombinasi optimal antara bobot ringan dan kekuatan tinggi, sehingga cocok untuk berbagai aplikasi. Selain itu, struktur *lattice* memiliki kemampuan untuk menyerap energi absorpsi lebih banyak dibandingkan struktur lain (Chang, 2022). Pada era saat ini, *lattice structure* digunakan, khususnya untuk menyusun rangka *socket prosthetic leg* amputasi transtibial (Piyush Rai, 2022). Sebagai penyusun rangka *socket prosthetic leg*, *lattice structure* yang digunakan bisa berbagai macam jenis. Jenis geometri tersebut antara lain, Cubic, FCC, dan BCC. Dari ketiga jenis desain yang umum diatas, yang memiliki sensitifitas baik jatuh kepada jenis geometri *Body Centered Cubic* (BCC).

Desain geometri dari struktur ini dapat dicetak menjadi *prosthetic leg* dengan beberapa metode, mulai dengan metode *Selective Laser Melting* (SLM) hingga *Fused Deposition Modeling* (FDM). Metode *Fused Deposition Modeling* (FDM) merupakan alternatif yang lebih hemat biaya dibandingkan *Selective Laser Melting* (SLM) untuk manufaktur struktur *lattice* disebabkan metode SLM membutuhkan biaya mesin dan material yang lebih tinggi (Merel, 2021). *Fused Deposition Modeling* juga mampu membuat beberapa struktur *lattice* yang akan di manufaktur dan terjangkau (Timothy, 2022). Akan tetapi, metode FDM memiliki kekurangan, yaitu terjadinya *step layer* sehingga menghasilkan cacat produk. Cacat geometri pada struktur jaringan berdampak pada deformasi dan absorpsi energi, yang menyebabkan penurunan sifat mekanik.

Oleh karena itu, penelitian ini akan berkonsentrasi pada pengaruh parameter *printing* dalam struktur *lattice* terhadap sifat mekanik. Dengan metode *Fused Deposition Modeling* (3D Printing), penelitian ini akan meningkatkan pemahaman tentang cara memilih parameter *printing* dalam *lattice structure* yang memiliki kekuatan baik. Penelitian ini bertujuan menemukan posisi *orientation angle* dan *raster angle* terbaik dalam pencetakan struktur *lattice* hingga mendekati bentuk ideal. Hasilnya berpotensi menjadi fondasi pengembangan teknologi 3D printing dengan metode *Fused Deposition Modeling* yang lebih maju.



Gambar 1.1 Hasil 3D *printing* Menggunakan *Lattice Structure*

1.2 Rumusan Masalah

Berikut adalah rumusan masalah dari penelitian yang akan dilakukan:

1. Bagaimanakah pengaruh orientasi printing dan raster angle pada kekuatan, kekakuan, energy capacity pada lattice structure *body centered cubic* dengan sudut printing yang bervariasi?
2. Berapakah sudut *printing* dan *raster angle lattice structure body centered cubic* yang menghasilkan *mechanical properties* mendekati geometri ideal?

1.3 Batasan Masalah

Berikut adalah Batasan masalah yang ditetapkan pada penelitian yang akan dilakukan:

1. Material yang digunakan adalah Polylactic Acid (PLA) *biodegradable* dan mudah didapatkan.
2. Ukuran orientasi printing dan raster angle dibatasi menjadi 4 jenis yang berbeda, 0 derajat terhadap sumbu x - raster angle 0 derajat, 0 derajat terhadap sumbu x - raster angle 45 derajat, 15 derajat terhadap sumbu x - raster angle 0 derajat, dan 15 derajat terhadap sumbu x - raster angle 0 derajat
3. Penelitian dilakukan dengan *compression* melalui eksperimen kompresi dan tipe analisis explicit dynamics dengan model beam dan surface ANSYS 2023 R1 dan Ultimaker Cura
4. Model ANSYS 2023 hanya menjadi verifikasi model Eksperimental
5. Penggunaan lattice structure BCC model sandwich 3 cm x 3 cm
6. Semua komponen lattice structure dianggap *flexible*

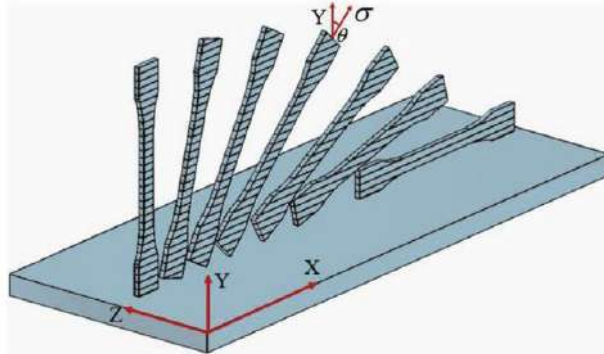
1.4 Tujuan

Berikut adalah tujuan dari penelitian yang akan dilakukan:

1. Mengidentifikasi lattice structure yang memiliki sudut *printing* dan raster angle *mechanical properties* yang mendekati geometri ideal.
2. Mengetahui pengaruh orientation printing-raster angle terhadap kekuatan melalui maximum load, kekakuan (mencari gradien), dan *energy capacity* sebelum puncak pertama.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Hasil Penelitian Terdahulu



Gambar 2.1 Orientasi Posisi 3D Printing FDM Pada kasus *Tensile Test*

Sebuah model teoritis pertama kali dikembangkan untuk memprediksi *Tensile Ultimate Strength* bahan FDM PLA. Pendekatan ini didasarkan pada hipotesis isotropik tembus, teori lapisan klasik, dan kriteria rendemen anisotropik Hill-Tsai. Selanjutnya, eksperimen tarik dilakukan untuk menguji keandalan model ini. Model ini menawarkan dua jenis perhitungan modulus geser dalam bidang, meningkatkan keandalan hasil perhitungan secara keseluruhan.

Spesimen pencetakan, sesuai dengan standar ISO 527-2-2012 untuk uji plastik serbaguna, dicetak dalam tujuh sudut yang berbeda (0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° , 90°) dengan tiga ketebalan lapisan yang berbeda, yaitu 0,1 mm, 0,2 mm, 0,3 mm untuk setiap sudut. Hasil kuadrat residu relatif antara data teoritis dan eksperimental mendekati nol, menunjukkan bahwa model teoritis ini mampu memprediksi kekuatan tarik ultimat bahan FDM PLA dengan akurat untuk semua sudut dan ketebalan yang diuji. Selain itu, temuan menunjukkan bahwa kekuatan tarik ultimat cenderung berkurang dengan penurunan sudut pencetakan atau peningkatan ketebalan lapisan.

Model teoritis dan metode eksperimental yang dikembangkan dalam penelitian ini juga dapat diterapkan pada bahan pencetakan 3D lainnya yang diproduksi menggunakan teknik FDM atau SLA. (Yao et al., 2019)

Dari hasil penelitian diatas, belum banyak studi yang menjelaskan mengenai penelitian jika dalam kasus 3D printing Lattice Structure. Disinilah ada nya gap, sehingga penulis mencoba untuk mengangkat topik penelitian pengaruh sudut printing terhadap hasil *lattice structure*.

2.2 Energy Capacity

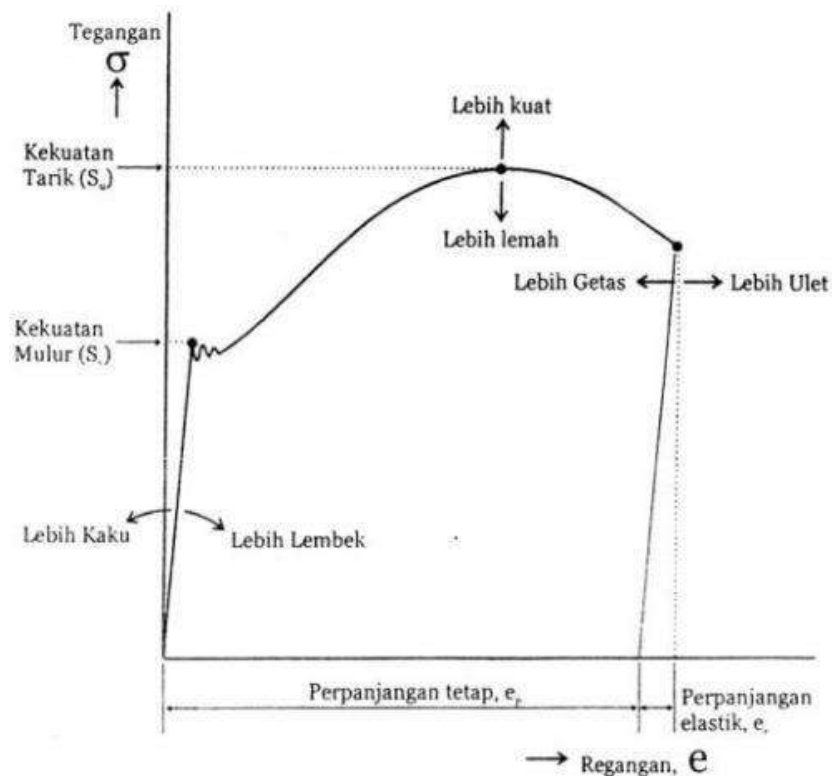
Penyerapan energi adalah proses yang digambarkan sebagai area di bawah kurva perpindahan-beban. Berdasarkan definisi penyerapan energi, nilai rata-rata beban, bersama dengan nilai beban maksimum yang terjadi adalah faktor yang menentukan kemampuan material untuk menyerap energi. Penyerapan energi dibagi menjadi 2 jenis, yaitu penyerapan energi (EA) dan energi absorpsi spesifik (SEA). Untuk energi absorpsi dapat dirumuskan sebagai berikut,

$$EA(\delta) = \int_0^{\delta} F(\delta)d\delta \quad (2.1)$$

Sementara itu, SEA adalah seberapa besar area di bawah kurva perpindahan-beban ketika material berinteraksi dengan pelat atas selama proses deformasi. Dengan kata lain, SEA adalah total energi yang diserap per unit massa. (Li et al., 2021) Berikut merupakan formula dari Energi Absorpsi,

2.3 Stress-Strain

Suatu struktur akan mengalami perubahan dalam bentuk, ukuran, atau deformasi setelah mendapatkan beban eksternal. Perpanjangan atau elongasi adalah istilah untuk struktur yang bertambah besar. Sebaliknya, pemendekan atau kontraksi adalah istilah untuk struktur yang berkurang besar. Jika suatu struktur mengalami deformasi normal dari masing-masing elemennya, struktur tersebut berada dalam kondisi kekakuan, atau kondisi kekakuan. Sebuah material akan tahan terhadap energi tarik atau tekan jika energi tersebut tidak melebihi energi karakteristik material tersebut. Deformasi pada bahan dapat dibagi menjadi dua jenis. Yang pertama adalah deformasi elastik, yang berarti bahwa bahan akan terdeformasi tetapi dapat kembali ke bentuk awalnya, seperti yang dilakukan oleh struktur mikro. Deformasi plastik juga terjadi, yang disebut sebagai deformasi plastik. Artinya, saat material mencapai deformasi plastik, material tersebut tidak dapat kembali ke bentuk semula atau bentuk awalnya. Untuk komponen tegangan pada suatu elemen kubus umum dinyatakan sebagai berikut:



Gambar 2.2 Kurva Stress-Strain

Tingkat deformasi yang terjadi pada suatu objek dipengaruhi oleh bentuk, dimensi, beban, dan jenis bahan yang digunakan. Ketika kita memeriksa bagian deformasi yang lebih kecil, kita dapat melihat strain, yang merupakan perubahan relatif dalam bentuk volume kecil. Perubahan seperti ini biasanya digunakan untuk menunjukkan tingkat tekanan atau stres yang ada saat bekerja pada materi tersebut. Pada grafik diatas, terdapat Gambar 2.5 yang menunjukkan hubungan antara tegangan dan strain. Setiap titik pada kurva menunjukkan modulus elastisitas atau ketegaran bahan, dan bahan.dengan modulus elastisitas yang rendah cenderung lebih rentan terhadap kerusakan. Sampai titik kekuatan pelepasan, deformasi yang disebabkan oleh beban awal tidak dapat diperbaiki atau menjadi permanen.

Tingkat deformasi yang terjadi pada suatu objek dipengaruhi oleh bentuk, dimensi, beban, dan jenis bahan yang digunakan. Ketika kita memeriksa bagian deformasi yang lebih kecil, kita dapat melihat strain, yang merupakan perubahan relatif dalam bentuk volume kecil. Perubahan seperti ini biasanya digunakan untuk menunjukkan tingkat tekanan atau stres yang ada saat bekerja pada materi tersebut. Pada grafik diatas, terdapat Gambar 2.5 yang menunjukkan hubungan antara tegangan dan strain. Setiap titik pada kurva menunjukkan modulus elastisitas atau ketegaran bahan, dan bahan.dengan modulus elastisitas yang rendah cenderung lebih rentan terhadap kerusakan. Sampai titik kekuatan pelepasan, deformasi yang disebabkan oleh beban awal tidak dapat diperbaiki atau menjadi permanen.

Menurut Hibbler (2018), ada dua jenis strain: normal, yang terjadi karena pemanjangan, dan shear, yang terjadi karena pergeseran dua permukaan. Ketika suatu objek mengalami beban aksial, itu memanjang dari panjang awal (L_0) menjadi panjang akhir (L). Ini dikenal sebagai strain normal yang dirumuskan sebagai berikut,

$$\epsilon = \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad (2.2)$$

2.4 Safety Factor

Insinyur perlu memastikan keamanan dari desain yang dibuat. Jika dilihat dari sisi keteknikan, desain yang diajukan harus mampu menahan beban lebih dari spesifikasi yang sudah ditentukan sejak awal (Hibbler, 2018) Terdapat beberapa alasan mengapa perlu melakukan hal tersebut. Alasan pertama yaitu masalah fabrikasi dari part yang sangat memungkinkan mengalami kesalahan pada pengukuran ataupun pada saat assembly. Alasan kedua yaitu sangat mungkin adanya beban external yang tidak diduga- duga seperti getaran yang tidak diketahui, beban dampak, ataupun beban yang muncul secara tidak sengaja yang tidak diperhitungkan pada desain awal. Alasan ketiga yaitu dikarenakan adanya factor korosi dan kerusakan akibat cuaca yang mengakibatkan material mengalami kerusakan saat digunakan. Alasan terakhir yaitu terdapat beberapa material yang memiliki variabilitas kekuatan mekanik yang tinggi seperti kayu, cor, dan komposit sehingga perlu adanya kompensasi desain tersebut. Salah satu metode untuk mengetahui beban yang diperbolehkan diberikan pada suatu benda adalah menentukan angka safety factor. Angka ini merupakan hasil dari rasio antara beban gagal material dan beban yang diperbolehkan (*allowable load*),

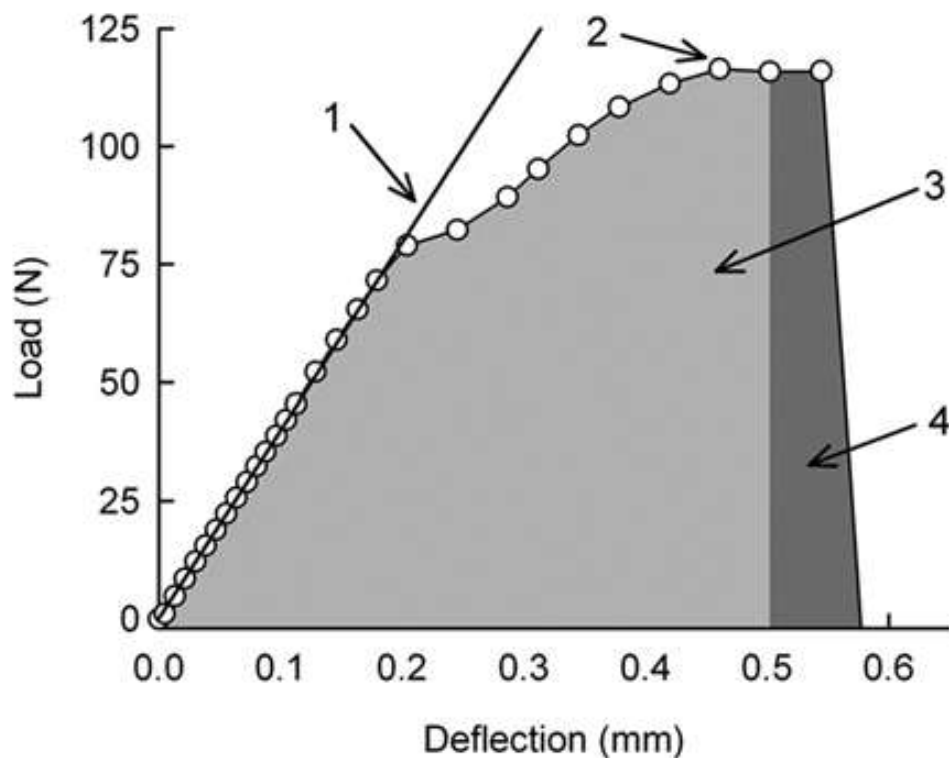
$$Safety\ Factor = \frac{F_{Fail}}{F_{Allow}} \quad (2.3)$$

Dimana F_{fail} diperoleh dari pengujian experimental dari material. Jika beban yang diaplikasikan pada benda mempunyai relasi yang linier terhadap stress maka dapat digantikan menjadi persamaan berikut,

2.5 Stiffness

Dalam penelitian ini, konsep kekakuan material di daerah elastis dianalisis menggunakan pendekatan yang dijelaskan oleh (Hibbler,2017) dalam buku "Mechanics of Materials". Hibbeler menjelaskan bahwa kekakuan (*stiffness*) suatu material dapat dihitung dengan mengalikan modulus Young (E) dengan luas penampang (A), kemudian membaginya dengan panjang asli material (L). Rumus ini dinyatakan sebagai

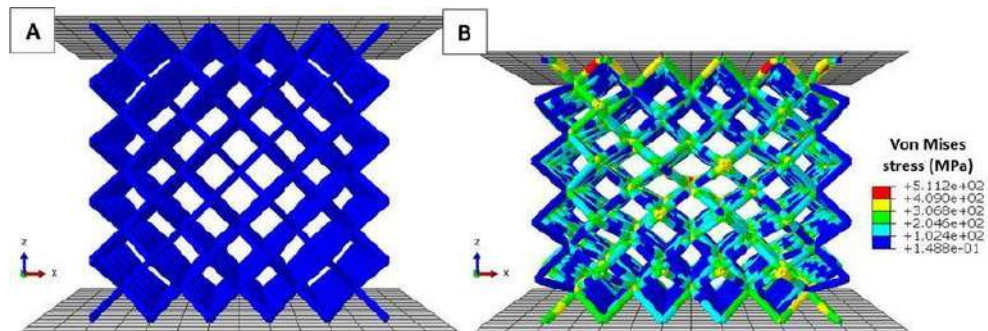
Pendekatan ini memungkinkan perhitungan kekakuan yang akurat pada berbagai konteks teknik sipil dan material, sehingga dapat digunakan untuk menganalisis respons struktur terhadap beban dalam batas elastis. Metodologi ini relevan untuk penelitian ini karena memberikan dasar teoretis yang kuat dalam memahami dan menghitung kekakuan material.



Gambar 2.3 Metode untuk mencari *Stiffness* dengan Menggunakan Gradien pada Daerah Elastis

Ada beberapa faktor yang dapat mempengaruhi faktor keamanan suatu desain, antarlain jenis dan tingkat keparahan beban yang diharapkan, keandalan bahan dan komponen yang digunakan, dan pentingnya komponen atau sistem dalam desain keseluruhan. Misalnya, komponen yang kegagalannya dapat mengakibatkan kerugian finansial yang besar, cedera serius, atau kematian dapat menggunakan faktor keamanan empat atau lebih. Komponen non- kritis umumnya mungkin memiliki faktor desain dua. Analisis risiko, mode kegagalan dan analisis efek, dan alat lain biasanya digunakan. Faktor desain untuk aplikasi tertentu sering diamanatkan oleh undang-undang, kebijakan, atau standar industri

2.5 *Finite Element Method*



Gambar 2.4 *Finite Element Method Simulation* pada *Lattice Structure*

Dalam analisis struktural, *Finite Element Method*, atau metode elemen hingga, digunakan untuk memprediksi respons struktur terhadap beban yang diberikan. Metode FEM membagi struktur yang akan dianalisis menjadi komponen yang lebih kecil, dan kemudian menghitung respons masing-masing komponen secara terpisah. Metode ini digunakan secara luas untuk mengevaluasi kekuatan, stabilitas, dan deformasi struktural dalam berbagai bidang seperti sipil, mesin, dan kimia. Jenis masalah yang dapat diselesaikan dengan FEM mencakup analisis tegangan, seperti truss dan frame, masalah dengan tegangan terkonsentrasi, buckling, dan tumbukan antar objek. Sebelum menerapkan FEM, peneliti harus menentukan geometri model, kondisi batas, beban, dan dukungan yang sesuai. Hasil dari simulasi ini mencakup data seperti tegangan, Kriteria Kegagalan Von Mises, deformasi, dan faktor keamanan, yang membantu peneliti dalam mengevaluasi respons struktur terhadap kondisi-kondisi yang ada dan membuat keputusan yang relevan. Berikut ini adalah langkah-langkah prosedur perhitungan dengan menggunakan Metode Elemen Hingga (MEH)



Gambar 2.5 Prosedur Metode Elemen Hingga

1. Diskretisasi dan pemilihan elemen

Tahap ini adalah pembagian struktur menjadi elemen-elemen kecil yang sederhana dan dihubungkan dengan titik simpul (node). Setelah itu, dipilih elemen seperti model awal struktur. Hal ini dilakukan untuk mempermudah analisa struktur pada elemen-elemen itu.

2. Memilih fungsi pendekatan

Fungsi interpolasi adalah fungsi yang didasarkan pada harga simpul yang mengitari dan mendekati variasi perpindahan elemen. Fungsi polinomial adalah yang paling sering digunakan. Metode dengan fungsi interpolasi ini dipilih karena kesulitan menemukan jawaban tertutup, sehingga digunakan distribusi perpindahan yang merupakan besaran yang tidak diketahui dengan menggunakan fungsi yang harus memenuhi hukum, prinsip, dan syarat batas yang menjadi sifat persoalan saat ini.

3. Menurunkan persamaan matrik kekakuan [k]

Dengan prinsip usaha virtual akan dihasilkan persamaan matrik kekakuan elemen

yang dinyatakan sebagai berikut

$$[k] = h \int [B]^T [C] [B] dA \quad (2.5)$$

dengan :

[k] : matrik kekakuan

elemen : tebal struktur

[B] : matrik konstitutive hubungan regangan dan perpindahan.

[C] : matrik konstitutive hubungan tegangan dan regangan material.

4. Menghitung matrik beban total

Beban yang bekerja didefinisikan menjadi 3 macam, sehingga beban total adalah:

$$R = Q_{NF} + Q_{BF} + Q_T \quad (2.6)$$

dengan :

Q_{NF} : beban pada konsentrasi nodal

Q_{BF} : beban *body force* (akibat beban sendiri)

Q_T : beban traksi (*surface traction*)

5. Merakit elemen menjadi struktur

Perakitan persamaan elemen akan dibawa ke bentuk persamaanglobal, yang prosesnya harus memenuhi sifat konvergen dan sifat sinambung. Salah satunya antara lain : titik-titik yang semula bersebelahan harus tetap bersebelahan satu sama lain setelah elemen dikenai beban. Bentuk persamaan global elemen yaitu :

$$[K] \{q\} = \{R\} \quad (2.7)$$

dengan :

[K] : matrik kekakuan elemen.

{q} : vektor perpindahan simpul.

{R} : matrik beban total.

Setelah matrik kekakuan global diperoleh dan syarat-syarat batasnya dimasukkan maka perpindahan simpul (q) dapat dicari. Suatu syarat batas memberikan informasi bagaimana struktur ditopang dalam ruang, dengan memasukkan nilai perpindahan yang telah ditetapkan sesuai kondisi pada struktur.

6. Mendapatkan perpindahan global

Persamaan global yang telah mendapatkan syarat batas, merupakan sekumpulan persamaan linier yang secara umum dapat ditulis sebagai berikut :

$$k_{1.1} q_1 + k_{1.2} q_2 + \dots + k_{1.n} q_n = R_1$$

$$k_{2.1} q_1 + k_{2.2} q_2 + \dots + k_{2.n} q_n = R_2$$

$$k_{n.1} q_1 + k_{n.2} q_2 + \dots + k_{n.n} q_n = R_n \quad (2.8)$$

Persamaan di atas akan diselesaikan dengan cara eliminasi Gauss untuk mendapatkan besaran-besaran primer yaitu $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$.

7. Mendapatkan besaran sekunder dan interpretasi hasil

Dari besaran pertamanya yang berupa perpindahan, dapat dicari besaran sekunder yang dapat berupa tegangan maupun regangan, dengan menggunakan hubungan antara keduanya. Hubungan tegangan- regangan untuk material isotropik pada kondisi *plane stress* dapat dinyatakan dalam bentuk matrik sebagai berikut:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.9)$$

Sedangkan pada kondisi *plane strain* yaitu:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.10)$$

Hubungan tersebut dapat ditulis dalam bentuk simbol

$$\{\sigma\} = [C] \{\epsilon\} \quad (2.11)$$

berikut : Hubungan regangan dengan perpindahan adalah

$$\{\epsilon\} = [B] \{d\} \quad (2.12)$$

:

Sehingga tegangan dapat dirumuskan sebagai :

$$\{\sigma\} = [C] [B] \{d\} \quad (2.13)$$

Hasil akhir dari perhitungan dengan metode elemen hingga ini berupa harga distribusi tegangan yang akan diplot di sepanjang struktur untuk dianalisis sesuai dengan rumusan masalah yang ada.

2.6 ANSYS Software

Software yang berbasis elemen hingga ini mempunyai kelebihan lain dari penggunaan software ini adalah kemampuan untuk mendiskritisasi model dengan sangat halus, mampu bekerja elemen lebih banyak dan menghasilkan output dengan ketelitian tinggi. ANSYS dapat digunakan untuk menganalisis antara lain : analisis struktural, analisis thermal, analisis listrik, analisis magnetis dan analisis fluida. Secara umum langkah-langkah analisis dengan menggunakan ANSYS dibagi menjadi tiga, yaitu Preprocessing (Proses Awal), Solution (Proses Solusi) dan Postprocessing (Proses Pembacaan Hasil).

1. *Preprocessing* (Proses Awal)

Tahap-tahap penting dalam preprocessing :

- a. Pemodelan Geometri: disini dilakukan proses modeling geometri baik 1D, 2D maupun 3D
- b. Pemilihan tipe elemen: digunakan untuk mendiskritisasikan model yang dibuat. Material properties (input data material yang digunakan).
- c. Meshing (pembagian struktur menjadi elemen-elemen kecil/ elemendiskrit).
Pembuatan model geometri dari benda kerja dapat juga dilakukan dengan *software CAD* yang nantinya diekspor ke dalam ANSYS.

2. Solution (Proses Solusi)

Tahap-tahap penting dalam Solution :

- a. Mendefinisikan analisis solusi yang dipakai (*Analysis Type*)
- b. Memasukkan kondisi batas (*constrain*)
- c. Menerapkan pembebanan
- d. Penyelesaian (*Solving*)

3. General Postprocessing (Proses Pembacaan Hasil)

Hasil analisis dari proses solusi dapat ditampilkan dalam bentuk tabel maupun dalam bentuk *plot result* dan *list result*.

a. Plot result.

Dengan menggunakan (*contour plot*) akan tampak distribusi tegangan atau variable lain pada model sehingga mudah dalam menginterpretasikan informasi yang disajikan. Di sini model digambarkan dengan sebaran warna yang menunjukkan besarnya tegangan yang terjadi.

b. List result.

Hasil analisis dalam bentuk *lis result* berupa tabel yang memberikan informasi secara detil nilai perpindahan, tegangan dan regangan yang terjadi pada tiap node maupun elemennya.

c. Animasi

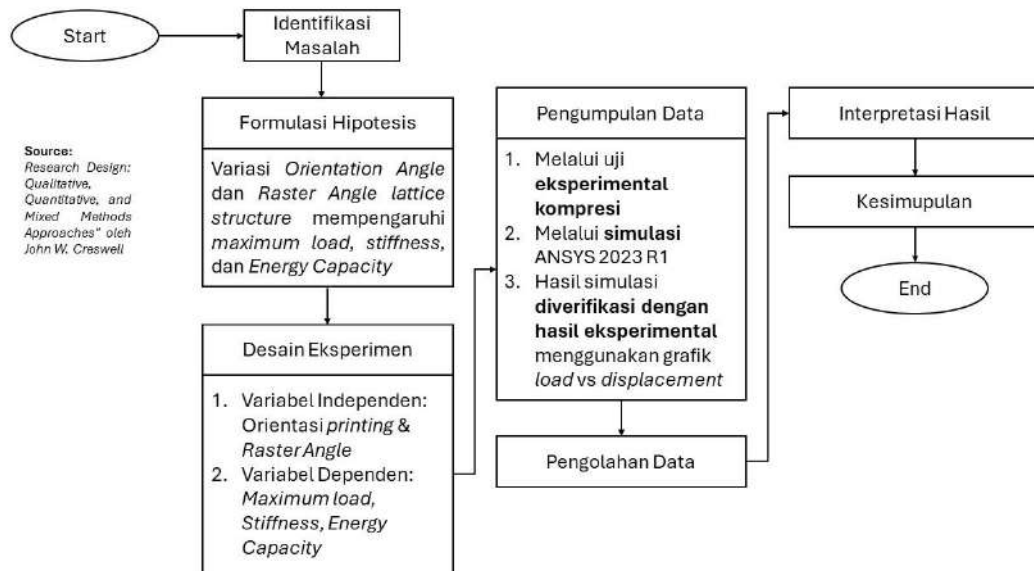
Hasil analisa yang diperoleh juga ditampilkan dalam bentuk simulasi (animasi).

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 3 METODOLOGI

3.1 Diagram Alir Tugas Akhir

Berikut merupakan diagram alir yang digunakan dalam penelitian berikut ini.



Gambar 3.1 Flowchart Penelitian Akhir

Penelitian ini menggunakan diagram alir seperti di atas. Langkah pertama adalah identifikasi masalah. Proses pencetakan 3D-printing menyebabkan struktur berbentuk seperti anak tangga, yang dikenal sebagai step layer, mengakibatkan cacat pada dimensi hasil cetakan. Berdasarkan permasalahan tersebut, hipotesis yang diangkat adalah cacat bawaan dari hasil 3D-printing mempengaruhi tegangan, kekuatan, dan serapan energi lattice structure dengan sudut printing dan raster angle yang berbeda. Desain eksperimen dijelaskan, dimana variabel independennya adalah orientasi printing dan raster angle, sedangkan variabel dependennya adalah *maximum load*, *stiffness*, dan *energy capacity*.

Data yang akan diuji terdiri dari 12 sampel dengan 4 populasi yang berbeda. Data dikumpulkan menggunakan uji eksperimental dan simulasi ANSYS 2023 R1. Hasil dari uji eksperimental dibandingkan dengan hasil simulasi untuk menentukan lattice structure yang hasilnya mendekati. Data diolah dan dianalisis secara deterministik menggunakan free body diagram tiap perbedaan orientasi printingnya. Data tersebut kemudian dibahas dan kesimpulan diambil dari penelitian ini.

3.2 Jenis Penelitian yang Digunakan

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif untuk mengukur dan menganalisis data numerik yang dihasilkan. Metode ini memungkinkan peneliti untuk menguji hipotesis yang telah dirumuskan sebelumnya melalui penggunaan instrumen yang terstruktur, seperti kuesioner atau survei. Data yang dikumpulkan kemudian dianalisis secara deterministik menggunakan *free body diagram analysis*. Penelitian kuantitatif memberikan hasil yang dapat digeneralisasi dan memiliki tingkat kepercayaan yang tinggi karena pendekatannya yang sistematis dan objektif. Sebagai contoh, menurut (Sugiyono, 2019) dalam jurnalnya yang berjudul 'Metode Penelitian Kuantitatif,

Kualitatif, dan R&D,' metode kuantitatif berperan penting dalam menghasilkan data yang valid dan reliabel melalui proses pengukuran yang ketat dan terkontrol.

3.3 Pendekatan Penelitian

Pendekatan penelitian ini dilakukan secara **deduktif**, yaitu dimulai dengan teori atau hipotesis, kemudian dibahas melalui penelitian. Hipotesis yang akan diuji dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Cacat bawaan dari hasil 3D *printing* mempengaruhi tegangan, kekuatan, dan serapan energi *lattice structure* dengan sudut *printing* dan raster *angle* yang berbeda.

3.4 Desain Penelitian

Desain penelitian merupakan kerangka kerja yang digunakan untuk menjawab pertanyaan penelitian secara sistematis. Dalam penelitian ini, desain yang digunakan adalah desain korelasional. Desain korelasional adalah desain penelitian yang bertujuan untuk meneliti hubungan antara dua atau lebih variabel. Penelitian ini mencoba untuk mengetahui sejauh mana variabel-variabel tersebut berkorelasi atau memiliki hubungan satu sama lain. Penting untuk diingat bahwa korelasi tidak sama dengan kausalitas; hanya karena dua variabel berkorelasi, tidak berarti bahwa satu variabel menyebabkan variabel lainnya.

1. Variabel Bebas

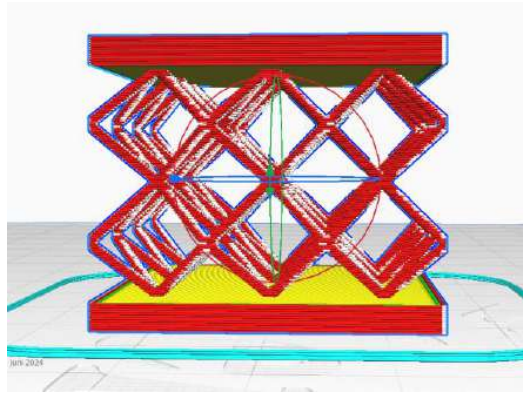
Variabel bebas adalah variabel yang besarnya ditentukan oleh user dan tidak dipengaruhi oleh variabel lain, berfungsi sebagai sebab dalam penelitian. Adapun variabelbebas dalam penelitian ini adalah sudut *printing dan raster angle*.

2. Variabel Terikat

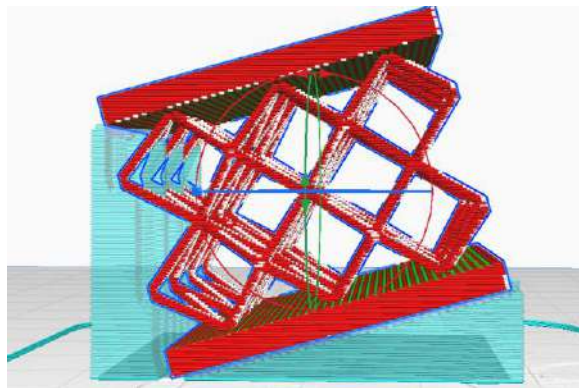
Variabel terikat ialah variabel yang nilainya tergantung dari variabel bebas dan diketahui setelah penelitian dilakukan. Variabel terikat yang diamati dalam penelitian ini adalah *maximum load, stiffness*, dan energy absorpsi.

3.5 Identifikasi Masalah

Dalam proses ini, filamen plastik yang telah dikeluarkan meleleh sambil nozzle menumpuk lapisan demi lapisan dari plastik yang meleleh untuk mencapai bentuk yang diinginkan. Namun, struktur berbentuk jaring yang terbentuk memiliki lapisan berjenjang sesuai dengan pengaturan *printing 3D* karena metode ini melibatkan penambahan lapisan material secara bertahap. Efek ini sering disebut juga *step layer efect*. Efek strut ini menyebabkan dimensi hasil cetakan mengalami cacat dan tidak merata.



Gambar 3.2 Kondisi Lattice Structure pada Orientasi 0 Derajat terhadap Sumbu x



Gambar 3.3 Kondisi *Lattice Structure* pada Orientasi 15 Derajat terhadap Sumbu- X

3.6 Studi Literatur

Pada tahap ini studi literatur dilakukan untuk menunjang penulis dalam menyelesaikan permasalahan terkait Studi Numerik Sensitivitas Tipologi *Lattice Structure* terhadap Cacat 3D *Printing* Dalam Hal kekuatan dan Serapan Energi. Literatur sebagai penunjang yang digunakan yaitu berasal dari artikel, buku, jurnal penelitian sebelumnya. Selain itu, literatur utama yang digunakan adalah mengenai pengaruh sudut 3D printing terhadap *mechanical properties* pada *lattice structure* dan solusi sebelumnya mengenai permasalahan yang sejenis. Untuk metodologi uji, Penulis menggunakan skema milik Piyush Ray sebagai pengujian *lattice structure*.

3.7 Penentuan Data Awal

Setelah dilakukan studi literatur, penulis perlu menentukan data awal yang akan dijadikan dasar pertimbangan simulasi dan analisis kedepannya. Tahap ini dilakukan dengan mencari informasi mengenai Data operasional *lattice structure*, dimensi *lattice structure*, sudut *lattice structure*, material *lattice structure*, dan jenis pengujian *lattice structure*.

3.7.1 Dimensi *Lattice Structure*

Untuk membuat model *Lattice Structure* perlu diketahui data dimensi dari alat tersebut agar dapat membuat model geometri yang sesuai untuk disimulasikan. Berikut adalah dimensi ukuran *Lattice Structure* baik pada kondisi terbuka maupun tertutup

Tabel 3.1 *Lattice Structure* Dimensi 1

Dimension	Nilai ukuran
Panjang <i>Lattice</i>	30 mm
Lebar <i>Lattice</i>	30 mm
Ketebalan Box <i>Lattice</i>	2,5 mm
Sudut <i>printing</i>	0 derajat
Raster Angle	0 derajat
Duration	1 hour 8 minutes

Tabel 3.2 *Lattice Structure* Dimensi 2

Dimension	Nilai ukuran
Panjang <i>Lattice</i>	30 mm
Lebar <i>Lattice</i>	30 mm
Ketebalan Box <i>Lattice</i>	2,5 mm
Sudut <i>printing</i>	0 derajat
Raster Angle	45 derajat
Duration	1 hour 7 minutes

Tabel 3.3 *Lattice Structure* Dimensi 3

Dimension	Nilai ukuran
Panjang <i>Lattice</i>	30 mm
Lebar <i>Lattice</i>	30 mm
Ketebalan Box <i>Lattice</i>	2,5 mm
Sudut <i>printing</i>	15 derajat
Raster Angle	0 derajat
Duration	1 hour 56 minutes

Tabel 3.4 *Lattice Structure* Dimensi 4

Dimension	Nilai ukuran
Panjang <i>Lattice</i>	30 mm
Lebar <i>Lattice</i>	30 mm
Ketebalan Box <i>Lattice</i>	2,5 mm
Sudut <i>printing</i>	15 derajat
Raster Angle	45 derajat
Duration	1 hour 57 minutes

3.7.2 Material *Lattice Structure*

Pemilihan material untuk *lattice structure* diambil berdasarkan data yang didapatkandari *Paper 3D Printing On-Water Sports Boards with Bio-Inspired Core Designs*. Berikut adalah beberapa properties material yang digunakan:

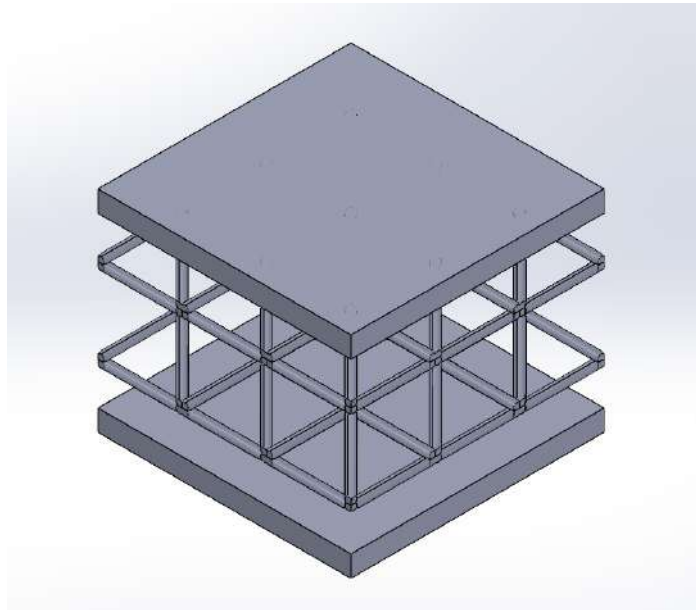
Tabel 3.5 Data *Material Properties* PLA

<i>Mechanical Properties</i>	<i>Material</i>
	Polylactic Acid (PLA)
Density (kg/m ³)	1875
Bulk Modulus (MPa)	2211,7
Shear Modulus (MPa)	683,01
Poisson Ratio	0,36

3.8 Pembuatan Geometri Model

3.8.1 Gambar CAD

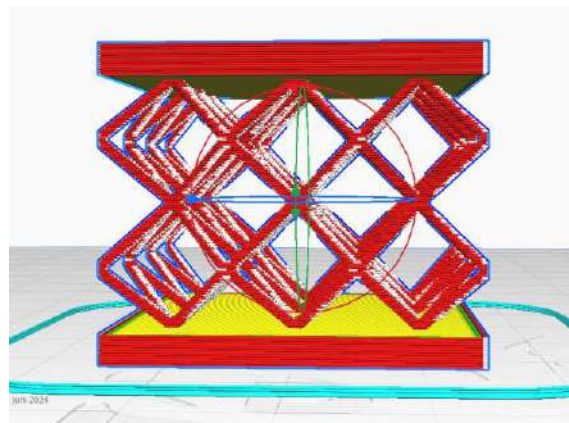
Dalam penelitian ini, penulis menggunakan software CAD untuk menggambarkan unit *lattice*. Pertama penulis membuat kubus dengan ukuran 10x10x10 mm. Lalu, penulis membuat beberapa rekayasa plane guna membuatstrut pada *lattice structure*, sehingga didapatkan hasil seperti berikut.



Gambar 3.4 *Lattice Body Centered Cubic Solid* Ukuran 30x30 mm

3.8.2 3D Printing

Setelah dilakukan pemodelan gambar CAD di dalam software Solidworks, gambar tersebut di import ke dalam bentuk .STL untuk disetting dalam software ultimaker cura. Software tersebut merupakan salah satu software pengaturan sebelum dilakukan 3D printing menggunakan metode FDM. Lalu, disetting menggunakan orientasi sudut 0 derajat untuk percobaan pertama



Gambar 3.5 Hasil *Slicing* dengan Orientasi 0 Derajat terhadap Sumbu-X

Kemudian, dilakukan printing menggunakan jenis 3D printing Creality Ender 3 v2. Spesifikasi tersebut dapat dilihat pada **Tabel 3.6**

Tabel 3.6 Spesifikasi 3D Printing Creality Ender 3 v2

<i>Constant Parameter</i>	<i>Values</i>
Nozzle Diameter (mm)	0,4
Bed Temperature (Celsius)	60
Infill Pattern	Line
Printing Speed (mm/s)	50
Nozzle Temperature (Celsius)	220

Hasil dari 3D printing lattice structure dengan orientasi sudut 0 derajat adalah sebagai berikut



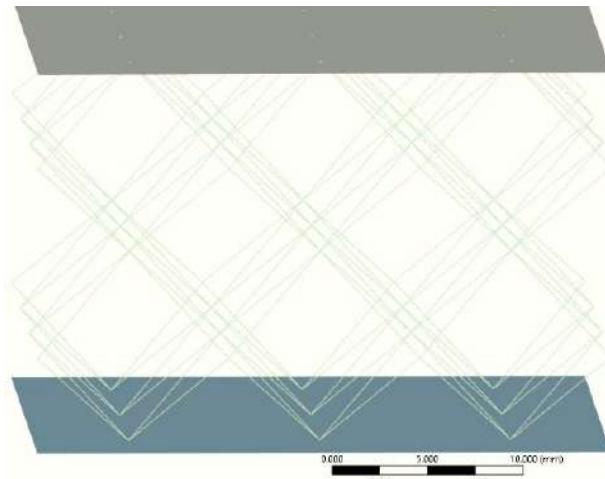
Gambar 3.6 Hasil 3D *Printing* dengan Sudut 0 Derajat terhadap Sumbu-X

3.9 FEM Simulation

Dalam penelitian ini dilakukan simulasi FEM menggunakan ANSYS Workbench 2023 R1 dengan memerhatikan beberapa langkah penting, yaitu permodelan geometri, pemilihan material, pengaturan *connections*, proses *meshing*, dan pengaturan *static structural*.

3.9.1 Pemodelan Geometri

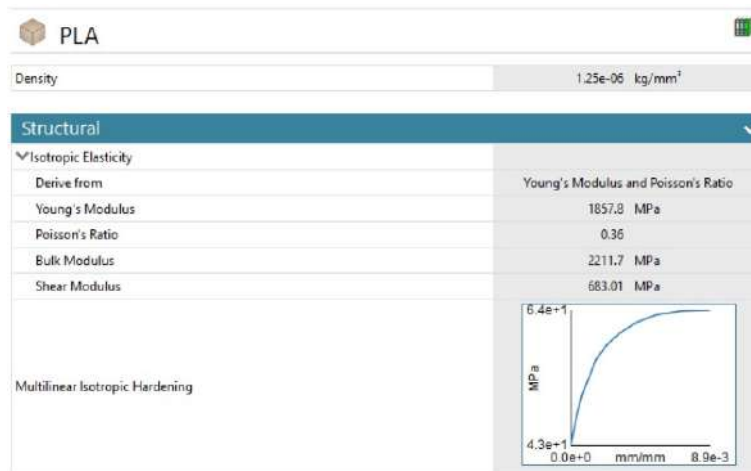
Pada tahap ini dilakukan proses permodelan 3D dari Lattice Structure dengan Space claim 2023. Ini dilakukan untuk memudahkan software ANSYS untuk melakukan *meshing* dan simulasi dibanding dengan *import* file desain 3D dari *software* lainnya. Model geometri *lattice structure* diperoleh dari referensi pada paper Piyush ray dan dimodifikasi dengan adanya *step-layer* untuk pemodelan elemen hingga. Model geometri tersebut diubah menjadi *beam* (pada *lattice structure*) dan *surface* (pada plat atas dan plat bawah) melalui untuk mempersingkat waktu simulasi dan menghindari terjadinya *error* ketika proses *meshing* dan simulasi nantinya.



Gambar 3.7 Model Beam Geometri Ideal pada Ansys Spaceclaim

3.9.2 Pemilihan Model Material

Berdasarkan data material *lattice structure* yang didapatkan dari Paper, kemudian penulis melakukan pemilihan material pada ANSYS Mechanical yang sesuai. Seluruh material yang ada dalam *lattice structure* menggunakan Polyacticacid dengan asumsi Multilinear Isotropic Hardening.



Gambar 3.8 Tampilan Ansys Untuk Memilih Material

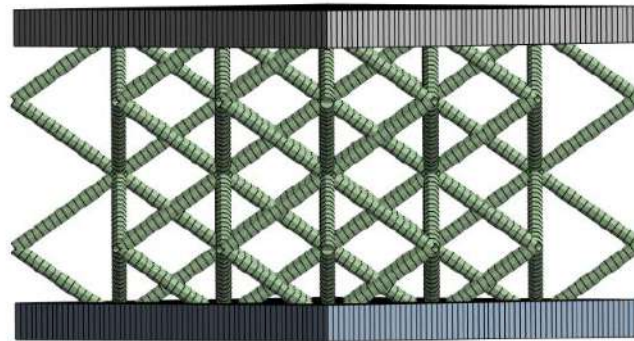
3.9.3 Proses Meshing

Meshing adalah melakukan pembagian benda menjadi elemen-elemen yang lebih kecil yang nantinya akan dilakukan pemodelan simulasi impak dan akan terjadi kontak antara dua material yang bertumbukan. Semakin kecil ukuran mesh, hasilnya akan semakin akurat. Namun dalam kenyataannya, semakin kecil ukuran mesh, maka akan meningkatkan waktu simulasi yang harus dihindari. Maka dari itu, penulis melakukan *meshing* untuk *lattice structure* dengan ukuran 1 mm dengan metode automesh untuk block atas dan bawah.



Gambar 3.9 Fitur Meshing pada ANSYS 2023 R1

Setelah dilakukan *meshing* didapatkan jumlah elemen *lattice structure* yaitu 9673 dan jumlah *nodes* sebanyak 122.56.

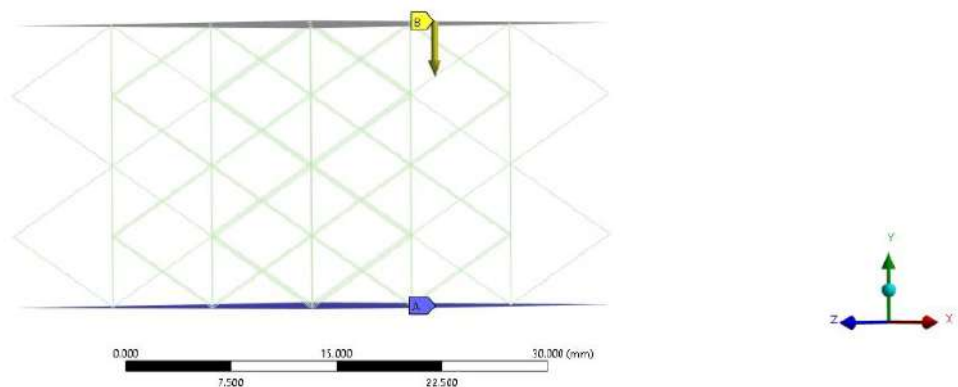


Gambar 3.10 Hasil Meshing Lattice Structure 3x3 cm

3.9.4 Penentuan Data Awal

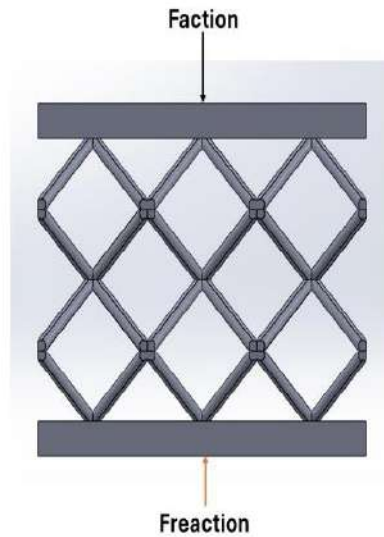
a. *Intial conditions*

Input type yang digunakan adalah berupa *force*. Hal ini karena diasumsikan bebanyang ditopang lattice diumpamakan seperti kondisi saat pemakaian pada *prosthetic leg*.



Gambar 3.11 Penganturan *Boundary Conditions*

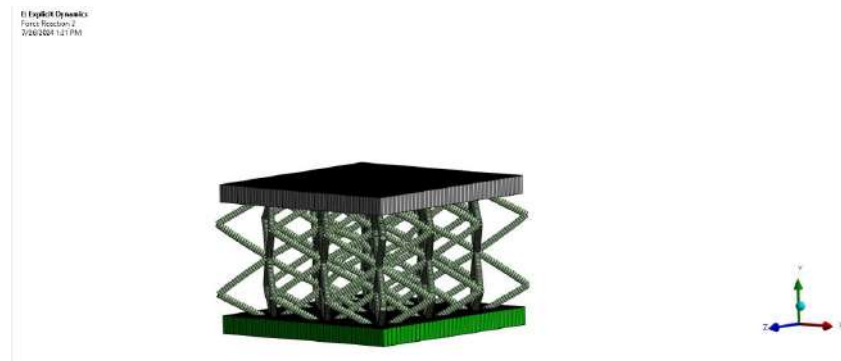
Sehingga, *free body diagram* untuk kasus pengujian *lattice structure* body centered cubic ini adalah sebagai berikut.



Gambar 3.12 *Free Body Diagram Lattice Structure*

3.9 Verifikasi Hasil

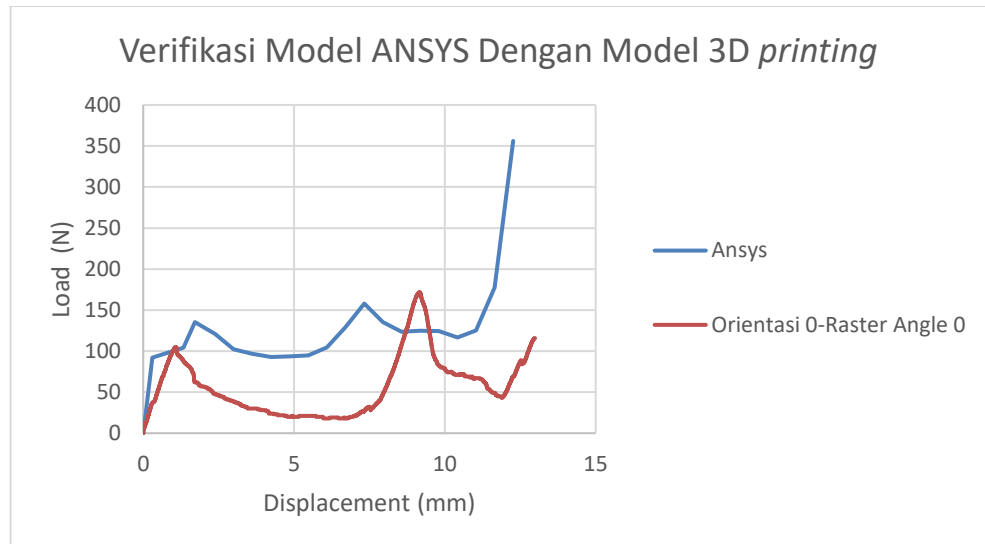
Verifikasi hasil simulasi dilakukan untuk memastikan bahwa model simulasi yang digunakan menghasilkan hasil yang dapat dipercaya dan representatif dari sistem yang diwakilinya. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan pengujian compressive (eksperimental) menggunakan grafik *Load* terhadap *displacement*.



Gambar 3.13 Model Lattice Beam sebelum Dikompressi



Gambar 3.14 Model Lattice Beam Setelah Terkompresi



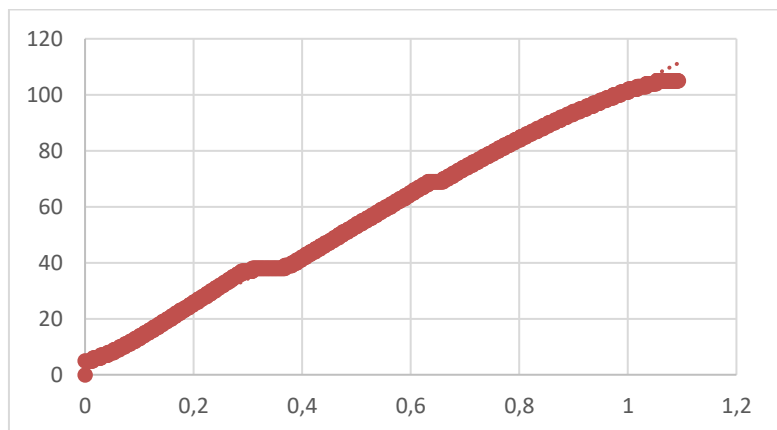
Gambar 3.15 Grafik Perbandingan Model ANSYS dengan Model 3D-Printing Orientasi 0-Raster Angle 0

3.10 Metodologi untuk Mencari *Mechanical Properties*

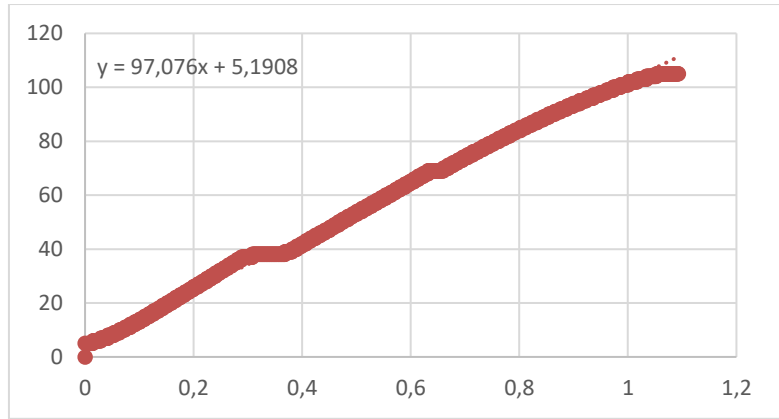
3.10.1 *Stiffness Methodology*

Untuk menentukan stiffness, dapat dijelaskan dengan cara menentukan gradien yang ada dalam kurva load displacement. Berikut merupakan langkah-langkah untuk menentukan gradien.

- Menyiapkan grafik load-displacement yang sudah dipotong sampai batas maximum load



- Mencari gradien lewat persamaan $y = mx+c$ dengan menggunakan excel

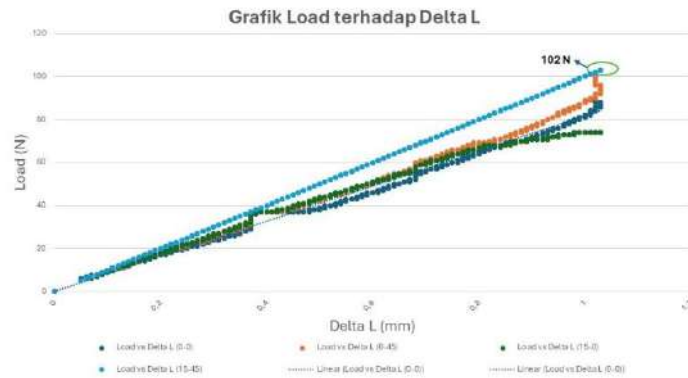


- Sehingga, ditemukan gradien sebesar 97,076 N/mm.
- Lakukan untuk variasi lain sehingga mendapatkan hasil keseluruhan

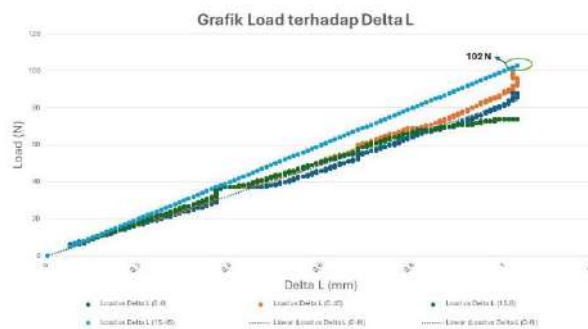
3.10.2 Maximum Load Methodology

Untuk menentukan maximum load, dapat dijelaskan dengan cara menentukan titik tertinggi yang ada dalam kurva load displacement. Berikut merupakan langkah-langkah untuk menentukan maximum load.

- Menyiapkan grafik load-displacement yang sudah dipotong sampai batas maximum load



- Menentukan titik puncak dari hasil plotting grafik yang ada



- Diperoleh titik puncak berada di load maximum sebesar 102N
- Lakukan metode tersebut untuk variasi lainnya

3.10.3 Energy Capacity Methodology

Untuk menentukan Energy Capacity, dapat dijelaskan dengan cara menggunakan persamaan energy absorption dan grafik kurva load displacement. Berikut merupakan langkah-langkah untuk menentukan maximum load. (Li et al., 2021)

- Menentukan maximum load dan displacement, kemudian memasukan kedalam rumus:

$$EA(\delta) = \int_0^{\delta} F(\delta) d\delta$$

- Misalkan, pada kasus orientasi *printing* 0 derajat dan *raster angle* 0 derajat, diketahui bahwa maximum load pada puncak pertama adalah 105 N dan displacement sebesar 1,066 mm. Maka, jika diturunkan dengan rumus, akan menjadi

$$EA(1,066) = \int_0^{1,066} F(1,066) d\delta$$

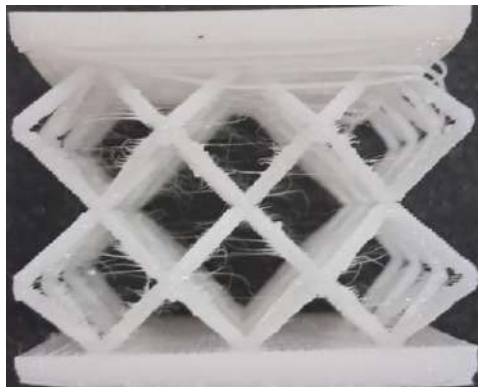
$$EA(1,066) = \frac{1}{2} \times 105 \times 1,066^2$$

$$EA(1,066) = 62,71 \text{ Joule}$$

3.10.4 Pengukuran Diameter Ideal VS Diameter *as-printed*

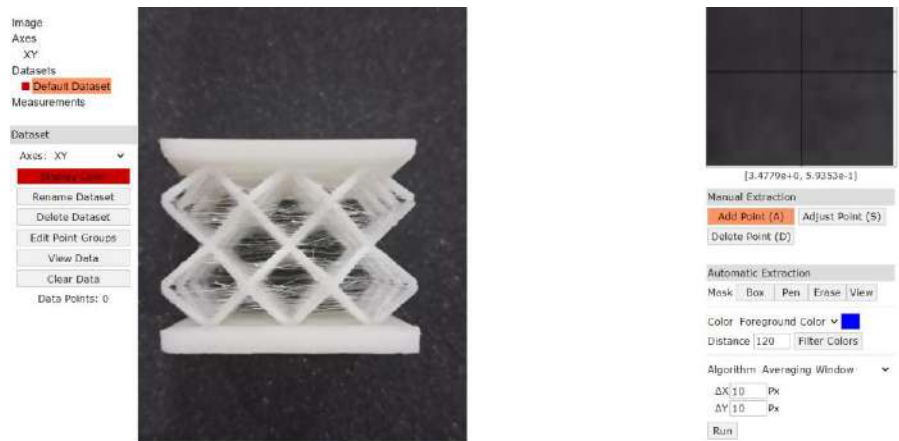
Untuk faktor koreksi eror terhadap geometri ideal, dapat dijelaskan dengan cara mengukur *diameter strut ideal* dengan *diameter strut as-printed* dengan webplotdigitizer. Berikut merupakan langkah-langkah untuk mengukur diameter strut pada webplotdigitizer

- Melakukan pemrotetan specimen strut as-printed dengan kamera handphone



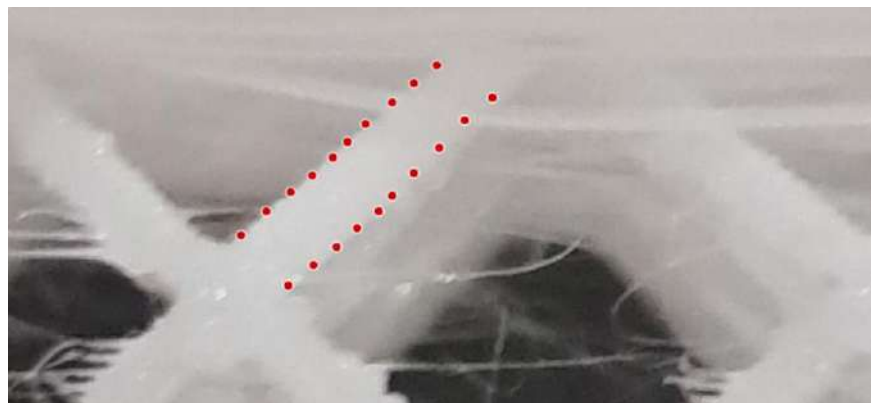
Gambar 3. 16 Hasil pemrotetan spesimen strut as printed

- Melakukan load gambar dan menentukan titik koordinat (0,3) dan (0,3). Lalu mengukur dengan cara melakukan add point.



Gambar 3.17 Interface Webplotdigitizer

- Kemudian akan keluar hasil titik-titik tiap pointnya



Gambar 3.18 Hasil titik-titik pada strutnya

- Hasil titik itu kemudian diolah datanya, sehingga, didapatkan analisa diameter strut as-printed terhadap ideal adalah sebagai berikut

Tabel 3.7 Metodologi Koreksi Error Diameter as-printed terhadap Diameter CAD

Faktor koreksi diameter

	<i>Orientasi printing 0°- Raster Angle 0°</i>	<i>ideal cad diameter</i>
Mean	1,030589529	1
Variance	0,036634041	0
Observations	10	10
Hypothesized Mean Difference	0	
df	9	
t Stat	0,505394341	
P(T<=t) one-tail	0,312713106	

t Critical one-tail	1,833112933
P(T<=t) two-tail	0,625426213
t Critical two-tail	2,262157163

- Berdasarkan pengujian diatas, ada penyimpangan rata-rata diameter orientasi printing 0° - raster angle 0° sekitar 0,03 mm.

3.11 Rencana Simulasi dan Pengamatan

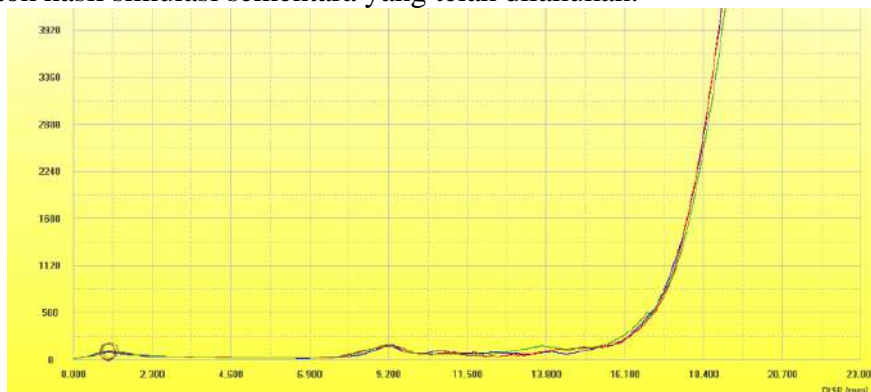
Penelitian ini menggunakan variasi orientasi *printing* dan raster *angle* sebagai variabel bebas. Parameter yang diamati dalam penelitian ini adalah *Max Load*, *stiffness*, dan *Energy Capacity*. Berikut adalah rencana simulasi dan pengamatan yang akan dilakukan dalam penelitian ini.

Tabel 3.8 Rancangan Penelitian Eksperimental

Orientasi Printing	Raster Angle	Max.Load	Stiffness	Energy Capacity
0°	0°			
0°	45°			
15°	0°			
15°	45°			

3.12 Analisa dan Pembahasan

Dari simulasi yang telah dilakukan maka akan mendapatkan hasil tegangan kompresi *lattice structure*, kemudian akan diketahui bagaimana pengaruh beban terhadap *lattice structure*. Untuk membantu dalam proses analisis, dilakukan validasi penelitian ini adalah membandingkan dengan foto bukti fisik kerusakan. Jika data hasil analisis sudah dianggap valid maka akan siap untuk digunakan sebagai rekomendasi ke pada pengguna 3D-Printing. Berikut adalah contoh hasil simulasi sementara yang telah dilakukan.



Gambar 3.19 Hasil Ekesperimen Sementara

Gambar 3.19 merupakan hasil simulasi yang dilakukan pada model 3Dprinting lattice structure dengan orientasi sudut printing sebesar 0° dan raster angle 0° . Didapatkan data tegangan maksimum yang terjadi ternyata tidak melebihi dari kekuatan material sehingga tumbukan dengan model ini tidak dapat menyebabkan retak secara langsung. Namun, berdasarkan korelasi lokasi tegangan maksimum dengan kondisi kerusakan aktual, hal ini sesuai dengan data empiris di mana terjadi retak pada bagian tersebut. Ini artinya model yang digunakan dalam eksperimen ini dapat divalidasi hasilnya untuk kemudian dilakukan analisa lebih lanjut..

3.12 Kesimpulan dan Saran

Kemudian tahapan terakhir adalah penarikan kesimpulan berdasarkan hasil dari analisis data pada penelitian kali ini. Kesimpulan akan diperoleh berdasarkan tujuan penelitian. Terdapat saran yang diajukan penulis untuk pembaca.

3.13 Jadwal Kegiatan

Berikut merupakan jadwal kegiatan dalam penelitian tugas akhir ini yang mengacu pada jadwal akademik Departemen Teknik Mesin FTIRS ITS.

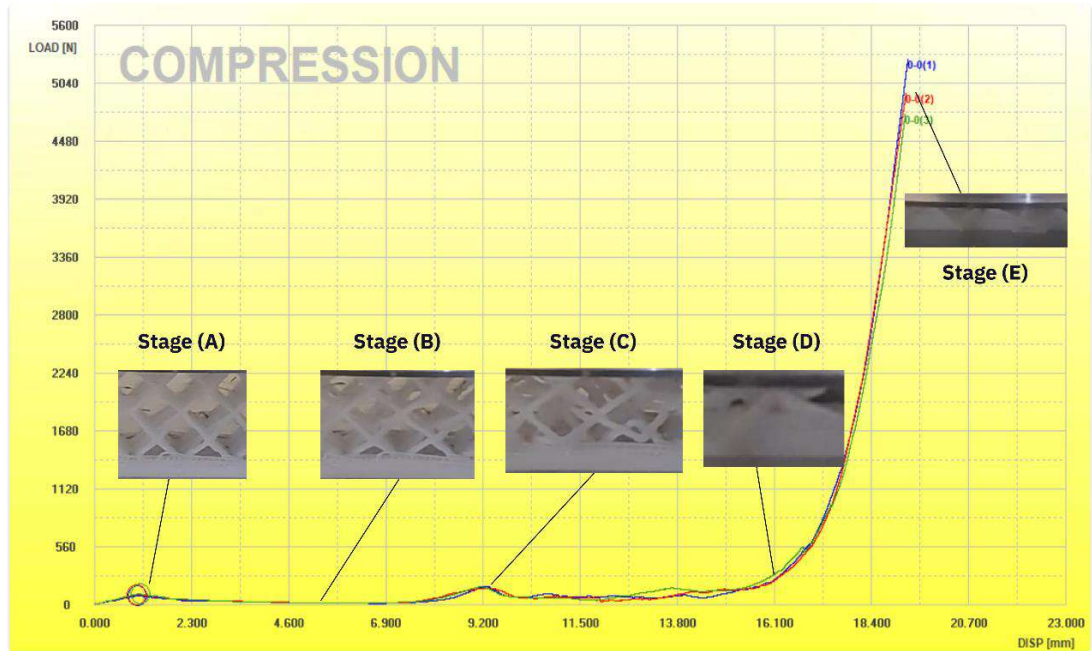
Tabel 3.9 Jadwal Kegiatan Penelitian

No	Kegiatan	Bulan																							
		November				Desember				Januari				Februari				Maret				April			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Studi Literatur	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2	Perumusan Masalah			■	■	■	■	■	■																
3	Penyusunan Proposal					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■								
4	Perolehan Data Empiris									■	■	■	■	■	■	■	■								
5	Simulasi										■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■				
6	Pengambilan Data																	■	■	■	■				
7	Pengolahan Data																	■	■	■	■	■	■	■	■
8	Penyusunan Tugas Akhir																	■	■	■	■	■	■	■	■

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Data Penelitian

Sebagaimana telah dijelaskan pada bab sebelumnya, untuk validasi hasil simulasi yang akan dilakukan, uji kompresi dilakukan sebagai data pembanding. Pengujian dilakukan dengan cara menguji 12 spesimen dengan alat uji kompresi hingga rusak. Adapun data yang diperoleh dari pengujian tersebut dapat dilihat pada **Gambar 4.1**.



Gambar 4.1 Hasil Pengujian 3 Spesimen dengan Kompresi dan Grafik Load terhadap Displacement

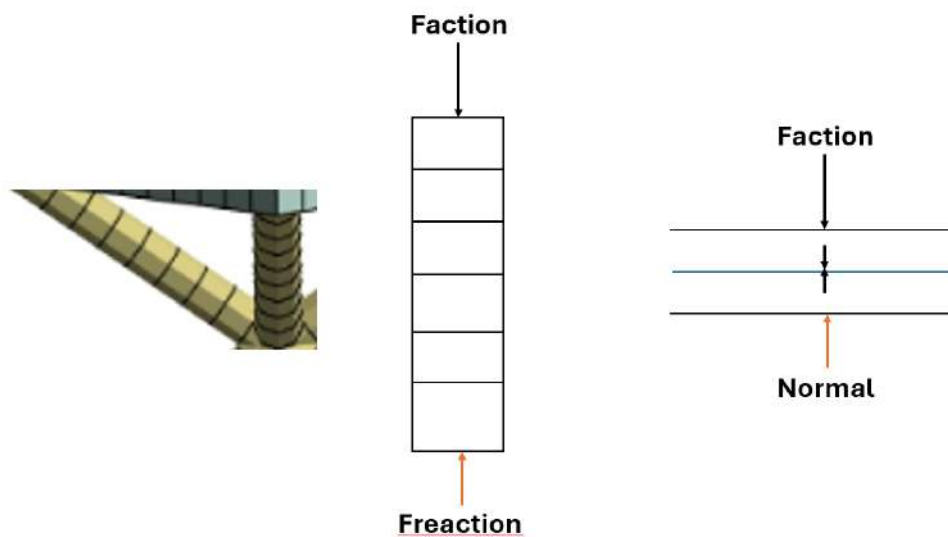
Pada saat pengujian dilakukan terjadi 4 tahap proses yang terjadi pada spesimen. Stage (A) grafik load meningkat menunjukkan spesimen menerima beban kompresi sampai mencapai puncak pertama. Saat periode stage (B), setelah mencapai puncak pertama sisi bagian atas dari spesimen mengalami *fracture* membuat spesimen tidak dapat menahan beban kompresi, akibatnya nilai load menurun. Saat beban kompresi menyentuh bagian lain dari spesimen yang belum mengalami fraktur terjadi peningkatan *load* hingga pada puncak kedua pada grafik, seperti stage (C). Kemudian, spesimen tersebut mengalami deformasi plastis, dan mengalami fraktur kedua. Setelah itu, spesimen tersebut terus berdeformasi kembali hingga naik kembali loadnya seperti pada stage (D). Puncaknya, setelah puncak terakhir, keempat spesimen tersebut mengalami kerusakan saat di stage (E).

Adapun pada pengujian ini peneliti berfokus pada kondisi dimana spesimen atau lattice tidak mengalami kerusakan atau terdeformasi plastis dengan pertimbangan bahwa penerapan dari penelitian ini akan diterapkan pada aplikasi yang tidak menoleransi deformasi plastis, misalnya adalah socket dan Sol sepatu. Maka peneliti berfokus pada data sebelum puncak pertama sebagai data validasi. Data yang ditemukan menunjukkan bahwa load yang diterima oleh setiap spesimen sebelum terdeformasi plastis berkisar 0 N sampai dengan gaya saat mengalami patah total seperti yang ditunjukkan oleh gambar variasi lain dibawah ini.

Orientasi Printing	Raster Angle	Max.Load (N)	Stiffness (N/mm)	Energy Capacity (Joule)
0°	0°	91	88,72	38,3
		101	97,3	54,41
		105	96,065	62,71
0°	45°	105	88,3	51,45
		101	80,54	79,41
		97	87,23	59,97
15°	0°	78	92,887	31,309
		75	102,48	23,00
		74	81,095	60,5
15°	45°	102	96,4	39,71
		105	98,499	59,65
		84	90,91	97,42

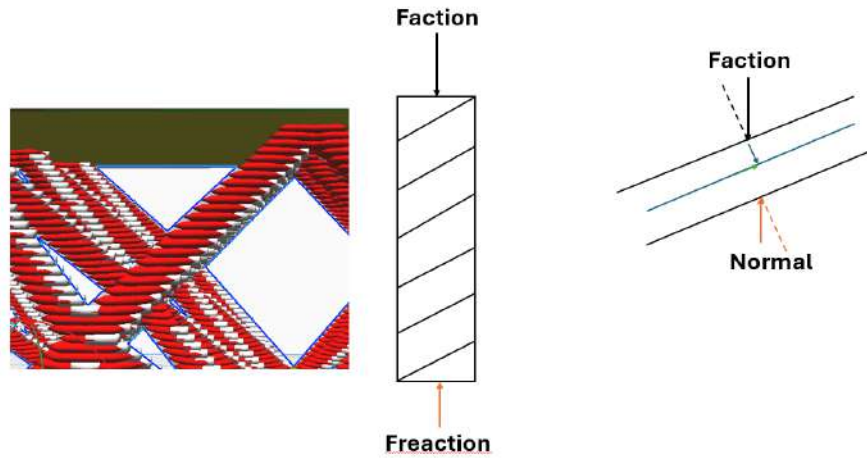
4.2 Analisa Fenomena Distribusi Gaya

Berdasarkan fenomena yang terjadi, terdapat 3 kondisi, yaitu kondisi ideal, kondisi pada orientasi 0 derajat, dan kondisi pada orientasi 15 derajat. Berdasarkan **gambar 4.2**, terlihat bahwa secara step layernya tegak lurus terhadap arah gaya, sehingga lebih kuat menahan beban tekan.



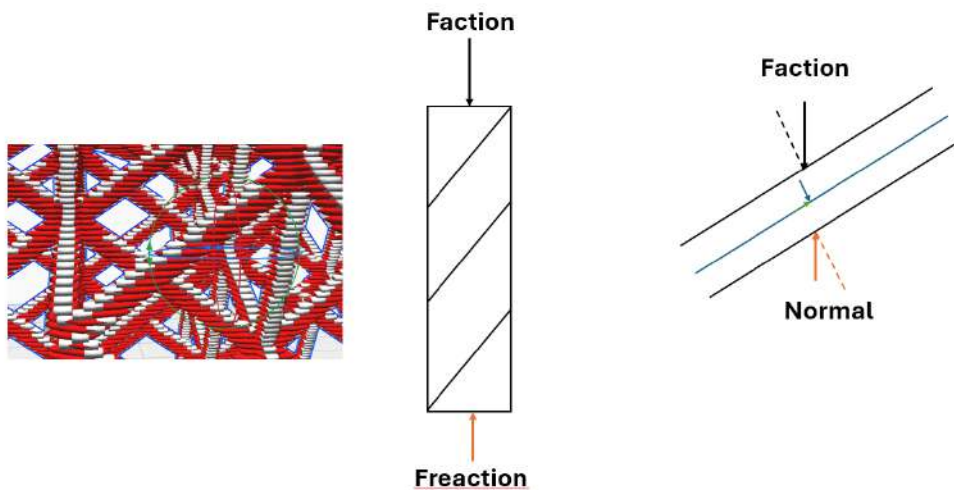
Gambar 4.2 Free Body Diagram Kondisi Ideal ANSYS

Sementara itu, pada **gambar 4.3**, terlihat bahwa secara step layernya tidak tegak lurus terhadap arah gaya, sehingga tidak terlalu kuat menahan beban normal dan beban geser.



Gambar 4.3 *Free Body Diagram* Kondisi Orientasi 0 Derajat terhadap sumbu-X

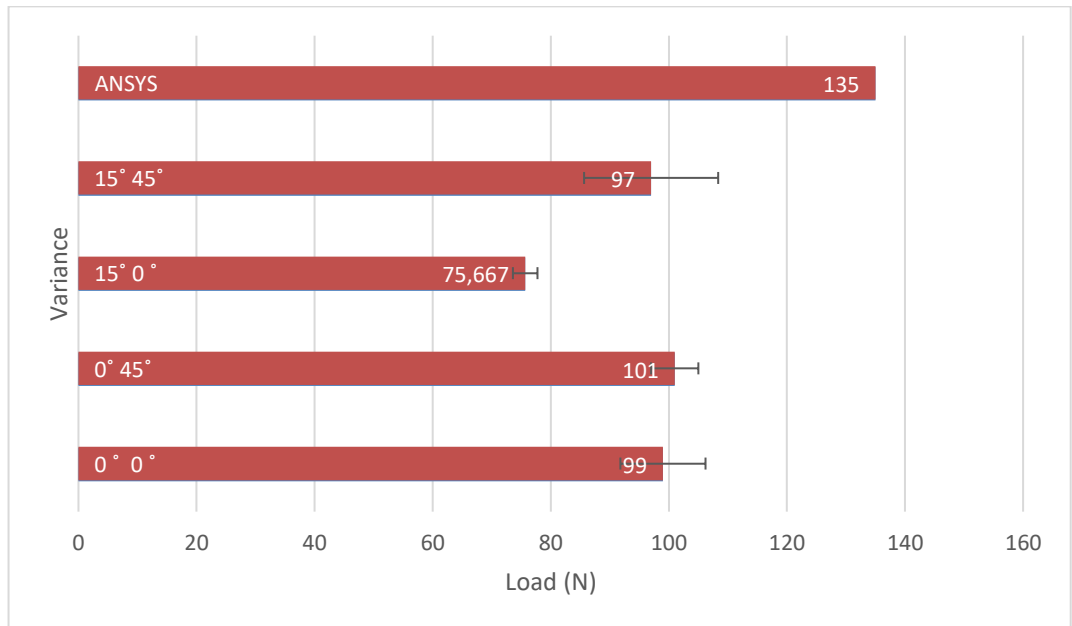
Sementara itu, pada **gambar 4.4**, terlihat bahwa secara step layernya tidak tegak lurus terhadap arah gaya, dengan sudut *printing* lebih besar, sehingga tidak terlalu kuat menahan beban normal dan beban geser.



Gambar 4.4 *Free Body Diagram* Kondisi Orientasi 15 Derajat terhadap sumbu-X

4.3 Pengaruh Parameter Printing terhadap Mechanical Properties

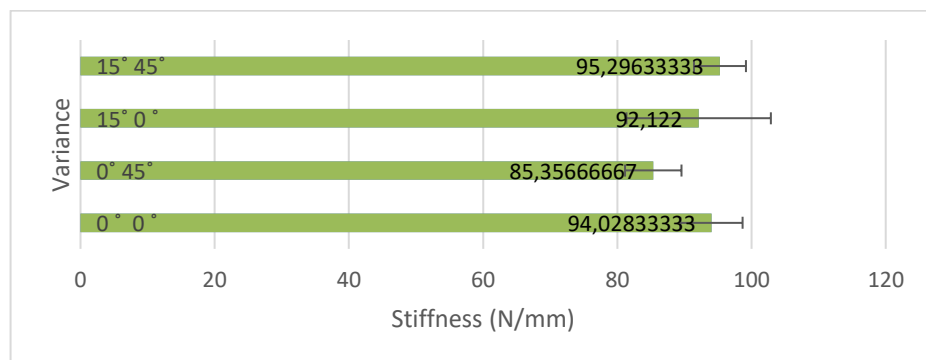
4.3.1 Pengaruh Raster Angle dan Orientasi Printing terhadap Maximum Load



Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Pengaruh Orientasi Printing dan Raster Angle terhadap Maximum Load pada Empat Variasi Berbeda

Analisis kekuatan pada *lattice structure* pada model Body Centered Cubic berukuran 30x30 dilakukan untuk mengetahui manakah orientasi printing dan raster angle yang memiliki ketahanan load yang paling baik. Teori maximum load capacity yang digunakan untuk memprediksi adalah sejauh mana struktur mampu menahan beban kompresi sebelum masuk kedalam peak pertama pada kurva Load terhadap Displacement. Dari keempat hasil diatas, terlihat bahwa orientasi printing 0° terhadap sumbu-x raster angle 45° memiliki ketahanan material yang baik dibandingkan dengan ketiga jenis variasinya, sehingga, parameter tersebut lebih baik dibandingkan yang lainnya.

4.3.2 Pengaruh Raster Angle dan Orientasi Printing terhadap Stiffness

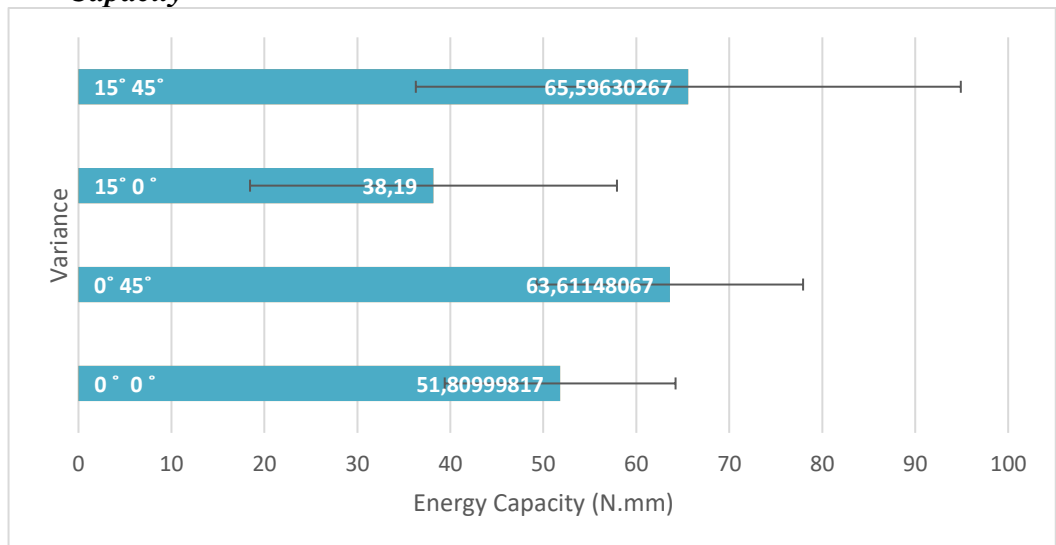


Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Pengaruh Orientasi Printing dan Raster Angle terhadap stiffness pada Empat Variasi Berbeda

Analisis kekuatan pada *lattice structure* pada model Body Centered

Cubic berukuran 30x30 dilakukan untuk mengetahui manakah orientasi printing dan raster angle yang paling kaku. Teori stiffness yang digunakan untuk memprediksi adalah sejauh mana struktur mampu menahan beban kompresi sebelum masuk kedalam peak pertama pada kurva Load terhadap Displacement. Dari keempat hasil diatas, terlihat bahwa orientasi printing 15° terhadap sumbu-x raster angle 45° memiliki kekakuan yang paling baik dibandingkan yang lain.

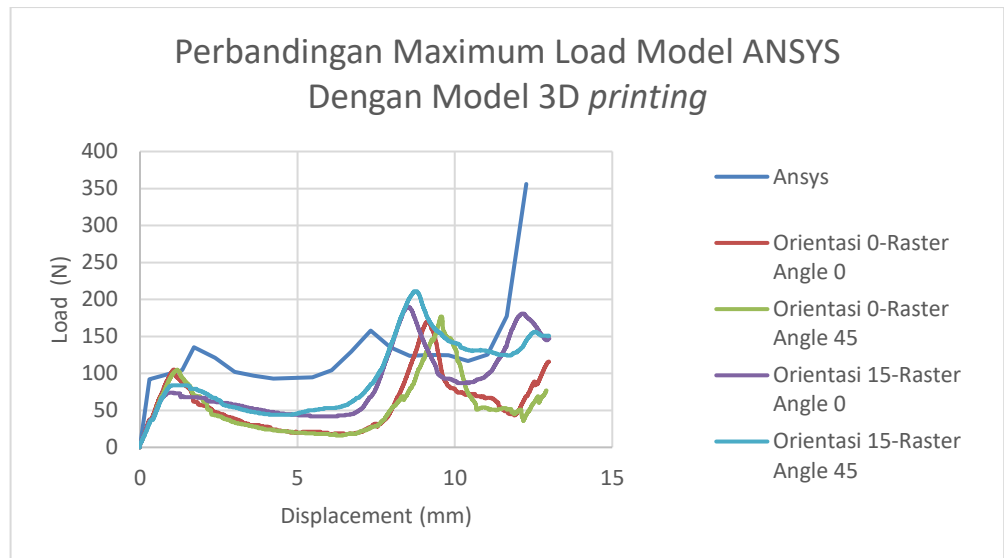
4.3.3 Pengaruh Raster Angle dan Orientasi *Printing* terhadap *Energy Capacity*



Gambar 4.7 Grafik Perbandingan Pengaruh Orientasi *Printing* dan *Raster Angle* terhadap *Energy Capacity* pada Empat Variasi Berbeda

Analisis kekuatan statis pada *lattice structure* pada model Body Centered Cubic berukuran 30x30 dilakukan untuk mengetahui manakah orientasi printing dan raster angle yang memiliki serapan energi sebelum masuk batas *maximum load* pada peak pertama. Teori *energy capacity* yang digunakan untuk memprediksi adalah load maximum pada maximum load point dikalikan dengan integral displacement dari batas nol sampai dengan maximum displacement pada maximum load. Dari keempat hasil diatas, terlihat bahwa orientasi printing 0° terhadap sumbu-x raster angle 45° memiliki serapan energi yang baik dibandingkan dengan ketiga jenis variasinya, sehingga, parameter tersebut lebih baik dibandingkan yang lainnya.

4.3.4 Analisa *Maximum Load* Model Ansys Dengan Eksperimen 3D Printing



Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Maximum Load Model ANSYS Dengan Model 3D-Printing

Analisis kekuatan *Maximum Load* pada *lattice structure* pada model Body Centered Cubic berukuran 30x30 dilakukan untuk mengetahui manakah orientasi printing dan raster angle yang memiliki mechanical properties yang mendekati dengan model ideal. Dari keempat hasil diatas, terlihat bahwa orientasi *printing* 0° terhadap sumbu-x raster angle 45° maximum load pada puncak pertama yang mendekati dengan model ANSYS, yaitu 101 N, sementara di ANSYS hasilnya adalah 135 N.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian tugas akhir ini, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Berdasarkan analisa free body diagram, terlihat bahwa yang lebih kuat menahan beban normal dan geser adalah orientasi nol derajat terhadap sumbu-x dibandingkan dengan orientasi 15 derajat terhadap sumbu-x.
2. Dari analisa pengujian kompresi, maka yang memiliki maximum load adalah orientasi 0 derajat raster angle 45 derajat dengan angka 101 N. Hal itu didasarkan pada hasil bar chart yang ada didalam pembahasan 4.3.3.
3. Dari analisa pengujian kompresi, maka yang paling kaku adalah orientasi 15 derajat raster angle 45 derajat dengan angka gradien 95,26 N/mm. Hal itu didasarkan pada hasil bar chart yang ada didalam pembahasan 4.3.3.
4. Dari analisa pengujian kompresi, maka yang memiliki serapan energi terbanyak adalah orientasi 0 derajat raster angle 45 derajat 65,59 N.mm. Hal itu didasarkan pada hasil bar chart yang ada didalam pembahasan 4.3.3.
5. Dari hasil verifikasi ansys, maka orientasi *printing* yang mendekati ideal adalah parameter printing orientasi 0 derajat terhadap sumbu x dan raster angle 45 derajat dengan maximum load diangka 101 N. Sementara hasil ANSYS ada diangka 135 N. Hal ini disebabkan faktor mechanical properties yang mendekati dan waktu *printing* yang lebih cepat dibandingkan variasi lain.

5.2 Saran

Dari penelitian tugas akhir ini, ada beberapa saran untuk peneliti selanjutnya agar lebih baik kedepannya sebagai berikut:

1. Hasil Spesimen yang dibuat menggunakan 3D Printing meninggalkan kotoran berupa jaring sisa yang menempel pada specimen dan *support*. Sebaiknya dibersihkan dengan hati hati karena sangat rentan merusak spesimen uji.
2. Jika ingin melakukan pengujian simulasi, agar simulasi berjalan lancar sebaiknya dijalankan menggunakan perangkat yang lebih memadai misalnya komputer Lab.
3. Menggunakan Aplikasi Ansys yang telah memiliki lisensi agar fitur yang diperoleh lebih lengkap jika di banding dengan Ansys *Free*.

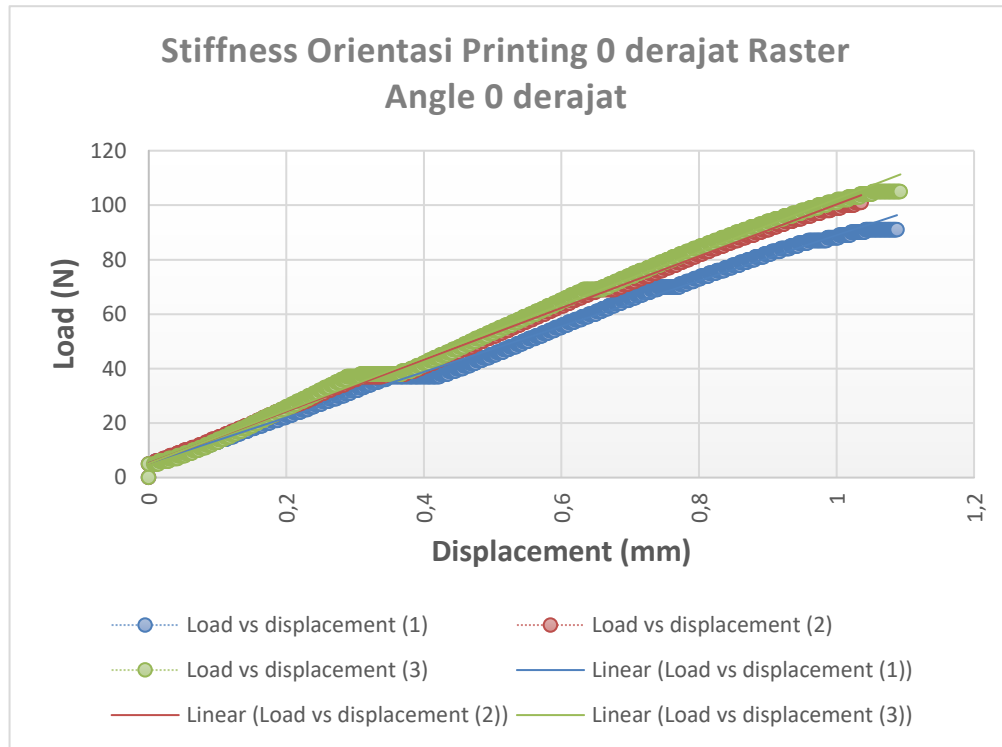
DAFTAR PUSTAKA

- Beer, F.P. (1981). *Mechanics of materials*. Ferdinand P. Beer, E. Russell Johnston, JR., John T. Dewolf.
- Blank, L. (1980). *Statistical Procedures for Engineering, Management, and Science*. McGrawHill.
- Chang C.L., & Yang S.H. (2008). Finite element simulation of wheel impact Test. *International Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. Mechanical Engineering Department, National Yunlin University of Science and Technology, Yunlin, 640, Taiwan, R.O.C
- Hibbeler, R. C. (2018). *Structural analysis*. Boston: Prentice Hall.
- Khurmi, R.S. and Gupta, J.K. (2005) *A Textbook of Machine Design*. 14th Edition, Eurasia Publishing House (PVT.) Ltd, Ram Nagar, New Delhi.
- Logan, M. S., & Ganster, D. C. (2007). The effects of empowerment on attitudes and performance: The role of social support and empowerment beliefs. *Journal of Management Studies*, 44(8), 1523–1550.
- Maulana, I. M., & Rasyid, A. H. A. (2022). Otopro. Simulasi parameter pengelasan gesek rotari pada al alloy 6061 t-6 dan aisi 1018 dengan finite element method (fem). <https://doi.org/10.26740/otopro.v17n2.p38-47>.
- Popov, E.P. (1978). *Mechanic of materials*. New Delhi: Prentice Hall.
- Yao, T., Deng, Z., Zhang, K., & Li, S. (2019). A method to predict the ultimate tensile strength of 3D printing polylactic acid (PLA) materials with different printing orientations. *Composites Part B: Engineering*, 163, 393–402. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.01.025>
- Li, D., Qin, R., Chen, B., & Zhou, J. (2021). Analysis of mechanical properties of lattice structures with stochastic geometric defects in additive manufacturing. *Materials Science and Engineering: A*, 822, 141666. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141666>

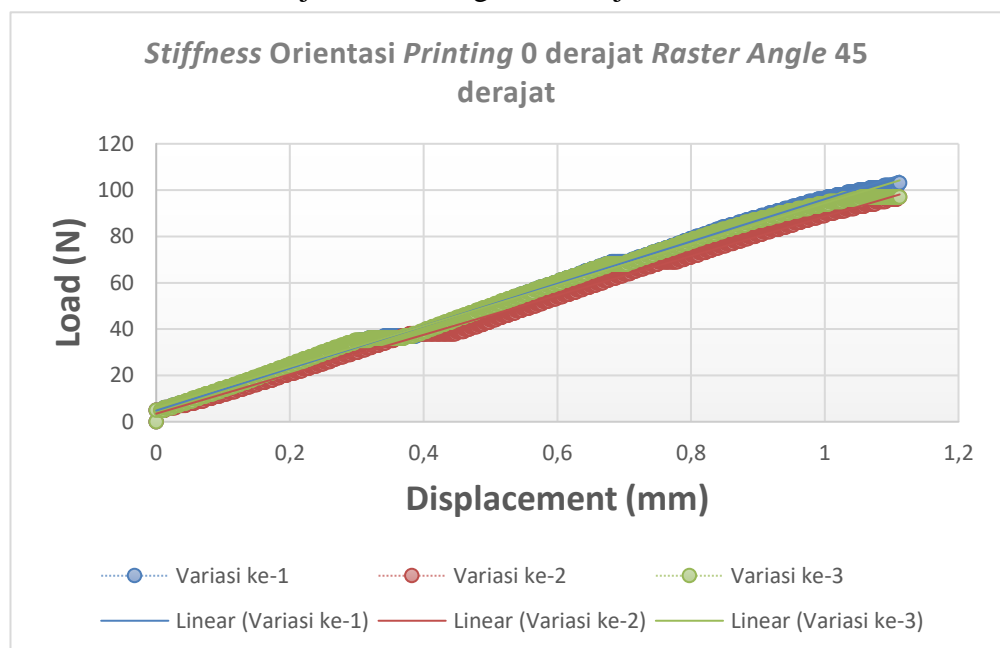
LAMPIRAN

1. Grafik Load terhadap Displacement untuk Mencari *Maximum Load* Pada variasi (Orientasi printing – Raster Angle)

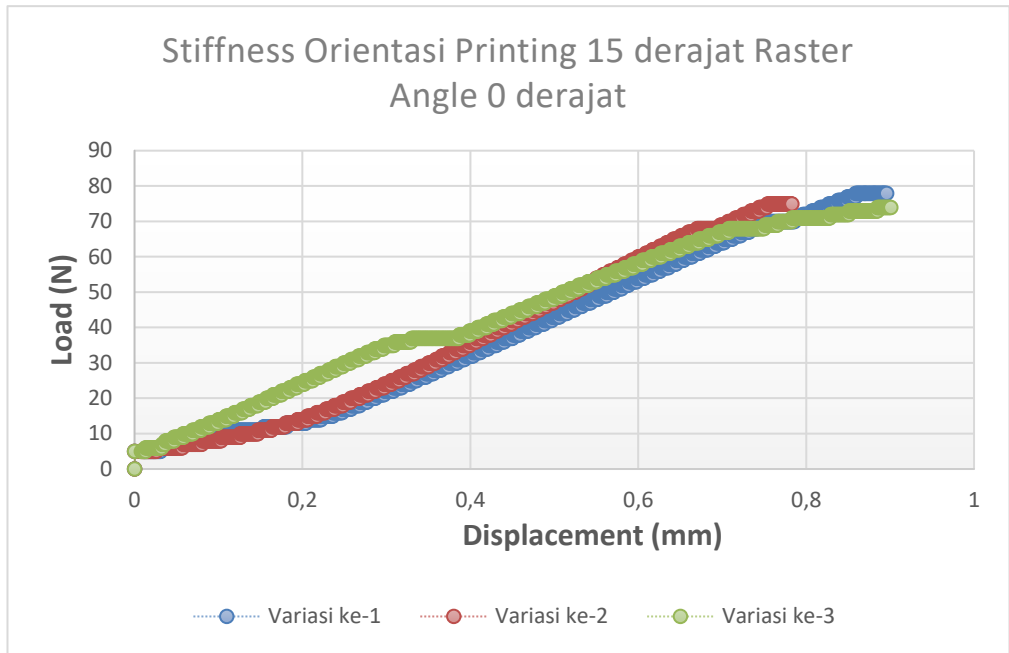
- Orientasi 0 derajat-Raster Angle 0 derajat



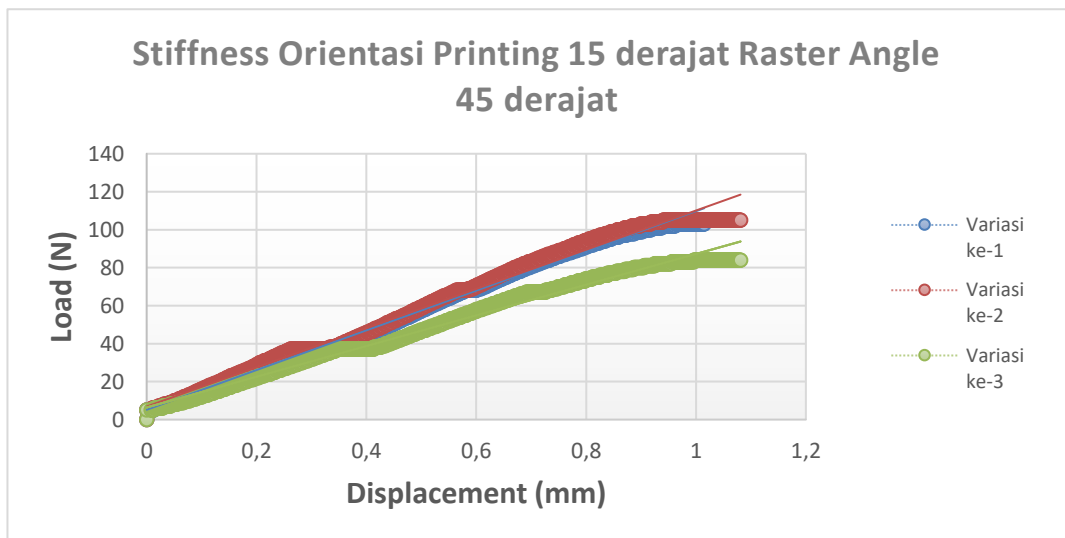
- Orientasi 0 derajat-Raster Angle 45 derajat



- Orientasi 15 derajat-Raster Angle 0 derajat

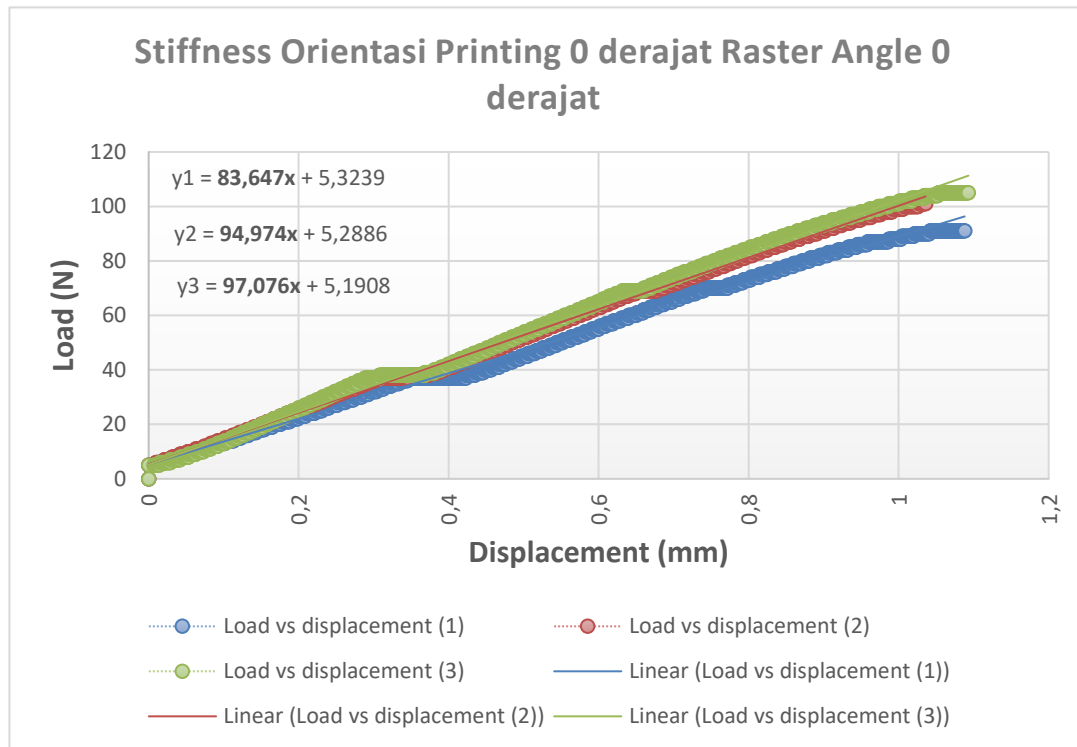


- Orientasi 15 derajat-Raster Angle 45 derajat

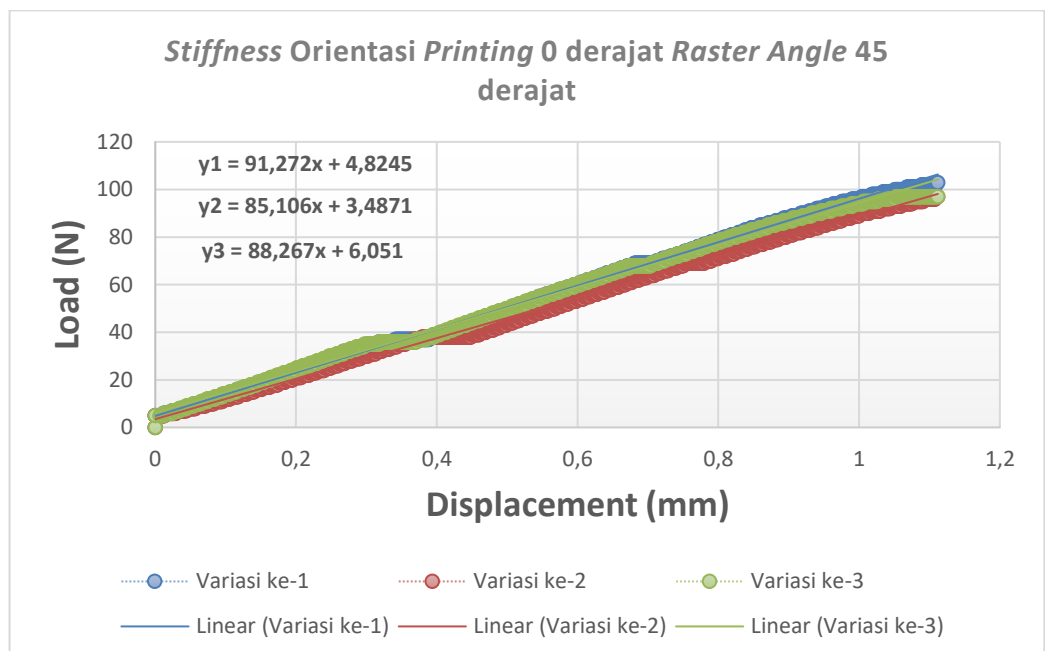


2. Grafik Load terhadap Displacement Dengan mencari Gradient untuk Mencari *Stiffness* Pada variasi (**Orientasi printing – Raster Angle**)

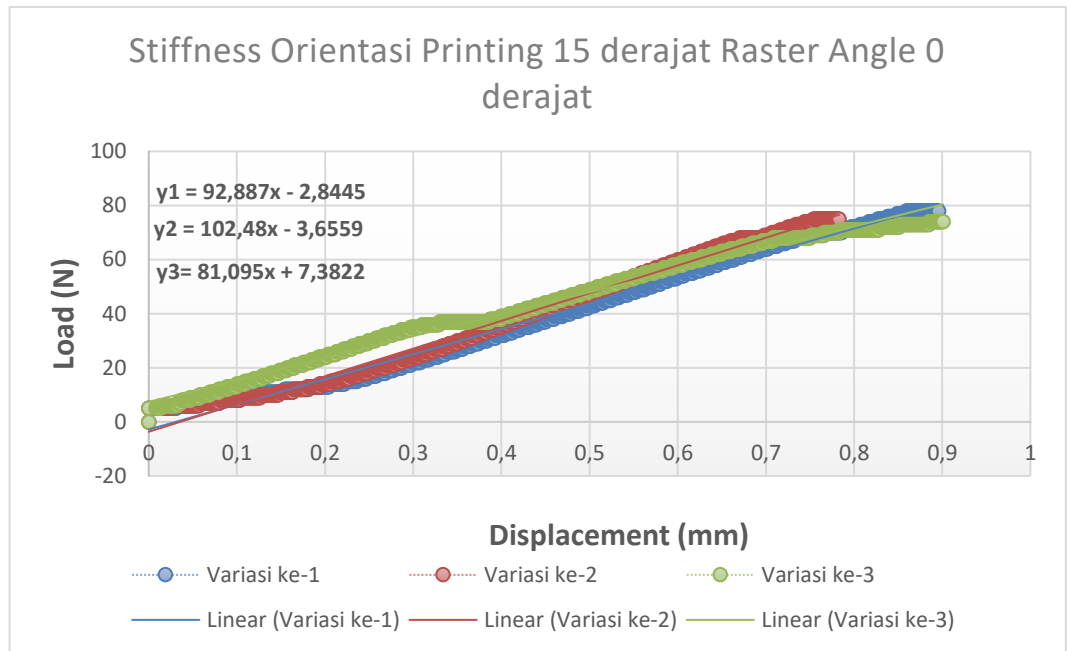
- Orientasi *Printing* 0 Derajat – *Raster Angle* 0 Derajat



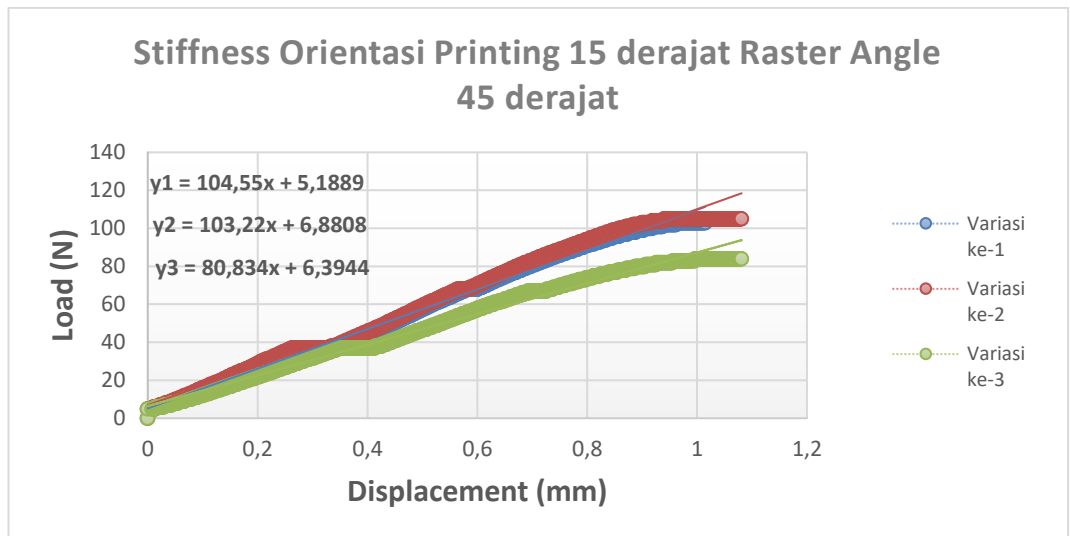
- Orientasi *Printing* 0 Derajat – *Raster Angle* 45 Derajat



- Orientasi *Printing* 15 Derajat – *Raster Angle* 0 Derajat



- Orientasi *Printing* 15 Derajat – *Raster Angle* 45 Derajat



3. Hasil Standar Deviasi untuk gambar grafik subab 4.3.3

- Hasil standar deviasi perbandingan *Maximum Load*

Orientasi Printing	Raster Angle	Std Deviation
0°	0°	7,211102551
0°	45°	4
15°	0°	2,081665999
15°	45°	11,35781669

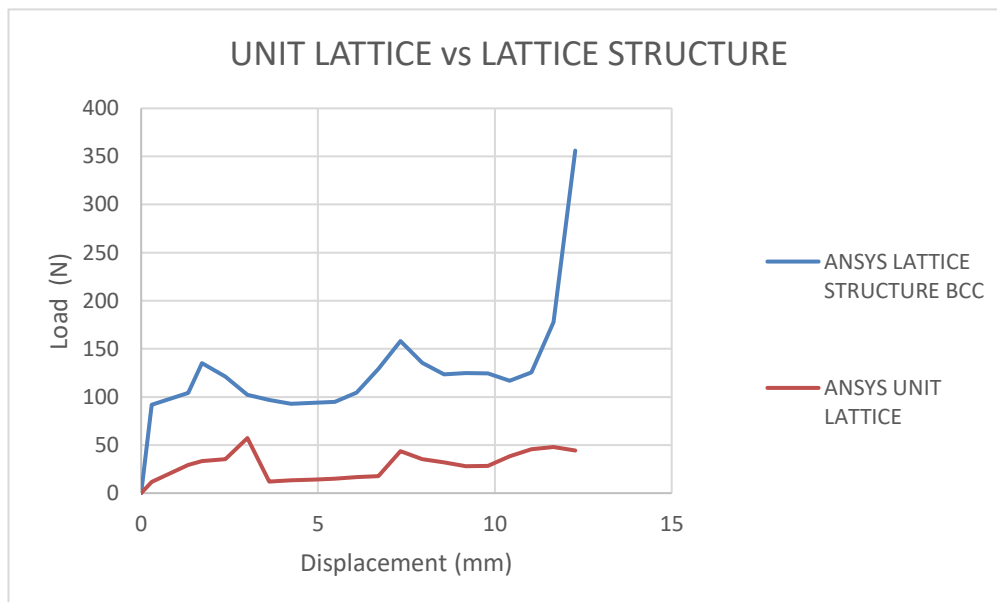
- Hasil standar deviasi perbandingan *Stiffness*

Orientasi Printing	Raster Angle	Std Deviation
0°	0°	4,638438135
0°	45°	4,205524145
15°	0°	10,76039666
15°	45°	3,874252229

- Hasil standar deviasi perbandingan *Energy Capacity*

Orientasi Printing	Raster Angle	Std Deviation
0°	0°	12,41557002
0°	45°	14,33183311
15°	0°	19,73426039
15°	45°	29,309704

4. Perbandingan Grafik Load displacement Unit Lattice dengan Lattice Structure 3x3



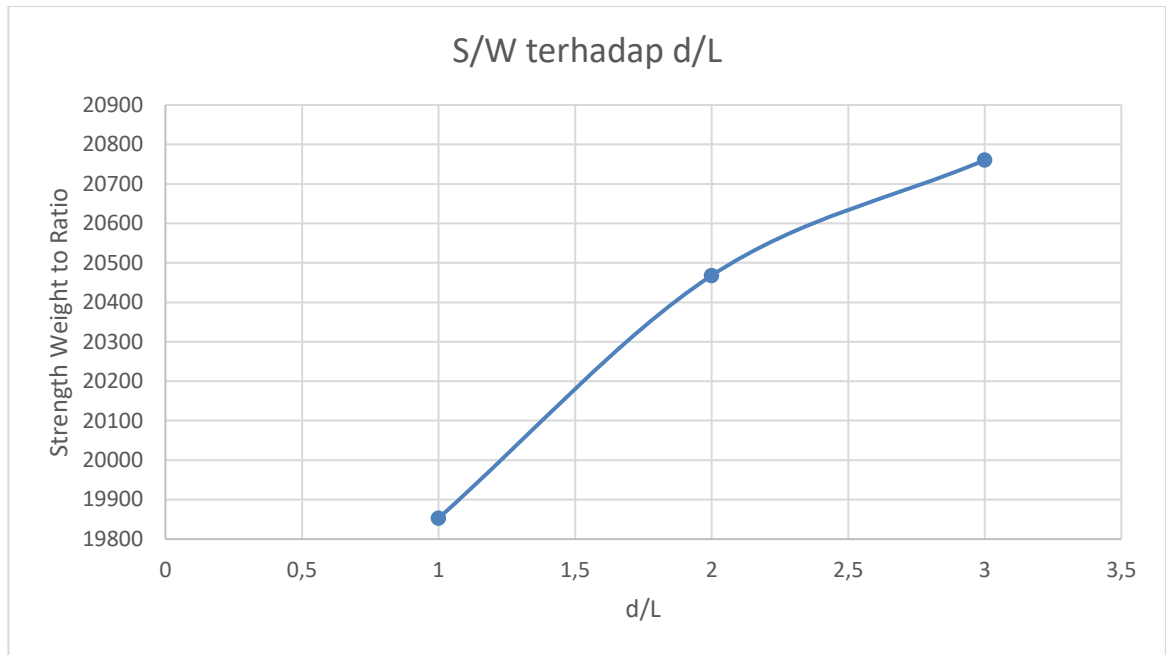
5. Faktor Koreksi Geometri Ideal terhadap *as printed*

Orientasi Printing – Raster Angle	Lattice structure printed	Lattice Structure ideal	Faktor Koreksi
0° - 0°	1,03 mm	1 mm	0,03 mm
0° - 45°	1,23 mm	1 mm	0,23 mm
15° - 0°	1,17 mm	1 mm	0,17 mm
15° - 45°	1,34 mm	1 mm	0,34 mm

6. Perbandingan Strength Weight to ratio

		Data Max Load	Strength weight to ratio
0°	0°	99	16500
0°	45°	101	16833,33333
15°	0°	75,667	12611,16667
15°	45°	97	16000
ANSYS	Diameter 1 mm	135	19736,84211
	Diameter 1,2 mm	140	20467,83626
	Diameter 1,5 mm	142	20760,23392

d/L	S/W				
	Ideal CAD	0° - 0°	0° - 45°	15° - 0°	15° - 45°
$1/3\sqrt{2}$	19852,94118	16500	16833,33333	12611,16667	16000
$1,2/3\sqrt{2}$	20467,83626				
$1,5/3\sqrt{2}$	20760,23392				



BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Surabaya, 23 Juli 2002, merupakan anak pertama dari 2 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di TK Bina Insan, SDIT AL-USWAH Surabaya, SMPN 29 Surabaya dan SMAN 4 Surabaya. Setelah lulus dari SMAN 4 Surabaya tahun 2020, Penulis mengikuti SM ITS dan diterima di Departemen Teknik Mesin FTIRS - ITS pada tahun 2020 dan terdaftar dengan NRP 5007201101.

Di Departemen Teknik Mesin Penulis sempat aktif di beberapa kegiatan yang diselenggarakan oleh pihak *external*, organisasi 180 Degrees Consulting ITS, TEDxITS, dan lain-lain.