

TUGAS AKHIR - TM184835

**ANALISIS DEFORMASI PADA PROSES METAL ADDITIVE
MANUFACTURING CETAKAN AIRLESS TIRE
MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

GARIN WISNU MURTI

02111840000087

Dosen Pembimbing

Dr.Ir. Agus Sigit Pramono DEA

19650810 199102 1 001

Program Studi S-1 Teknik Mesin

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

Surabaya

2022



TUGAS AKHIR - TM184835

ANALISIS DEFORMASI PADA PROSES *METAL ADDITIVE MANUFACTURING* CETAKAN *AIRLESS TIRE* MENGGUNAKAN METODE EL EMEN HINGGA

GARIN WISNU MURTI

02111840000087

Dosen Pembimbing

Dr.Ir. Agus Sigit Pramono DEA

19650810 199102 1 001

Program Studi S-1 Teknik Mesin

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

Surabaya

2022



FINAL PROJECT - TM184835

**ANALYSIS OF DEFORMATION ON METAL ADDITIVE
MANUFACTURING OF AIRLESS TIRE MOLD USING
FINITE ELEMENT METHOD**

GARIN WISNU MURTI

02111840000087

Advisor

Dr.Ir. Agus Sigit Pramono DEA

19650810 199102 1 001

Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

HALAMAN PENGESAHAN

ANALISIS DEFORMASI PADA PROSES *METAL ADDITIVE MANUFACTURING* CETAKAN *AIRLESS TIRE* MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

TUGAS AKHIR

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

Oleh:

Garin Wisnu Murti

NRP. 0211184000087

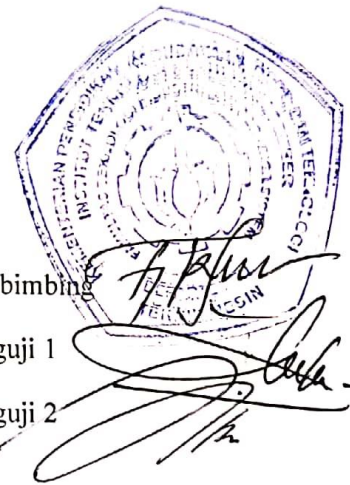
Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr.Ir. Agus Sigit Pramono DEA
2. Ir. Yusuf Kaelani, M. Sc. E.
3. Dr.Eng. Yohanes, S.T., M.Sc.

Pembimbing

Penguji 1

Penguji 2



SURABAYA

2022

APPROVAL SHEET




ANALYSIS OF DEFORMATION ON METAL ADDITIVE MANUFACTURING OF AIRLESS TIRE USING FINITE ELEMENT METHOD

FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements
for obtaining a 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: **Garin Wisnu Murti**
NRP. 0211184000087

Approved by Final Project Examiner Team:

1. Dr.Ir. Agus Sigit Pramono DEA  Adviser
2. Ir. Yusuf Kaelani, M. Sc. E.  Examiner 1
3. Dr.Eng. Yohanes, S.T., M.Sc.  Examiner 2

SURABAYA
July, 2022

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : GARIN WISNU MURTI/0211184000087

Departemen : Teknik Mesin

Dosen pembimbing / NIP : Dr.Ir. Agus Sigit Pramono DEA/196508101991021001

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Analisis Deformasi pada Proses *Metal Additive Manufacturing* Cetakan *Airless Tire* Menggunakan Metode Elemen Hingga“ adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

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

Surabaya, 29 Juli 2022

Mengetahui

Dosen Pembimbing,

(Dr.Ir. Agus Sigit Pramono DEA)

NIP. 196508101991021001

Mahasiswa,

(Garin Wisnu Murti)

NRP. 0211184000087

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Garin Wisnu Murti/0211184000087
Department : Mechanical Engineering
Advisor / NIP : Dr.Ir. Agus Sigit Pramono DEA/196508101991021001

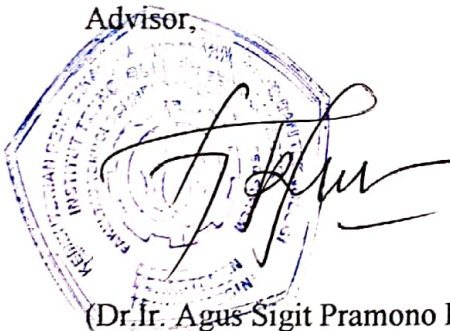
Hereby declare that the Final Project with the title of “Analysis of Deformation on Metal Additive Manufacturing of Airless Tire Mold Using Finite Element Method“ is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

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

Surabaya, 29 July 2022

Acknowledged

Advisor,



(Dr.Ir. Agus Sigit Pramono DEA)

NIP. 196508101991021001

Student,



(Garin Wisnu Murti)

NRP. 02111840000087

ANALISIS DEFORMASI PADA PROSES *METAL ADDITIVE MANUFACTURING* CETAKAN *AIRLESS TIRE* MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Nama Mahasiswa/NRP : Garin Wisnu Murti/0211184000087

Departemen : Teknik Mesin FTIRS-ITS

Dosen Pembimbing : Dr.Ir.Agus Sigit Pramono DEA

Abstrak

Perkembangan teknologi di era industri saat ini sudah sangat pesat, salah satunya adalah teknologi 3D-printing atau *additive manufacturing* (AM). Berdasarkan laman dari Kementerian Komunikasi dan Informatika (KOMINFO), AM merupakan salah satu pilar utama perkembangan revolusi industri 4.0. AM adalah teknologi yang menghasilkan bagian-bagian tiga dimensi lapis demi lapis dari suatu bahan, baik berbahan dasar polimer maupun logam. Namun deformasi menjadi salah satu masalah yang sering ditemui dalam penggunaan teknologi AM. Salah satu penerapan AM pada bidang otomotif adalah pada *airless tire*. *Spoke* merupakan salah satu bagian dari *airless tire* yang berfungsi sebagai pengganti tekanan angin. Untuk menghasilkan geometri *spoke* pada *airless tire* sesuai yang diinginkan, maka perlu dievaluasi cetakan yang digunakan pada proses pembuatan ban tersebut. Sehingga didapat hasil geometri sesuai yang direncanakan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis deformasi yang terjadi pada celah *spoke* proses *metal additive manufacturing* cetakan *airless tire*.

Variasi yang digunakan pada penelitian ini adalah jenis material, *layer thickness*, dan *scan speed*. Variasi pertama pada penelitian ini adalah *layer thickness* yang digunakan yaitu sebesar 30 μ m, 60 μ m, dan 90 μ m. Variasi kedua pada penelitian ini adalah *scan speed* yang digunakan yaitu sebesar 1000 mm/s, 1500 mm/s, dan 2000 mm/s. Kemudian material yang digunakan adalah 17-4PH dan Ti-6Al-4V. Pemodelan cetakan *airless tire* menggunakan 1/4 geometri cetakan mengingat biaya komputasi yang tinggi. Selanjutnya pemodelan akan disimulasikan menggunakan *software finite element method* yaitu *Ansys Workbench 2019 R3* dengan ekstensi *Additive Wizard*. Hasil dari simulasi yang dilakukan adalah deformasi total yang selanjutnya akan dibandingkan besar deformasi maksimal dari variasi yang telah ditentukan dan proses parameter operasi terbaik yang didapatkan.

Dari penelitian ini didapatkan deformasi terkecil pada nilai *layer thickness* 90 μ m. Pada variasi *layer thickness* 30 μ m, 60 μ m, 90 μ m menghasilkan deformasi yang semakin kecil dengan penurunan ($\pm 3\%$). Didapatkan juga nilai deformasi total pada variasi *scan speed* 1000 mm/s, 1500 mm/s, dan 2000 mm/s yaitu cenderung fluktuatif dengan kenaikan signifikan pada *scan speed* 1500 mm/s. Peningkatan terbesar pada *layer thickness* 30 μ m material Ti-6Al-4V yaitu ($\pm 14\%$). Selisih deformasi total yang dihasilkan antara material 17-4PH dan Ti-6Al-4V adalah ($\pm 45\%$). Berdasarkan simulasi bahwa material terbaik adalah 17-4PH apabila mempertimbangkan nilai deformasi yang kecil yaitu 0,51128 mm dibandingkan material Ti-6Al-4V sebesar 0,73198 mm dan harga material yang lebih murah. Jika mempertimbangkan waktu proses yang lebih cepat maka menggunakan material Ti-6Al-4V. Pada material 17-4PH parameter proses terbaik adalah pada *layer thickness* 90 μ m dan *scan speed* 1000 mm/s sedangkan pada material Ti-6Al-4V adalah pada *layer thickness* 90 μ m dan *scan speed* 2000 mm/s.

Kata kunci : *Additive manufacturing, Airless tire, Deformation, Finite element method*

ANALYSIS OF DEFORMATION ON METAL ADDITIVE MANUFACTURING OF AIRLESS TIRE MOLD USING FINITE ELEMENT METHOD

Student Name/NRP : Garin Wisnu Murti/0211184000087
Department : Teknik Mesin FTIRS-ITS
Advisor : Dr.Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

Abstract

The development of technology in the current industrial era is very rapid, one of which is 3D-printing technology or additive manufacturing (AM). Based on the website of the Ministry of Communication and Information (KOMINFO), AM is one of the main pillars of the development of the industrial revolution 4.0. AM is a technology that produces three-dimensional parts layer by layer from a material, both polymer and metal based. However, deformation is one of the problems that are often encountered in the use of AM technology. One application of AM in the automotive sector is on airless tires. Spoke is one part of the airless tire that functions as a substitute for air pressure. To produce the desired spoke geometry for the airless tire, it is necessary to evaluate the mold used in the tire manufacturing process. So that the results obtained according to the planned geometry. This study aims to analyze the deformation that occurs in the spoke gap of the metal additive manufacturing process of airless tire molds.

The variations used in this research are material type, layer thickness, and scan speed. The first variation in this study is the layer thickness used which is 30 μ m, 60 μ m, and 90 μ m. The second variation in this study is the scan speed used which is 1000 mm/s, 1500 mm/s, and 2000 mm/s. Then the comparison of deformation on 17-4PH and Ti-6Al-4V materials. The modeling of the airless tire mold uses $\frac{1}{4}$ of the mold geometry considering the high computational cost. Furthermore, the modeling will be simulated using finite element method software, Ansys Workbench 2019 R3 with Additive Wizard extension. The result of the simulation is the total deformation which will then be compared to the maximum deformation of the predetermined variation.

From this study, the smallest deformation was obtained at the layer thickness value of 90 μ m. In layer thickness variations of 30 μ m, 60 μ m, 90 μ m, the deformation is getting smaller with decreasing ($\pm 3\%$). The total deformation at the scan speed variations of 1000 mm/s, 1500 mm/s, and 2000 mm/s tends to fluctuate with a significant increase in the scan speed of 1500 mm/s. The biggest increase in the layer thickness of 30 μ m of Ti-6Al-4V material is ($\pm 14\%$). The resulting total deformation difference between 17-4PH and Ti-6Al-4V materials is ($\pm 45\%$). Based on the simulation that the best material is 17-4PH when considering the smallest deformation value of 0.51128 mm compared to the Ti-6Al-4V material of 0.73198 mm and the material price is cheaper. If you consider a faster processing time, then use the Ti-6Al-4V material. For 17-4PH material, the best process parameter is at layer thickness 90 μ m and scan speed is 1000 mm/s, while for Ti-6Al-4V material is layer thickness 90 μ m and scan speed is 2000 mm/s.

Keywords: *Additive manufacturing, Airless tire, Deformation, Finite element method*

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas rahmat-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan Sarjana S-1 di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penyusunan tugas akhir ini dapat terlaksana dengan baik atas bantuan dan kerjasama dari berbagai pihak. Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan Laporan Tugas Akhir ini bukan semata-mata atas kemampuan penulis sendiri. Untuk itu, izinkan penulis untuk mengucapkan terima kasih dan memberikan rasa hormat atas segala bantuan yang telah diberikan kepada penulis, baik itu secara langsung dan tidak langsung, yaitu kepada:

1. Ibu Sri Hastuti dan Bapak K. Riyanto selaku orang tua penulis serta Bayu Purwito, Edo Pahlevi dan Retno Wulan Gayatri selaku kakak penulis yang menjadi motivasi tersendiri bagi penulis untuk menyelesaikan tugas akhir dan perkuliahan ini.
2. Bapak Dr.Ir. Agus Sigit Pramono, DEA selaku dosen pembimbing penulis yang telah membimbing serta memberikan dukungan dan nasihat selama rangkaian pengerjaan tugas akhir ini.
3. Bapak Ir. Yusuf Kaelani, M.Sc.E dan Bapak Dr. Eng. Yohanes, S.T., M.Sc. selaku dosen penguji seminar yang telah memberikan saran dan arahan kepada penulis dalam menyempurnakan tugas akhir ini.
4. Pasukan Kontrakan Mulyosari Utara yang telah membantu penulis dalam proses pengerjaan tugas akhir.
5. Bapak Dr. Eng. Yohanes, S.T., M.Sc. selaku dosen wali penulis yang telah memberikan nasihat sejak awal perkuliahan hingga akhir perkuliahan.
6. Seluruh teman satu bimbingan tugas akhir (Rizal, Shiddiq, Huda, Nauval, Syarif) yang telah membantu, menemani, serta membagi ilmunya kepada penulis selama pengerjaan tugas akhir ini.
7. Semua pihak yang tidak dapat penulis cantumkan satu persatu.

Semoga seluruh kebaikan yang telah diberikan dapat bermanfaat dan mendapat balasan dari Allah SWT. Penulis menyadari dalam bahwa masih terdapat kekurangan dalam penulisan laporan tugas akhir ini. Untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun demi kesempurnaan laporan tugas akhir ini. Semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis dan pembaca dalam pengembangan kemajuan teknologi di Indonesia. Akhir kata, penulis memohon maaf atas kekurangannya dan mengucapkan terima kasih.

Surabaya, Juli 2022

Garin Wisnu Murti
NRP. 0211184000087

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	1
HALAMAN PENGESAHAN	iv
APPROVAL SHEET	v
PERNYATAAN ORISINALITAS	vi
STATEMENT OF ORIGINALITY	vii
Abstrak	viii
Abstract	ix
KATA PENGANTAR	x
Daftar Isi	xi
Daftar Gambar	xiii
Daftar Tabel	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Manfaat penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 <i>Airless tire</i>	4
2.2 Material Cetakan <i>Airless Tire</i>	4
2.2.1 17-4PH Stainless Steel	5
2.2.2 Ti-6Al-4V	5
2.3 <i>Metal Additive Manufacturing</i>	6
2.3.1 <i>Powder Bed Fusion (PBF)</i>	8
2.3.2 <i>Directed Energy Deposition (DED)</i>	9
2.4 Deformasi.....	10
2.5 <i>Finite Element Method (FEM)</i>	11
2.5.1 Thermo-Mechanical Simulation	13
2.5.2 Meshing	16
2.6 Penelitian Terdahulu	17
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	23
3.1 <i>Flowchart</i> penelitian	23
3.2 Observasi.....	24
3.3 Perumusan Masalah	24
3.4 Studi Literatur	25

3.5 Pengumpulan Data	25
3.6 Pemodelan 3D Cetak dan <i>Base</i>	25
3.6.1 Pemodelan Cetakan Metal <i>Airless Tire</i>	25
3.6.2 Pemodelan <i>Base</i> Proses Pencetakan	27
3.6.3 Assembly Model 3D	27
3.7 Simulasi <i>Finite Element Method</i>	27
3.7.1 <i>Input Additive Wizard</i> dengan Ekstensi	29
3.7.2 <i>Set AM Process</i>	30
3.7.3 <i>Input Engineering Data</i>	31
3.7.4 <i>Input Geometry</i>	31
3.7.5 Melakukan Pemodelan pada Ansys	32
3.8 Analisis Data dan Pembahasan	37
3.9 Kesimpulan Penelitian	38
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	39
4.1 Data Hasil Simulasi	39
4.1 Analisa Pengaruh <i>Layer Thickness</i> dengan <i>Scan Speed</i> Konstan terhadap Deformasi Total pada <i>Cetakan Metal Airless Airless Tire</i>	40
4.1.1 Variasi <i>Layer Thickness</i> 30 μm , 60 μm , dan 90 μm pada <i>Scan Speed</i> Konstan Material 17-4PH	40
4.1.2 Variasi <i>Layer Thickness</i> 30 μm , 60 μm , dan 90 μm pada <i>Scan Speed</i> Konstan Material Ti-6Al-4V	43
4.2 Analisa Pengaruh <i>Scan Speed</i> dengan <i>Layer Thickness</i> Konstan terhadap Deformasi Total pada <i>Cetakan Metal Airless Airless Tire</i>	45
4.2.1 Variasi <i>Scan Speed</i> 1000 mm/s, 1500 mm/s, dan 2000 mm/s pada <i>Layer Thickness</i> Konstan Material 17-4PH	45
4.2.2 Variasi <i>Scan Speed</i> 1000 mm/s, 1500 mm/s, dan 2000 mm/s Pada <i>Layer Thickness</i> Konstan Material Ti-6Al-4V	46
4.3 Analisa Pengaruh Jenis material terhadap Deformasi Total yang dihasilkan pada <i>Layer Thickness</i> Konstan dan <i>Scan Speed</i> Konstan	47
4.4 Analisa Parameter Proses Terbaik yang Digunakan Pada Proses Metal AM Cetakan <i>Airless Tire</i>	48
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	50
5.1 Kesimpulan	50
5.2 Saran	50
DAFTAR PUSTAKA	51
LAMPIRAN	53
BIODATA PENULIS	56

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Adopsi penggunaan AM pada industri	1
Gambar 2.1 Ban tanpa udara dengan bentuk spoke yang berbeda	4
Gambar 2.2 Mesin SLM 500	7
Gambar 2.3 Bagian parameter SLM.....	8
Gambar 2.4 Proses pada SLM	9
Gambar 2.5 Bagian proses pada DED	10
Gambar 2.6 Gradien tegangan dalam satu lapisan	11
Gambar 2.7 <i>Certain 2D and 3D continuum element</i>	12
Gambar 2.8 <i>Meshing</i> pada <i>plate</i> (Fish et al., n.d.).....	12
Gambar 2.9 Mekanisme gradien suhu proses SLM (Gibson et al., n.d.).....	14
Gambar 2.10 Mesh pada AM	16
Gambar 2.11 Geometri dan <i>boundary condition model</i>	17
Gambar 2.12 Variasi strategi pemindaian	18
Gambar 2.13 <i>Part build direction (Z direction) deformation</i>	18
Gambar 2.14 Deformasi <i>contour</i> pada semua kasus pemindaian.....	19
Gambar 2.15 Geometri Cantilever.....	20
Gambar 2.16 Alat ukur deformasi dengan teknik difraksi sinar-X (XRD)	20
Gambar 2.17 Variasi besarnya <i>residual stress magnitude</i> dengan daya laser dan <i>scanning speed</i> (lapisan 30 μm).	21
Gambar 2.18 Perbandingan besarnya <i>residual stress</i> untuk ketebalan lapisan 30 μm dan 45 μm pada 180 W dan 600 mm/s untuk sampel yang diproduksi pada mesin EOSINT M280.....	21
Gambar 2.19 Efek <i>Scanning Speed</i> dan daya laser terhadap distorsi pada ketebalan lapisan 30 μm	21
Gambar 3.1 Metodologi Penelitian.....	24
Gambar 3.2 Desain pemodelan $\frac{1}{4}$ cetakan metal airless tire (a) Tampak isometri (1) posisi celah <i>spoke</i> (b) Tebal cetakan dan tinggi <i>spoke</i> (c) Jari-jari dalam dan jari-jari luar cetakan.....	26
Gambar 3.3 Geometri Spoke	26
Gambar 3.4 Pemodelan <i>base plate</i>	27
Gambar 3.5 <i>Assembly</i> model 3D	27
Gambar 3.6 Diagram Alir Simulasi FEM.....	29
Gambar 3.7 <i>Input additive wizard</i>	30
Gambar 3.8 Menu pilihan modul ekstensi.....	30
Gambar 3.9 <i>Additive manufacturing system</i>	31
Gambar 3.10 <i>Engineering data</i>	31
Gambar 3.11 <i>Import geometry</i>	32
Gambar 3.12 <i>Additive wizard automation</i>	32
Gambar 3.13 <i>Build</i> geometri	33
Gambar 3.14 <i>Base plate</i> geometri	33
Gambar 3.15 Mengatur tipe mesh dan <i>size</i> mesh	34
Gambar 3.16 Hasil <i>meshing build</i> geometri dan <i>base</i> geometri.....	34
Gambar 3.17 <i>Setting</i> jenis material yang digunakan	35
Gambar 3.18 <i>Machine parameters</i>	35
Gambar 3.19 <i>Base thermal boundary condition</i>	36
Gambar 3.20 <i>Analysis settings static structural process</i>	36
Gambar 3.21 <i>Solution</i>	36
Gambar 3.22 <i>Mesh metric</i>	37

Gambar 4.1 <i>Contour</i> pada hasil simulasi <i>layer thickness</i> 90 dan <i>scan speed</i> 1000 mm/s material 17-4PH Stainless Steel	41
Gambar 4.2 Vector arah deformasi total pada simulasi <i>layer thickness</i> 90 dan <i>scan speed</i> 1000 mm/s material 17-4PH Stainless Steel	42
Gambar 4.3 <i>Contour</i> pada hasil simulasi <i>layer thickness</i> 90 μm dan <i>scan speed</i> 2000 mm/s material Ti-6Al-4V	44
Gambar 4.4 Vector arah deformasi total pada simulasi <i>layer thickness</i> 90 μm dan <i>scan speed</i> 2000 mm/s material 17-4PH Ti-6Al-4V	44

DAFTAR TABEL

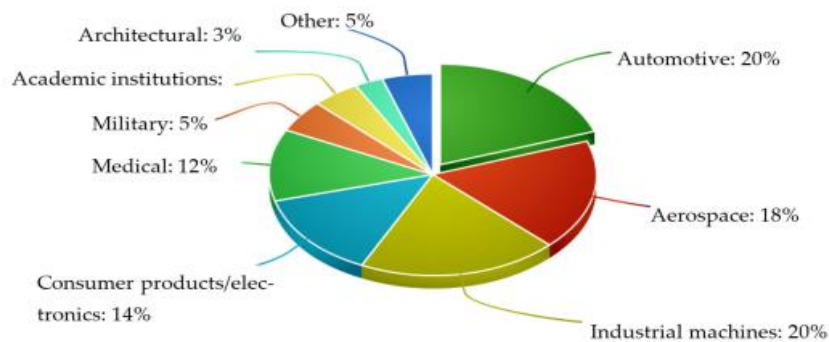
Tabel 2.1 Material pada metal AM.....	5
Tabel 2.2 Material properties 17-4PH	5
Tabel 2.3 Material properties Ti-6Al-4V.....	6
Tabel 2.4 Spesifikasi Teknis SLM 500	7
Tabel 2.5 Perbandingan penelitian terdahulu dan penelitian yang akan dilakukan.....	22
Tabel 3.1 Dimensi komponen.....	25
Tabel 3.2 Variasi simulasi	27
Tabel 3.3 Konvergensi Mesh.....	37
Tabel 4.1 Data Hasil Simulasi Variasi <i>Layer Thickness</i> dan <i>Scan Speed</i> Konstan	39
Tabel 4.2 Data Hasil Simulasi Variasi <i>Scan Speed</i> dan <i>Layer Thickness</i> konstan.....	39
Tabel 4.3 Hasil Proses Parameter Terbaik pada Material 17-4PH dan Ti-6Al-4V	49

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi di era industri saat ini sudah sangat pesat, salah satunya adalah teknologi 3D-printing atau biasa disebut *additive manufacturing* (AM). Berdasarkan laman dari Kementerian Komunikasi dan Informatika (KOMINFO), *additive manufacturing* merupakan salah satu pilar utama perkembangan revolusi industri 4.0 (R. Lesti, 2020). *Additive Manufacturing* adalah teknologi yang menghasilkan bagian-bagian tiga dimensi lapis demi lapis dari suatu bahan, baik berbahan dasar polimer maupun logam. Metode ini bergantung pada file data digital yang ditransfer ke mesin yang kemudian membangun komponen. (Emmelmann et al., 2013). Saat ini, beberapa bahan logam termasuk bahan rekayasa penting baja, aluminium, dan titanium dapat diproses menjadi bagian padat penuh dengan *properties* yang bagus melalui teknologi *additive manufacturing* (Herzog et al., 2016).

AM memungkinkan desainer untuk membuat model kustom yang rumit tanpa batasan manufaktur konvensional seperti limbah material yang tinggi, kesulitan untuk membuat bentuk yang kompleks, dan kebutuhan akan perkakas khusus. Melalui penggunaan AM, para insinyur telah meningkatkan kebebasan desain. Pada penggunaan AM jumlah suku cadang dapat dikurangi sehingga waktu dan biaya perakitan berkurang atau dihilangkan. Selain itu, suku cadang dapat diproduksi sesuai permintaan, yang meningkatkan waktu respon, memperpendek rantai pasokan, mengurangi kebutuhan penyimpanan, menghilangkan biaya pengiriman, dan mengurangi waktu tunggu untuk suku cadang penting (Vafadar et al., 2021). Wohlers dkk (Kianian, 2017) menyimpulkan bahwa diharapkan pertumbuhan industri AM berlanjut selama beberapa tahun ke depan, dan penjualan AM diperkirakan melebihi US\$15,8 miliar di seluruh dunia menurut sektor industri. Menurut data yang diterbitkan oleh Wohlers et al. (Kianian, 2017), Gambar 1.1 menampilkan distribusi *market* AM akhir pada tahun 2018, dan mewakili adopsi industri yang beragam.



Gambar 1.1 Adopsi penggunaan AM pada industri

Salah satu penerapan teknologi *additive manufacturing* adalah pada bidang *automotive* yaitu *airless tire* atau ban tanpa udara. Keuntungan utama dari ban tanpa udara adalah bahwa ban tanpa udara tidak bisa kempes, namun penggunaannya masih jarang daripada ban pada umumnya. Ban tanpa udara memiliki tahanan gelinding (*rolling resistance*) yang lebih tinggi dan memberikan suspensi jauh lebih sedikit daripada ban pneumatik yang berbentuk dan berukuran sama (Kumar & Kalahastimath, 2021). Ban tanpa udara terdiri atas tiga komponen utama, yaitu *hub*, *spoke*, dan *thread*. Bagian *thread* merupakan komponen ban terluar yang langsung berkontak dengan permukaan tanah. Bagian *hub* merupakan

komponen yang tersambung langsung dengan kendaraan. Bagian *spoke* adalah bagian yang menghubungkan *hub* dengan *thread*.

Spoke ban tanpa udara biasanya dibuat dengan poliuretan termoplastik (TPU), yang merupakan bahan yang sangat elastis, untuk menggantikan tekanan inflasi pada ban pneumatik konvensional. Namun ada keterbatasan dalam merancang geometri jari-jari yang kompleks karena kesulitan dalam proses manufaktur, yang biasanya melibatkan proses pencetakan. Baru-baru ini, teknik pencetakan 3D telah ditingkatkan dan dapat digunakan untuk membuat geometri yang sangat kompleks dengan berbagai bahan. Namun sifat mekanik struktur jari-jari tercetak menggunakan teknik pencetakan 3D masih diperlukan untuk merancang dan mengembangkan ban tanpa udara (Rugsaj & Suvanjumrat, 2021).

Untuk menghasilkan geometri *spoke* pada ban tanpa udara sesuai yang diinginkan, maka perlu dievaluasi cetakan yang digunakan pada proses pembuatan ban tersebut. Sehingga didapat hasil geometri sesuai yang direncanakan. Oleh karena itu, penulis melakukan penelitian untuk menganalisis tentang pengaruh variasi jenis material, *layer thickness* dan *scan speed* terhadap deformasi yang dihasilkan pada celah *spoke* 3D-printing proses *metal additive manufacturing* cetakan *airless tire*. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah *finite element method* dengan *powder bed fusion* bahan material metal. Pada penelitian ini penulis menggunakan software ANSYS *additive suite workbench* untuk menjalankan simulasi dan menganalisis proses cetakan 3D-printing. Penelitian ini diawali dengan perancangan desain CAD dan geometri cetakan *airless tire* kemudian dianalisis berdasarkan variasi yang telah ditentukan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut maka penulis dapat merumuskan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh jenis material yang digunakan terhadap deformasi yang dihasilkan melalui *finite element method* (FEM)?
2. Bagaimana pengaruh *layer thickness* terhadap deformasi yang dihasilkan melalui *finite element method* (FEM)?
3. Bagaimana pengaruh *laser speed* yang digunakan terhadap deformasi yang dihasilkan melalui *finite element method* (FEM)?
4. Apa jenis material dan parameter operasi terbaik yang digunakan pada proses *metal AM* melalui *finite element method* (FEM)

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh *layer thickness* yang digunakan terhadap deformasi yang dihasilkan melalui *finite element method* (FEM).
2. Menganalisis pengaruh *scan speed* yang digunakan terhadap deformasi yang dihasilkan melalui *finite element method* (FEM).
3. Menganalisis pengaruh jenis material yang digunakan terhadap deformasi yang dihasilkan melalui *finite element method* (FEM).
4. Mengetahui material 17-4PH dan Ti-6Al-4V serta parameter operasi terbaik yang digunakan pada proses metal AM cetakan *airless tire* melalui *finite element method* (FEM).

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah :

1. Metode pencetakan yang digunakan pada *built AM process* adalah *Powder Bed Fusion*
2. Pemodelan menggunakan ¼ dimensi desain cetakan *airless tire*.

3. Hanya mengamati deformasi yang terjadi pada celah *spoke* cetakan *airless tire*.
4. *Hatching spacing* yang digunakan adalah 0,13 mm.
5. *Preheat temperature* yang digunakan adalah 100 °C.
6. *Cooldown temperature* yang digunakan adalah 22 °C.
7. Material yang digunakan pada *base plate* adalah *structural steel*.
8. *Dwell time* yang digunakan adalah 10s.

1.5 Manfaat penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah :

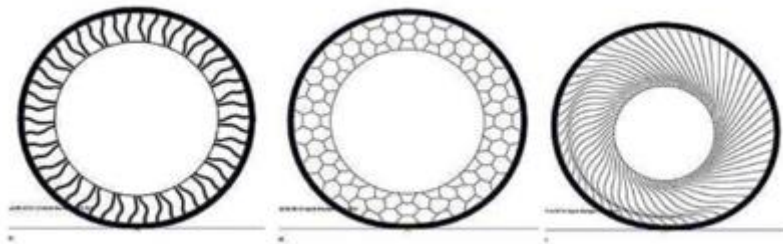
1. Memberi evaluasi pada desain yang telah dibuat untuk dapat dilakukan optimasi maupun perubahan desain pada penelitian berikutnya.
2. Menjadi referensi bagi perkembangan teknologi dan penelitian terkait *metal additive manufacturing*

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini dipaparkan landasan teori yang dijadikan acuan penelitian. Adapun dasar teori dan tinjauan pustaka yang digunakan berdasarkan simulasi dan analisa cetakan *airless tire* menggunakan metode *finite element method*.

2.1 *Airless tire*

Ban non-pneumatik atau ban tanpa udara adalah ban yang tidak didukung oleh tekanan udara. Dibandingkan dengan ban pneumatik dengan bentuk dan ukuran yang serupa, ban non-pneumatik umumnya memiliki gesekan guling yang lebih tinggi dan memberikan suspensi yang jauh lebih sedikit. Resilient Technologies dan perusahaan cabang Madison, Wisconsin yang berspesialisasi dalam rekayasa dan desain polimer menciptakan "Ban non pneumatik", yang pada dasarnya adalah polimer honeycomb yang dibungkus tapak hitam tebal. Struktur honeycomb dirancang untuk menopang beban pada ban, menghilangkan panas dan mengimbangi beberapa masalah ini. Menurut pengembangnya, desain ini merupakan replika terbaik dari ban pneumatik untuk meningkatkan kenyamanan berkendara. Tujuannya untuk mengurangi perubahan kekakuan ban, sehingga dapat memindahkan beban secara merata dan menjadi lebih homogen (Rangdale et al., n.d.).



Gambar 2.1 Ban tanpa udara dengan bentuk spoke yang berbeda

Kelebihan ban tanpa udara ini yaitu tidak perlu melakukan pengisian udara, aman terhadap benda tajam dan terhadap kebocoran, kinerja yang lebih baik dibanding ban konvensional, memberikan kenyamanan dan kendali yang baik, dan fleksibilitas yang memberikan cengkeraman baik antara ban dengan tanah. Sedangkan kerugiannya yaitu harganya yang mahal karena masih dalam tahap pengembangan, lalu penggantian komponen yang rumit, dan apabila ban mengalami kerusakan seperti aus, ban harus diganti secara keseluruhan. Selain itu, sulit untuk melakukan penyesuaian pada ban apabila ban airless ini sudah diproduksi (Kumar & Kalahastimath, 2021).

2.2 *Material Cetakan Airless Tire*

Terdapat sejumlah paduan komersial logam yang digunakan di *metal additive manufacturing*. Sampai saat ini, hanya ada sejumlah paduan komersial yang digunakan di AM. Beberapa diantaranya disajikan pada Tabel 2.1. Perlu dikembangkan untuk memanfaatkan keunggulan AM. Ti-6Al-4V sejauh ini merupakan yang paling banyak diselidiki. Hal ini dapat dikaitkan dengan kasus bisnis yang kuat yang dapat dikembangkan untuk suku cadang titanium dengan volume produksi yang rendah dan kompleks (Frazier, 2014). Beberapa diantaranya disajikan dalam tabel dibawah ini.

Tabel 2.1 Material pada metal AM

Titanium	Aluminum	Tool steels	Super alloys	Stainless steel	Refractory
Ti-6Al-4V	Al-Si-Mg	H13	IN625	316 & 316L	MoRe
ELI Ti	6061	Cermets	IN718	420	Ta-W
CP Ti			Stellite	347	CoCr
γ -TiAl				PH 17-4	Alumina

Pada penelitian ini penulis menggunakan material Ti-6Al-4V dikarenakan material tersebut yang umum digunakan pada proses metal AM di industri kedirgantaraan dan otomotif. Pada pemilihan material 17-4PH dikarenakan material tersebut banyak dijumpai dipasaran dan harganya relatif terjangkau.

2.2.1 17-4PH Stainless Steel

Baja tahan karat 17-4PH (SAE tipe 630, UNS S17400) adalah salah satu dari sedikit paduan baja yang dapat diendapkan mengeras. Ini juga merupakan salah satu baja tahan karat presipitasi yang paling umum digunakan. Paduan ini menunjukkan ketahanan korosi rata-rata yang sebanding dengan stainless steel tipe 304, dan ketahanan oksidasi yang unggul jika dibandingkan dengan stainless steel tipe SAE 4105. Aplikasi umum dari 17-4 stainless meliputi; industri kedirgantaraan, dan pembangkit listrik kimia dan (nuklir). Pada tabel menunjukkan nilai mekanis yang dipublikasikan untuk stainless 17-4PH dalam beberapa kondisi. Sebagai acuan, DMLS memiliki kesalahan tarik ± 50 Mpa, kesalahan perpanjangan $\pm 5\%$, dan kesalahan kekerasan ± 20 HV. Berikut material properties dari 17-4PH yang digunakan pada penelitian ini :

Tabel 2.2 Material properties 17-4PH

1	Temperature (C)	Young's Modulus (Pa)	Poisson's Ratio	Bulk Modulus (Pa)	Shear Modulus (Pa)
2	25	2,04E+11	0,291	1,6268E+11	7,9009E+10
3	221	1,95E+11	0,295	1,5854E+11	7,529E+10
4	307	1,87E+11	0,296	1,5278E+11	7,2145E+10
5	377	1,82E+11	0,305	1,5556E+11	6,9732E+10
6	455	1,76E+11	0,316	1,5942E+11	6,6869E+10
7	525	1,68E+11	0,309	1,466E+11	6,4171E+10
8	612	1,53E+11	0,322	1,4326E+11	5,7867E+10
9	684	1,42E+11	0,332	1,4087E+11	5,3303E+10
10	794	1,29E+11	0,348	1,4145E+11	4,7849E+10
11	889	1,17E+11	0,361	1,4029E+11	4,2983E+10

2.2.2 Ti-6Al-4V

Paduan Ti-6Al-4V atau dikenal sebagai Ti-6Al-4V adalah paduan titanium $\alpha + \beta$ dengan kekuatan tinggi, kepadatan rendah, ketangguhan patah yang tinggi, ketahanan korosi yang sangat baik, dan biokompatibilitas yang unggul. Ti-6Al-4V merupakan paduan titanium paling populer, Ti-6Al-4V menempati hampir setengah dari pangsa pasar produk titanium yang digunakan di dunia saat ini. Sementara industri kedirgantaraan masih mendominasi permintaan bidang aplikasi lain seperti industri kelautan, mobil, energi, kimia dan biomedis juga telah diterima secara luas selama setengah abad terakhir. Kepadatan yang rendah, kekuatan yang tinggi, ketahanan korosi yang tinggi dan biokompatibilitas merupakan karakteristik yang menarik dari Ti-6Al-4V untuk aplikasi seperti jembatan dan implan. Aplikasinya juga telah diperluas ke industri kelautan dan kimia karena ketahanan korosinya yang tinggi terhadap sebagian besar asam dan alkali korosif.

Pembuatan konvensional produk Ti-6Al-4V bergantung pada penempaan, pengecoran, diikuti oleh pemesinan berikutnya hingga menjadi bentuk dimensi akhir. Proses manufaktur tradisional ini selalu menghasilkan limbah material dalam jumlah besar, biaya produksi tinggi, dan *lead time* yang lama. Dalam keadaan seperti itu, *additive manufacturing* (AM) teknologi manufaktur canggih untuk memproduksi bentuk struktur secara langsung dari model CAD dengan menambahkan bahan secara lapis demi lapis, menawarkan kemampuannya yang bermanfaat untuk fabrikasi produk Ti-6Al-4V dengan kompleksitas geometris. Berikut merupakan material properties dari Ti-6Al-4V yang digunakan pada penelitian ini :

Tabel 2.3 Material properties Ti-6Al-4V

1	Temperature (C)	Young's Modulus (Pa)	Poisson's Ratio	Bulk Modulus (Pa)	Shear Modulus (Pa)
2	20	1,95E+11	0,25	1,3E+11	7,8E+10
3	100	1,91E+11	0,26	1,3264E+11	7,5794E+10
4	200	1,86E+11	0,275	1,3778E+11	7,2941E+10
5	300	1,8E+11	0,315	1,6216E+11	6,8441E+10
6	400	1,73E+11	0,33	1,6961E+11	6,5038E+10
7	500	1,64E+11	0,3	1,3667E+11	6,3077E+10
8	600	1,55E+11	0,32	1,4352E+11	5,8712E+10
9	700	1,44E+11	0,31	1,2632E+11	5,4962E+10
10	800	1,31E+11	0,24	8,3974E+10	5,2823E+10
11	900	1,17E+11	0,24	7,5E+10	4,7177E+10
12	1000	1E+11	0,24	6,4103E+10	4,0323E+10
13	1100	8,1E+10	0,24	5,1923E+10	3,2661E+10
14	1200	5,1E+10	0,24	3,2692E+10	2,0565E+10

2.3 Metal Additive Manufacturing

Metal additive manufacturing juga dikenal sebagai pencetakan 3D logam, teknologi ini menawarkan kebebasan desain dengan kemampuan untuk memproduksi suku cadang dari berbagai bahan material. *Additive manufacturing* (AM) telah banyak digunakan untuk membuat suku cadang logam fungsional dalam industri mobil, dirgantara, energi, dan perangkat medis karena kapasitas prosesnya yang fleksibel termasuk geometri kompleks, material bergradasi fungsional, dan penggunaan *tool* secara bebas (Vafadar et al., 2021). Pada proses manufaktur aditif logam terdapat dua kategori metode utama yaitu *powder bed fusion* (PBF) dan *direct energy deposition* (DED), suku cadang dibuat melalui peleburan bahan baku dalam bentuk bubuk atau kabel langsung dari model CAD (Li et al., 2018). Sistem dapat diklasifikasikan berdasarkan sumber energi atau cara material disambungkan, misalnya menggunakan pengikat, laser, nosel berpemanas, dll. Klasifikasi juga dimungkinkan berdasarkan kelompok material yang diproses, seperti plastik, logam, atau keramik. Keadaan bahan baku, dengan yang paling umum adalah padat (bubuk, kawat, atau lembaran) atau cair, juga digunakan untuk menentukan proses. Biasanya lapisan memiliki ketebalan 20 sampai 100 mm. Setelah lapisan bubuk didistribusikan, irisan 2D diikat menjadi satu, yang dikenal sebagai Pencetakan 3D, atau dilebur menggunakan sinar energi yang diterapkan pada lapisan bubuk. Dalam kasus kedua, sumber energi biasanya adalah satu laser berdaya tinggi, tetapi sistem canggih dapat menggunakan dua atau lebih laser dengan daya berbeda di bawah atmosfer gas inert.

Hederick (Herderick, 2011) menerbitkan ulasan tentang AM logam pada tahun 2011. Disajikan ringkasan yang bagus dari berbagai teknologi AM dan produsen peralatan AM yang mendominasi. Beberapa temuan utama dari laporan tersebut meliputi:

1. Bahan yang menggunakan AM mengalami siklus resor termal yang kompleks. Ada kebutuhan untuk lebih memahami hubungan antara struktur mikro dan properti untuk bagian fabrikasi AM, serta mengembangkan database bahan AM.
2. Ada kebutuhan untuk mengurangi perbedaan dalam sifat dan kualitas dari mesin ke mesin di seluruh bahan dan jenis mesin. Oleh karena itu, kontrol umpan balik *loop*

tertutup dan sistem penginderaan dengan kemampuan umpan maju yang cerdas perlu dikembangkan. Selanjutnya, ruggedisasi peralatan AM diperlukan.

3. AM dapat diterapkan pada pembuatan suku cadang yang tidak dapat dibuat dengan praktik pemesinan standar. Hal ini mendukung metodologi desain baru.

Salah satu mesin pencetakan pada *metal additive manufacturing* adalah SLM 500. SLM 500 adalah printer 3D industri yang dibuat oleh SLM Solutions, produsen yang berbasis di Jerman. Printer 3D logam dari pabrikan ini menggunakan teknologi pencetakan 3D *Selective Laser Melting* (SLM). Teknologi SLM terdiri dari peleburan dan penggabungan serbuk logam dengan sinar laser yang kuat. Setelah lapisan logam padat dibuat, baki yang menampung cetakan 3D diturunkan dan bubuk dilapisi di atasnya. Sintering dengan laser dilanjutkan untuk lapisan baru. Lapisan demi lapisan objek dicetak 3D. Solusi SLM SLM 500 dirancang untuk produksi komponen berukuran sedang dengan presisi tinggi dan kualitas permukaan yang bagus.



Gambar 2.2 Mesin SLM 500

Spesifikasi teknis mesin 3D SLM 500 ditampilkan pada table 2.4 berikut:

Tabel 2.4 Spesifikasi Teknis SLM 500

Build Envelope (L x W x H)	500 x 280 x 365 mm reduced by substrate plate thickness
3D Optics Configuration	Twin (2x 400W or 2x 700W) Quad (4x 400W or 4x 700W) IPG fiber laser
Real Build Rate	up to 171 cm ³ /h*
Variable Layer Thickness	20 µm - 90 µm, more available on request
Minimum Feature Size	150 µm
Beam Focus Diameter	80 - 115 µm
Maximum Scan Speed	10 m/s
Average Inert Gas Consumption in Process	16 l/min (Argon)
Average Inert Gas Consumption in Purging	250 l/min (Argon)
E-Connection / Power Input	400 Volt 3NPE, 63 A, 50/60 Hz, 8 - 10 kW
Compressed Air Requirement	ISO 8573-1:2010 [1:4:1] 7 bar
Machine Dimensions (L x W x H)	6080 x 2530 x 2620 mm

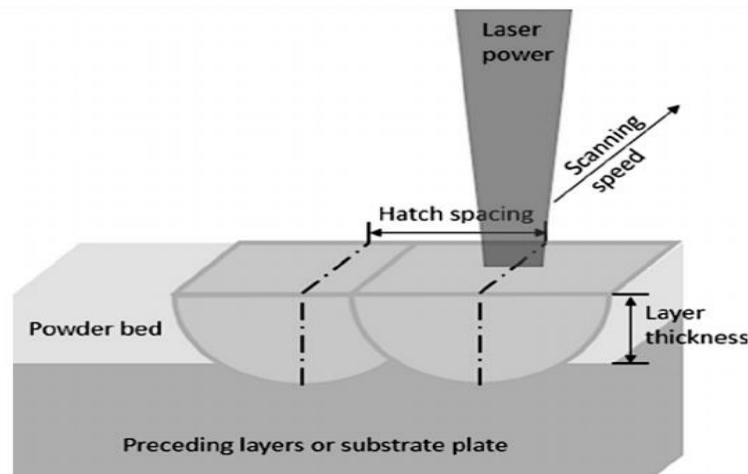
Pada penelitian ini menggunakan variasi parameter jenis material, *layer thickness*, dan *scan speed* berdasarkan dari spesifikasi teknis mesin SLM 500 yang disesuaikan dengan parameter proses pada *ansys additive workbench*.

2.3.1 Powder Bed Fusion (PBF)

Proses Powder Bed Fusion mencakup teknik pencetakan yang umum digunakan adalah sebagai berikut: *direct metal laser sintering* (DMLS), *electron beam melting* (EBM), *selective heat sintering* (SHS), *selective layer melting* (SLM), dan *selective laser sintering* (SLS).

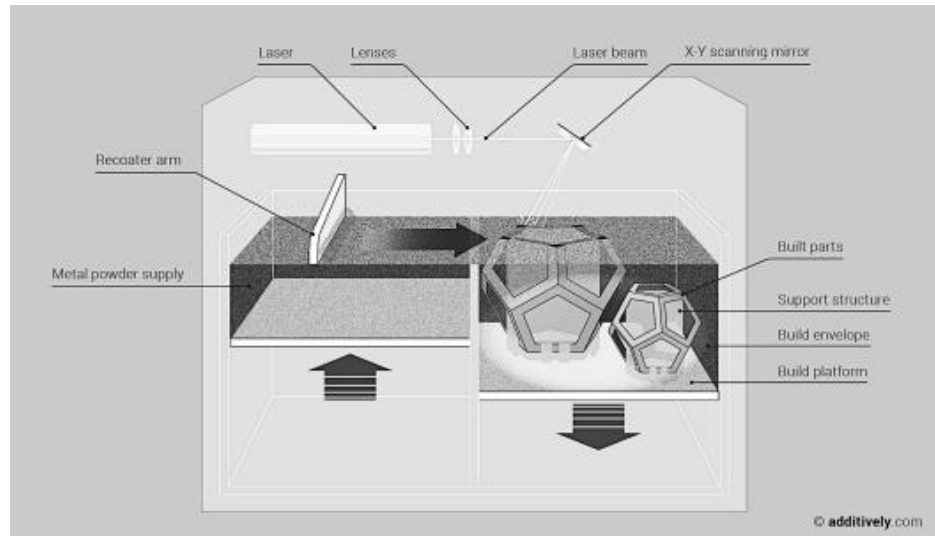
Metode *powder bed fusion* (PBF) menggunakan sinar laser atau elektron untuk melelehkan dan menyatukan bubuk material. Peleburan berkas elektron (EBM), metode yang memerlukan ruang hampa tetapi dapat digunakan dengan logam dan paduan dalam pembuatan bagian fungsional. Semua proses PBF melibatkan penyebaran bahan bubuk di atas lapisan sebelumnya. *Direct metal laser sintering* (DMLS) sama dengan SLS, namun dengan penggunaan logam dan bukan plastik. Proses sinter bubuk, lapis demi lapis. *Selectif laser Sintering* berbeda dari proses lain dengan cara menggunakan kepala cetak termal dipanaskan untuk menggabungkan bahan bubuk bersama-sama (Sames et al., 2016).

Proses SLM memiliki parameter yang dapat dikontrol, namun parameter yang paling kritis adalah *lase power*, *laser speed*, *hatching space*, *layer thickness* dan atmosfer proses, yang diilustrasikan dalam gambar dibawah :



Gambar 2.3 Bagian parameter SLM

Laser power dalam watt dan merupakan pengukuran daya yang dikirim pada *powder bed*, dalam joule per detik, dan bukan *laser power* yang digunakan. *Laser speed*, kadang-kadang disebut sebagai *scan speed*, dinyatakan dalam mm/s dan dikendalikan oleh aktuasi sistem optik. *Hatching spacing*, juga biasa disebut sebagai *hatching distance*, adalah pusat dari jarak tengah antara lintasan laser berikutnya dan dinyatakan dalam mikron. *Layer thickness* adalah ketebalan lapisan (*layer*) yang dikendalikan oleh pergerakan *powder bed*, dinyatakan dalam mikron, dan distribusi bubuk tambahan setelahnya. Akhirnya, proses atmosfer dikendalikan oleh gas yang dipasok, dengan nitrogen biasanya digunakan untuk bahan non-reaktif dan argon untuk bahan reaktif (Coulson, n.d.) .



Gambar 2.4 Proses pada SLM

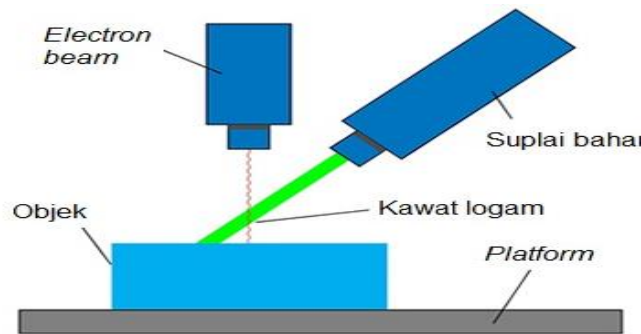
Proses operasi diilustrasikan pada Gambar 2.4 dan dilakukan dalam urutan berikut. Pertama, pasokan bubuk logam dinaikkan sementara *build platform* diturunkan oleh ketebalan lapisan yang ditentukan. Lengan pelapis kemudian akan menyebarkan bubuk logam dari suplai ke seluruh *platform* pembuatan. Laser tersebut kemudian diaktifkan dengan kekuatan laser yang telah ditentukan, dengan cermin pemindaian XY yang mengendalikan kecepatan laser dan jarak pindaian. Setelah pemindaian laser selesai, lengan pelapis akan kembali ke tempatnya posisi awal dan proses akan diulang sampai komponen selesai. Lapisan awal akan simpan material secara langsung pada pelat pembuatan, kadang-kadang disebut sebagai pelat substrat, dengan semua lapisan berikutnya dibangun di atas luas permukaan lapisan sebelumnya. Jika komponen tidak memiliki luas permukaan yang cukup untuk membangun, struktur pendukung akan ditambahkan ke desain. Sebuah struktur pendukung adalah komponen lain yang diproduksi dengan porositas yang disengaja agar lebih mudah penghapusan selama pemrosesan pasca. Setelah proses SLM selesai, bagian tersebut harus dipisahkan dari *build platform* melalui proses pemesinan manual atau otomatis (Coulson, n.d.).

2.3.2 *Directed Energy Deposition (DED)*

Directed energy deposition (juga dikenal dengan *direct energy deposition*) adalah salah satu jenis pencetakan 3D. Proses ini menciptakan produk-produk 3D dengan melelehkan bahan secara langsung dan menempatkannya lapis demi lapis. Teknik manufaktur logam aditif ini sebagian besar menggunakan serbuk atau kawat. Kawat kurang akurat karena sifat bentuk yang sudah terbentuk sebelumnya tetapi lebih hemat bahan jika dibandingkan dengan bubuk (Gibson et al., n.d.), karena hanya bahan yang diperlukan yang digunakan. Metode peleburan bahan bervariasi antara laser, berkas elektron atau busur plasma, semua dalam ruang yang dikendalikan dimana atmosfer telah mengurangi kadar oksigen. Dengan mesin 4 atau 5 sumbu, pergerakan kepala umpan tidak akan mengubah laju aliran material, dibandingkan dengan deposisi vertikal yang tetap (Gibson et al., n.d.).

Sementara dalam kebanyakan kasus, itu adalah lengan yang bergerak dan objek tetap dalam posisi tetap, ini dapat dibalik dan platform dapat dipindahkan sebagai gantinya dan lengan tetap dalam posisi tetap. Pilihannya akan tergantung pada aplikasi yang tepat dan objek yang sedang dicetak. Waktu pendinginan material sangat cepat, biasanya antara 1000 – 5000°C/detik (Gibson et al., n.d.). Waktu pendinginan pada gilirannya akan mempengaruhi struktur butir akhir dari bahan yang diendapkan, meskipun tumpang tindih bahan juga harus dipertimbangkan, dimana struktur butir berubah karena tumpang tindih dapat menyebabkan

pelelehan kembali, menghasilkan mikro yang seragam tetapi bergantian. -struktur. Tipikal ketebalan lapisan 0,25 mm sampai 0,5 mm (Gibson et al., n.d.).



Gambar 2.5 Bagian proses pada DED

Istilah populer lainnya untuk DED antara lain: fabrikasi cahaya terarah, deposisi logam langsung, pengelasan deposisi laser (LDW), dan laser cladding 3D. Selain untuk membuat produk baru, DED juga mampu memperbaiki komponen yang rusak, seperti bilah turbin atau baling-baling (Carlota, 2019).

2.4 Deformasi

Deformasi terjadi bila bahan mengalami gaya. Selama deformasi, bahan menyerap energi sebagai akibat adanya gaya yang bekerja sepanjang deformasi. Sekecil apapun gaya yang bekerja, maka benda akan mengalami perubahan bentuk dan ukuran. Perubahan ukuran secara fisik ini disebut deformasi. Deformasi ada dua macam yaitu deformasi elastis dan deformasi plastis. Yang dimaksud deformasi elastis adalah deformasi yang terjadi akibat adanya beban yang jika beban diiadakan, maka material akan kembali keukuran semula. Sedangkan deformasi plastis adalah deformasi yang bersifat permanen jika bebannya dilepas.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\frac{P}{A}}{\frac{\delta}{L}} \quad (2.1)$$

Sehingga deformasi (δ) dapat diketahui :

$$\delta = \frac{P \times L}{A \times E} \quad (2.2)$$

Dimana :

P = beban (N)

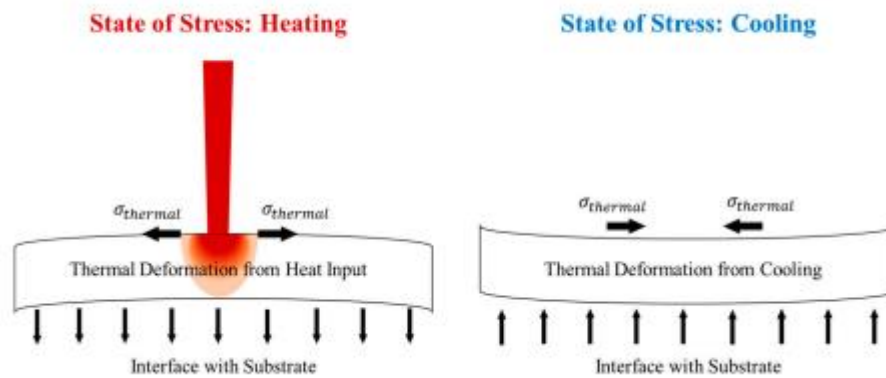
A = luas permukaan (mm^2)

L = panjang awal (mm)

E = modulus elastisitas.

Deformasi atau distorsi pada proses metal *additive manufacturing* adalah hasil yang tak terhindarkan dari pemanasan sejumlah kecil material ke titik lelehnya pada entitas yang jauh lebih dingin . Bahan di zona terpengaruh panas (HAZ) secara alami mengalami ekspansi termal, yang untuk sementara membengkokkan bagian ke bawah sementara lapisan atas masih dalam keadaan panas , karena bahan yang lebih dingin dipaksa untuk ditekuk untuk mengakomodasi

ekspansi bagian atas. Saat bahan mendingin, ada kontraksi termal di bagian atas saat bahan cair mengeras, yang meregangkan bagian bawah komponen sehingga membengkok ke atas. Tegangan selama ekspansi dan kontraksi sangat tinggi sehingga memaksa bagian untuk menghasilkan deformasi permanen. Gambar 2.6 mengilustrasikan deformasi termal yang terjadi saat proses metal *additive manufacturing*.



Gambar 2.6 Gradien tegangan dalam satu lapisan

Pada proses metal *additive manufacturing* melalui selective layer melting (SLM) dengan distribusi suhu tinggi dan pemadatan cepat selama proses SLM, tegangan sisa dihasilkan di bagian yang dicetak yang menyebabkan deformasi bagian tersebut. Untuk mendapatkan nilai dari deformasi pada proses metal AM dilakukan melalui finite element analisis yang memungkinkan untuk memprediksi deformasi bagian yang dicetak sebelum proses pencetakan sesungguhnya.

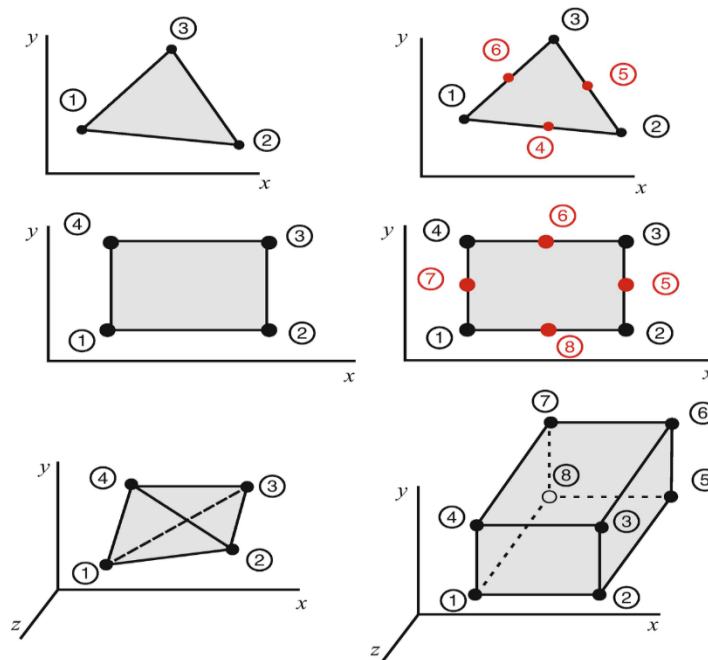
2.5 Finite Element Method (FEM)

Metode elemen hingga atau *Finite Element Method* adalah sebuah teknik komputasional yang digunakan untuk mendapatkan solusi pendekatan dari permasalahan dengan batas nilai pada bidang engineering. Masalah batas secara sederhana didefinisikan sebagai sebuah permasalahan matematis dimana yang melibatkan satu atau lebih variabel tidak bebas dan memenuhi sebuah persamaan diferensial dalam sebuah domain variabel bebas yang diketahui dan juga kondisi spesifik pada batasan domain tersebut. Finite element method (FEM) pada awalnya hanya dikembangkan untuk memecahkan masalah yang kompleks dalam struktur mekanika, tetapi saat ini digunakan untuk berbagai masalah yang berbeda seperti perpindahan panas, aliran fluida, medan listrik, dan lainnya.

Dalam metode elemen hingga, permasalahan nilai batas sering direpresentasikan ke dalam sebuah struktur fisis. Contohnya, terdapat sebuah volume material yang memiliki sifat-sifat fisis tertentu. Volume tersebut merepresentasikan domain dari sebuah permasalahan nilai batas yang akan diselesaikan. Sederhananya, asumsikan sebuah kasus dua dimensi dengan sebuah variabel batas $\phi(x,y)$ yang akan ditentukan pada setiap titik $P(x,y)$, seperti persamaan-persamaan fisis yang diketahui secara eksak pada setiap titik. Sehingga kita akan mendapatkan solusi matematis pada setiap titik tersebut, yang mana solusi tersebut adalah sebuah persamaan aljabar dari variabel- variabel tetap. Akan tetapi pada kenyataannya, domain tersebut mungkin sangat kompleks sekali. Sehingga nilai ketepatan solusi aljabar bentuk akan sangat rendah. Oleh karena itu, solusi pendekatan berdasarkan teknik numerik dan komputasi sering kali dibutuhkan dalam analisis rekayasa pada permasalahan-permasalahan yang kompleks. Dan analisis elemen hingga atau metode elemen hingga teknik yang sangat tepat untuk mendapatkan solusi aproksimasi dengan akurasi yang baik (Hutton, 2014).

Pengertian lain dari metode elemen hingga adalah sebuah struktur menjadi elemen-elemen kecil kemudian mendeskripsikan sifat-sifat dari tiap elemen. Tiap elemen kemudian menggunakan node. Proses ini akan menghasilkan persamaan aljabar yang serentak pada setiap node. Karena banyaknya persamaan aljabar pada satu struktur maka penggunaan alat bantu seperti komputer sangat direkomendasikan (Cook, 1990).

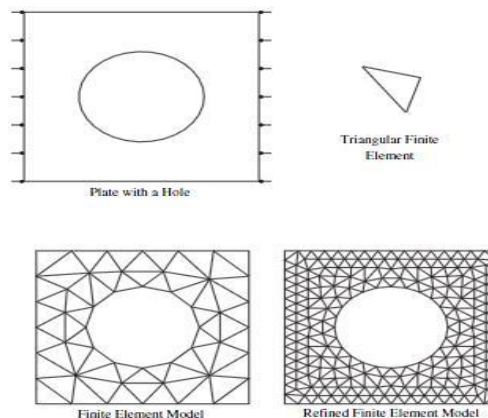
Penggunaan perangkat lunak sebagai alat bantu dalam menganalisis elemen hingga merupakan hal yang lumrah digunakan. Salah satu perangkat lunak yang biasa digunakan untuk melakukan analisis elemen hingga adalah ANSYS Workbench. ANSYS Workbench merupakan perangkat lunak yang menggunakan sistem analisis tertentu dalam melakukan analisis. Penggunaan setiap sistem analisis dapat dilaksanakan secara terpisah dalam satu proyek, namun dapat dilakukan secara terintegrasi antara satu sistem analisis dengan sistem analisis lainnya.



Gambar 2.7 Certain 2D and 3D continuum element

(Tekkaya A. Erman

and Soyarslan, 2014)



Gambar 2.8 Meshing pada plate (Fish et al., n.d.)

2.5.1 Thermo-Mechanical Simulation

Proses termomekanikal dilakukan untuk mensimulasikan medan suhu dan memperkirakan tegangan sisa dan distorsi menggunakan FEM. *Input* yang ditentukan oleh pengguna selama tahap pra-pemrosesan adalah bagian geometri, mesh, awal dan kondisi batas, beban yang diterapkan dan sifat material. Pada tahap pemrosesan, persamaan diferensial parsial yang mengatur sistem di diskritisasi menjadi persamaan untuk setiap elemen dan kemudian semua persamaan tersebut dirangkai menjadi persamaan global. Solusi persamaan dapat digunakan dalam tahap pasca-pemrosesan untuk memvisualisasikan medan suhu pada bagian geometri. Untuk memperkirakan tegangan sisa dan distorsi, analisis mekanis dilakukan, mengikuti alur kerja yang serupa. Medan suhu diperoleh dengan analisis termal yang akan diterapkan sebagai *load*. Analisis termo-mekanis dapat digabungkan atau tidak berpasangan. Dalam analisis gabungan, pembentukan panas disebabkan oleh gesekan atau dalam kasus ini oleh deformasi plastik bahan dipertimbangkan dalam perhitungan bidang suhu. Untuk mengambil efek hasil tersebut, analisis termal dan mekanik dilakukan secara bersamaan.

Persamaan keseimbangan energi dengan sistem tertutup yang mengacu pada hukum termodinamika pertama dapat ditulis sebagai :

$$QL = QCD + QCV + QR \quad (2.3)$$

dimana QL , QCD , QCV dan QR adalah nilai kalor untuk fluks panas, konduksi, konveksi yang hilang dan radiasi yang hilang masing-masing. Mempertimbangkan volume part dalam proses AM, persamaan konduksi panas menurut hukum Fourier adalah :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.4)$$

dimana K adalah konduktivitas termal, T adalah suhu part, \dot{q} adalah laju dimana panas disuplai ke sistem, ρ adalah densitas material, C_p adalah kapasitas panas spesifik dan t adalah waktu interaksi antara beam dan material. Untuk mendefinisikan transformasi *solid-liquid*, persamaan di atas dapat dimodifikasi sehingga entalpi perubahan diperhitungkan. Perubahan entalpi dH dinyatakan sebagai :

$$dH = C_p dT \quad (2.5)$$

Dan persamaan konduksi panas diubah menjadi :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2.6)$$

Kondisi awal dapat dinyatakan sebagai :

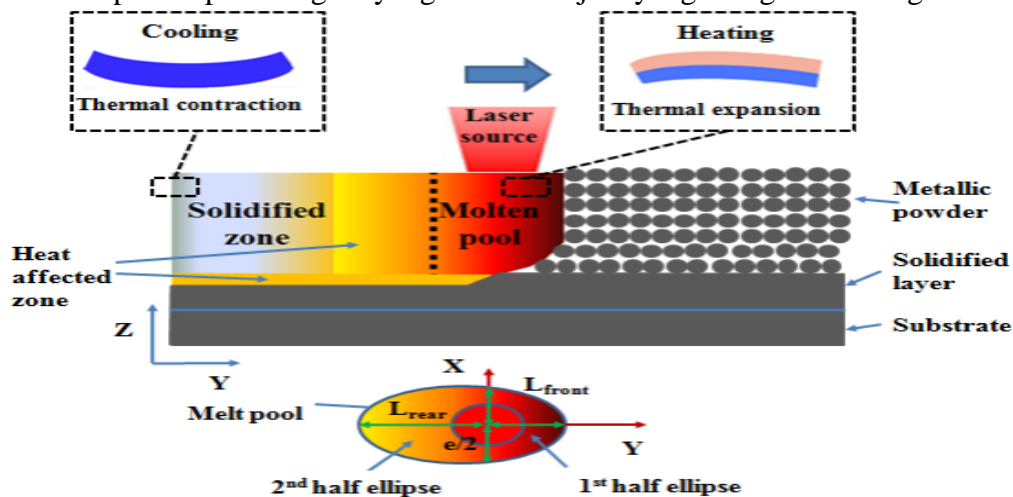
$$T(x, y, z, 0) = T_0 \quad (2.7)$$

Diasumsikan bahwa suhu awal bubuk sama dengan suhu lingkungan T_0 . Dalam kasus umum, dimana panas yang disuplai oleh beam dimodelkan sebagai fluks panas dan panas hilang dari sistem oleh konveksi dan radiasi, kondisi batas untuk permukaan bebas bagian adalah

$$k \frac{\partial T}{\partial n} - \dot{q}_s + h(T - T_0) + \sigma \varepsilon (T^4 - T_0^4) \quad (2.8)$$

dimana n adalah vektor normal ke permukaan, \dot{q}_s adalah laju dari masukan panas dari *beam*, h adalah perpindahan panas koefisien, s adalah konstanta Stefan–Boltzmann dan ε adalah emisivitas.

Deformasi pada metal AM dapat diprediksi melalui distribusi temperatur dan tegangan sisa yang terjadi saat proses simulasi. Gambar 2.9 menunjukkan mekanisme gradien suhu dengan deformasi bagian dalam pemanasan dan proses pendinginan. Ketika sumber laser memindai pada permukaan bubuk, energi ditransfer dari atas permukaan ke bawah permukaan melalui berbagai perubahan fisik seperti perpindahan panas, radiasi, konveksi, konduksi, aliran fluida di dalam kolam cair, peleburan, penguapan, dan reaksi kimia. Selama Proses SLM, ekspansi termal pada lapisan bagian yang dicetak terjadi yang mengarah ke bagian deformasi.



Gambar 2.9 Mekanisme gradien suhu proses SLM (Gibson et al., n.d.)

Gambar 2.9 menggambarkan ukuran kolam lelehan dalam proses SLM. Deskripsi nilai suhu di kolam cair dengan demikian dideskripsikan oleh persamaan sebagai berikut, menggunakan fitur geometris dari kolam leleh dan suhu maksimum T_{max} diperoleh dengan simulasi elemen hingga (Gibson et al., n.d.).

- Untuk $y > 0$ (*front semi-elips*)

$$T = T_m + \frac{1}{2} (T_{max} - T_m) \times \left(1 + \cos \left(\pi \left(\frac{x^2}{(e/2)^2} + \frac{y^2}{L_{front}^2} + \frac{z^2}{p^2} \right) \right) \right) \quad (2.9)$$

- Untuk $y < 0$ (*rear semi – elips*)

$$T = T_m + \frac{1}{2}(T_{max} - T_m) \times \left(1 + \cos \left(\pi \left(\frac{x^2}{(e/2)^2} + \frac{y^2}{L_{rear}^2} + \frac{z^2}{p^2} \right) \right) \right) \quad (2.10)$$

Dengan L_{front} adalah bagian depan dari panjang kolam leleh (*melt-pool*), L_{rear} adalah bagian belakang dari panjang kolam leleh (*melt-pool*), e adalah lebar kolam leleh (*melt-pool*), p adalah kedalaman kolam leleh (*melt-pool*), T_{max} adalah suhu maksimum (K), T_m adalah suhu leleh (K), dan p adalah kedalaman kolam leleh (μm).

Kemudian, informasi dari suhu digunakan untuk menganalisis tegangan sisa dan memprediksi deformasi yang terjadi pada bagian part yang dibangun.

Regangan dengan perubahan suhu dihitung sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{bmatrix} \cdot \Delta T \quad (2.11)$$

Dengan $[\epsilon_{ij}]$ adalah tensor regangan, α_{ij} adalah koefisien muai panas, T adalah perbedaan suhu. Rumus untuk menghitung tegangan sisa dengan pertimbangan perubahan suhu adalah sebagai berikut.

$$\sigma(T) = E(T) \cdot \alpha(T) \cdot [T_m - T] \quad (2.12)$$

Dengan E adalah kekakuan material, T adalah suhu pra-pemanasan (*preheating-temperature*).

Berdasarkan teori deformasi kecil, seperti yang dijelaskan oleh (Gouge et al., 2018) pendekatan ini valid bila tidak ada gangguan besar, seperti retak, runtuhnya tumpuan, dan pemisahan bagian dari pelat build. Kegagalan seperti itu tidak hanya akan mengubah bentuk bagian tetapi juga mengubah jalur konduksi panas, yang menyebabkan perubahan besar dalam profil suhu. Kombinasi perpindahan dan traksi kondisi batas diterapkan ke seluruh bagian. Surface bagian bawah dianggap sebagai ($u = v = w = 0$) yang berarti perpindahan dalam arah x , y , dan z adalah nol. Di mana u , v , dan w adalah komponen perpindahan dalam arah x , y , dan z . Batas traksi kondisi $T(n)$ diterapkan pada node tertentu menggunakan riwayat termal. Apalagi pada *free surface* (yaitu, permukaan antara bagian dan bubuk, dan permukaan atas) diberi traksickondisi bebas, $T(n) = 0$.

Deformasi diperoleh sesuai dengan Persamaan

$$\{U\} = [K]^{-1}\{F_T\} \quad (2.13)$$

di mana $\{U\}$ adalah vektor perpindahan; $[K]$ matriks kekakuan elemen; dan $\{F_T\}$ adalah vektor beban termal. Nilai dari $\{U\}$ didapatkan dari hasil simulasi transient pada hasil distribusi suhu geometri cetakan. Pada simulasi yang dilakukan oleh penulis mengabaikan nilai dari sensitifitas pada material yang digunakan. Nilai dari $\{F_T\}$ adalah gaya yang diakibatkan oleh hasil beban termal dari distribusi suhu.

Berikut diperoleh per Persamaan

$$[K] = \int [B]^T [H] [B] \cdot dv \quad (2.14)$$

$$\{F_T\} = \int [B]^T [H] \alpha (\Delta T) \cdot dv \quad (2.15)$$

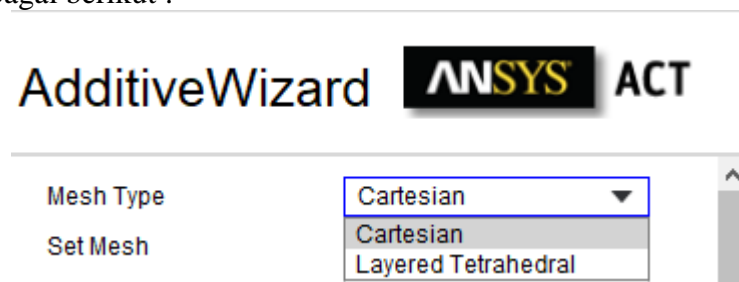
Di mana domain integrasi adalah volume elemen, [B] adalah perpindahan regangan matriks, [H] adalah matriks elastisitas, α adalah vektor salah satu koefisien muai panas, dan ΔT adalah perbedaan suhu antara dua node.

Sampai seluruh bagian part selesai, mencatat bahwa lapisan berikutnya disimulasikan sebagai disimpan di atas lapisan yang sebelumnya disimpan dan dideformasi. Oleh karena itu, deformasi lapisan berikutnya menyumbang, dan pada gilirannya dipengaruhi oleh, dislokasi pada lapisan sebelumnya.

2.5.2 Meshing

Kualitas FEA sangat ditentukan oleh karakteristik mesh yang kekuatannya, dengan mesh yang buruk mungkin menyebabkan perhitungan numerik yang tidak stabil dan tidak akurat. Selanjutnya, kualitas mesh memiliki dampak yang signifikan pada efisiensi komputasi dan waktu yang dibutuhkan untuk analisis (Li et al., 2018).

Pada *metal additive manufacturing* melalui ekstensi *additive wizard* meshing yang digunakan adalah sebagai berikut :



Gambar 2.10 Mesh pada AM

1. Cartesian

Cartesian atau voxel meshing adalah yang paling umum digunakan jenis mesh untuk simulasi manufaktur aditif saat ini. Elemen terdiri dari kubus (voxel) dengan keseluruhan model konsisten pada ukuran tertentu. Karena elemen voxel dengan panjang tepi yang identik pada masing-masing sisi kubus, representasi geometri hanya perkiraan. Untuk mengatasi representasi geometri yang tidak akurat menggunakan elemen hexahedron maka dapat menggunakan apa yang disebut faktor proyeksi. Faktor ini berkisar dari nol sampai satu dan menggambarkan tingkat representasi bernilai nol karena tidak ada adaptasi elemen. Dengan semakin besar nilai faktornya, semakin banyak elemennya dan lebih terdistorsi agar sesuai dengan geometri sebenarnya dari bagian tersebut. Kemiringan yang dihasilkan dan aspek rasio yang tidak merata mengakibatkan kualitas elemen menjadi buruk. Namun hasil simulasi lebih akurat dimungkinkan menggunakan metode meshing ini. Jaringan kartesius bisa menggunakan pendekatan polinomial linier, kuadrat atau bahkan lebih tinggi. Elemen berbentuk segi enam kemudian memiliki delapan (linier) atau dua puluh (kuadrat) node per elemen.

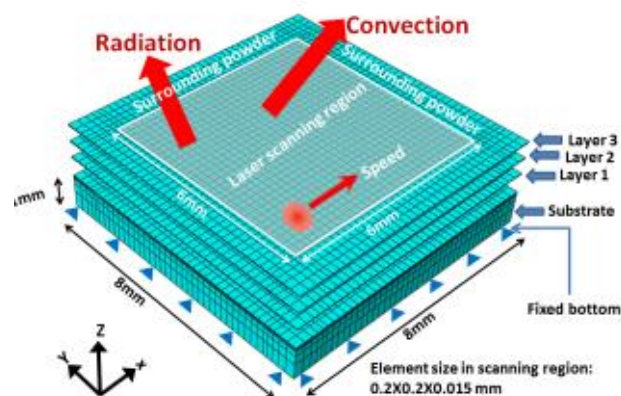
2. Layered tetrahedral

Meshing tetrahedral berlapis pertama kali diperkenalkan untuk simulasi manufaktur aditif pada tahun 2019 oleh ANSYS. Tujuannya adalah untuk menyederhanakan representasi detail kecil geometri bagian AM tanpa meningkatkan level kompleksitas model (Herderick, 2011). Bentuk tetrahedral dari

elemen memungkinkan algoritma meshing untuk mencapai mesh yang baik dengan hanya distorsi elemen kecil. Meshing tetrahedral berlapis berbeda dari meshing tetrahedral tradisional dalam hal elemen orientasi. Dalam parameter meshing, tinggi lapisan didefinisikan, dimana semua elemen perlu membentuk permukaan datar. Ketinggian lapisan tidak harus sama dengan ukuran elemen, karena elemen diperbolehkan menjadi lebih kecil. Elemen berbentuk tetrahedron dari mesh tetrahedral berlapis umumnya memiliki lima (pendekatan linier) atau sepuluh (kuadrat pendekatan) node per elemen. Karena ada lebih sedikit node per elemen daripada dengan yang berbentuk segi enam, lebih banyak elemen diperlukan untuk mencapai akurasi hasil yang dihasilkan.

2.6 Penelitian Terdahulu

Pada penelitian yang dilakukan oleh (Cheng et al., 2016) yang berjudul “*Stress and Deformation Evaluations of Scanning Strategy Effect in Selective Laser Melting*” di latar belakang bahwa (SLM) telah muncul sebagai salah satu teknik aditif logam utama teknologi manufaktur yang digunakan untuk banyak aplikasi di berbagai industri seperti medis dan sektor kedirgantaraan. Namun, cacat seperti distorsi bagian dan delaminasi dihasilkan dari tegangan sisa yang diinduksi proses masih merupakan salah satu tantangan utama yang menghambat penyebaran adopsi SLM. Untuk parameter proses, jalur pemindaian sinar laser akan mempengaruhi perilaku termomekanis dari bagian *build part* sehingga mengubah pola pemindaian merupakan sebuah strategi yang mungkin dapat mengurangi tegangan sisa dan deformasi melalui pengaruh panas distribusi masukan intensitas. Dalam penelitian ini, model elemen hingga (FE) 3D yang digabungkan secara berurutan dikembangkan untuk menyelidiki respon termomekanis dalam proses SLM. *Software* pemodelan yang digunakan adalah ABAQUS dengan model diterapkan untuk menguji strategi pemindaian yang berbeda dan mengevaluasi efeknya pada suhu *part*, tegangan dan deformasi. Penelitian ini mengamati deformasi atau distorsi yang terjadi pada sebuah part balok dengan ukuran 8 x 8 x 1 mm dengan material Inconel 718.

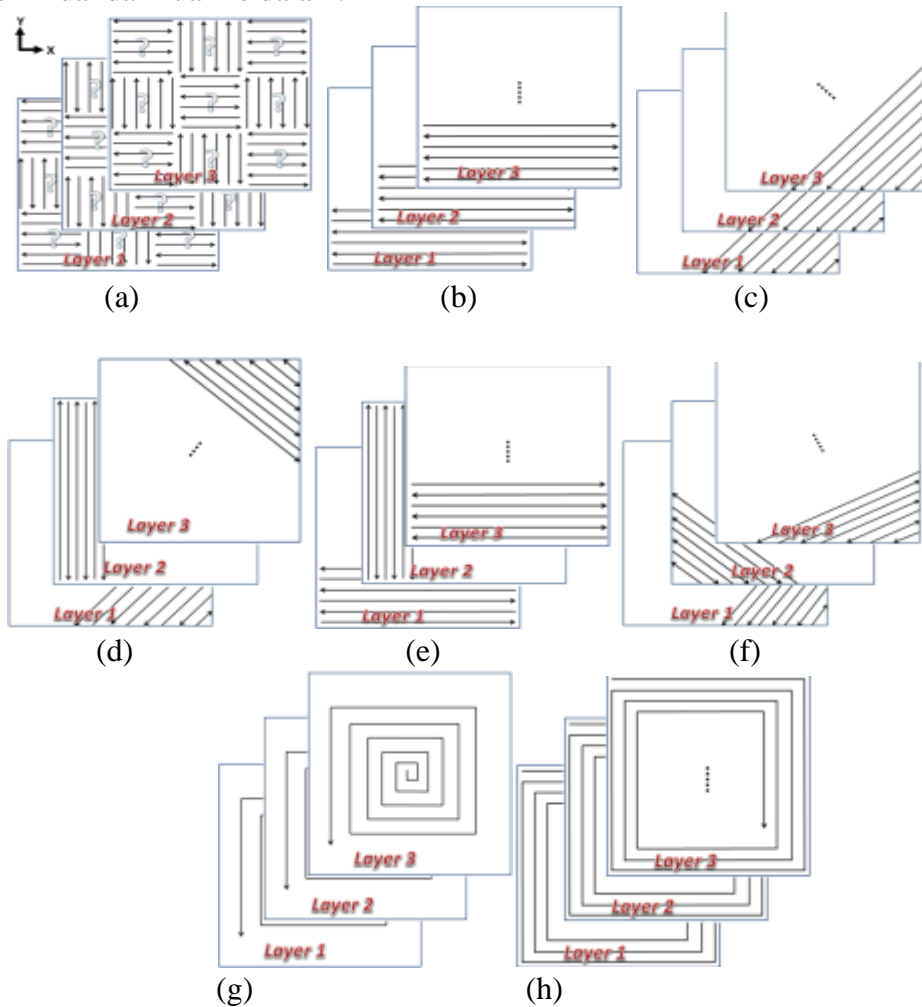


Gambar 2.11 Geometri dan *boundary condition model*

Domain pemindaian berada dalam kotak berukuran 6×6 mm. Namun, bagian logam SLM yang sebenarnya akan sangat melebihi ukuran model numerik ini dan dapat diiris menjadi ratusan ribu lapisan, yang sulit untuk dilakukan simulasi mengingat biaya komputasi. Dengan demikian, model ukuran yang lebih kecil telah dipertimbangkan dalam penelitian ini. *Powder* berlapis menggunakan partikel In 718 dengan ketebalan masing-masing lapisan 30 mikrometer.

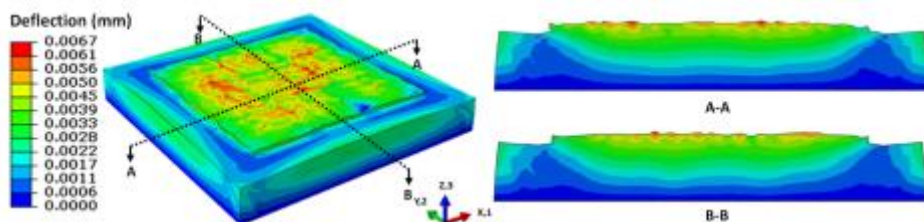
Metode pemindaian telah diringkas dalam Gambar 2.14. Kasus (a) adalah pulau acak pemindaian, seluruh domain pemindaian telah dibagi menjadi 9 pulau dengan ukuran pulau yang diberikan (2×2 mm) dan dengan proses rotasi arah pemindaian pada lapisan berikutnya,

penyelesaian urutan pulau tunggal dipilih secara acak. Kasus (b) adalah garis horizontal bolak-balik pemindaian tanpa bagian pulau. Kasus (c) adalah pemindaian garis miring ke depan dan ke belakang 45° ; itu jalur laser berorientasi 45° terhadap sumbu X. Kasus (d) adalah kemiringan 45° pemindaian dengan rotasi vektor pemindaian 45° pada lapisan berikutnya. Kasus (e) adalah garis bolak-balik pemindaian dengan rotasi vektor pemindaian 90° pada lapisan berikutnya. Kasus (f) adalah pemindaian miring 67° dengan rotasi vektor pemindaian 67° pada lapisan berikutnya. Rotasi derajat prima digunakan untuk menghindari vektor pemindaian berulang hanya dalam beberapa lapisan, misalnya, vektor pemindaian akan sama persis setelah 4 lapisan untuk sudut rotasi 90° . Kasus (g) adalah pemindaian ular dari dalam ke luar. Kasus (h) adalah ular memindai dari luar ke dalam.

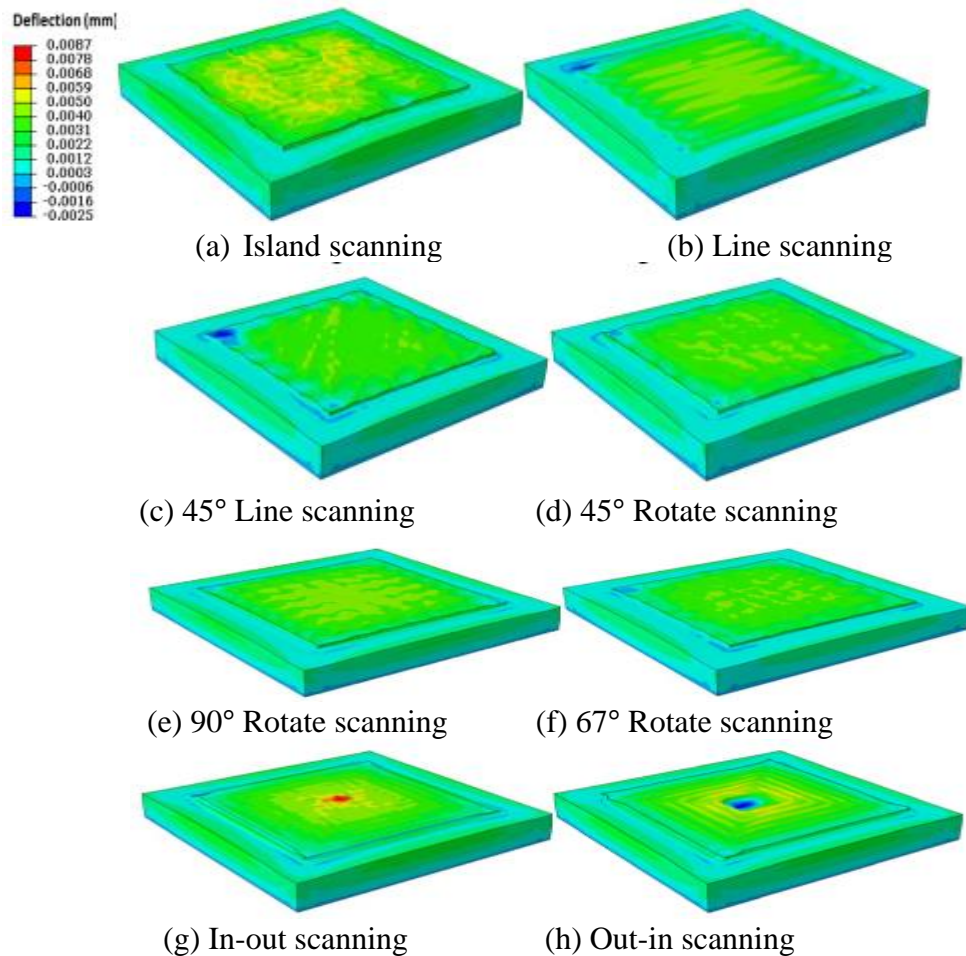


Gambar 2.12 Variasi strategi pemindaian

Hasil dari simulasi yang dilakukan ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 2.13 Part build direction (Z direction) deformation



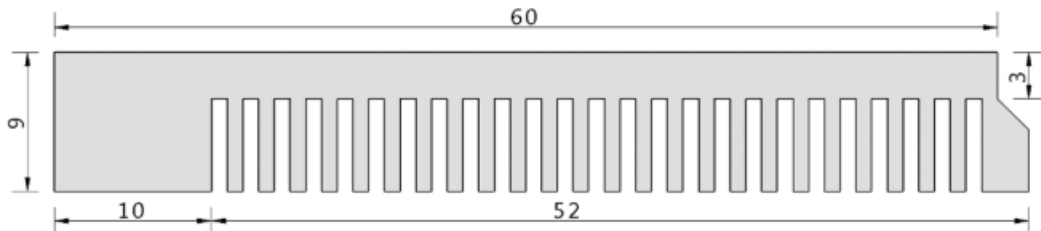
Gambar 2.14 Deformasi *contour* pada semua kasus pemindaian

Hasil utama diringkas sebagai berikut:

1. Di antara semua kasus yang diuji, pola *out-in scanning* memiliki tegangan maksimum sepanjang arah X dan Y; sedangkan 45° pemindaian garis miring dapat mengurangi tegangan sisa di kedua arah.
2. Perbedaan tegangan arah yang besar dapat dihasilkan oleh strategi pemindaian garis horizontal.
3. Arah X dan Y konsentrasi tegangan ditunjukkan di sekitar tepi lapisan yang diendapkan dan antarmuka antara lapisan yang diendapkan dan substrat untuk semua kasus.
4. Pemindaian garis miring 45° juga memiliki deformasi pada arah *build* yang lebih kecil daripada *case* lainnya.

Pada penelitian berikutnya yang dilakukan oleh (Mugwagwa et al., 2019) yang berjudul “*Effect of Process Parameters on Residual Stresses, Distortions, and Porosity in Selective Laser Melting of Maraging Steel 300*” yang dilatar belakangi bahwa *Selective Laser Melting* (SLM) adalah salah satu metode manufaktur aditif paling terkenal yang tersedia untuk fabrikasi bagian fungsional dari bubuk logam. Meskipun SLM sekarang menjadi teknik manufaktur aditif logam yang sering digunakan, penerapannya yang luas di industri masih terhalang oleh fenomena yang menyertainya, salah satunya adalah tegangan sisa yang tinggi. Beberapa efek dari tegangan sisa seperti warping dan retak akibat tegangan termal tidak dapat

diperbaiki pada *post-processing*. Oleh karena itu, menetapkan kombinasi parameter proses input yang menghasilkan besaran tegangan sisa yang paling kecil dan distorsi dan/atau retak terkait sangat penting. Penelitian yang dilakukan oleh (Mugwagwa et al., 2019) menyajikan pengaruh *laser power*, *scanning speed*, dan *layer thickness* terhadap tegangan sisa, distorsi yang terjadi pada *part Maraging Steel 300* untuk menetapkan kombinasi parameter input yang paling optimal.



Gambar 2.15 Geometri Cantilever

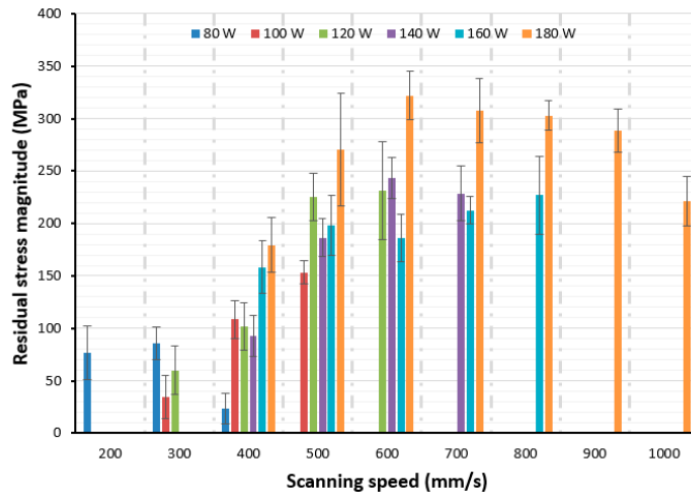
Pada penelitian yang dilakukan oleh (Mugwagwa et al., 2019) sampel dibuat dari *Maraging Steel 300*, yang juga biasa disebut sebagai 18Ni(300). Baja Maraging 300 memiliki fraktur yang sangat baik ketangguhan dan diterapkan secara luas untuk aplikasi perkakas kerja panas seperti pembuatan injeksi sisipan cetakan dan alat pembentuk lembaran logam panas. Kekuatan luluh (*yield strength*) baja maraging 300 yang terpasang adalah 950 MPa.

Pengukuran tegangan sisa dilakukan dengan teknik difraksi sinar-X (XRD). Metode XRD tidak merusak, dan banyak digunakan untuk mengukur tegangan permukaan pada komponen yang diproduksi SLM. Meskipun evaluasi, sisa yang mendalam lebih disukai, biaya untuk melakukan pengukuran tersebut biasanya mahal, terutama ketika mengembangkan beberapa bagian seperti dalam penelitian ini. Namun demikian, karena besarnya tekanan meningkat di dekat permukaan bagian yang dibangun SLM, menganalisis hanya pada permukaan yang ditentukan.

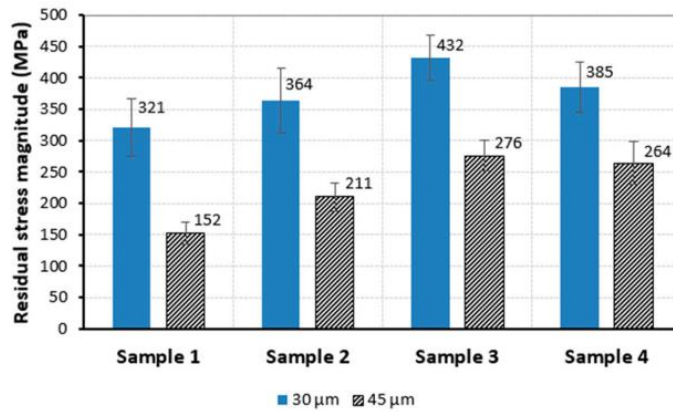


Gambar 2.16 Alat ukur deformasi dengan teknik difraksi sinar-X (XRD)

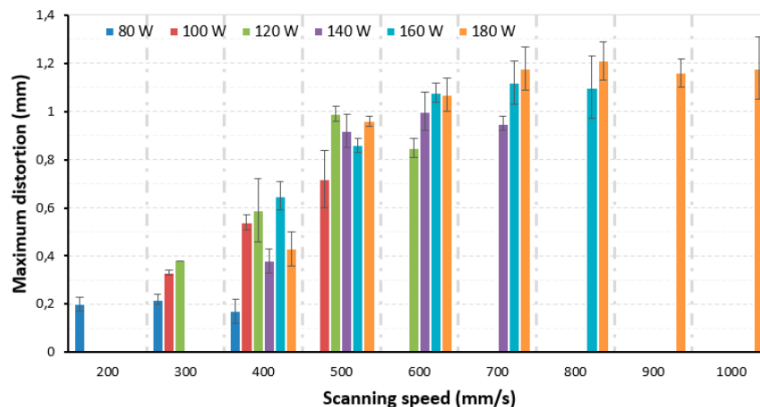
Hasil dari penelitian yang dilakukan oleh (Mugwagwa et al., 2019) disajikan dalam grafik berikut:



Gambar 2.17 Variasi besarnya *residual stress magnitude* dengan daya laser dan *scanning speed* (lapisan 30 μm).



Gambar 2.18 Perbandingan besarnya *residual stress* untuk ketebalan lapisan 30 μm dan 45 μm pada 180 W dan 600 mm/s untuk sampel yang diproduksi pada mesin EOSINT M280.



Gambar 2.19 Efek *Scanning Speed* dan daya laser terhadap distorsi pada ketebalan lapisan 30 μm .

Hasil tersebut dapat diringkas sebagai berikut:

1. Daya laser dan kecepatan pemindaian menimbulkan gradien termal curam yang kemudian menyebabkan peningkatan besaran tegangan sisa dan distorsi yang sesuai.

2. Peningkatan ketebalan lapisan menghasilkan penurunan tegangan sisa dan distorsi, meskipun peningkatan porositas yang tidak diinginkan juga diamati.
3. Penurunan besarnya tegangan sisa dapat dikaitkan dengan input energi termal yang berkurang dan laju pendinginan.

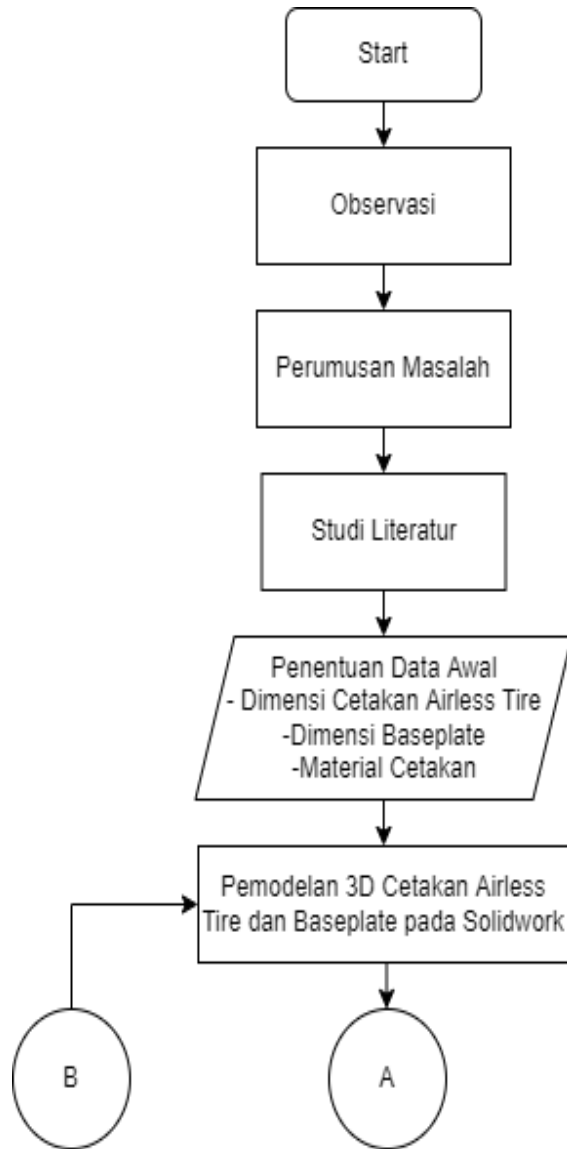
Tabel 2.5 Perbandingan penelitian terdahulu dan penelitian yang akan dilakukan

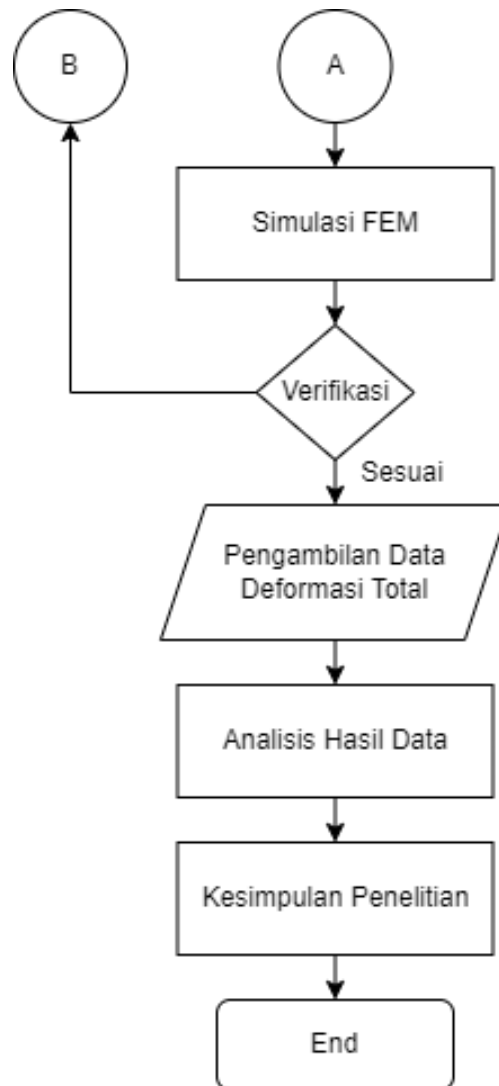
Parameter Analisa	Penelitian		
	Cheng dkk	Mugwagwa dkk	Penulis
Menganalisis distorsi/deformasi	✓	✓	✓
Part yang di analisa	Balok	Cantilever	Cetakan metal airless tire
Material yang digunakan	Inconel 718	Maraging Steel 300	17-4PH dan Ti-6Al-4V
Memvariasikan layer thickness	✗	✓	✓
Memvariasikan scan speed	✗	✓	✓
Memvariasikan material	✗	✗	✓
Variasi metode <i>scanning</i>	✓	✗	✗
Jenis proses AM	Powder Bed Fusion	Powder Bed Fusion	Powder Bed Fusion
Software pemodelan/simulasi	ABAQUS	Eksperimen	<i>Ansys additive suite workbench</i>
Metode Simulasi	<i>Finite Element Method</i>	Eksperimen	<i>Finite element method</i>

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 *Flowchart* penelitian

Berikut merupakan flowchart yang digunakan dalam melakukan penelitian ini.





Gambar 3.1 Metodologi Penelitian

3.2 Observasi

Observasi adalah langkah pertama yang dilakukan dalam melakukan penelitian ini. Hal ini dilakukan untuk menentukan permasalahan yang akan dijadikan bahan penelitian oleh penulis. Dalam penelitian ini, penulis melakukan observasi pada lingkup cetakan metal ban tanpa udara dan deformasi yang terjadi pada spoke pada saat proses pencetakan metal *additive manufacturing*.

3.3 Perumusan Masalah

Setelah observasi, penulis merumuskan masalah dimana pada kasus-kasus ini desain cetakan metal ban tanpa udara yang telah dibuat harus dianalisa deformasi pada bagian celah spokenya agar diketahui deformasi yang terjadi pada proses pencetakan menggunakan metal *additive manufacturing*. *Spoke* merupakan bagian vital pada ban tanpa udara karena memiliki fungsi sebagai pengganti tekanan inflasi angin seperti pada ban konvensional. Nilai yang didapatkan dari penelitian ini melalui variasi yang ditentukan akan dibandingkan sehingga diketahui deformasi minimal dan maksimal yang terjadi pada celah *spoke* ban tanpa udara yang nantinya akan menjadi evaluasi desain geometri cetakan spoke ban tanpa udara. Melalui penelitian ini diharapkan desain yang telah dibuat dapat dikembangkan dan diubah desainnya

jika diperlukan sehingga ban tanpa udara dapat diproduksi secara massal yang mampu menyaingi ban yang umum digunakan saat ini.

3.4 Studi Literatur

Tahap selanjutnya setelah masalah dirumuskan yaitu penulis melakukan studi literatur dengan tujuan untuk mengetahui dan mempelajari teori – teori dasar yang akan digunakan dalam penelitian ini. Peneliti melakukan studi literatur dengan mencari jurnal dan juga buku yang berhubungan dengan topik berupa penelitian dasar teori ban tanpa udara, *metal additive manufacturing*, metode elemen hingga, penggunaan ANSYS additive workbench melalui analisa *transient thermal* dan *static structural* untuk mendukung penelitian ini.

3.5 Pengumpulan Data

Setelah melakukan studi literatur, penulis perlu menentukan dan mengumpulkan data dari objek yang akan diteliti, dalam hal ini yaitu cetakan metal ban tanpa udara yang dimodelkan dalam ¼ bentuk geometrinya dan *base plate* yang digunakan pada proses *metal additive manufacturing*. Data yang didapatkan yaitu berupa dimensi dari cetakan metal ban tanpa udara serta dimensi *base plate* yang digunakan. Berikut data yang telah dikumpulkan :

Tabel 3.1 Dimensi komponen

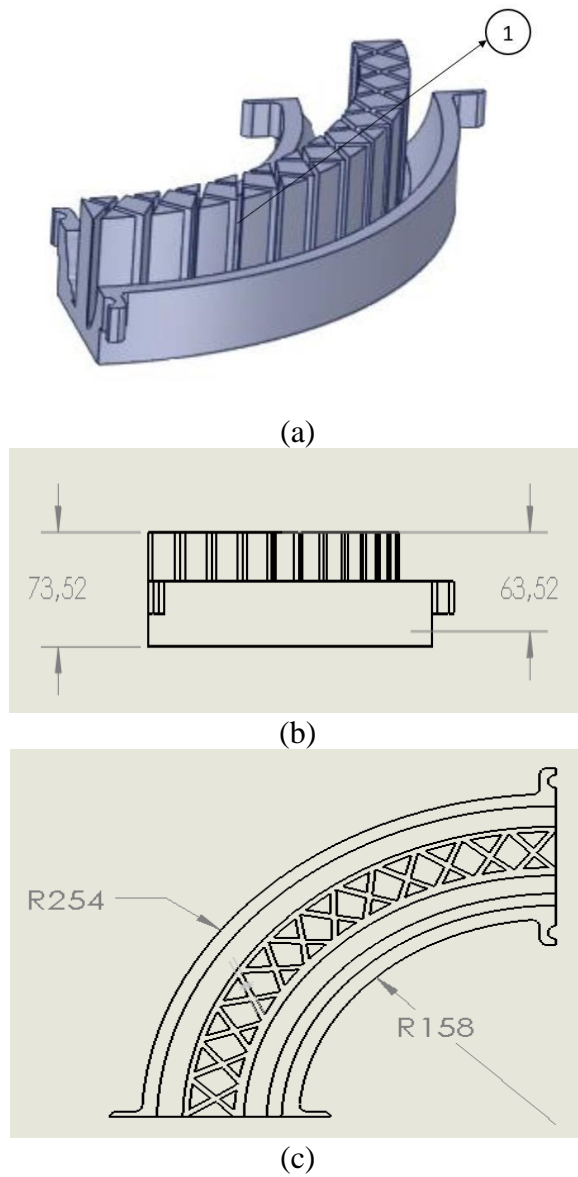
Komponen	Parameter	Nilai (mm)
Cetakan <i>Airless Tire</i>	Jari-jari dalam	158
	Jari-jari luar	254
	Tinggi cetakan	73,52
	Lebar spoke (celah spoke cetakan)	4
	Tinggi spoke	63,52
<i>Base plate</i> Cetakan	Panjang	300
	Lebar	300
	Tinggi (tebal)	20

3.6 Pemodelan 3D Cetakan dan *Base*

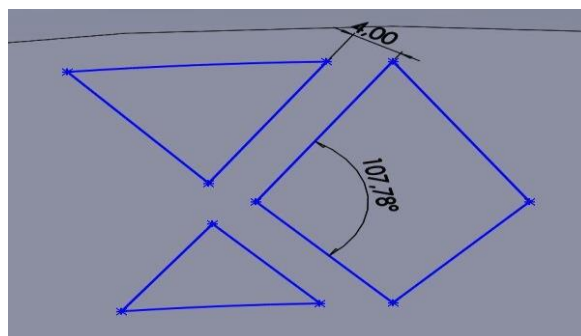
Setelah data dikumpulkan, maka bentuk fisik dari komponen dapat dimodelkan melalui perangkat lunak *Computer Aided Desain (CAD)* dimana penulis menggunakan Solidworks.

3.6.1 Pemodelan Cetakan Metal *Airless Tire*

Berikut merupakan pemodelan ¼ cetakan metal *airless tire* dengan dimensi ketebalan cetakan adalah 73,52 mm, ketinggian celah spoke 63,52 mm, tebal *spoke* 4 mm, jari-jari bagian dalam 158 mm, dan jari-jari bagian luar 254 mm.



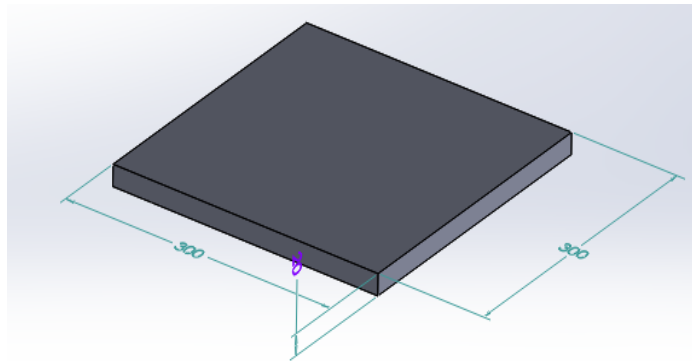
Gambar 3.2 Desain pemodelan ¼ cetakan metal airless tire (a) Tampak isometri (1) posisi celah *spoke* (b) Tebal cetakan dan tinggi spoke (c) Jari-jari dalam dan jari-jari luar cetakan.



Gambar 3.3 Geometri Spoke

3.6.2 Pemodelan *Base* Proses Pencetakan

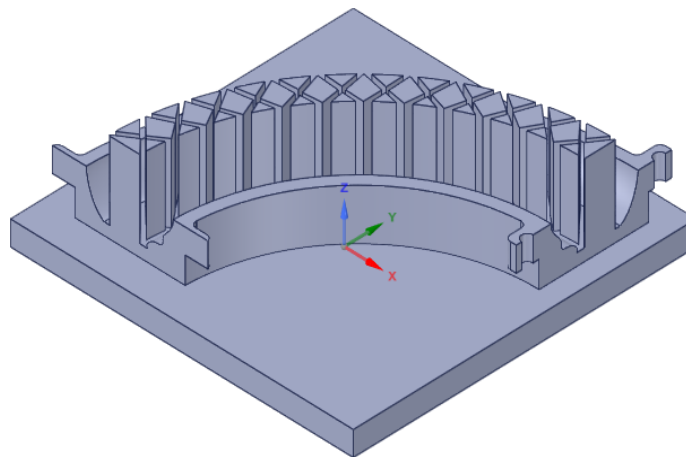
Berikut merupakan pemodelan base yang digunakan dalam proses metal AM dengan ukuran 300 x 300 x 20 mm.



Gambar 3.4 Pemodelan *base plate*

3.6.3 Assembly Model 3D

Setelah didapatkan data dari model cetakan dan base maka di *assembly* melalui software Solidwork dan diekspor ke dalam format .igs untuk kemudian digunakan sebagai model yang akan disimulasikan.



Gambar 3.5 *Assembly model 3D*

3.7 Simulasi *Finite Element Method*

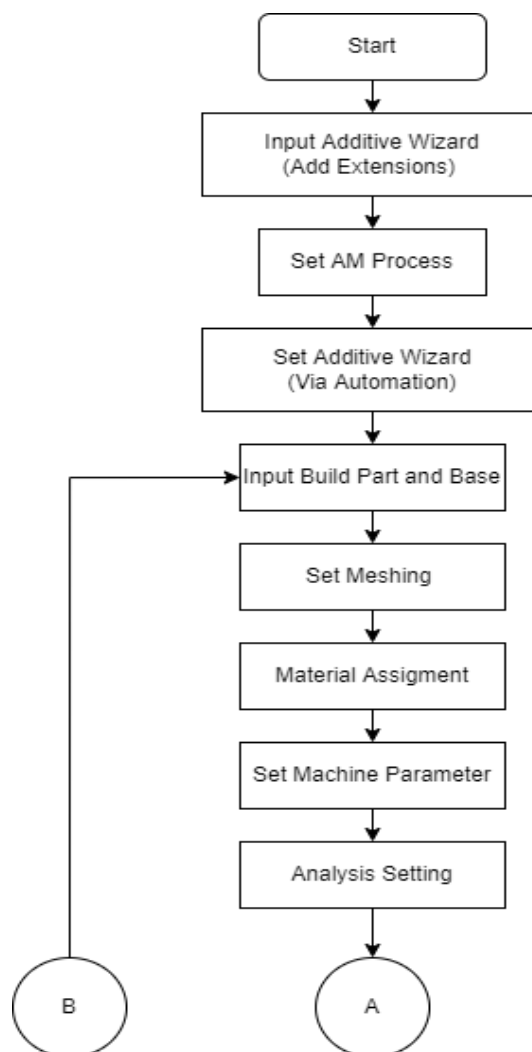
Pada penelitian ini, penulis melakukan simulasi menggunakan *software finite element analysis* yaitu ANSYS Workbench 2019 R3 dengan modul *transient thermal* yang terhubung dengan *static structural* melalui ekstensi *additive wizard*. Dalam melakukan analisis, perlu dilakukan pengaturan sebelum dilakukannya simulasi. Simulasi dilakukan dengan 3 macam variasi, yaitu jenis material, *layer thickness*, dan *laser speed* seperti yang ditunjukkan pada tabel dibawah ini.

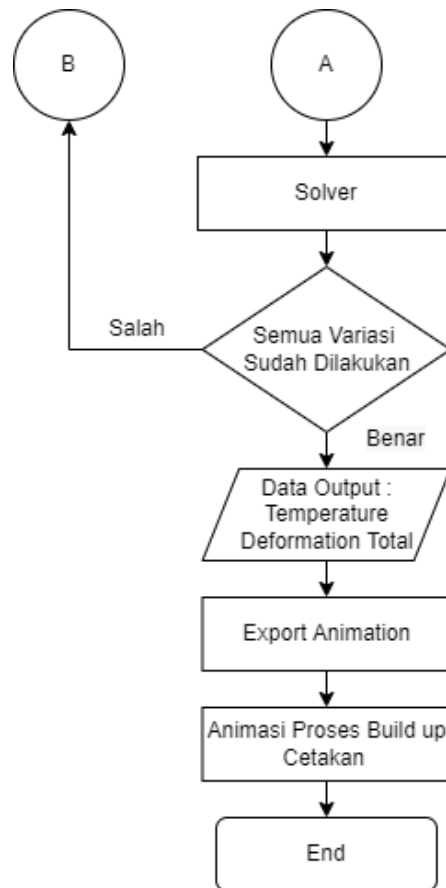
Tabel 3.2 Variasi simulasi

Scan Speed	Layer Thickness	Total Deformation (mm)	
		17-4PH	Ti-6Al-4V
	30 μ m		

1000 mm/s	60 μm		
	90 μm		
1500 mm/s	30 μm		
	60 μm		
	90 μm		
2000 mm/s	30 μm		
	60 μm		
	90 μm		

Berikut merupakan alur dari simulasi FEM pada penelitian ini menggunakan *Ansys Workbench* dengan ekstensi *Additive Wizard*.

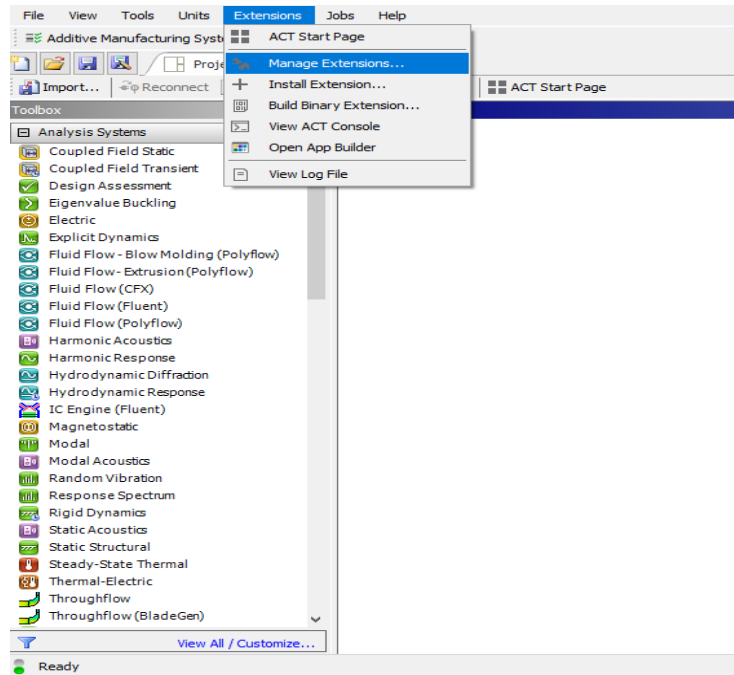




Gambar 3.6 Diagram Alir Simulasi FEM

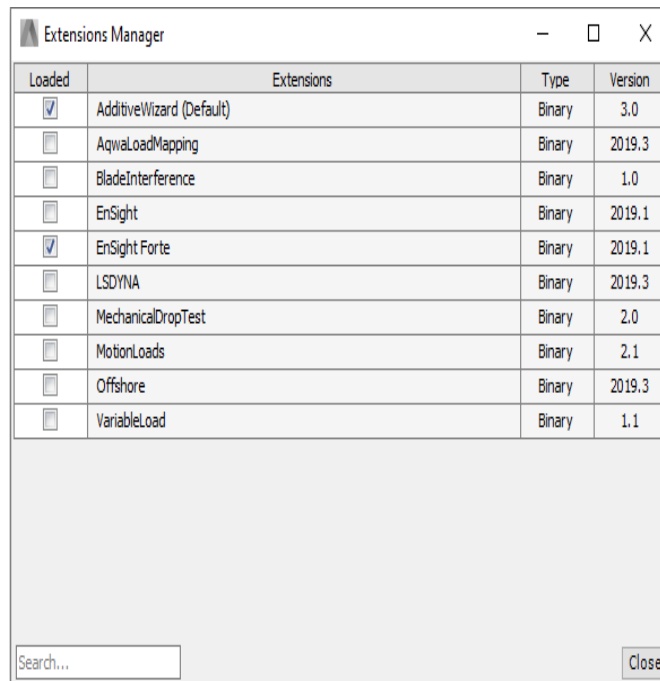
3.7.1 *Input Additive Wizard* dengan Ekstensi

Proses pertama yang dilakukan dalam melakukan simulasi melalui *ansys additive workbench* adalah menambahkan ekstensi *additive wizard* untuk konfigurasi parameter proses metal AM.



Gambar 3.7 *Input additive wizard*

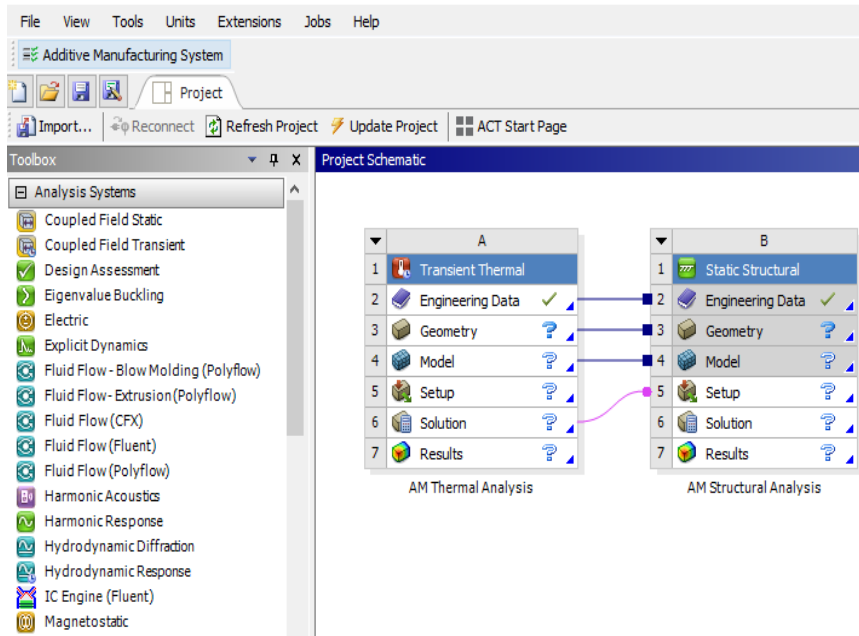
Setelah ke menu bagian ekstensi lalu pilih *manage extensions* kemudian pilih *additive wizard* dan klik centang.



Gambar 3.8 Menu pilihan modul ekstensi

3.7.2 Set AM Process

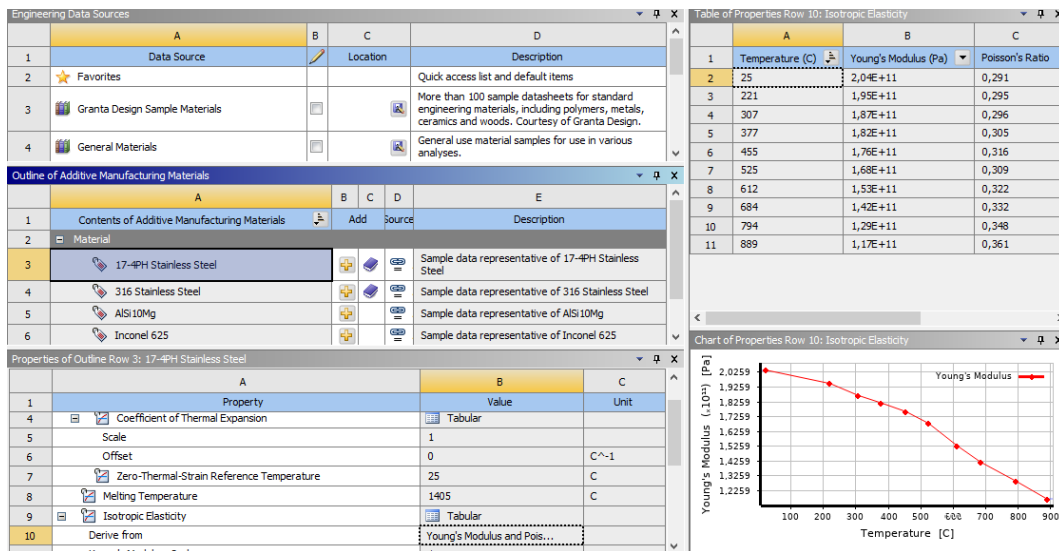
Setelah berhasil menambahkan ekstensi *additive wizard* maka selanjutnya adalah *set additive manufacturing system* yang akan langsung menambahkan modul *transient thermal* yang ter-couple dengan *static structural*.



Gambar 3.9 Additive manufacturing system

3.7.3 Input Engineering Data

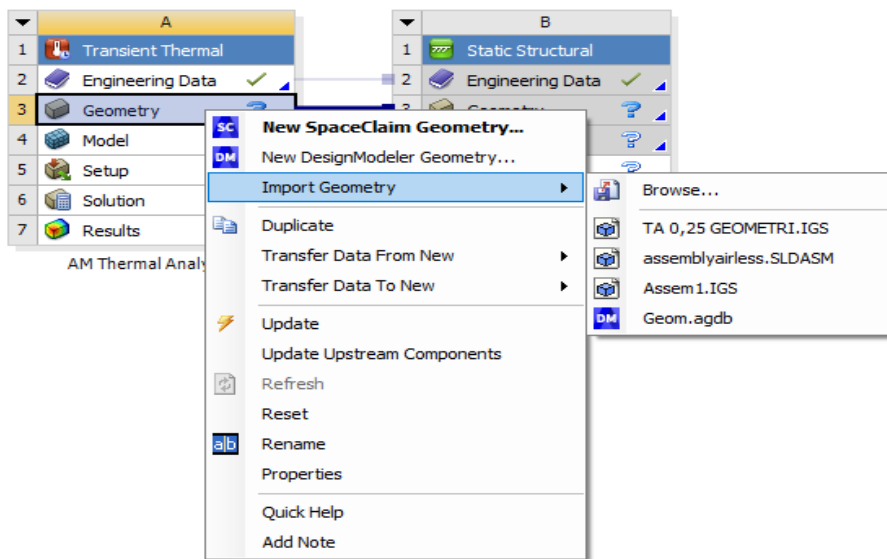
Data engineering merupakan data dari material yang akan digunakan pada simulasi. Simulasi ini menggunakan material 17-4PH dan Ti-6Al-4V serta material pada base menggunakan *structural steel*. Maka dari itu, ditambahkan data sifat mekanis dari tiga material tersebut pada *engineering data*.



Gambar 3.10 Engineering data

3.7.4 Input Geometry

Desain bagian – bagian yang sudah dibuat tersebut lalu disatukan ke dalam satu model *assembly* dan diekspor ke dalam format *.igs* untuk kemudian digunakan sebagai model yang akan disimulasikan.

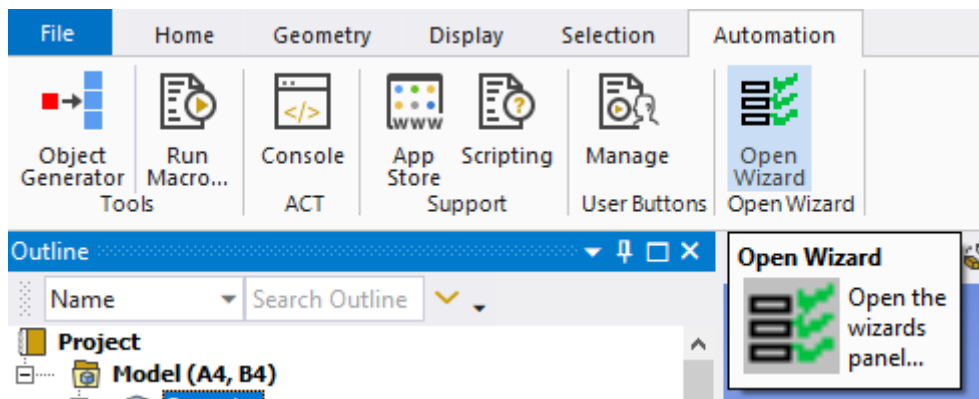


Gambar 3.11 *Import geometry*

3.7.5 Melakukan Pemodelan pada Ansys

1. *Set additive wizard via automation*

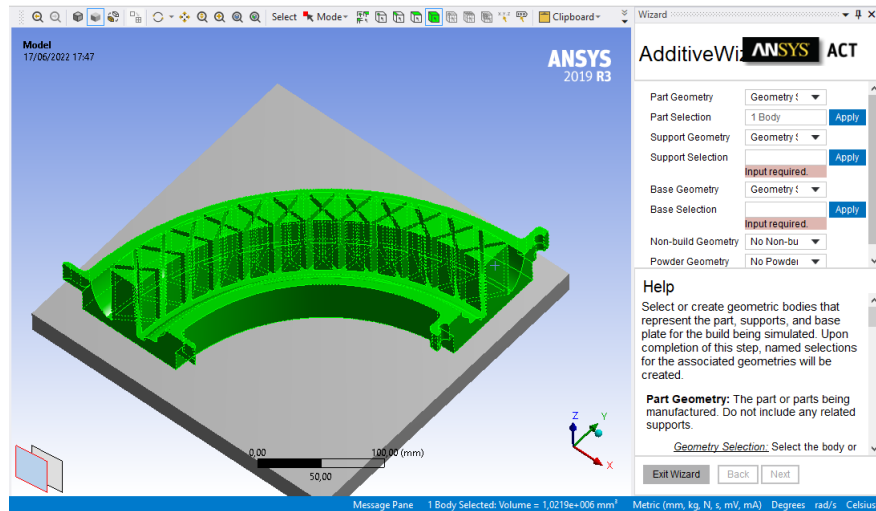
Untuk memasukkan parameter serta variasi yang telah ditentukan dalam proses metal AM dilakukan melalui *automation* dan *open wizard* yang telah ditambahkan sebelumnya.



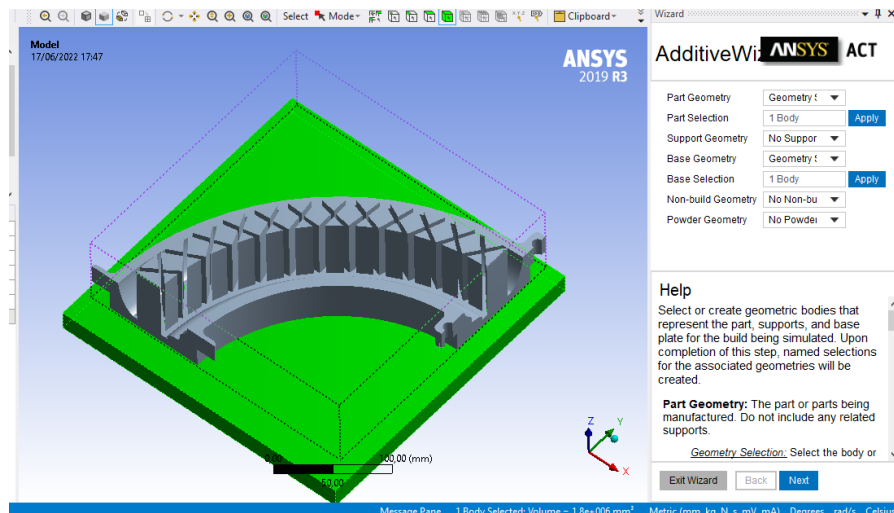
Gambar 3.12 *Additive wizard automation*

2. *Set build part and base*

Menentukan build part yang akan dicetak dalam proses metal AM dan geometri *base plate* yang digunakan.



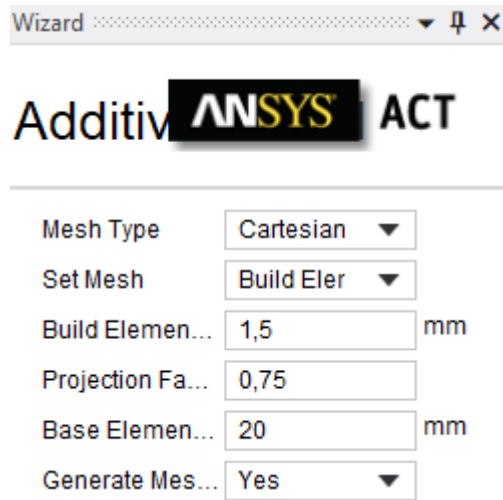
Gambar 3.13 Build geometri



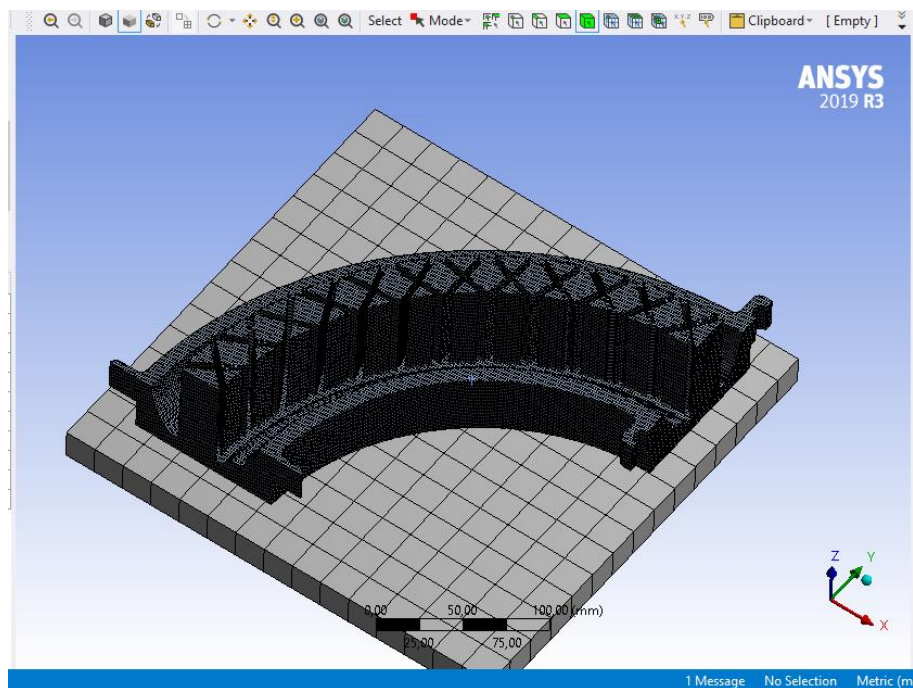
Gambar 3.14 Base plate geometri

3. Set meshing

Proses *meshing* sebagai proses utama berguna untuk membagi geometri atau model tiga dimensi yang telah dibuat menjadi model diskrit atau elemen hingga. Semakin banyak elemen *meshing* maka hasilnya akan semakin baik dan semakin mendekati nilai real. Namun, jumlah elemen yang digunakan dalam simulasi akan mempengaruhi waktu yang dibutuhkan dalam proses simulasi. Pada model simulasi ini, *meshing* yang digunakan yaitu *mesh* cartesian dengan ukuran elemen *mesh* pada *build geometri* 1,5 mm dan 10mm pada *base plate geometri*. Kualitas dari *mesh* tersebut dapat dilihat pada *mesh* metric pada menu *mesh*.



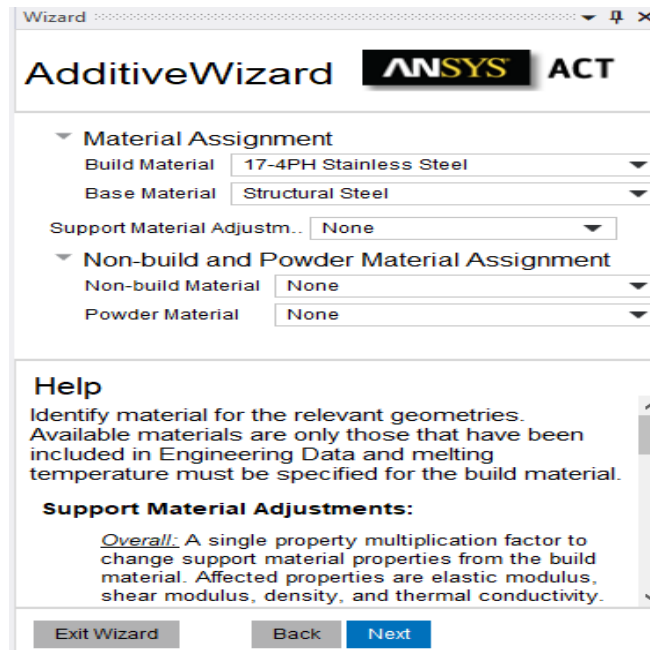
Gambar 3.15 Mengatur tipe mesh dan *size* mesh



Gambar 3.16 Hasil *meshing* build geometri dan base geometri

4. *Material assignment*

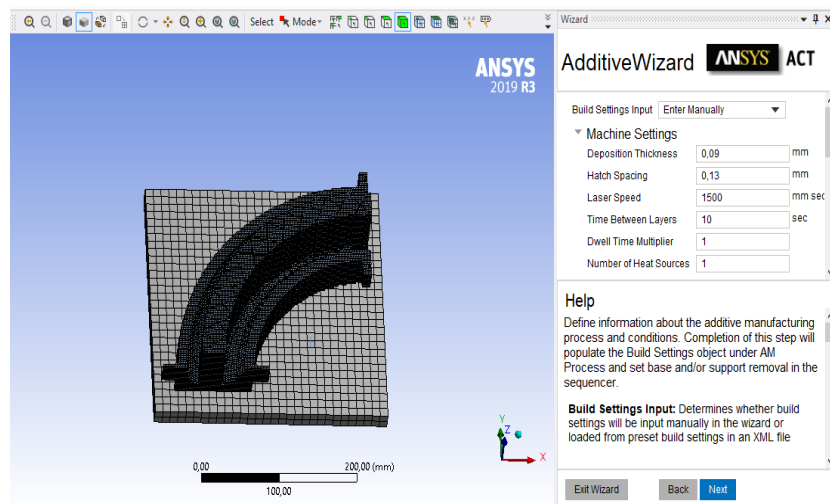
Dalam melakukan simulasi perlu mengatur material yang digunakan, pada penelitian ini menggunakan material 17-4PH , Ti-6Al-4V dan material base yang digunakan adalah structural steel yang sebelumnya telah terdefinisi melalui *material properties engineering data*.



Gambar 3.17 Setting jenis material yang digunakan

5. Set Machine Parameter

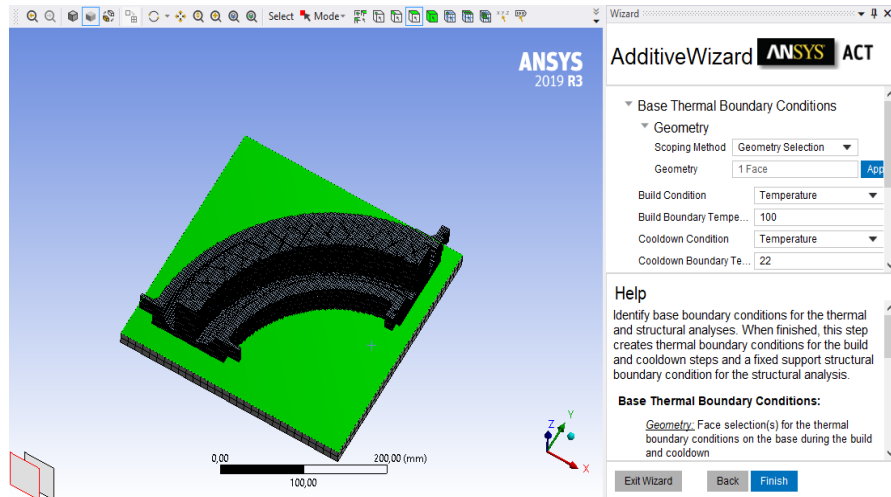
Parameter yang digunakan dalam penelitian ini terdapat 2 macam yaitu parameter yang divariasikan dan parameter yang terkontrol menyesuaikan *default machine setting* pada *ansys additive suite workbench*. Pada penelitian ini variasi parameter menggunakan *deposition thickness (layer thickness)* yaitu sebesar 30 μm , 60 μm , dan 90 μm , serta *laser speed* yaitu 1000 mm/s, 1500 mm/s, dan 2000 mm/s.



Gambar 3.18 Machine parameters

6. Thermal Boundary Condition

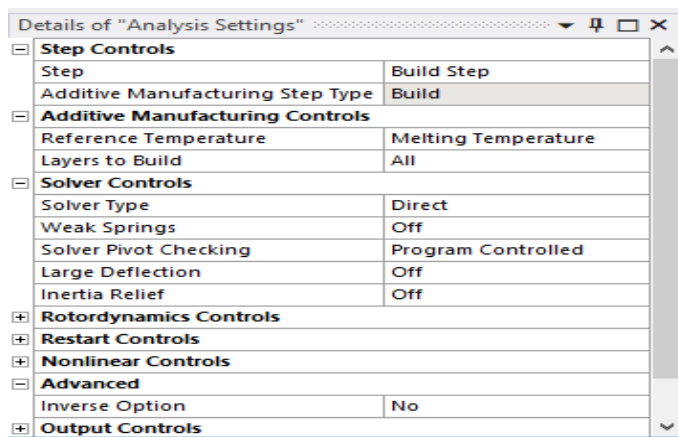
Pada penelitian ini perlu ditentukan *thermal boundary condition* pada geometri *surface* saat proses *build* and *cooldown* dan geometri pada proses cetak. *Preheat boundary temperature* yang digunakan adalah 100°C dan *cooldown temperature* adalah 22°C.



Gambar 3.19 Base thermal boundary condition

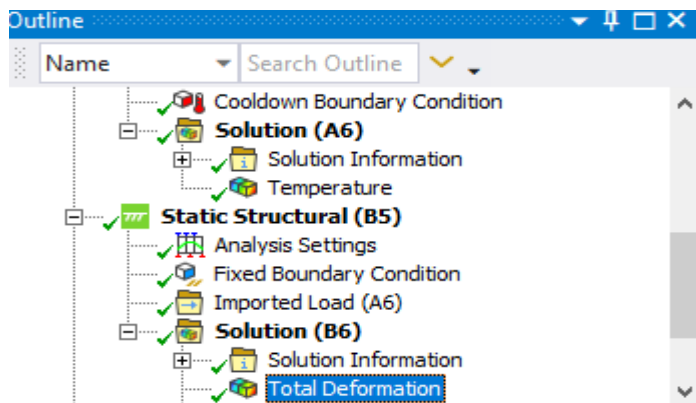
7. Solver

Sebelum melakukan *solve* untuk mengetahui nilai deformasi maka perlu diinput nilai load dari *thermal history* pada proses *transient thermal*. *Analysis setting* pada *static structural* juga perlu ditentukan seperti pada Gambar 3.18.



Gambar 3.20 Analysis settings static structural process

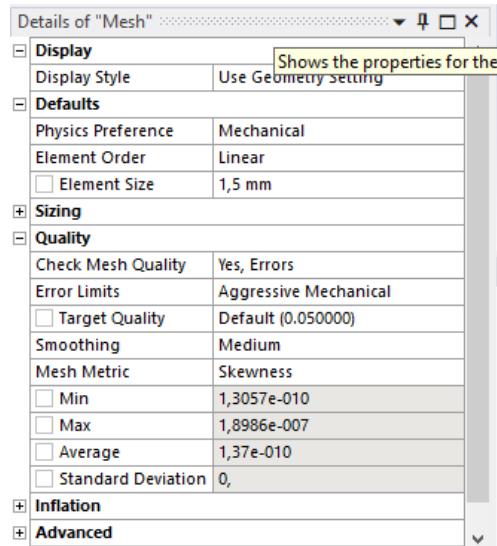
Setelah *input load* maka dapat dilakukan *solve* pada *static structural* untuk mengetahui besar deformasi total yang dihasilkan, oleh karena itu dipilih solution deformation total.



Gambar 3.21 Solution

8. Verifikasi

Sebelum melanjutkan proses maka perlu dilakukan verifikasi. Pada simulasi ini perlu dilakukan verifikasi agar diketahui bahwa simulasi yang dilakukan mendekati sebenarnya. Verifikasi yang dilakukan melalui nilai *quality mesh metric*. Nilai *mesh metric* dengan kategori *skewness* masih jauh dibawah 0,25 yang berarti dianggap bahwa simulasi telah mendekati akurat karena nilai *mesh metric* berada pada range 0-0,25.



Gambar 3.22 Mesh metric

Excellent	Very good	Good	Acceptable	Bad	Unacceptable
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

Untuk element size yang digunakan adalah 1,5 mm pada tingkat relative error dibawah 10% sehingga sudah dianggap konvergen. Berikut pada tabel 3.3 merupakan data konvergensi mesh.

Tabel 3.3 Konvergensi Mesh

Element size (mm)	Nodes	Elements	Max deformation (mm)	Relative error (%)
1,8	250289	207578	0,70383	-
1,7	290586	240636	0,60157	15
1,6	350917	292454	0,53712	12
1,5	408454	341200	0,51128	5

3.8 Analisis Data dan Pembahasan

Setelah ANSYS selesai menghitung model matematika dari simulasi, maka hasil dari simulasi tersebut perlu didefinisikan. Dalam penelitian ini, hasil yang diambil dari simulasi yaitu deformasi total. Data yang diperoleh dari hasil simulasi akan diolah kedalam table dan grafik yang selanjutnya akan dianalisis. Analisis dilakukan dengan membandingkan nilai deformasi maksimal yang terjadi pada celah *spoke* cetakan metal *airless tire*. Pembahasan yang dilakukan meliputi pengaruh variasi jenis material, *layer thickness*, dan *laser speed* terhadap

besar deformasi yang dihasilkan pada cetakan metal *airless tire* metal 3D-printing proses. Untuk memudahkan dalam mengetahui deformasi yang terjadi pada celah *spoke* cetakan ban *airless* maka dipilih *surface* terkait saja pada bagian celah *spoke*. Dikarenakan hasil *contour* yang susah dibaca akibat letak posisi celah adalah 4mm maka pembacaan berdasarkan grafik dengan melihat deformasi maksimal.

3.9 Kesimpulan Penelitian

Berdasarkan analisis data dan pembahasan yang telah dilakukan, akan ditarik kesimpulan untuk menjawab tujuan dari penelitian yang dilakukan.

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan menjelaskan, menganalisis, dan membahas mengenai data hasil simulasi penelitian deformasi pada *additive manufacturing* cetakan *metal airless tire*.

4.1 Data Hasil Simulasi

Pada penelitian ini dilakukan simulasi menggunakan *software finite element* yaitu *Ansys workbench 2019 R3* dengan ekstensi *Additive Wizard* untuk memperoleh data berupa deformasi total yang didapatkan dari simulasi *transient* yang ter-*couple* dengan *static structural*. Pada simulasi, dilakukan variasi jenis material, *layer thickness*, dan *scan speed*. Variasi jenis material yang digunakan adalah 17-4PH dan Ti-6Al-4V. Variasi *layer thickness* yang digunakan sebesar 30 μm , 60 μm , dan 90 μm . Variasi *scan speed* yang digunakan sebesar 1000 mm/s, 1500 mm/s, dan 2000 mm/s. Pada penelitian ini besar geometri *spoke* didasari oleh penelitian yang dilakukan oleh (Pramono & Effendi, 2019) dengan nilai tebal *spoke* terbaik adalah 4 mm. Sehingga pada penelitian ini penulis menggunakan dimensi tersebut sebagai acuan besarnya deformasi yang baik pada posisi celah *spoke* cetakan *metal airless tire*. Hasil dari simulasi berupa data deformasi total pada cetakan *metal airless tire* dilampirkan pada tabel di bawah yang kemudian akan dianalisa.

Tabel 4.1 Data Hasil Simulasi Variasi *Layer Thickness* dan *Scan Speed* Konstan

<i>Scan Speed</i>	<i>Layer Thickness</i>	<i>Total Deformation (mm)</i>	
		17-4PH	Ti-6Al-4V
1000 mm/s	30 μm	0,54071	0,78985
	60 μm	0,52423	0,77165
	90 μm	0,51128	0,75407
1500 mm/s	30 μm	0,56769	0,89629
	60 μm	0,55164	0,77745
	90 μm	0,51386	0,74618
2000 mm/s	30 μm	0,55528	0,76601
	60 μm	0,52232	0,74397
	90 μm	0,51594	0,73198

Tabel 4.2 Data Hasil Simulasi Variasi *Scan Speed* dan *Layer Thickness* konstan

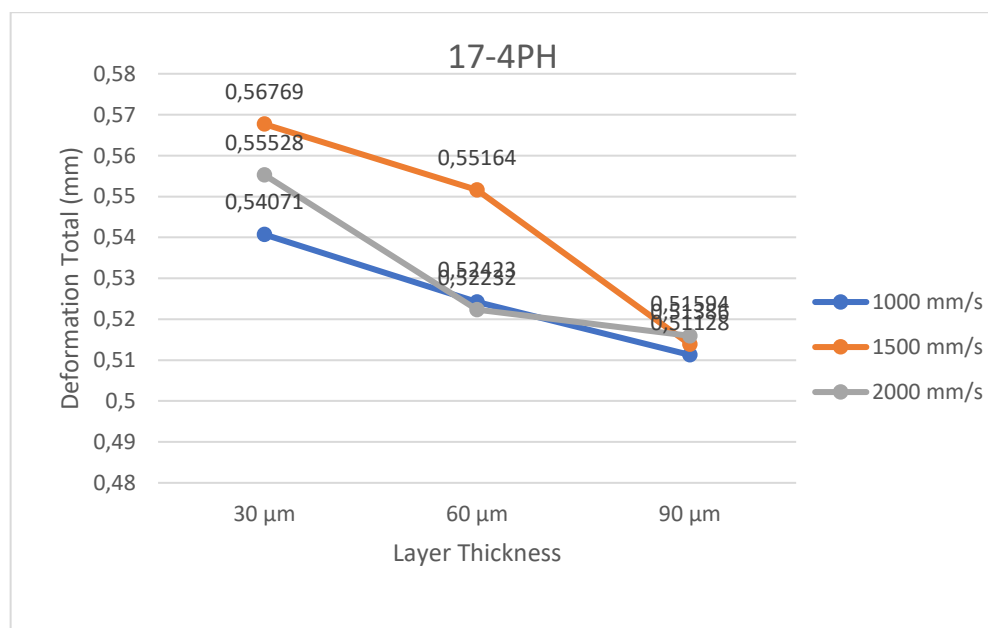
<i>Layer Thickness</i>	<i>Scan Speed</i>	<i>Total Deformation (mm)</i>	
		17-4PH	Ti-6Al-4V
30 μm	1000 mm/s	0,54071	0,78985
	1500 mm/s	0,56769	0,89629
	2000 mm/s	0,55528	0,76601
60 μm	1000 mm/s	0,52423	0,77165
	1500 mm/s	0,55164	0,77745
	2000 mm/s	0,52232	0,74397
90 μm	1000 mm/s	0,51128	0,75407
	1500 mm/s	0,51386	0,74618
	2000 mm/s	0,51594	0,73198

4.1 Analisa Pengaruh *Layer Thickness* dengan *Scan Speed* Konstan terhadap Deformasi Total pada *Cetakan Metal Airless Airless Tire*

Pada analisa ini, dilakukan perbandingan hasil deformasi total yang diperoleh dari simulasi pada cetakan metal *airless tire*. Data deformasi total didapat dari nilai *layer thickness* 30 μm , 60 μm , dan 90 μm dengan besar *scan speed* konstan menggunakan material 17-4PH dan Ti-6Al-4V. Konfigurasi yang digunakan yang pertama adalah besar *scan speed* konstan yang digunakan yaitu 1000 mm/s pada variasi *layer thickness* 30 μm , 60 μm , dan 90 μm . Kemudian konfigurasi berikutnya adalah pada *scan speed* konstan 1500 mm/s dengan variasi *layer thickness* 30 μm , 60 μm , dan 90 μm . Lalu konfigurasi pada pada *scan speed* konstan 2000 mm/s dengan variasi *layer thickness* 30 μm , 60 μm , dan μm .

4.1.1 Variasi *Layer Thickness* 30 μm , 60 μm , dan 90 μm pada *Scan Speed* Konstan Material 17-4PH

Konfigurasi pertama yang digunakan untuk dianalisis adalah *layer thickness* dengan nilai 30 μm , 60 μm , dan 90 μm pada *scan speed* konstan sebesar 1000 mm/s menggunakan material 17-PH. Kemudian digunakan konfigurasi pada *scan speed* konstan 1500 mm/s dengan variasi *layer thickness* 30 μm , 60 μm , dan 90 μm . Lalu variasi ketiga yang dilakukan menggunakan *scan speed* konstan 2000 mm/s dengan *layer thicknes* 30 μm , 60 μm , dan 90 μm . Pada Simulasi juga diberikan parameter input proses yang sama yaitu *hatching spacing* yang digunakan adalah 0,13 mm dan *dwell time* yaitu 10s. Hasil dari simulasi pada variasi ini ditampilkan pada grafik dibawah ini



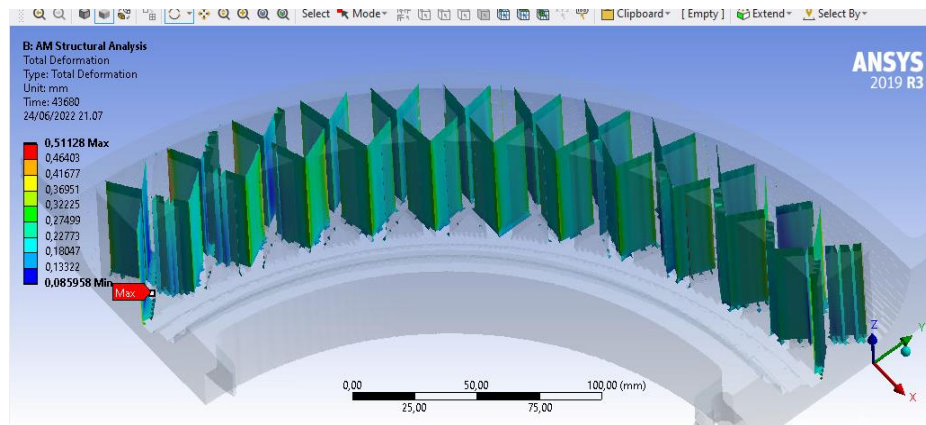
Grafik 4.1 Pengaruh *layer thickness* dengan *scan speed* konstan terhadap deformasi total

Hasil simulasi pada cetakan metal *airless tire* proses *metal additive manufacturing* yang ditampilkan pada grafik 4.1 menunjukkan bahwa konfigurasi variasi pertama pada *layer thickness* sebesar 30 μm dan *scan speed* 1000 mm/s dengan material 17-4PH didapatkan deformasi total sebesar 0,54071 mm. Untuk *layer thickness* 60 μm dan *scan speed* 1000 mm/s dengan material 17-4PH didapatkan deformasi total sebesar 0,52434 mm dan pada *layer*

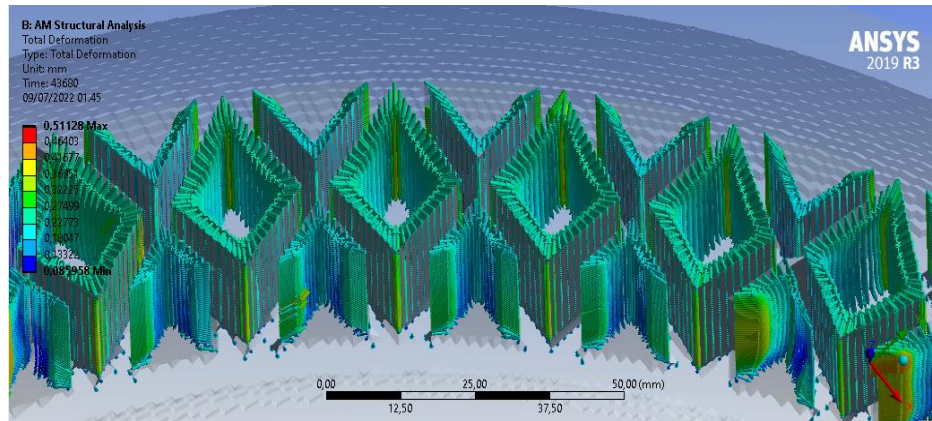
thickness 90 μm dengan nilai *scan speed* 1000 mm/s jenis material 17-4PH menghasilkan deformasi total sebesar 0,51128 mm.

Kemudian didapatkan juga hasil dari konfigurasi pada variasi *layer thickness* 30 μm dengan *scan speed* 1500 mm/s pada material 17-4PH menghasilkan deformasi total sebesar 0,56769 mm. Untuk nilai *layer thickness* 60 μm dengan *scan speed* 1500 mm/s dan jenis material 17-4PH menghasilkan nilai deformasi total sebesar 0,55164 mm. Lalu pada *layer thickness* 90 μm dengan *scan speed* 1500 mm/s dan material 17-4PH menghasilkan deformasi total sebesar 0,51386 mm. Selanjutnya pada konfigurasi variasi *layer thickness* 30 μm , 60 μm , dan 90 μm dengan *scan speed* konstan yaitu 2000 mm/s menghasilkan nilai deformasi total yang cenderung mirip dengan deformasi total pada variasi sebelumnya. Pada *layer thickness* 30 μm dengan *scan speed* 2000 mm/s pada material 17-4PH menghasilkan deformasi total sebesar 0,55528 mm. Untuk *layer thickness* 60 μm dengan *scan speed* 2000 mm/s dengan material 17-4PH menghasilkan deformasi total sebesar 0,52232 mm. Kemudian pada *layer thickness* 90 μm dengan *scan speed* 2000 mm/s dan material 17-4PH deformasi total yang dihasilkan adalah 0,51594 mm.

Didapatkan juga pada material 17-4PH dengan *scan speed* yang digunakan 1000 mm/s nilai deformasi terkecil yang dihasilkan adalah pada *layer thickness* 90 μm . Untuk *scan speed* konstan yang digunakan adalah 1500 mm/s nilai deformasi terkecil juga terdapat pada *layer thickness* 90 μm . Selanjutnya pada *scan speed* konstan 2000 mm/s nilai deformasi terkecil pada *layer thickness* 90 μm . Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin besar *layer thickness* yang digunakan maka deformasi total yang dihasilkan akan semakin kecil. Pada (Vrancken, 2016) menyatakan bahwa nilai *layer thickness* yang lebih besar maka akan menghasilkan *melt pool* yang lebih kecil. Pada *layer thickness* yang lebih besar juga akan mengakibatkan *residual stresses* akibat distribusi temperature akan lebih kecil dibandingkan dengan *layer thickness* yang kecil. Hal tersebut mengakibatkan nilai deformasi total yang dihasilkan pada nilai *layer thickness* yang lebih besar akan lebih kecil deformasinya. Berikut merupakan visualisasi *contour* dari hasil simulasi yang telah dilakukan.

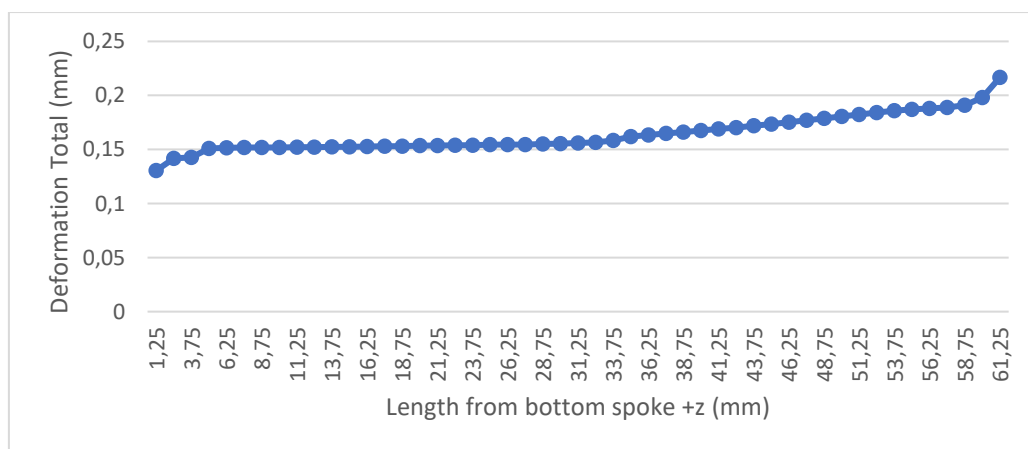


Gambar 4.1 *Contour* pada hasil simulasi *layer thickness* 90 dan *scan speed* 1000 mm/s material 17-4PH Stainless Steel



Gambar 4.2 Vector arah deformasi total pada simulasi *layer thickness* 90 dan *scan speed* 1000 mm/s material 17-4PH Stainless Steel

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan menunjukkan bahwa arah deformasi pada *spoke* yaitu ke bagian tengah *spoke* atau pusat. Hal itu dapat diketahui dari arah vector dari *output* deformasi total yang dihasilkan. Pada vector arah deformasi total juga mengindikasikan bahwa pada *build* cetakan *airless tire* metal AM mengalami penyusutan dari bentuk *design* sebenarnya. Berikut juga ditampilkan hasil grafik yang menunjukkan pola penyusutan pada posisi celah *spoke* dengan didapatkan pada sumbu arah (Z) dengan menggunakan metode *path*. Grafik yang dihasilkan merupakan sample pada posisi celah *spoke*. Pada celah *spoke* didapatkan berdasarkan ketinggian *spoke* dari bawah ke atas. Berikut merupakan hasil deformasi pada celah *spoke* menggunakan *path*.



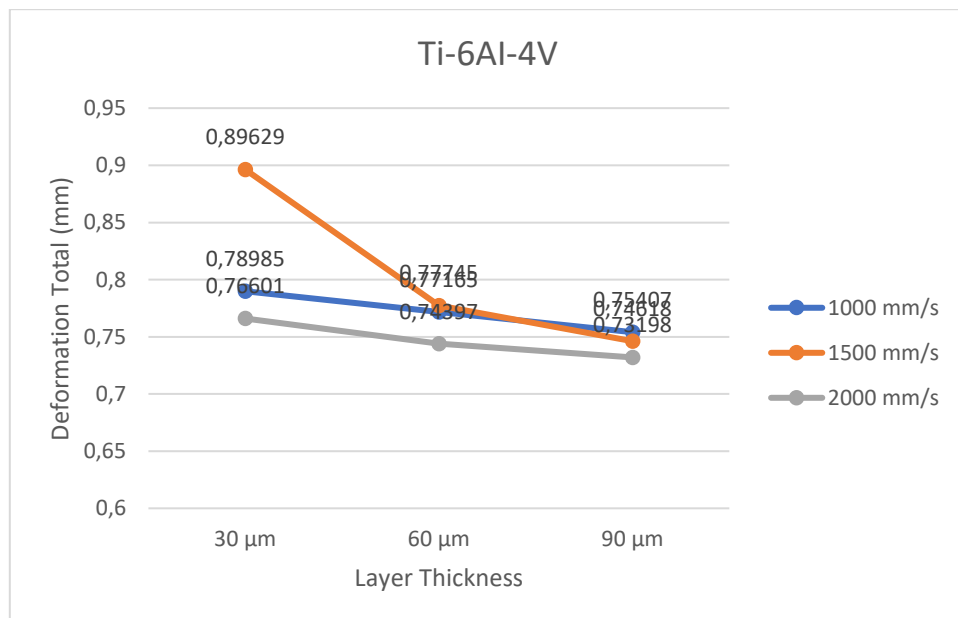
Grafik 4.2 Deformasi Total pada Posisi Tengah Celah Spoke dari Bawah Sumbu (Z) Menuju Bagian Atas Spoke

Dari grafik diatas dapat diketahui bahwa pola penyusutan yang terjadi adalah cenderung rapi tanpa adanya lekukan penyusutan yang tidak stabil. Dimana dapat terlihat bahwa hasil dari deformasi total pada arah (Z) dengan pengukuran dari posisi bawah ke atas yang terjadi. Pada bagian tengah celah *spoke* juga didapatkan grafik dari nilai deformasi total. Pada celah *spoke* didapatkan berdasarkan pengukuran ketinggian *spoke* dari posisi bawah ke atas. Dapat dilihat juga bahwa nilai pada posisi bagian tengah celah spoke cenderung kecil yaitu dengan deformasi total terkecil sebesar 0,13mm yang berlokasi pada bagian bawah celah spoke. Kemudian untuk posisi celah *spoke* teratas menghasilkan deformasi total 0,24 mm. Hal tersebut juga mengindikasikan bahwa semakin ke atas deformasi yang terjadi pada posisi bagian tengah celah

spoke akan semakin besar deformasinya. Namun, dari pengukuran yang dilakukan besar deformasi pada setiap kenaikan ketinggian pengukuran yaitu 2,5 mm tidaklah signifikan.

4.1.2 Variasi *Layer Thickness* 30 μm , 60 μm , dan 90 μm pada *Scan Speed* Konstan Material Ti-6Al-4V

Kemudian konfigurasi pada variasi selanjutnya pada *layer thickness* yaitu simulasi dengan data deformasi total didapat dari nilai *layer thickness* sebesar 30 μm , 60 μm , dan 90 μm dengan besar *scan speed* konstan pada 1000 mm/s dan jenis material Ti-6Al-4V. Setelah itu konfigurasi simulasi pada *layer thickness* yang sama yaitu 30 μm , 60 μm dan 90 μm pada *scan speed* konstan yaitu 1500 mm/s dan material Ti-6Al-4V. Lalu pada *layer thickness* sama 30 μm , 60 μm , dan 90 μm dan menggunakan nilai *scan speed* konstan yaitu 2000 mm/s. Material yang digunakan pada variasi berikutnya sama yaitu Ti-6Al-4V. Pada simulasi ini juga dimasukkan input yang sama yaitu nilai *hatching spacing* yang digunakan adalah 0,13 mm dan *dwelt time* sebesar 10s. Hasil dari simulasi yang dilakukan berdasarkan variasi *layer thickness* dan nilai *scan speed* yang konstan dengan material Ti-6Al-4V di tampilkan dalam grafik 4.3



Grafik 4.3 Pengaruh *layer thickness* dengan *scan speed* konstan terhadap deformasi total

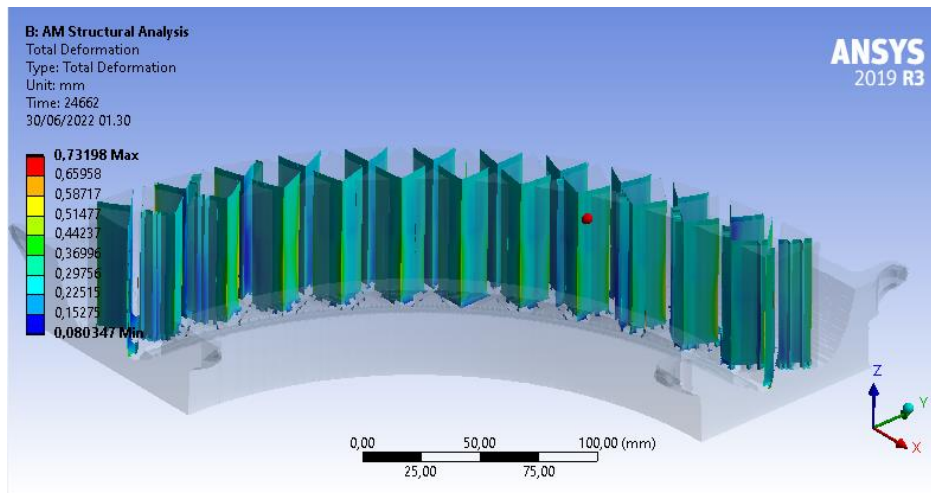
Hasil dari simulasi pada cetakan metal *airless tire* proses *metal additive manufacturing* yang ditampilkan pada grafik 4.3 menunjukkan bahwa pada variasi *layer thickness* sebesar 30 μm dengan *scan speed* konstan 1000 mm/s dan material Ti-6Al-4V menghasilkan data deformasi total sebesar 0,78985 mm. Pada nilai *layer thickness* 60 μm dan *scan speed* konstan 1000 mm/s deformasi total yang dihasilkan adalah 0,77165 mm. Kemudian pada nilai *layer thickness* 90 μm dengan *scan speed* konstan 1000 mm/s deformasi total yang dihasilkan adalah sebesar 0,75407 mm. Untuk nilai *scan speed* konstan 1000 mm/s pada semua variasi *layer thickness* dapat diketahui deformasi total yang dihasilkan yaitu semakin kecil dengan bertambahnya nilai *layer thickness*.

Nilai deformasi total pada konfigurasi variasi berikutnya dengan *layer thickness* 30 μm dan *scan speed* konstan yaitu 1500 mm/s adalah 0,89629 mm. Kemudian pada *layer thickness* 60 μm dan *scan speed* konstan 1500 mm/s menghasilkan deformasi total sebesar 0,77745 mm. Selanjutnya pada *layer thickness* yang digunakan 90 μm dengan *scan speed* konstan deformasi total yang dihasilkan yaitu 0,74618 mm. Pada variasi *layer thickness* yang digunakan yaitu 30

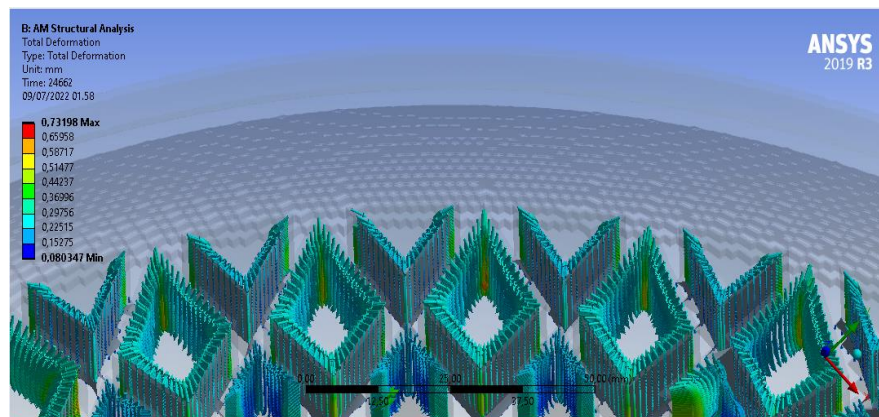
μm , $60 \mu\text{m}$, dan $90 \mu\text{m}$ dengan nilai *scan speed* konstan 1500 mm/s diketahui juga bahwa semakin besar *layer thickness* yang digunakan menghasilkan deformasi total yang semakin kecil.

Kemudian pada konfigurasi simulasi variasi *layer thickness* yang sama dengan *scan speed* 2000 mm/s menghasilkan deformasi yang cenderung mirip dengan sebelumnya. Dimana nilai deformasi total pada *layer thickness* $30 \mu\text{m}$ adalah $0,76601 \text{ mm}$. Untuk *layer thickness* $60 \mu\text{m}$ menghasilkan deformasi total $0,74397 \text{ mm}$. Lalu pada *layer thickness* $90 \mu\text{m}$ deformasi total yang dihasilkan adalah $0,73198$. Data tersebut menunjukkan bahwa pada variasi *layer thickness* $30 \mu\text{m}$, $60 \mu\text{m}$, dan $90 \mu\text{m}$ dengan *scan speed* konstan 2000 menghasilkan deformasi total yang semakin kecil ketika nilai *layer thickness* semakin besar. Pada ketiga nilai *scan speed* yang konstan semuanya menunjukkan grafik yang menurun. Dimana penurunan ini sudah sesuai dengan dengan analisa (Mugwagwa et al., 2019)

Berikut merupakan hasil dari simulasi yang dilakukan ditampilkan dalam *contour* dan *vector* dari arah deformasi yang dihasilkan



Gambar 4.3 *Contour* pada hasil simulasi *layer thickness* $90 \mu\text{m}$ dan *scan speed* 2000 mm/s material Ti-6Al-4V



Gambar 4.4 *Vector* arah deformasi total pada simulasi *layer thickness* $90 \mu\text{m}$ dan *scan speed* 2000 mm/s material 17-4PH Ti-6Al-4V

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan menunjukkan bahwa arah deformasi pada *spoke* yaitu ke bagian tengah *spoke* atau pusat. Hal itu dapat diketahui dari arah *vector* dari output deformasi total yang dihasilkan. Pada *vector* arah deformasi total juga mengindikasikan bahwa

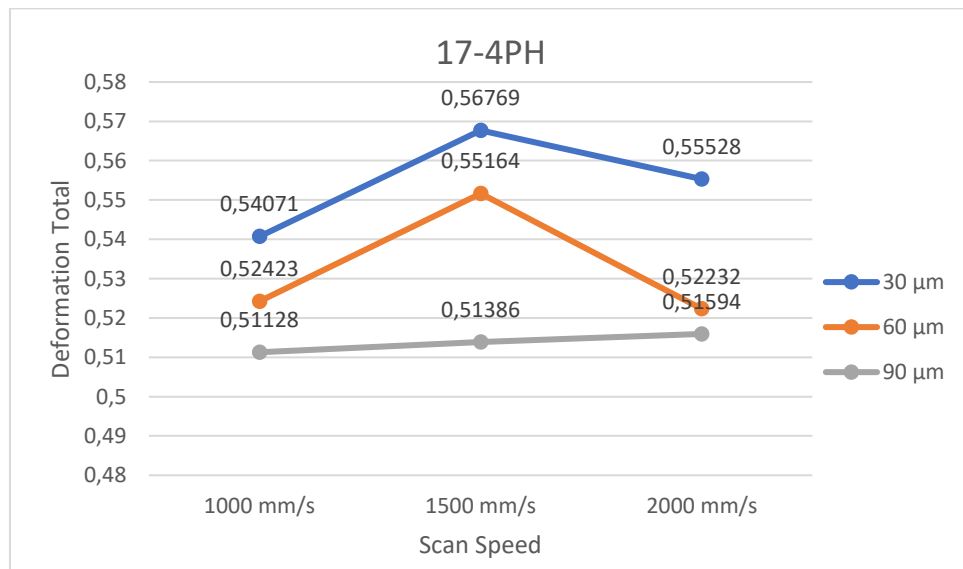
pada *build* cetakan *airless tire* metal AM mengalami penyusutan dari bentuk *design* sebenarnya. Arah penyusutan pada material Ti-6Al-4V sama dengan material sebelumnya yaitu 17-4PH.

4.2 Analisa Pengaruh *Scan Speed* dengan *Layer Thickness* Konstan terhadap Deformasi Total pada *Cetakan Metal Airless Airless Tire*

Pada analisa ini, dilakukan perbandingan hasil deformasi total yang diperoleh dari simulasi pada cetakan metal *airless tire*. Data deformasi total didapat dari konfigurasi nilai *scan speed* sebesar 1000 mm/s, 1500 mm/s, dan 2000 mm/s dengan besar *layer thickness* konstan menggunakan material 17-4PH dan Ti-6Al-4V. Pada simulasi ini nilai dari input pada parameter *hatch spacing* dan *dwell time* yaitu sama sebesar 0,13 mm dan 10s.

4.2.1 Variasi *Scan Speed* 1000 mm/s, 1500 mm/s, dan 2000 mm/s pada *Layer Thickness* Konstan Material 17-4PH

Pada konfigurasi variasi pada simulasi selanjutnya yaitu dilakukan simulasi dengan variasi *layer thickness* konstan 30 μm dengan *scan speed* 1000 mm/s, 1500 mm/s, dan 2000 mm/s. Kemudian pada konfigurasi simulasi dengan variasi *layer thickness* konstan 60 μm dengan besar *scan speed* yaitu sebesar 1000 mm/s, 1500 mm/s dan 2000 mm/s. Selanjutnya yang terakhir pada material 17-4PH dan *layer thickness* konstan 90 μm dengan *scan speed* 1000 mms, 1500 mm/s dan 2000 mm/s. Hasil dari simulasi yang dilakukan berdasarkan variasi nilai *scan speed* dan *layer thickness* yang konstan dengan material yang sama di tampilkan dalam grafik 4.4



Grafik 4.4 Deformasi total pada variasi *scan speed* 1000 mm/s, 1500 mm/s, dan 2000 mm/s dengan *layer thickness* konstan material 17-4PH

Hasil simulasi pada cetakan metal *airless tire* proses *metal additive manufacturing* yang ditampilkan pada grafik 4.4 menunjukkan bahwa pada variasi *layer thickness* sebesar 30 μm dengan nilai *scan speed* sebesar 1000 mm/s, 1500 mm/s, dan 2000 mm/s serta jenis material 17-4PH menghasilkan deformasi total sebesar 0,54071 mm, 0,56769 mm, dan 0,55528 mm. Pada variasi *scan speed* dengan *layer thickness* konstan sebesar 30 μm menunjukkan grafik yang meningkat lalu turun lagi. Pada *scan speed* 1500 mm/s nilai deformasi meningkat dan pada 2000 mm/s kembali turun namun tidak terlalu signifikan.

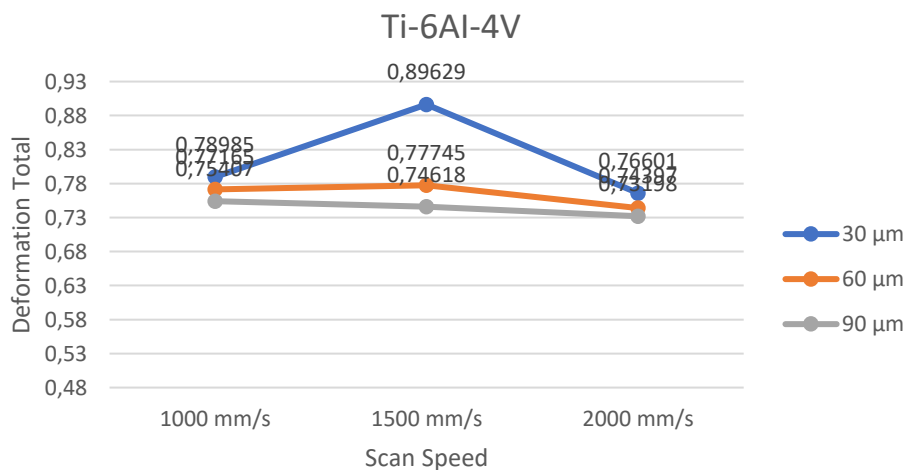
Kemudian pada nilai *layer thickness* 60 μm konstan dengan nilai *scan speed* sebesar 1000 mm/s jenis material 17-4PH menghasilkan nilai deformasi total sebesar 0,52423 mm. Nilai deformasi total kemudian naik pada *scan speed* 1500 mm/s sebesar 0,55164 mm. Namun deformasi kembali turun pada *scan speed* 2000 mm/s yaitu 0,52232 mm yang hampir sama nilainya dengan *scan speed* yang digunakan 1000 mm/s.

Selanjutnya pada konfigurasi *layer thickness* konstan 90 μm hasil dari deformasi total menunjukkan grafik yang cenderung naik. Dimana pada *scan speed* 1000 mm/s menunjukkan angka deformasi total sebesar 0,51128 mm. Kemudian pada saat *scan speed* 1500 mm/s deformasi total yang dihasilkan naik menjadi 0,51386 mm dengan selisih yang sangat sedikit. Pada *scan speed* 2000 mm/s menunjukkan nilai deformasi yang mengalami kenaikan menjadi 0,51594 mm.

Dari hasil simulasi pada *layer thickness* konstan 30 μm , 60 μm dan 90 μm pada variasi *scan speed* sebesar 1000 mm/s, 1500 mm/s, dan 2000 mm/s serta jenis material 17-4PH *stainless steel* didapat nilai deformasi tekecil pada nilai *scan speed* 1000 mm/s. Data tersebut menunjukkan bahwa pengaruh variasi *scan speed* dengan nilai *layer thickness* konstan terhadap deformasi total yang dihasilkan bersifat fluktuatif. (Vrancken, 2016) menunjukkan bahwa pengaruh *scan speed* terhadap deformasi bersifat fluktuatif dan tidak linear. Berdasarkan analisa yang dilakukan oleh (Vrancken, 2016) bahwa meningkatkan *scan speed* akan memperpanjang kolom lehan, yang kemudian akan meningkatkan besarnya tegangan sisa dalam satu lapisan. Namun, efek ini hanya ada ketika pada peningkatan dari *scanning speed* rendah ke sedang . Sehingga nilai deformasi yang dihasilkan pada kondisi *scan speed* tertentu akan fluktuatif hasilnya.

4.2.2 Variasi Scan Speed 1000 mm/s, 1500 mm/s, dan 2000 mm/s Pada Layer Thickness Konstan Material Ti-6Al-4V

Pada analisa ini didapatkan dari nilai *layer thickness* konstan yaitu pada 30 μm dengan besar variasi *scan speed* yang digunakan yaitu 1000 mm/s, 1500 mm/s, dan 2000 mm/s. Kemudian dilakukan simulasi dengan variasi *layer thickness* konstan 60 μm dengan besar variasi *scan speed* sama yaitu sebesar 1000 mm/s, 1500 mm/s, dan 2000 mm/s. Selanjutnya pada *layer thickness* konstan 90 μm dengan variasi *scan speed* yaitu 1000 mm/s, 1500 mm/s, dan 2000 mm/s. Hasil dari simulasi yang dilakukan berdasarkan *layer thickness* yang konstan pada variasi *scan speed* tersebut dengan material yang sama Ti-6Al-4V di tampilkan dalam grafik 4.5



Grafik 4.5 Deformasi total pada variasi scan speed 1000 mm/s, 1500 mm/s, dan 2000 mm/s dengan layer thickness konstan material Ti-6Al-4V

Hasil pada grafik 4.5 menunjukkan nilai deformasi total pada simulasi proses metal *additive manufacturing* cetakan *airless tire*. Pada konfigurasi penggunaan variasi *scan speed* 1000 mm/s dan *layer thickness* 30 μm menghasilkan deformasi total sebesar 0,78985 mm. Kemudian pada nilai *scan speed* 1500 mm/s dan *layer thickness* 30 μm deformasi total yang dihasilkan naik signifikan dibandingkan sebelumnya yaitu menjadi 0,89629 mm. Namun, pada *scan speed* 2000 mm/s deformasi mengalami penurunan yang signifikan dibandingkan pada *scan speed* 1500 mm/s. Pada *layer thickness* 30 μm dengan *scan speed* 2000 mm/s nilai deformasi total adalah 0,76601 mm.

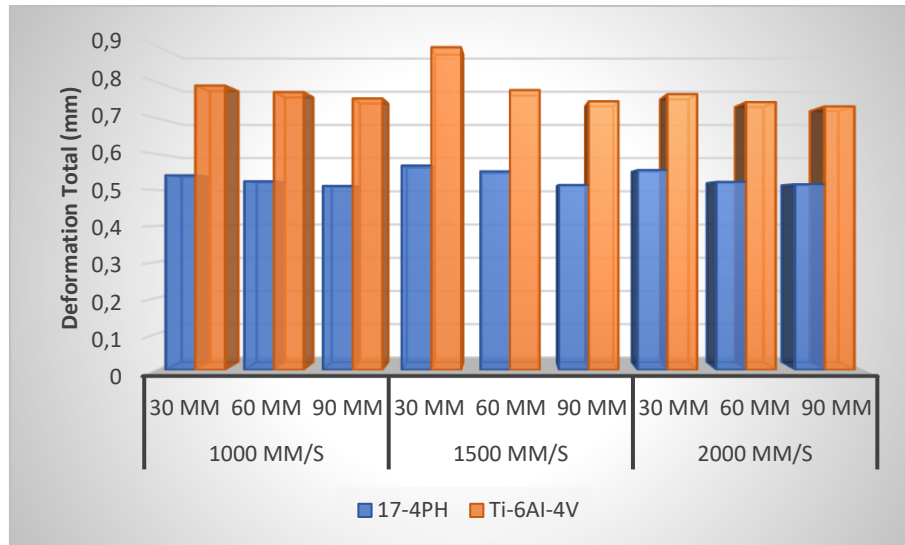
Selanjutnya diketahui hasil pada *layer thickness* konstan dengan nilai 60 μm dan *scan speed* 1000 mm/s menghasilkan deformasi total 0,77165 mm. Pada *layer thickness* 60 μm dengan *scan speed* 1500 mm/s deformasi total yang dihasilkan mengalami kenaikan seperti pada simulasi *scan speed* 1500 mm/s *layer thickness* 30 μm . Namun kenaikannya tidak terlalu signifikan yaitu menjadi 0,77745 mm. Lalu pada saat nilai *layer thickness* 60 μm dengan *scan speed* 2000 mm/s deformasi total yang dihasilkan turun menjadi 0,74397 mm.

Kemudian dari hasil konfigurasi simulasi pada *layer thickness* 90 μm dan nilai *scan speed* 1000 mm/s didapatkan deformasi total yaitu sebesar 0,75407 mm. Pada *layer thickness* yang sama yaitu 90 μm dan *scan speed* 1500 mm/s deformasi total yang dihasilkan sedikit mengalami penurunan yaitu menjadi 0,74618 mm. Konfigurasi berikutnya dapat dilihat pada *layer thickness* yang digunakan 90 μm dan nilai *scan speed* sebesar 2000 mm/s deformasi total yang dihasilkan turun lagi namun tidak mengalami selisih yang besar yaitu menjadi 0,73198 mm.

Dari hasil keseluruhan simulasi menunjukkan bahwa ada kemiripan grafik pada variasi *scan speed* 1000 mm/s, 1500 mm/s, dan 2000 mm/s dengan *layer thickness* 30 μm dan 60 μm . Data tersebut juga menunjukkan bahwa nilai deformasi pada variasi *scan speed* yang digunakan sebesar 1000 mm/s, 1500 mm/s, dan 2000 mm/s dengan besar *layer thickness* konstan material Ti-6Al-4V hasilnya tidak stabil atau fluktuatif. (Vrancken, 2016) juga menjelaskan bahwa hal ini sama seperti pada material sebelumnya yang digunakan yaitu 17-4PH dimana efek dari *scan speed* hanya terjadi pada saat nilai *scan speed* yang rendah. Untuk *scan speed* yang cenderung tinggi maka efek terhadap deformasi yaitu fluktuatif. Pada simulasi didapatkan hasil variasi dengan nilai deformasi terkecil terjadi pada saat *scan speed* 2000 mm/s dengan nilai adalah *layer thickness* 90 μm

4.3 Analisa Pengaruh Jenis material terhadap Deformasi Total yang dihasilkan pada Layer Thickness Konstan dan Scan Speed Konstan

Pada analisa ini, dilakukan perbandingan hasil data deformasi total pada penggunaan variasi jenis material yaitu 17-4PH *stainless steel* dan Ti-6Al-4V. Hasil data dari deformaasi total berdasarkan dari nilai *layer thickness* konstan dan *scan speed* konstan. Data dari simulasi yang telah dilakukan ditampilkan pada grafik bar dibawah ini.



Grafik 4.6 Perbandingan Deformasi Total pada material 17-4PH dan Ti-6Al-4V

Hasil data pada grafik tersebut dapat diketahui bahwa nilai deformasi total pada variasi *layer thickness* 30 μm dan *scan speed* 1000 mm/s yang sama pada material 17-4PH stainless steel lebih kecil dibandingkan pada material Ti-6Al-4V yaitu 0,54071 mm dan 0,78985 mm. Kemudian pada *layer thickness* 60 μm dan *scan speed* 1000 mm/s didapatkan nilai deformasi total pada material 17-4PH lebih kecil dibandingkan dengan material Ti-6Al-4V yaitu 0,52423 mm dan 0,77165 mm. Pada nilai *layer thickness* yang digunakan 90 μm dan *scan speed* 1000 mm/s menghasilkan deformasi total pada material 17-4PH lebih kecil dibandingkan dengan pada material Ti-6Al-4V yaitu 0,51128 mm dan 0,75407 mm.

Pada keseluruhan nilai variasi *layer thickness* dan *scan speed* yang digunakan adalah sama dapat diketahui bahwa nilai deformasi total pada material 17-4PH selalu lebih kecil daripada deformasi total yang dihasilkan pada material Ti-6Al-4V. Hal tersebut berkaitan dengan nilai *melting point* pada material Ti-6Al-4V yaitu 1605 $^{\circ}\text{C}$ lebih tinggi dibandingkan dengan nilai *melting point* pada material 17-4PH yaitu 1605 $^{\circ}\text{C}$. Nilai *melting point* yang semakin tinggi mengakibatkan proses pendinginan pada cetakan akan lebih lama. Dengan proses pendinginan yang lebih lama kemudian pada proses *build* cetakan yang di *inject* oleh bubuk logam cair pada bagian atas *layer* akan mengakibatkan *residual stress* yang lebih besar. Hal ini sesuai dengan (Vrancken, 2016) bahwa material dengan nilai *melting point* yang tinggi akan menghasilkan deformasi yang lebih tinggi dibandingkan material dengan nilai *melting point* yang lebih rendah.

4.4 Analisa Parameter Proses Terbaik yang Digunakan Pada Proses Metal AM Cetakan Airless Tire

Pada analisa ini dilakukan perbandingan hasil nilai proses operasi terbaik pada *metal additive manufacturing* cetakan *airless tire* berdasarkan dari geometri *design spoke* yang dilakukan oleh penelitian (Prmono & Effendi, 2019) . Hasil deformasi yang dihasilkan akan menjadi pertimbangan dari selisih terkecil berdasarkan geometri *design spoke* yaitu 4 mm. Aspek lain yang diperhatikan adalah mempertimbangkan aspek waktu proses operasi metal AM dan juga biaya dari jenis material yang digunakan. Berdasarkan dari hasil simulasi yang dilakukan dan pada analisa sebelumnya menghasilkan parameter proses operasi terbaik sebagai berikut.

Tabel 4.3 Hasil Proses Parameter Terbaik pada Material 17-4PH dan Ti-6Al-4V

Material	<i>Scan Speed</i>	<i>Layer Thickness</i>	<i>Total Deformation</i>	Harga Bubuk per Kg
17-4PH	1000 mm/s	90 μ m	0,51128 mm	US\$ 79 /Kg
Ti-6Al-4V	2000 mm/s	90 μ m	0,73198 mm	US\$ 379 /Kg

Dari tabel yang ditampilkan diatas dapat diketahui bahwa apabila mempertimbangkan manufacture dengan biaya yang lebih murah maka material jenis 17-4PH menjadi opsi material yang lebih baik. Harga dari bubuk material 17-4PH adalah US\$ 79/Kg dan untuk material Ti-6Al-4V adalah US\$ 379 / Kg berdasarkan dari *MSE Suplies*. Pada material 17-4PH juga menghasilkan nilai deformasi total sebesar 0,51128 mm lebih kecil daripada material Ti-6Al-4V yaitu 0,73198 mm. Hasil dari deformasi total yang dihasilkan pada 17-4PH mempunyai selisih yang relative kecil dari desain geometri *spoke* yang ditetapkan yaitu 4 mm. Sehingga hasil pada material 17-4PH akan lebih akurat dengan *design* geometri yang telah ditetapkan. Namun apabila mempertimbangkan waktu proses maka yang lebih baik adalah material Ti-6Al-4V. Pada material Ti-6Al-4V didapatkan parameter proses input *scan speed* terbaik adalah 2000 mm/s yang mana lebih cepat daripada material 17-4PH dengan hasil terbaik proses parameter *scan speed* yaitu 1000 mm/s.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian tugas akhir yang telah dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Hasil pengujian pada penelitian ini dapat disimpulkan bahwa pada variasi *layer thickness* 30 μm , 60 μm , dan 90 μm dengan *scan speed* konstan menghasilkan deformasi total yang menurun seiring meningkatnya *layer thickness*. Namun, penurunan yang dihasilkan pada variasi *layer thickness* tidaklah signifikan yaitu (\pm) 3%. Besarnya deformasi total terkecil yaitu terjadi pada nilai *layer thickness* 90 μm .
2. Hasil pengujian pada penelitian ini dapat disimpulkan bahwa pada variasi *scan speed* 1000 mm/s, 1500 mm/s, dan 2000 mm/s dengan *layer thickness* yang konstan menghasilkan nilai deformasi yang fluktuatif seiring bertambahnya besar *scan speed*. Besar deformasi yang dihasilkan meningkat pada nilai 1500 mm/s dibandingkan dengan nilai *scan speed* 1000 mm/s dan cenderung turun lagi pada *scan speed* 2000 mm/s. Peningkatan signifikan terbesar terjadi pada *scan speed* 1500 mm/s pada *layer thickness* 30 μm material Ti-6Al-4V yaitu (\pm) 14%.
3. Hasil pengujian dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa pada variasi material yang digunakan adalah 17-4PH menghasilkan nilai deformasi yang lebih kecil dibandingkan dengan material Ti-6Al-4V. Hal tersebut berkaitan dengan perbedaan nilai *melting point* dari material 17-4PH yang lebih kecil dibandingkan material Ti-6Al-4V yaitu 1405 °C dan 1605 °C. Nilai deformasi total yang dihasilkan pada material 17-4PH mempunyai selisih yang cenderung signifikan yaitu sebesar (\pm) 45 % dibandingkan deformasi total material Ti-6Al-4V.
4. Berdasarkan hasil dari simulasi yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa material terbaik adalah 17-4PH jika mempertimbangkan nilai deformasi yang kecil yaitu 0,51128 mm dan biaya manufaktur yang murah. Jika mempertimbangan waktu proses pencetakan yang lebih cepat maka menggunakan material Ti-6Al-4V. Pada material 17-4PH parameter proses terbaik adalah pada *layer thickness* 90 μm dan *scan speed* 1000 mm/s sedangkan pada material Ti-6Al-4V adalah pada *layer thickness* 90 μm dan *scan speed* 2000 mm/s.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian tugas akhir yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran guna mengembangkan penelitian lebih lanjut mengenai metal additive manufacturing yaitu sebagai berikut.

1. Perlu adanya variasi tambahan *pre-heating temperature* dan *dwelt time* yang digunakan untuk memaksimalkan nilai deformasi terkecil yang dihasilkan.
2. Diperlukan komputer dengan spesifikasi yang bagus untuk menjalankan simulasi sehingga dapat melakukan simulasi secara penuh tanpa pemodelan skala dengan waktu yang lebih singkat.
3. Pada penelitian berikutnya disarankan untuk mempertimbangkan nilai dari sensitifitas material yang digunakan.

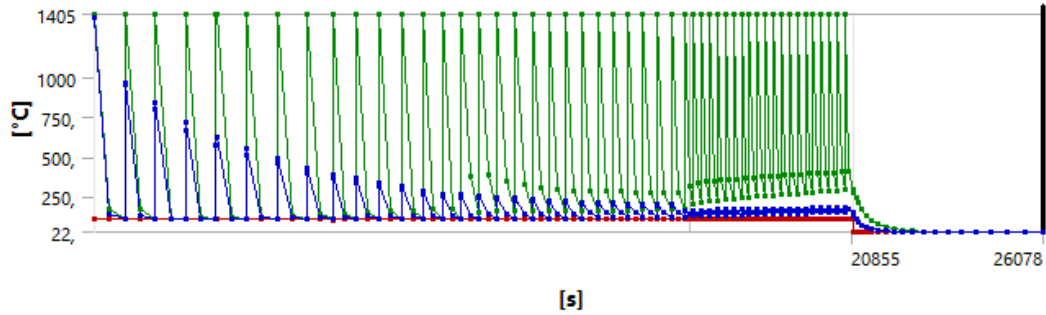
DAFTAR PUSTAKA

- Carlota, V. (2019, September 10). *The Complete Guide to Directed Energy Deposition (DED) in 3D Printing*.
- Cheng, B., Shrestha, S., & Chou, K. (2016). Stress and deformation evaluations of scanning strategy effect in selective laser melting. *Additive Manufacturing*, 12, 240–251. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.05.007>
- Cook, R. D. S. (1990). *Konsep dan Aplikasi METODE ELEMEN HINGGA* (T. Surjaman, Ed.).
- Coulson, S. (n.d.). *ANALYSIS OF ADDITIVELY MANUFACTURED 17-4PH STAINLESS STEEL*.
- Emmelmann, C., Kranz, J., Herzog, D., & Wycisk, E. (2013). *Laser Additive Manufacturing of Metals* (pp. 143–162). https://doi.org/10.1007/978-3-642-41341-4_6
- Fish, J., Belytschko, T., & Wiley, J. (n.d.). *A First Course in Finite Elements*.
- Frazier, W. E. (2014). Metal additive manufacturing: A review. In *Journal of Materials Engineering and Performance* (Vol. 23, Issue 6, pp. 1917–1928). Springer New York LLC. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>
- Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (n.d.). *Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing Second Edition*.
- Gouge, M., Michaleris, P., Denlinger, E., & Irwin, J. (2018). The Finite Element Method for the Thermo-Mechanical Modeling of Additive Manufacturing Processes. In *Thermo-Mechanical Modeling of Additive Manufacturing* (pp. 19–38). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811820-7.00003-3>
- Herderick, E. D. (2011). *Additive Manufacturing of Metals: A Review*.
- Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., & Emmelmann, C. (2016). Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, 371–392. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>
- Hutton, D. (2014). *Hutton: Fundamentals of Finite Element Analysis Front Matter Preface*.
- Kianian, B. (2017). *Wohlers Report 2017: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report: Chapters titles: The Middle East, and other countries* (22nd ed.). Wohlers Associates, Inc.
- Kumar, A., & Kalahastimath, A. (2021). REVIEW ON AIRLESS TYRE. *International Research Journal of Engineering and Technology*. www.irjet.net
- Li, C., Liu, Z. Y., Fang, X. Y., & Guo, Y. B. (2018). Residual Stress in Metal Additive Manufacturing. *Procedia CIRP*, 71, 348–353. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.05.039>
- Mugwagwa, L., Yadroitsev, I., & Matope, S. (2019). Effect of process parameters on residual stresses, distortions, and porosity in selective laser melting of maraging steel 300. *Metals*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/met9101042>
- Pramono, A. S., & Effendi, M. K. (2019). Optimization in airless tires design using backpropagation neural network (BPNN) and genetic algorithm (GA) approaches. *AIP Conference Proceedings*, 2187. <https://doi.org/10.1063/1.5138331>
- R. Lesti. (2020, January 28). *Revolusi Industri 4.0*. Kementrian Komunikasi Dan Informatika RI.
- Rangdale, P. A., Chandak, K. R., & Bagade, G. M. (n.d.). IJESRT INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES & RESEARCH TECHNOLOGY NON PNEUMATIC TYRE. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1165624>
- Rugsaj, R., & Suvanjumrat, C. (2021). Study of Mechanical Properties of 3D Printed Material for Non-Pneumatic Tire Spoke. *Engineering and Innovative Materials IX*, 880, 97–102. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.880.97>

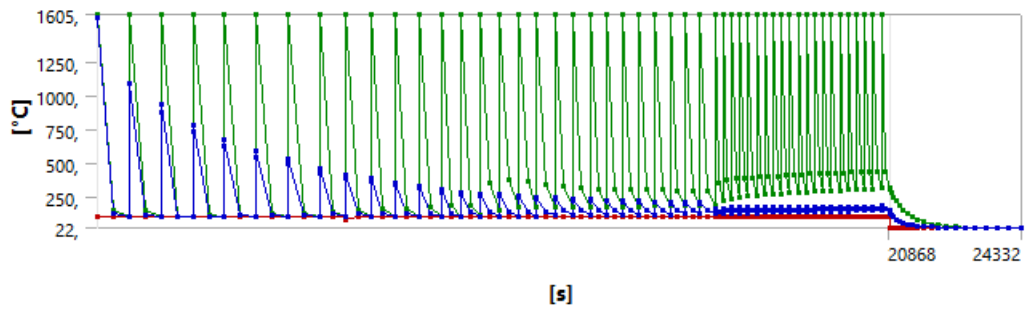
- Sames, W. J., List, F. A., Pannala, S., Dehoff, R. R., & Babu, S. S. (2016). The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. In *International Materials Reviews* (Vol. 61, Issue 5, pp. 315–360). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/09506608.2015.1116649>
- Tekkaya A. Erman and Soyarslan, C. (2014). Finite Element Method. In G. Laperrière Luc and Reinhart (Ed.), *CIRP Encyclopedia of Production Engineering* (pp. 508–514). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20617-7_16699
- Vafadar, A., Guzzomi, F., Rassau, A., & Hayward, K. (2021). Advances in metal additive manufacturing: A review of common processes, industrial applications, and current challenges. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 3, pp. 1–33). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/app11031213>
- Vrancken, B. (2016). *Study of Residual Stresses in Selective Laser Melting*.

LAMPIRAN

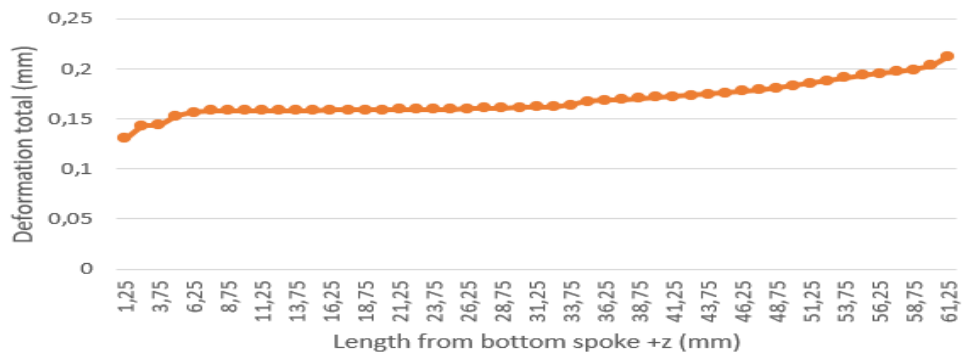
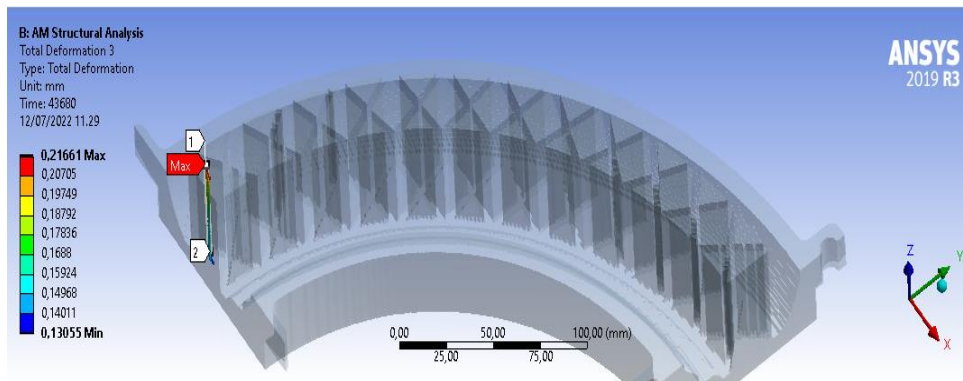
Grafik Temperature pada material 17-4PH



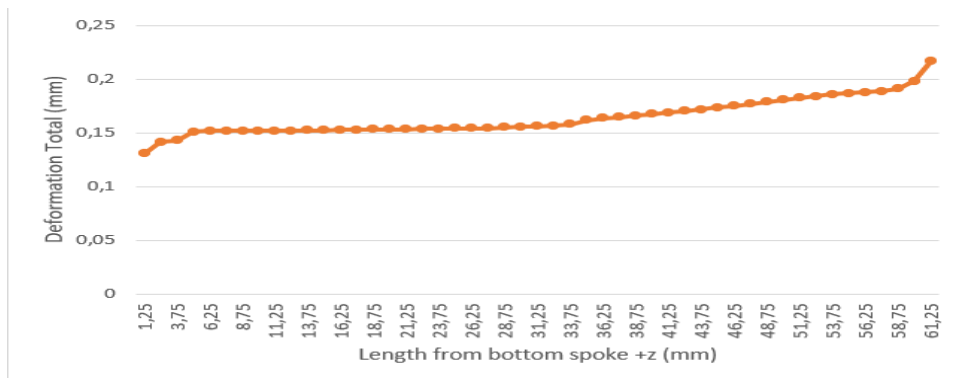
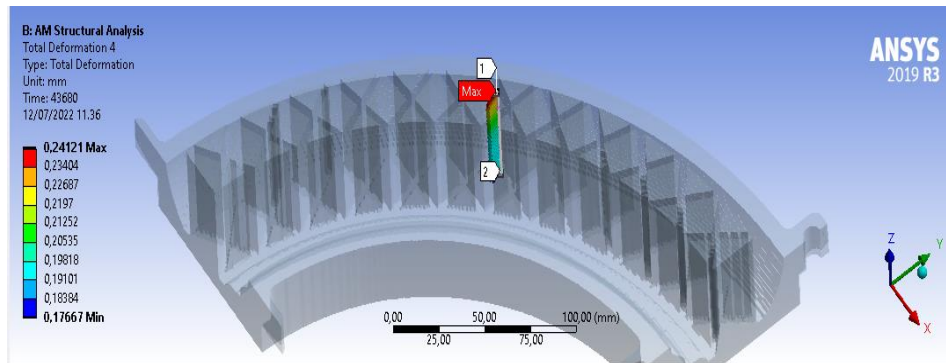
Grafik Temperatur pada material Ti-6Al-4V



Gambar Posisi path Sample 1 celah spoke bagian tengah kearah Z



Gambar Posisi path Sample 2 celah spoke bagian tengah kearah Z



Harga Ti-6Al-4V Metal Powder pada MSE Supplies

Call Us: +1 (520) 789-6673 Sign in or Create an Account

MSE Supplies®
 We Enable Innovations

Search all products...

HOME PRODUCTS ▾ CUSTOMIZATION ABOUT ▾ CONTACT REQUEST A QUOTE WHY US OFFERS

Home > Ti-6Al-4V (TC4) Titanium Based Metal ...

Ti-6Al-4V (TC4) Titanium Based Metal Powder for Additive Manufacturing (3D Printing)

\$ 379⁰⁰

45-105um ▾

Bulk orders? Please contact us for Bulk Quotation.

Harga 17-4PH Metal Powder pada MSE Supplies



Call Us: +1 (520)789-6673 [Sign in](#) or [Create an Account](#)

Search all products...



Cart

[HOME](#) [PRODUCTS](#) [CUSTOMIZATION](#) [ABOUT](#) [CONTACT](#) [REQUEST A QUOTE](#) [WHY US](#) [OFFERS](#)

Home > 17-4PH Iron Based Metal Powder for A...



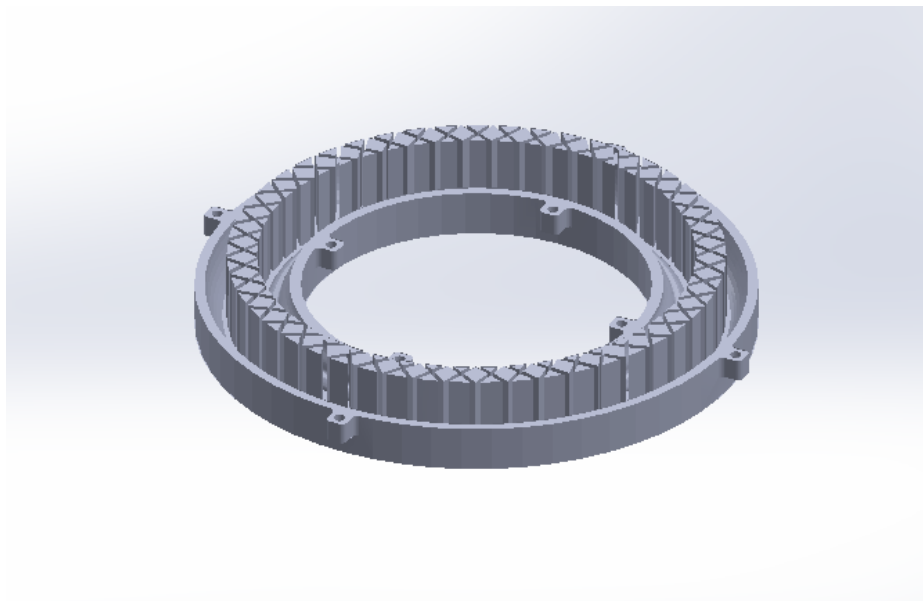
17-4PH Iron Based Metal Powder for Additive Manufacturing (3D Printing)

\$ 79⁰⁰

Size

45-105um

Design Cetakan Airless Tire



BIODATA PENULIS



Tugas akhir ini ditulis oleh Garin Wisnu Murti yang dilahirkan di Purworejo, 20 Februari 2000. Penulis merupakan anak ke 4 dari 4 bersaudara dari pasangan Bapak K. Riyanto dan Ibu Sri Hastuti. Penulis menempuh pendidikan formal di SDN Kaligesing, Kutoarjo, SMPN 5 Purworejo, dan SMAN 6 Purworejo sebelum akhirnya mengikuti seleksi SBMPTN dan diterima di Departemen Teknik Mesin FTIRS-ITS pada tahun 2018. Selama menempuh pendidikan S-1, penulis sempat aktif di beberapa kegiatan yang diselenggarakan di dalam dan luar ITS. Diantaranya sebagai *staff* departemen sosial dan masyarakat pada Himpunan Mahasiswa Mesin ITS (HMM ITS) pada periode 2019/2020. Kemudian menjabat sebagai Wakil Ketua Keluarga Mahasiswa Purworejo ITS (KAPORITS) periode 2020/2021.

Untuk Informasi, kritik, saran serta keperluan lain mengenai tugas akhir ini, penulis dapat dihubungi melalui *e-mail* berikut: garinwisnumurti@gmail.com