



**TUGAS AKHIR - TL 141584**

**ANALISIS ELEMEN HINGGA PADA PROSES BENDING  
PIPA BERPENAMPANG SEGI EMPAT DENGAN LASER**

Ida Bagus Putra Anandya  
NRP 2712 100 138

Dosen Pembimbing

**Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D**  
**Ir. Rochman Rochiem, M.Sc**

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2016

*(Halaman sengaja dikosongkan)*



**FINAL PROJECT - TL 141584**

**FINITE ELEMENT ANALYSIS ON LASER BENDING  
PROCESS OF SQUARE AND RECTANGLE TUBE**

Ida Bagus Putra Anandya  
Student ID 2712 100 138

Advisor

Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D  
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.

DEPARTMENT OF MATERIALS AND METALLURGICALS  
ENGINEERING

Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya  
2016

*(Halaman sengaja dikosongkan)*

**ANALISIS ELEMEN HINGGA PADA PROSES BENDING  
PIPA BERPENAMPANG SEGI EMPAT DENGAN LASER**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Bidang Studi Metalurgi Manufaktur  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**IDA BAGUS PUTRA ANANDYA**

NRP. 2712100138

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir :

1. Mas Irfan P. Hidayat, ST. M.Sc, Ph.D
2. Ir. Rochman Rochiem, M.Sc



# **ANALISIS ELEMEN HINGGA PADA PROSES BENDING PIPA BERPENAMPANG PERSEGI DAN PERSEGI PANJANG DENGAN LASER**

**Nama** : Ida Bagus Putra Anandya  
**NRP** : 2712100138  
**Jurusan** : Teknik Material & Metalurgi  
**Dosen Pembimbing** : Mas Irfan P.H., S.T., M.Sc., Ph.D.  
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.

## **Abstrak**

*Dari segi kekuatan, ketahanan terhadap korosi dan ketahanan terhadap buckling, baja tahan karat AISI 304 menjadi salah satu pipa dengan luas penampang segi empat yang banyak digunakan. Namun, proses bending konvensional dengan mekanik memiliki banyak keterbatasan pada bending radius dan diameter pipa yang akan ditebuk. Sehingga, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mencapai hasil proses laser bending yang optimal. Analisa yang digunakan adalah termal dan mekanik. Parameter-parameter yang digunakan adalah bentuk penampang persegi dan persegi panjang persegi, laser power, scanning speed, scanning path dengan masing-masing dua variasi. Variasi tersebut dianalisa untuk mendapatkan hasil proses laser bending yang paling optimal. Dari simulasi yang dilakukan menghasilkan tegangan, distorsi dan bend angle terbesar adalah skema circumferential dengan power 1500W scanning speed 10 mm/s dengan nilai tegangan maksimum 414 MPa.*

**Kata Kunci:** *Laser forming, Pipa segi empat, daya laser, scanning speed, scanning path, Analisa elemen hingga*

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

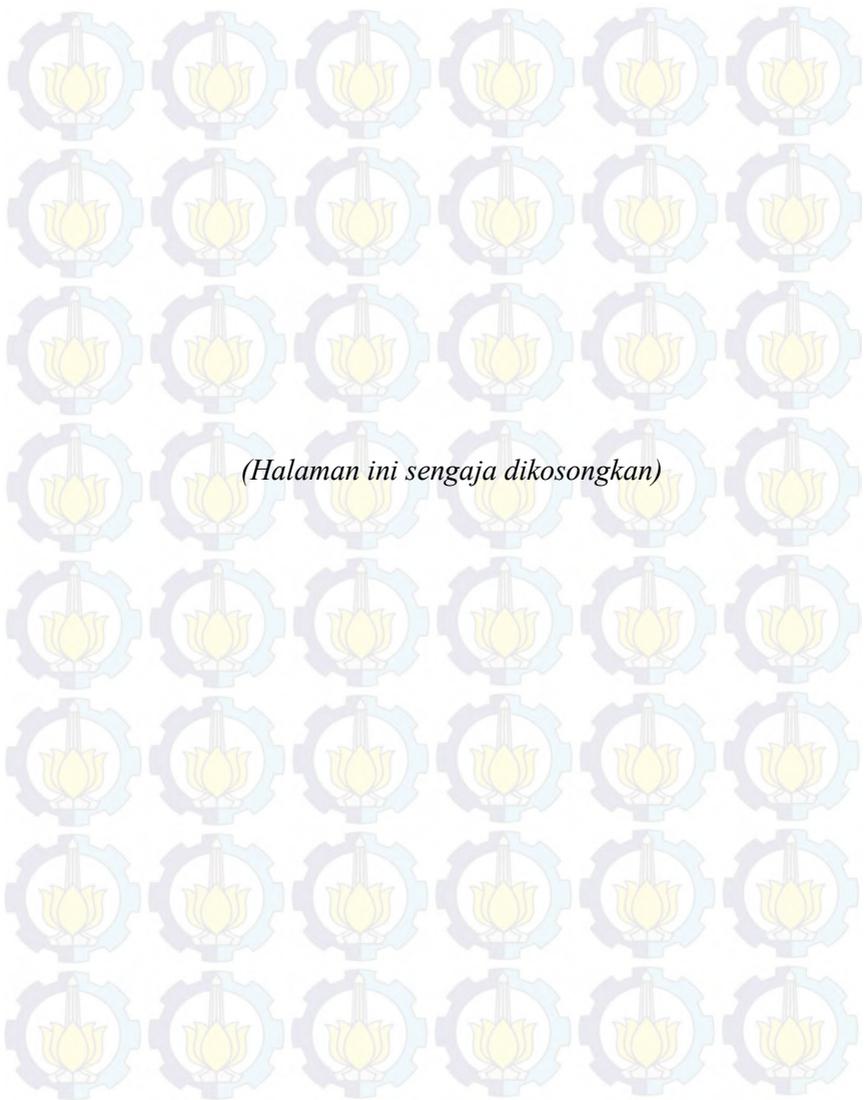
## ***FINITE ELEMENT ANALYSIS ON LASER BENDING PROCESS OF SQUARE AND RECTANGLE PIPE***

***Name*** : ***Ida Bagus Putra Anandya***  
***SRN*** : ***2712100138***  
***Major*** : ***Material and Metallurgical Engineering Dept***  
***Advisor*** : ***Mas Irfan P.H., S.T., M.Sc., Ph.D.***  
***Lectures*** : ***Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.***

### ***Abstract***

*Based on its advantageous properties or characteristic, stainless steel AISI 304L is widely used as square pipe materials. Tube bending is an important manufacturing of pipe products. There is a new developed method of bending process, named laser forming. This manufacturing technique use laser beam as a heat source. However, conducting an experiment with this method is time consuming and expensive. Having said that, this experiment has been done by finite element method. There were some variations used in this simulation, first is the geometry of the tube, the first one was square and the other one was rectangle. The other variations are laser power, scanning speed, and scanning path (axial and circumferential). Based on the simulation, the highest bend value was 1.129 mm with 414 Mpa maximum stress was obtained from 1500 W laser power and 10 mm/s scanning speed with circumferential scanning path in rectangle pipe.*

***Keywords: Finite Element Analysis, laser forming, laser bending, laser power, scanning path, scanning speed, rectangle Pipe***



## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan rahmat, serta pencerahan-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir berjudul "Analisis Elemen Hingga Pada Proses Bending Pipa Berpenampang Segi Empat dengan Laser" yang menjadi salah satu syarat kelulusan mahasiswa di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, laporan kerja praktik ini tidak dapat diselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberi dukungan, dan bimbingan kepada penulis hingga Tugas Akhir ini dapat diselesaikan. Penulis mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang berperan serta pada terbentuknya laporan ini, yaitu:

1. Kedua orang tua penulis Mama dan Ayah yang senantiasa memberikan dukungan dalam segala hal terutama kesadaran akan pentingnya ilmu pengetahuan.
2. Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D sebagai dosen pembimbing Tugas Akhir, yang senantiasa memberikan bimbingan, nasihat, dan motivasi untuk masa depan penulis.
3. Bapak Ir. Rochman Rochiem, M.Sc. selaku dosen Pembimbing kedua yang telah memberikan banyak saran dan masukan.
4. Bapak Dr. Agung Purniawan, S.T, M.Eng. selaku Dosen Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
5. Ibu Diah Susanti, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing akademik dan segenap Dosen dan Karyawan

Teknik Material dan Metalurgi ITS yang membantu penulis untuk menyelesaikan proses perkuliahan di ITS.

6. Serta kepada seluruh keluarga seperjuangan baik dari Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS maupun dari almamater Sekolah Santa Laurensia yang telah memberikan semangat, serta nasihat dan pesan yang tidak pernah bisa terlupakan

Semoga tulisan ini dapat menjadi pelita ilmu pengetahuan dan pikiran yang baik datang dari segala penjuru.

Surabaya, Januari 2016

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	v
<b>ABSTRAK</b> .....	vii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	xi
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xiii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xv
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xxi
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	3
1.3. Batasan Penelitian.....	3
1.4. Tujuan Penelitian.....	3
1.5. Manfaat Penelitian.....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1. Penelitian Sebelumnya Mengenai <i>Laser Bending</i> .....	5
2.2. Metode Analitis Mekanisme <i>Laser Forming</i> .....	16
2.2.1 Mekanisme Gradien Temperatur.....	16
2.2.2 Mekanisme Buckling.....	18
2.2.3 Mekanisme Upsetting.....	20
2.3. Proses Pembentukan dengan <i>Laser</i> .....	21
2.3.1 Penjelasan Proses.....	21
2.3.2 Prinsip Deformasi Thermal.....	23
2.4 Faktor yang Mempengaruhi dalam <i>Laser Bending</i> .....	26
2.4.1 Parameter Energi.....	27
2.4.2 Penyerapan Permukaan pada Material.....	27
2.4.3 Daya Laser.....	28
2.4.4 Kecepatan Pergerakan.....	28
2.4.5 Diameter Sinar Laser.....	29
2.4.6 Pengaruh Pendinginan.....	29
2.4.7 Sifat Material.....	30
2.4.8 Geometri Benda Kerja.....	31
2.5 Metode Elemen Hingga.....	32

2.5.1 Pengertian Umum.....	32
2.5.2 Perpindahan Panas dalam FEM.....	33
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b>	
3.1 Diagram Alir Penelitian .....	37
3.2 Spesifikasi Material dan Parameter <i>Laser Bending</i> .....	38
3.2.1 Material Pipa .....	38
3.2.2 Geometri Pipa.....	38
3.2.3 Parameter <i>Laser Bending</i> .....	40
3.3 Peralatan.....	40
3.4 Proses Penelitian .....	41
3.4.1. Pemodelan pipa .....	42
3.4.2. Pemodelan <i>material properties</i> .....	43
3.4.3. Pemodelan <i>boundary condition</i> .....	44
3.4.4. Pemodelan tipe pembebanan .....	44
3.4.5. Tipe analisa .....	45
<b>BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN</b>	
4.1 Pipa Pesergi.....	49
4.1.1 Respon Termal .....	49
4.1.2 Respon Tegangan .....	61
4.2 Pipa Pesergi Panjang .....	74
4.2.1 Respon Termal .....	74
4.2.2 Respon Tegangan .....	87
4.3 Analisa Sensitivitas .....	101
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>	
5.1 Kesimpulan .....	105
5.2 Saran.....	106
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	107
<b>BIODATA PENULIS</b> .....	111

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> Profil penampang melintang dari diameter luar dan dalam pipa untuk hasil ketiga jalur diameter pipa (Shafdar, 2010).....	6
<b>Gambar 2.2</b> Hasil eksperimental laser bending jalur aksial (Shafdar, 2010).....	6
<b>Gambar 2.3</b> Tampak penampang melintang distorsi dari empat skema yang berbeda (a) daya 780W, kecepatan 1,57 rad/s, diameter sinar laser 11 mm; (b) daya 425 W, interval 1 detik, lebar sinar laser 4 mm; (c) daya 1550W, kecepatan 20 mm/s, lebar sinar laser 4 mm; (d) sama seperti c namun dengan pendinginan air.(Zhang, 2006) .....	8
<b>Gambar 2.4</b> Kontur temperatur plat logam pada saat $t=0,4$ detik pemanasan (Yilbas,2014) .....	10
<b>Gambar 2.5</b> Hasil sudut tekuk yang dihasilkan untuk setiap initial displacement dari daya laser dan pulsa laser (Jamil,2015)	11
<b>Gambar 2.6</b> Perbandingan hasil eksperimen dengan analisis numerik pada hubungan antara kecepatan pergerakan laser dengan sudut tekuk yang dihasilkan (Shi, 2007.).....	13
<b>Gambar 2.7</b> Hubungan linear antara pengaruh daya laser terhadap sudut tekuk, serta adanya daya laser minimum untuk membengkokan pipa (Hao, 2003.) .....	13
<b>Gambar 2.8</b> Hasil perpindahan radial pada analisa numerik dan eksperimental di permukaan pipa baja tahan karat (Hsieh,2005.).....	14
<b>Gambar 2.9.</b> Gambar 2.9 Struktur mikro laser welding pada (A) daerah las - lasan, (B) HAZ dan struktur mikro las Metal Active GAS pada (C) daerah las - lasan dan (D) HAZ (Nemecek,2012) .....	15
<b>Gambar 2.10.</b> Sebuah model geometri sederhana unuk analisis menggunakan pendekatan energi: (a) saat pemanasan; dan (b) saat pendinginan.....	18
<b>Gambar 2.11</b> Tahap - tahap pembentukan dengan laser melalui mekanisme buckling: (a) Munculnya tegangan kompresif akibat	

sinar laser; (b) Terjadinya buckling oleh tegangan termal; (c) pertumbuhan deformasi elastis dan plastis, dan (d) pertumbuhan sudut tekuk. (Jung,2006.....	20
<b>Gambar 2.12</b> Pembentukan dengan laser melalui mekanisme upsetting .....	21
<b>Gambar 2.13</b> Skema laser bending pipa dengan penjepit di salah satu ujungnya(Hao, 2003) .....	22
<b>Gambar 2.14</b> Mekanisme gradien temperatur yang terjadi pada proses pembentukan dengan laser; (a) gradien temperatur; (b) saat pemanasan; (c) ketika pendinginan. (Jung, 2006).....	24
<b>Gambar 2.15</b> Hubungan tegangan-regangan dari material terhadap temperatur.(Jung, 2006).....	25
<b>Gambar 2.16</b> Diagram alir proses pembentukan dengan laser.(Jung,2006) .....	26
<b>Gambar 2.17</b> Proses Pengerjaan pada Metode Elemen Hingga (Sonief, 2005.).....	33
<b>Gambar 2.18</b> Perpindahan panas yang terjadi pada proses <i>laser forming</i> .....	34
<b>Gambar 3.1</b> Diagram Alir Penelitian .....	37
<b>Gambar 3.2</b> Penampang melintang pipa persegi.....	39
<b>Gambar 3.3</b> Penampang melintang pipa persegi panjang .....	39
<b>Gambar 3.4</b> Model 3 dimensi pipa persegi dan persegi panjang.....	40
<b>Gambar 3.5</b> Diagram alir pemodelan menggunakan metode elemen hingga.....	41
<b>Gambar 3.6</b> Hasil <i>meshing</i> pada pipa berpenampang lingkaran .	42
<b>Gambar 3.7</b> Hasil <i>meshing</i> pada pipa berpenampang elips.....	43
<b>Gambar 3.8</b> Material properties yang di-input.....	44
<b>Gambar 4.1</b> Distribusi temperatur pada: (a) detik 1; (b) detik 2; (c) detik 12; (d) detik 37; (e) detik 38; dan (f) 138. Perlakuan 1 (Axial Scanning).....	51
<b>Gambar 4.2</b> Distribusi temperatur pada: (a) detik 1; (b) detik 2; (c) detik 12; (d) detik 37; (e) detik 38; dan (f) 138. Perlakuan 5 (Circumferential Scanning) .....	53
<b>Gambar 4.3</b> Grafik Temperatur vs waktu untuk <i>axial scanning</i> pipa persegi.....	54

<b>Gambar 4.4</b> Grafik Temperatur vs waktu untuk <i>circumferential scanning</i> pipa persegi .....	55
<b>Gambar 4.5</b> Grafik Gradien Termal sumbu X Vs Waktu (Persegi-Axial) untuk perlakuan 1 hingga perlakuan 4 .....	56
<b>Gambar 4.6</b> Grafik Gradien Termal sumbu X Vs Waktu (PersegiCircumferential) perlakuan 5 hingga perlakuan 8.. .....	57
<b>Gambar 4.7</b> Grafik gradien temperatur sumbu y terhadap waktu (Persegi circumferential dan Axial).....	59
<b>Gambar 4.8</b> Gradien temperatur arah sumbu z terhadap waktu (Pipa Persegi Panjang circumferential dan Axial).....	60
<b>Gambar 4.9</b> Grafik Tegangan pada arah pemanasan terhadap waktu dengan skema axial dan circumferential .....	61
<b>Gambar 4.10</b> Distribusi tegangan pada pipa ( $\sigma_z$ ) pada skema aksial pada detik ke: (a) 0.125; (b) 1; (c) 138. Deformasi diperbesar 100x untuk memperjelas .....	63
<b>Gambar 4.11</b> Distribusi tegangan pada pipa ( $\sigma_z$ ) pada skema circumferential pada detik ke: (a) 0.125; (b) 1; (c) 138. Deformasi diperbesar 100x untuk memperjelas .....	66
<b>Gambar 4.12</b> Displacement pada arah-y (bending) pada bagian atas pada skema axial .....	68
<b>Gambar 4.13</b> Displacement pada arah-y (bending) pada bagian atas pada skema circumferential.....	70
<b>Gambar 4.14</b> Historis displacement-y pada ujung pipa persegi dengan jalur pemanasan aksial .....	70
<b>Gambar 4.15</b> Historis displacement-y pada ujung pipa persegi dengan jalur pemanasan aksial .....	71
<b>Gambar 4.16</b> Profil penampang dari pipa pada axial scanning pada $z = 50$ mm .....	72
<b>Gambar 4.17</b> Profil penampang dari pipa pada circumferential scanning pada $z = 50$ m .....	72
<b>Gambar 4.18</b> Distribusi temperatur pada: (a) detik 1; (b) detik 2; (c) detik 12; (d) detik 37; (e) detik 38; dan (f) 138. Perlakuan 1 (Axial Scanning).....	77

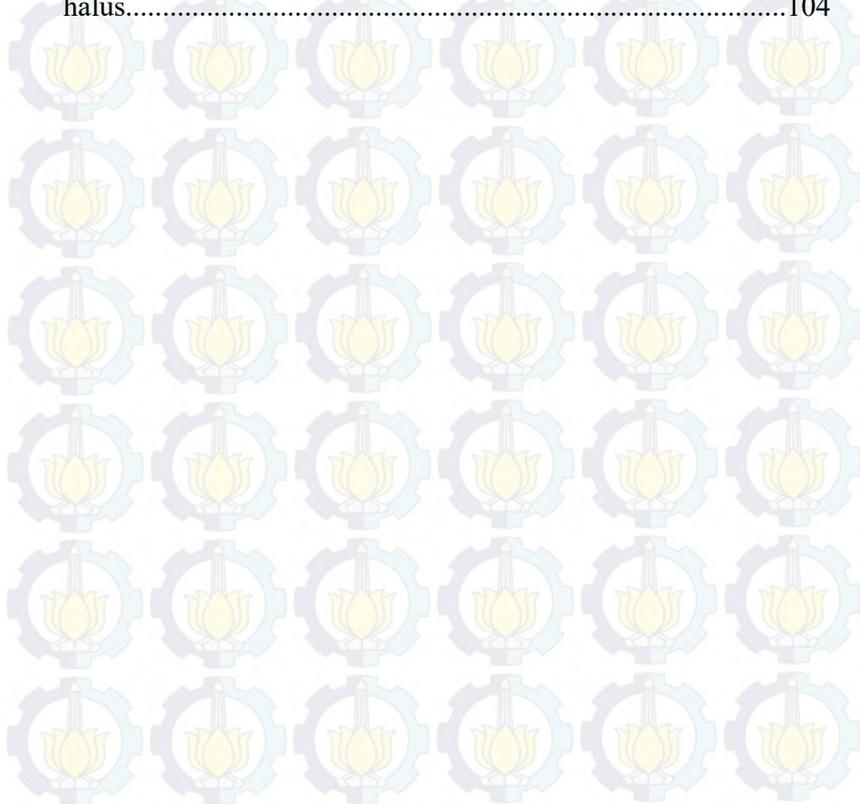
<b>Gambar 4.19</b> Distribusi temperatur pada: (a) detik 1; (b) detik 2; (c) detik 12; (d) detik 37; (e) detik 38; dan (f) 138. Perlakuan 5 (Circumferential Scanning) .....	80
<b>Gambar 4.20</b> Temperatur vs waktu untuk axial scanning pipa Persegi Panjang .....	81
<b>Gambar 4.21</b> Temperatur vs waktu untuk circumferential scanning pipa Persegi Panjang .....	82
<b>Gambar 4.22</b> Thermal Gradient arah-x Vs Waktu (Axial) untuk perlakuan 9 hingga perlakuan 12.....	83
<b>Gambar 4.23</b> Thermal Gradient arah sumbu x Vs Waktu (Circumferential) untuk perlakuan 13 hingga perlakuan 16.....	84
<b>Gambar 4.24</b> Gradien temperatur arah sumbu y terhadap waktu (Pipa Persegi Panjang circumferential dan Axial) untuk perlakuan 9 hingga perlakuan 16.....	85
<b>Gambar 4.25</b> Gradien temperatur arah sumbu y terhadap waktu (Pipa Persegi Panjang circumferential dan Axial) untuk perlakuan 9 hingga perlakuan 16 .....	86
<b>Gambar 4.26</b> Grafik Tegangan pada arah pemanasan terhadap waktu dengan skema axial dan circumferential.....	87
<b>Gambar 4.27</b> Distribusi tegangan pada pipa persegi panjang ( $\sigma_z$ ) pada skema aksial pada detik ke: (a) 0.125; (b) 1; (c) 138. Deformasi diperbesar 100x untuk memperjelas .....	91
<b>Gambar 4.28</b> Distribusi tegangan pada pipa persegi panjang ( $\sigma_z$ ) pada skema circumferential pada detik ke: (a) 0.125; (b) 1; (c) 138. Deformasi diperbesar 100x untuk memperjelas.....	94
<b>Gambar 4.29</b> Displacement UY pada arah-y (bending) pada bagian atas pada skema axial.....	95
<b>Gambar 4.30</b> Displacement pada arah-y (bending) pada bagian atas pada skema circumferential.....	96
<b>Gambar 4.31</b> Historis displacement-y pada ujung pipa persegi panjang dengan jalur pemanasan aksial.....	98
<b>Gambar 4.32</b> Historis displacement-y pada ujung pipa persegi panjang dengan jalur pemanasan circumferential .....	98

**Gambar 4.33** Profil penampang dari pipa persegi panjang pada axial scanning pada  $z = 50$  mm ..... 99

**Gambar 4.34** Profil penampang dari pipa pada circumferential scanning pada  $z = 50$  mm ..... 100

**Gambar 4.35** Distribusi temperatur pada: detik 1 untuk meshing: (a) normal; (b) halus; (c) sangat halus; dan detik 138 untuk meshing: (d) normal; (e) halus; dan (f) sangat halus ..... 103

**Gambar 4.36** Distribusi tegangan arah sumbu-z pada detik 1 pada meshing: (a) normal; (b) halus; (c) sangat halus; dan detik ke 138 untuk meshing: (d) normal; (e) halus; dan (d) sangat halus ..... 104





*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Perbandingan hasil proses <i>laser bending</i> 4 macam skema pemberian sinar laser (Zhang,2006).....	8
<b>Tabel 2.2</b> Pengaruh pendinginan terhadap sudut yang dihasilkan.....	30
<b>Tabel 3.1</b> Standar Komposisi Kimia AISI 304L (NAS-UNS S30430, EN 1.4307). ....	38
<b>Tabel 3.2</b> Properti Material dari AISI 304L.....	38
<b>Tabel 3.3</b> Parameter <i>Laser Bending</i> .....	40
<b>Tabel 4.1</b> Kondisi Perlakuan <i>Laser Bending</i> .....	47
<b>Tabel 4.2</b> Skema waktu <i>scanning</i> .....	48
<b>Tabel 4.3</b> Jumlah elemen yang digunakan.....	102





## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Sebagai salah satu komponen untuk mengalirkan bahan atau menahan beban, pipa merupakan bagian yang tak terpisahkan dalam berbagai macam industri seperti dirgantara, perkapalan, otomotif, energi, sipil dan medis. Bentuk pipa dengan berpenampang segi empat banyak digunakan dalam bidang akstektur khususnya untuk menambah nilai estetika bangunan pada bagian luar. Dari segi kekuatan, ketahanan terhadap korosi dan ketahanan terhadap buckling, baja tahan karat AISI 304 menjadikan salah satu pipa dengan luas penampang segi empat yang banyak digunakan bukan hanya untuk struktural namun juga aksitektural.

Sejauh ini, teknik bending pipa secara mekanis telah menjadi cara yang paling umum digunakan. Cara konvensional ini menggunakan gaya eksternal. Bending pipa secara mekanis memiliki keterbatasan dalam radius tertentu yang bisa ditekuk. Hal ini diakibatkan oleh penipisan pada bagian extrados. Extrados adalah lengkungan bagian luar pipa yang dibengkokkan sementara intrados adalah lengkungan bagian dalam pipa. Pada bagian intrados, tegangan kompresif dapat mendorong terjadinya buckling dan lipatan dari material pipa itu sendiri. Cacat dalam proses bending ini dapat dikurangi dengan menggunakan mandrel. Namun, penggunaan mandrel dan bending dengan tekanan dalam jangka panjang dapat berdampak negatif pada alat bending yang dipakai. Selain itu, bending pipa secara mekanis memerlukan alat yang lebih kompleks untuk bending dengan berbagai sumbu (Shafdar,2007).

Dalam beberapa kurun waktu terakhir pembentukan dengan laser mulai muncul penggunaannya dalam proses manufaktur. Pembentukan dengan laser ini memiliki keunggulan dimana material tersebut tidak mudah kembali ke posisi awal dan tidak memerlukan perangkat atau perkakas dan juga gaya



eksternal. Pembengkokkan terjadi akibat deformasi plastis yang diinduksi oleh tegangan termal. Tegangan termal ini dihasilkan oleh siklus termal non - linear secara cepat. Berdasarkan penelitian sebelumnya, proses laser bending ini memiliki kelebihan yaitu pengurangan tebal dinding pipa lebih sedikit dari proses bending konvensional dan distorsi pipa yang terbentuk lebih sedikit terjadi. Kemudian, proses laser bending pipa juga dapat diotomasikan melalui sistem kontrol numerik (Yang, 2012.)

Proses laser bending memiliki banyak sekali pengaruh untuk mencapai hasil yang optimal. Menurut Jung, ada beberapa faktor dalam proses yang mempengaruhi hasil laser bending seperti daya laser, kecepatan pergerakan sinar laser, diameter sinar laser, jalur penembakan laser, sifat material yang digunakan dan bentuk geometri benda kerja itu sendiri. Maka dari itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk menganalisa pengaruh parameter - parameter yang sudah disebutkan untuk mencapai hasil proses laser bending yang optimal. Eksperimen secara ril akan menggunakan biaya ekstra serta peralatan - peralatan yang kompleks. Di lain pihak, simulasi numerik dengan elemen hingga merupakan salah satu metode yang efektif dan juga efisien. Maka dari itu, akan dilakukan proses analisa numerik proses bending pipa berpenampang segi empat dengan laser. Pada masa sekarang ini kemajuan teknologi bahan semakin berkembang pesat. Kebutuhan akan karakteristik bahan yang spesifik untuk aplikasi - aplikasi tertentu menjadi pendorong percobaan mengenai proses produksi bahan. Pengecoran logam merupakan salah satu cara metode dari berbagai macam proses manufaktur seperti machining dan lain - lain. Kemampuannya yang mudah dibentuk sesuai kebutuhan, baik dalam segi kekuatan maupun keunggulan sifat-sifat yang lain, mendorong metode pengecoran logam sebagai cara populer yang dilakukan oleh industri khususnya industri manufaktur.



## 1.2. Perumusan Masalah

Berdasarkan penjabaran latar belakang diatas dapat ditarik beberapa masalah dalam penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana pengaruh geometri penampang pipa (persegi dan persegi panjang) terhadap proses bending pipa?
2. Bagaimana pengaruh *laser power* terhadap proses bending pipa?
3. Bagaimana pengaruh *scanning speed* terhadap proses bending pipa?
4. Bagaimana pengaruh *scanning path* terhadap proses bending pipa?

## 1.3. Batasan Penelitian

Untuk mendapatkan hasil perhitungan yang sesuai dengan referensi yang ada serta agar tidak menyimpang dari permasalahan yang akan ditinjau, maka terdapat beberapa batasan masalah yang perlu diperhitungkan yaitu:

1. Material isotropik dan homogen.
2. Tidak terjadi proses melting selama laser forming.
3. Perpindahan panas dari benda kerja ke clamp sangat kecil sehingga diabaikan.
4. Fenomena panas akibat perubahan fasa diabaikan
5. Panas yang timbul akibat strainenergy akibat deformasi plastis diabaikan karena sangat kecil dibandingkan dengan input panas dari sinar laser
6. Efek Bauschinger diabaikan

## 1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan yang diangkat dalam penelitian ini adalah:

1. Menganalisa pengaruh geometri penampang pipa (persegi dan persegi panjang) terhadap proses bending pipa.
2. Menganalisa pengaruh laser power terhadap proses bending pipa.
3. Menganalisa pengaruh scanning speed terhadap proses bending pipa.



---

4. Menganalisa pengaruh scanning path terhadap proses bending pipa.

### 1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah diperolehnya data mengenai luas penampang, arah pass laser, intensitas laser dan kecepatan pergerakan laser yang paling optimal untuk proses laser bending pipa segi empat. Dengan adanya data yang diperoleh, diharapkan bisa menjadi acuan untuk pengembangan penelitian dalam proses manufaktur yang inovatif di masa datang.

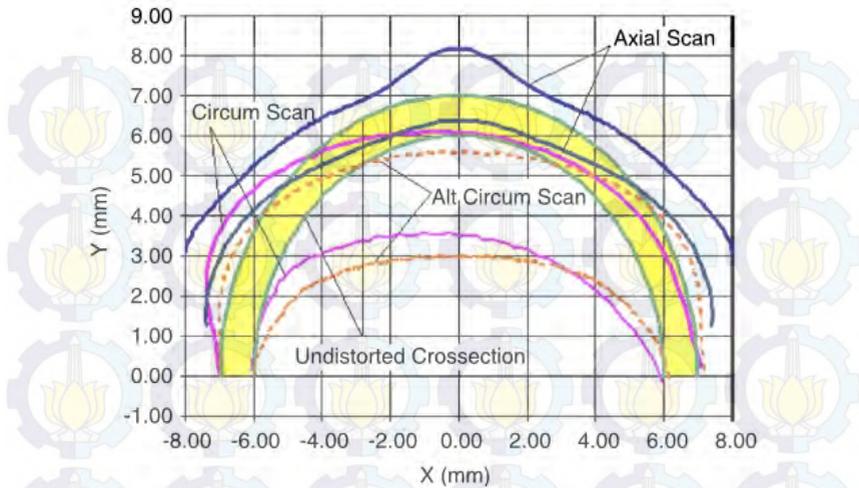


## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

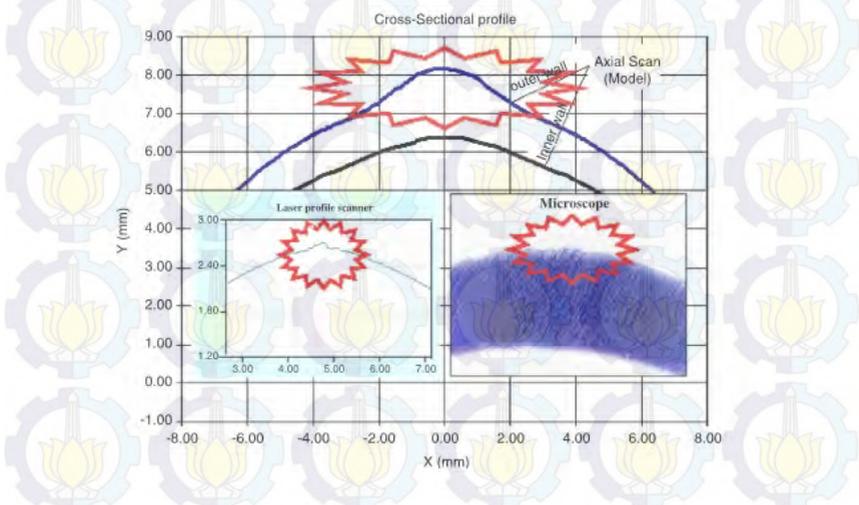
### 2.1 Penelitian sebelumnya mengenai *laser bending*

Dalam beberapa tahun terakhir terdapat sejumlah penelitian - penelitian tentang laser bending.

(Safdar, 2010) telah melakukan penelitian tentang pengaruh efek jalur pergerakan laser terhadap sudut tekuk, distorsi dan distribusi tegangan. Penelitian ini menggunakan simulasi metode elemen hingga dengan perangkat lunak ANSYS serta eksperimen. Dalam penelitian tersebut Safdar menggunakan laser dioda (LDL 160-1500) dengan daya 1,5kW dengan jangkauan operasi 800 - 980 nm. Laser tersebut dipakai untuk membengkokkan pipa 100mm dengan diameter 14 mm dan tebal 1 mm. Pipa tersebut berbahan dasar baja tahan karat AISI 304 L. Meja CNC digunakan untuk menggerakkan benda kerja selama penembakan laser dengan kecepatan 10mm/s. Safdar menggunakan tiga macam jalur sinar laser yaitu; alternate circumferential, axial dan sequential circumferential. Ukuran diameter geometri laser 2.56mm untuk ketiga jalur yang diuji. Setiap jalur dilakukan 4 kali penembakan laser dan interval waktu antar penembakan 10 detik. Rapatannya yang dipakai dalam pengujian 2,0 kW/cm<sup>2</sup>. Pada penembakan kedua, ketiga dan keempat, rapatannya dikurangi 0,2kW/cm<sup>2</sup>, sehingga rapatannya kedua, ketiga dan keempat secara berturut - turut adalah 1,8, 1,6 dan 1,4 kW/cm<sup>2</sup>. Untuk jalur circumferential, jalur mengitari pipa 180°, dimana kecepatan sudutnya adalah 1.428 rad/s. Berdasarkan hasil yang didapat, jalur penembakan sinar laser axial menghasilkan sudut tekuk dua kali lebih besar dari circumferential. Jalur axial juga memiliki distorsi paling kecil pada dinding bagian dalam pipa bila dibandingkan jalur circumferential.



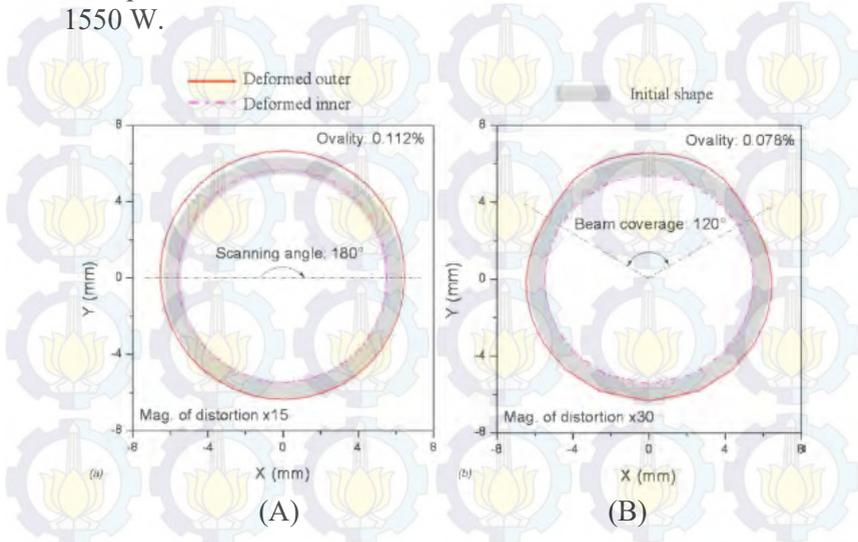
**Gambar 2.1** Profil penampang melintang dari diameter luar dan dalam pipa untuk hasil ketiga jalur diameter pipa (Shafdar, 2010)

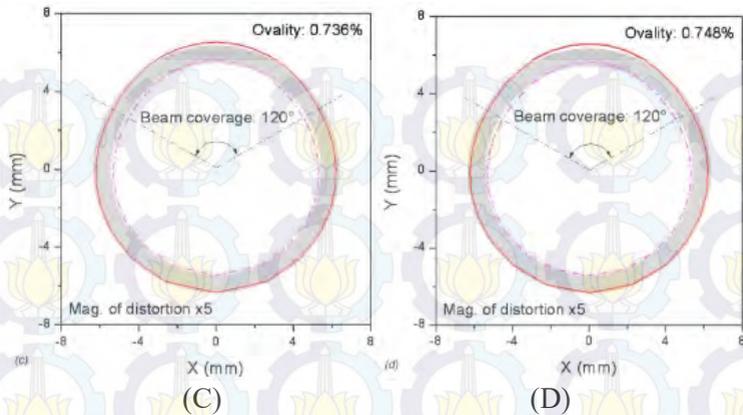


**Gambar 2.2** Hasil eksperimental laser bending jalur aksial (Shafdar, 2010)



Sedangkan (Zhang,2006) melakukan juga melakukan penelitian simulasi pengaruh skema pemberian sinar laser terhadap proses bending pipa. Material pipa yang dikaji pada penelitian ini adalah baja karbon rendah AISI 1010. Dimensi ukuran pipa adalah diameter luar 12,7mm dengan tebal 0.89 mm dan panjang 100mm untuk skema I dan 50mm untuk skema II dan III. Pada studi ini Zhang memberikan lapisan grafit pada permukaan pipa dengan maksud menambah efisiensi penyerapan energi panas pada pipa. Terdapat empat skema pemberian sinar laser yang diamati yaitu pertama dengan jalur circumferential, bentuk laser lingkaran dengan pemberian secara kontinu, kedua dengan secara ritmik, bentuk laser segi empat dengan arah aksial, ketiga dengan secara kontinu, bentuk laser segi empat dengan arah aksial dan keempat sama dengan skema ketiga namun dengan ditambahkan pendinginan dengan air. Secara berturut - turut daya yang diberikan untuk setiap skema dari pertama hingga keempat adalah 780 W, 200-800W, 200-600 W dan 425 serta 1550 W.





**Gambar 2.3** Tampak penampang melintang distorsi dari empat skema yang berbeda (a) daya 780W, kecepatan 1,57 rad/s, diameter sinar laser 11 mm; (b) daya 425 W, interval 1 detik, lebar sinar laser 4 mm; (c) daya 1550W, kecepatan 20 mm/s, lebar sinar laser 4 mm; (d) sama seperti c namun dengan pendinginan air. (Zhang, 2006)

**Tabel 2.1** Perbandingan hasil proses *laser bending* 4 macam skema pemberian sinar laser (Zhang, 2006)

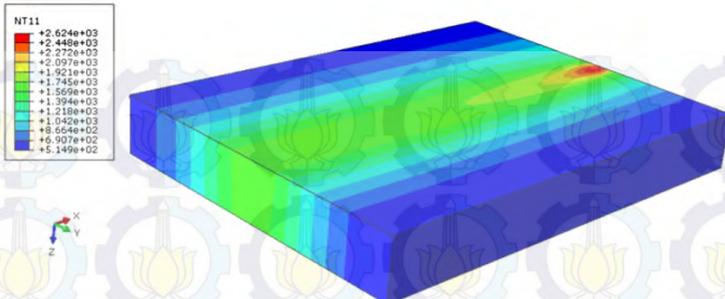
Skema	Sudut Tekuk (derajat)	Radius Bending (m)	Input Energi (J)	Energi Spesifik (J/der)	Jumlah Scanning laser	Waktu (s)	
						Scanning	Tunggu antar Scanning
I	1,73	3,3	12480	7213,8	8	16	2100
II	2,22	2,58	8500	3828,8	20(pulsa)	20	2261
II	4,16	1,2	6781	1630	1	4,375	0
IV	5,83	0,86	6781	1163	1	4,375	0



Dari hasil penelitian tersebut (Zhang,2006) , didapat bahwa pemberian laser secara ritmik atau tidak kontinu dapat membuat pipa terdeformasi bergantung pada bentuk sinar yang tepat. Skema dengan jalur aksial dengan kecepatan yang tepat dapat memberikan deformasi yang lebih besar. Aplikasi pendinginan dengan air dapat membantu meningkatkan sudut tekuk lebih banyak. Kemudian, ovalitas dari skema jalur aksial lebih besar dari pada skema jalur *circumferential*. Ketebalan dinding pipa yang terdeformasi jauh lebih banyak variasinya ditemukan pada skema jalur aksial. Pada perbandingan konsumsi energi dan waktu proses, skema jalur aksial lebih baik ketimbang jalur *circumferential*.

Berdasarkan studi yang telah dilakukan (Maji,2013) terdapat plat baja tahan karat AISI 304 yang dilakukan proses *pulsed laser bending*. Parameter yang dianalisa pada penelitian tersebut adalah daya laser, kecepatan pergerakan, diameter sinar laser dan durasi pulsa ketika pada saat pemanasan plat baja tahan karat tersebut. Proses permodelan yang dilakukan turut divalidasi dengan eksperimen. Ditemukan bahwa seluruh parameter yang dianalisa berpengaruh secara signifikan terhadap sudut tekuk yang dihasilkan. Sudut tekuk maksimum dapat terbentuk apabila diberikan frekuensi pulsa laser tertentu. Dengan melebarnya pulsa, sudut tekuk yang terbentuk meningkat dalam daya laser yang tetap. Dengan jumlah energi yang sama, laser dengan pulsa dapat menghasilkan sudut tekuk lebih banyak bila dibandingkan dengan laser secara kontinu. Namun, dengan adanya metode *pulsed laser* ini dapat menimbulkan adanya *overlapping*.

Pada penelitian *laser bending* pada lembaran plat logam (Yilbas,2014) daerah kontur temperatur dan tegangan diprediksi dengan metode elemen hingga dan juga dibandingkan dengan eksperimental. Prediksi dari temperatur permukaan, sudut tekuk dan tegangan sisa terbentuk pada permukaan yang terkena laser. Perubahan morfologis dan metalurgi akibat perlakuan dari sinar laser diamati dengan menggunakan *scanning electro microscope*, *energy dispersed spectroscopy*, XRD dan mikroskop optik.



**Gambar 2.4** Kontur temperatur plat logam pada saat  $t=0,4$  detik pemanasan (Yilbas,2014)

Ditemukan bahwa temperatur tetap tinggi pada daerah yang teradiasi oleh laser. Hal ini menghasilkan gradien temperatur antara *scanning path* dengan logam sekitarnya. Gradien temperatur ini mengasilkan tegangan tinggi pada daerah tersebut. Defleksi pada sumbu z tinggi akibat adanya tekukan pada benda kerja. Selisih defleksi antara garis yang diberikan sinar laser dengan yang tidak diberikan perlakuan besar sehingga sudut bending yang tinggi. Tidak ditemukannya kecacatan yang besar pada daerah penyinaran laser. Disekitar permukaan yang diberikan laser ditemukan diskontinuitas berupa lubang - lubang kecil. Hal ini disebabkan oleh erosi termal akibat evaporasi pada permukaan dan oksidasi eksotermis ketika proses berlangsung.

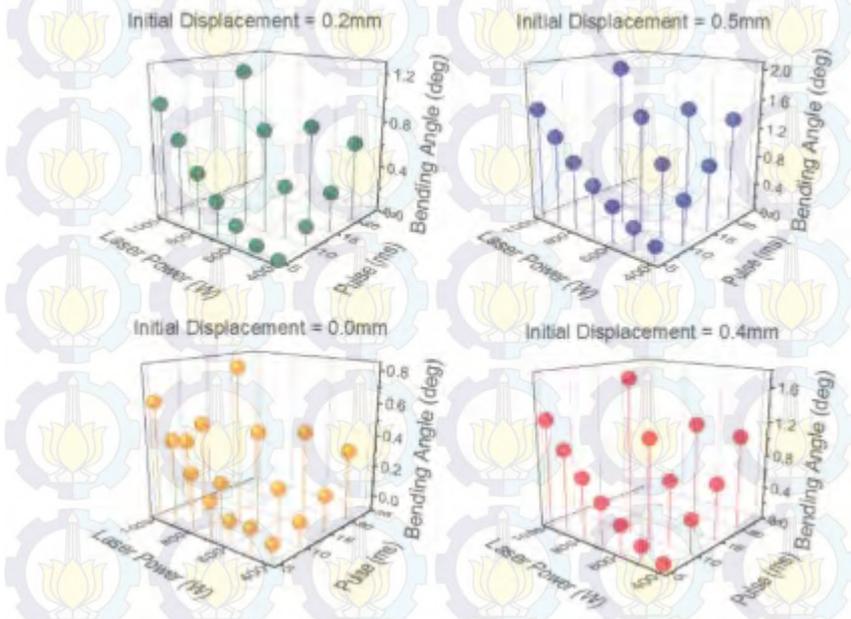
Sebuah deformasi pada plat logam baja tahan karat 304 diteliti setelah dilakukannya proses *pulsed laser forming* (Lee,2002.) Plat stainless steel 304 dipanaskan dengan sinar laser karbon dioksida pulsa tunggal melalui permodelan analitis. Eksperimen juga turut dilakukan untuk memvalidasi parameter - parameter yang dianalisa yaitu distribusi kontur temperatur, pola deformasi, kondisi tegangan - regangan dan tegangan sisa.

Dihasilkan adanya hubungan yang selaras antara eksperimen dan permodelan analitis. Studi analisa elemen hingga menembukan adanya gradien temperatur tinggi untuk sudut tekuk positif dan perbedaan temperatur yang sedikit pada sudut tekuk



yang kecil. Ketika puncak temperatur melebihi titik leleh logam, sudut tekuk menjadi negatif karena waktu radiasi yang terlalu lama dan menambah ketebalan benda kerja. Hal ini menandakan mekanisme dari laser dengan pulsa bergantung pada daya laser, waktu pemanasan, posisi penjepitan benda kerja, geometri bidang benda kerja, sifat termal dan kondisi tegangan pra-perlakuan.

Pada penelitian terbaru (Jamil, 2015) dilakukan eksperimen *laser bending* dari tabung mikro nikel ber dinding tipis yang sudah dilakukan pra-tegangan. Penelitian ini melakukan hal yang sedikit berbeda dengan studi - studi sebelumnya dimana terdapat pemberian tegangan tekan atau kompresif sebelum eksperimen. Penelitian ini menemukan bahwa tegangan awal yang diberikan sebelum diradiasi oleh sinar laser meningkatkan deformasi, hubungan antara pra-tegangan dengan deformasi bervariasi namun secara garis besar berhubungan linear.

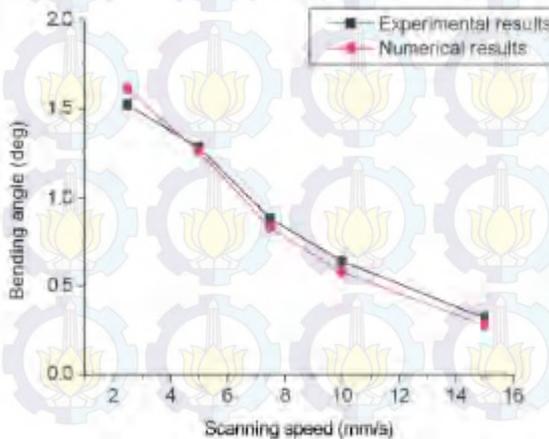


**Gambar 2.5** Hasil sudut tekuk yang dihasilkan untuk setiap initial displacement dari daya laser dan pulsa laser (Jamil,2015)



Hal diatas dapat terjadi karena tingginya konduktivitas termal dan struktur dinding pipa yang tipis, panas terdisipasi dengan cepat dari daerah yang terkena sinar menuju kesegala bagian material pipa. Sehingga, kombinasi antara durasi pulsa yang kecil dan daya laser yang tinggi cenderung menghasilkan gradien temperatur yang curam dan mendorong terjadinya regangan plastis. Desain dari eksperimen dan analisis regresi juga dilakukan untuk menganalisa pengaruh dari variabel independen pada respon penelitian Telah terbukti bahwa pergeseran awal dan jarak pulsa memberikan dampak positif pada proses ini.

Kemudian, sudah diteliti juga mekanisme gradien temperatur pembentukan dengan laser pada plat tipis (Shi, 2007.) Berdasarkan investigasi yang dilakukan, ditemukan bahwa dibawah kondisi proses mekanisme gradien temperatur, plat logam yang dibentuk tidak hanya menekuk pada sumbu x tetapi juga pada sumbu y. Model analitis mengestimasi sudut tekuk pada sumbu y berdasarkan teori perpindahan panas dan mekanika elastoplastisitas. Simulasi numerik dilakukan untuk menganalisa deformasi pada plat. Studi ini menemukan tekukan pada sumbu y pada plat lebih terdeformasi secara penuh, dimana sangat berguna untuk pembentukan dengan presisi tingkat tinggi.





**Gambar 2.6** Perbandingan hasil eksperimen dengan analisis numerik pada hubungan antara kecepatan pergerakan laser dengan sudut tekuk yang dihasilkan (Shi, 2007.)

Penelitian mengenai *laser bending* pipa baja karbon medium (07 m20) mendapatkan hubungan yang saling mempengaruhi antara parameter - parameter laser bending terhadap sudut tekuk yang dihasilkan (Hao,2003.) Sebuah model analitis dilakukan untuk memprediksi sudut tekuk yang dihasilkan. Sebuah laser akan menginduksi sudut tekuk yang lebih tinggi secara linear apabila daya laser juga ditingkatkan. Namun hubungan yang tidak linear terjadi pada sudut tekuk yang dihasilkan dari jumlah radiasi laser. Penelitian ini juga menemukan adanya batas minimum daya laser untuk membengkokkan pipa, jika daya laser berada dibawah batas minimum maka tekukan tidak dapat terjadi pada pipa.

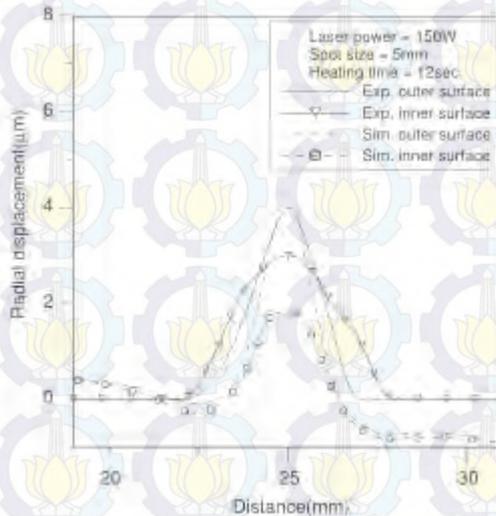


**Gambar 2.7** Hubungan linear antara pengaruh daya laser terhadap sudut tekuk, serta adanya daya laser minimum untuk membengkokkan pipa (Hao, 2003.)

Mekanisme *buckling* dalam pembentukan pipa dengan laser telah dipelajari dalam penelitian berikut (Hsieh, 2005). Mekanisme *buckling* pada proses *bending* pipa logam tipis dengan sinar laser dianalisa dengan eksperimen dan metode numerik. Pipa logam terbuat dari material baja tahan karat dipanaskan dengan sinar laser Gaussian karbon dioksida. Hal tersebut menghasilkan fenomena *buckling* pada permukaan pipa

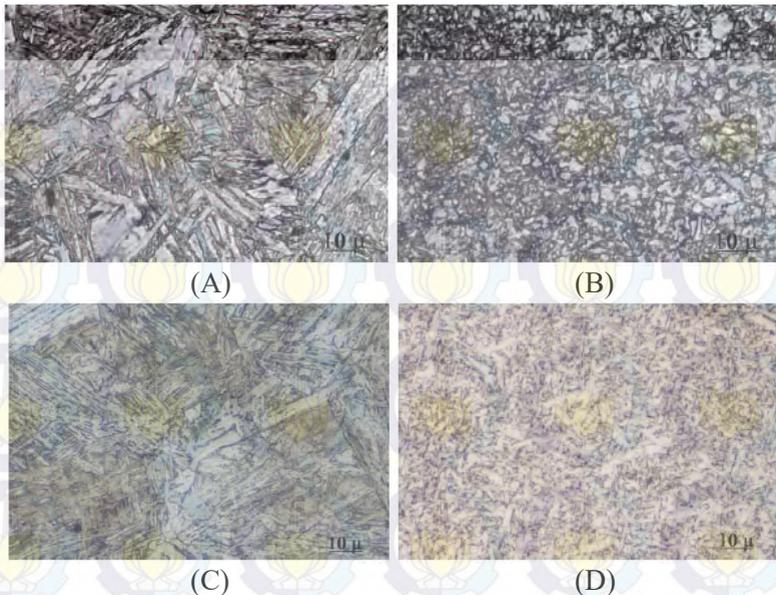


akibat deformasi elastis - plastis. Masalah termal dan mekanis ini diamati dengan metode elemen hingga tiga dimensi dan telah diverifikasi defleksinya dengan pengukuran. Berdasarkan simulasi numerik dan eksperimen terlihat bahwa sudut tekuk berhasil secara signifikan setelah berinteraksi dengan laser pada pipa tipis. Ketebalan permukaan pipa naik seiring dengan meningkatnya daya laser. Terlihat bahwa mekanisme *buckling* pada pipa logam tipis dibawah laser forming muncul akibat gradien temperatur yang seragam dan deformasi plastis.



**Gambar 2.8** Hasil perpindahan radial pada analisa numerik dan eksperimental di permukaan pipa baja tahan karat (Hsieh,2005.)

Prinsip kerja las dengan laser sama dengan pengelasan konvensional. Berdasarkan penelitian yang dilakukan, telah dibandingkan antara pengelasan dengan laser dengan pengelasan Metal Active Gas (MAG) pada logam DOCOL 1200 martensitik dan baja TRIP multiphase (Nemecek,2012).



**Gambar 2.9** Struktur mikro laser welding pada (A) daerah las - lasan, (B) HAZ dan struktur mikro las Metal Active GAS pada (C) daerah las - lasan dan (D) HAZ (Nemecek,2012.)

Laser welding diketahui memberikan panas yang lebih sedikit bila dibandingkan dengan pengelasan konvensional. Sehingga struktur mikro pada daerah yang terimbas panas atau heat affected zone yang lebih halus dan lebih tipis. Pada kedua logam DOCOL 1200 martensitic dan baja TRIP multiphase, kekuatan las - lasan dengan laser lebih tinggi dari las busur. Ditemukan juga penurunan kekerasan dan tempering terjadi pada daerah HAZ (Heat Affected Zone). Namun, karena panas yang diberikan lebih sedikit pada laser welding, maka lebar HAZ pada arc welding lebih mudah terlihat bila dibandingkan dengan laser welding.

Kemudian, pada laser welding kekuatan dari logam induk DOCOL 1200 dapat dipertahankan dan lebih sedikit terjadi elongasi. Pada pengelasan konvensional lebar HAZ sebesar 2 mm



dimana 10 kali lebih besar dari pengelasan dengan laser dan struktur mikronya lebih kasar. Kekerasan pada pengelasan dengan laser lebih tinggi karena memberikan gradien temperatur yang lebih besar dan dissipasi panas yang lebih tinggi.

Perbedaan mencolok antara laser welding dengan pengelasan konvensional terlihat hasil uji tarik pada baja TRIP. Laser welding memiliki pengaruh yang kecil terhadap daerah disekitar las - lasan. Retakan pada spesimen laser welding terjadi di luar HAZ dan daerah las lasan. Deformasi plastis terdistribusi sepanjang spesimen uji tarik. Kekuatan pada daerah las - lasan laser welding sedikit lebih tinggi dari pada logam induk.

## 2.2 Metode Analitis Mekanisme Laser Forming

### 2.2.1 Mekanisme Gradien Temperatur

Mekanisme Gradien Temperatur, salah satu mekanisme yang paling umum dibahas, menjelaskan tentang deformasi termal. Sifat - sifat dari mekanisme ini adalah :

1. Arah gradien temperatur tinggi pada suatu objek yang memiliki ketebalan dipengaruhi oleh *feed rate* atau kecepatan pergerakan laser dan ukuran diameter laser.
2. Bending bergerak ke sisi berlawanan dari sinar laser selama pemanasan
3. Arah bending bergerak mengikuti arah sinar laser ketika proses pendinginan.

Model analitis untuk Mekanisme Gradien Temperatur diusulkan oleh Vollertsen dan akan dijelaskan di bagian ini. Untuk modelnya , ia menggunakan pendekatan energi murni , dibuat untuk flame bending, yang didasarkan pada asumsi bahwa energi panas ditransfer kelembaran logam diubah menjadi energi untuk membengkokkan logam. Energi tersebut sama dengan proses bending dengan cara mekanis. Namun, derajat bending dari pendekatan energi menghasilkan sudut yang jauh lebih tinggi dari derajat bending yang terukur.



Model energi murni diperbaharui dengan memperkenalkan perhitungan geometri untuk derajat bending seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10 . Dalam gambar, diasumsikan bahwa ekspansi termal sepenuhnya dibatasi, sehingga sepenuhnya dikonversi menjadi kompresi plastis. Peningkatan temperatur lapisan yang dipanaskan dihitung sebagai berikut

$$\Delta T = \frac{2Ap_l}{v_l c_p l_h t_l} \quad (2.1)$$

dimana:

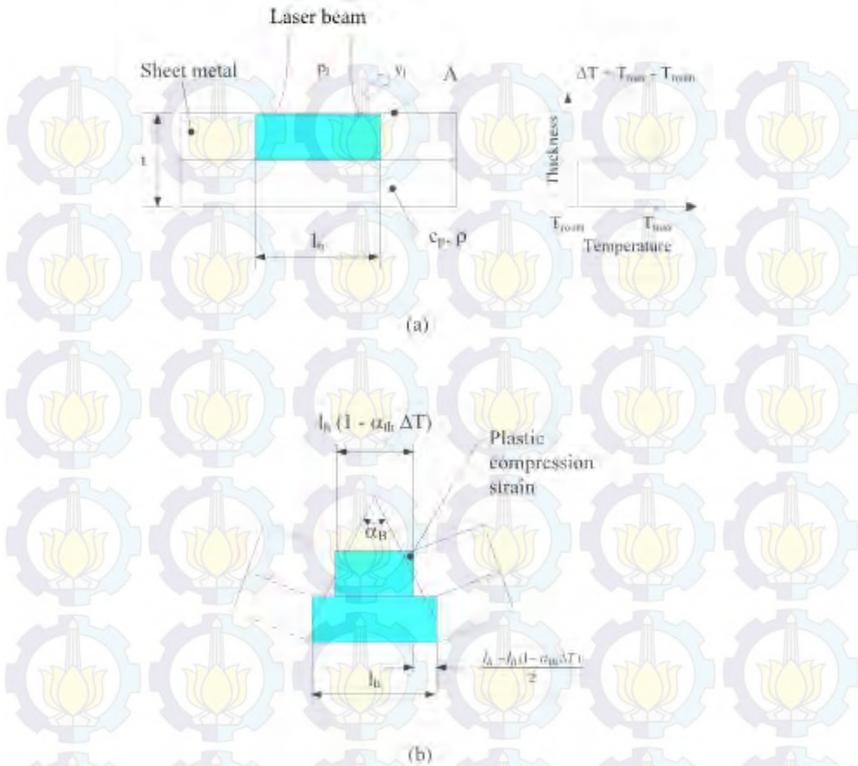
A = koefisien penyerapan daya laser

$p_l$  = daya laser

$v_l$  = *feed rate*

$c_p$  = kapasitas panas

$l_h$  = panjang pemanasan



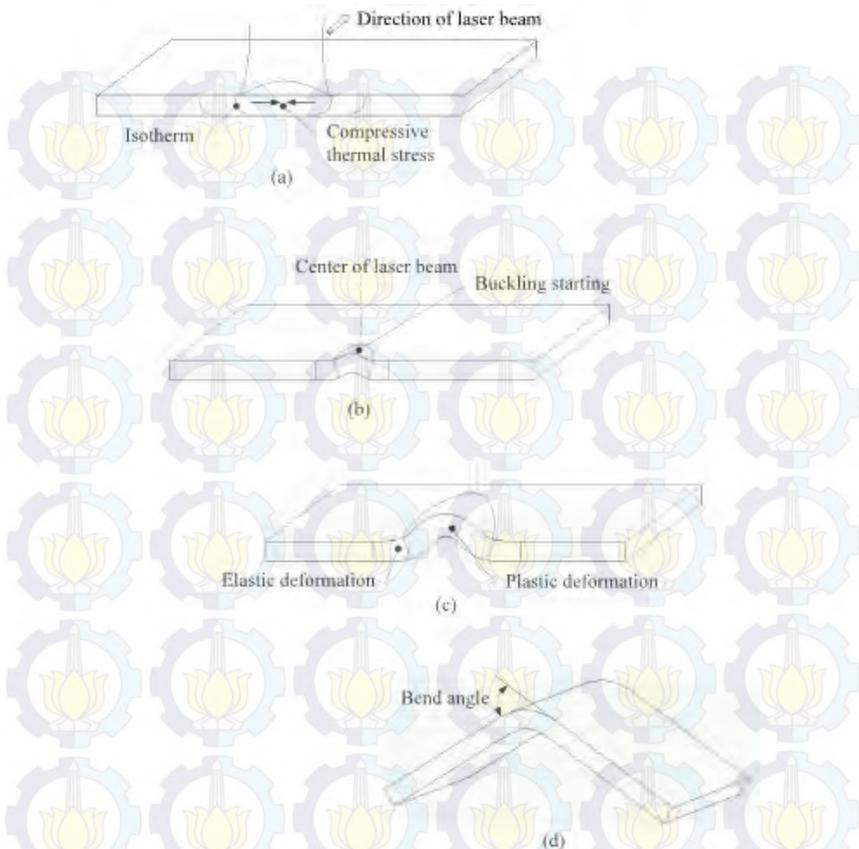
**Gambar 2.10** Sebuah model geometri sederhana untuk analisis menggunakan pendekatan energi: (a) saat pemanasan; dan (b) saat pendinginan.

### 2.2.2 Mekanisme Buckling

Dibandingkan dengan mekanisme gradien temperatur, mekanisme buckling dapat dihasilkan dengan mengurangi feed rate dan meningkatkan diameter sinar laser untuk menghindari gradien temperatur yang curam dalam gradien temperatur. Berbeda dengan mekanisme gradien temperatur dimana arah bending tidak berubah selama proses pemanasan dan pendinginan. sebuah bagian penting dari Mekanisme buckling



adalah arah perubahan geometri tidak ditentukan oleh proses itu sendiri. Hal ini tergantung pada kondisi batas atau boundary condition, terutama untuk pra-pembengkokan lembaran logam, tekanan internal dan eksternal atau gaya gravitasi. Namun, dapat dilakukan menekuk lembaran logam dengan cara yang ditentukan dengan menggunakan mekanisme buckling, dimana mekanisme tersebut memungkinkan digunakan pada proses pembentukan yang fleksibel. Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa mekanisme buckling bisa digunakan untuk proses bending lembaran tipis sepanjang garis lurus menuju atau menjauh dari sinar laser. Hal ini juga bisa diaplikasikan untuk proses bending pipa. Gambar 2.11 menunjukkan tahap-tahap dari sudut bending dari lembaran logam dengan mekanisme buckling. Gambar 2.11 (a) menggambarkan tegangan termal kompresif yang dihasilkan oleh sinar laser. Dapat dilihat tidak ada kecuraman gradien temperatur pada lembaran logam. Gambar 2.11 (b) menunjukkan awal terjadinya buckling di lembaran logam yang berasal dari ketidakstabilan karena tegangan termal. Seperti yang sudah dibahas, buckling bisa menuju atau menjauh dari sinar laser, tergantung pada kondisi pre-stressing benda kerja. Gambar 2.11 (c) menunjukan tahap kedua dari deformasi plastis dan deformasi elastis dalam lembaran logam. Bending plastis terjadi secara khusus di bagian atas lembaran logam karena laju tegangan rendah di wilayah ini akibat kenaikan temperatur dan deformasi elastis terlibat di wilayah sekitar daerah plastis karena pemanasan yang lebih rendah. Gaya yang disebabkan oleh deformasi elastis menetralkan oleh kendala dari bahan sekitarnya. Tekuk meningkatkan sepanjang garis scanning. Angka 2.11 (d) menunjukkan tahap akhir bending. Pembengkokan dihasilkan di seluruh lembar ketika sinar laser meninggalkan permukaan sheet karena tidak ada lagi gaya yang menahan regangan elastis, kemudian regangan elastis tidak menegang dan menjadi lurus. Bungkukan yang bersifat plastis pun tetap tidak berubah.



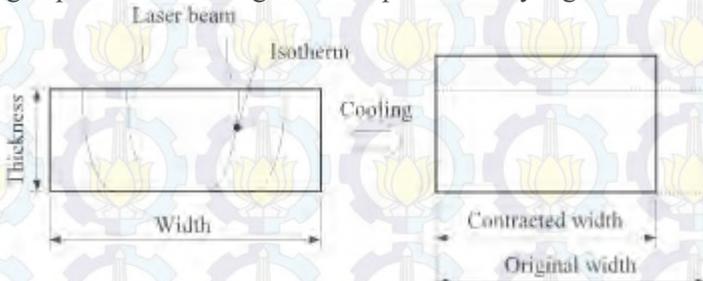
**Gambar 2.11** Tahap - tahap pembentukan dengan laser melalui mekanisme buckling: (a) Munculnya tegangan kompresif akibat sinar laser; (b) Terjadinya buckling oleh tegangan termal; (c) pertumbuhan deformasi elastis dan plastis, dan (d) pertumbuhan sudut tekuk. (Jung,2006)

### 2.2.3 Mekanisme Upsetting

Mekanisme upsetting adalah mekanisme penebalan atau pemendekan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.4. Dibandingkan dengan parameter yang digunakan dalam



mekanisme buckling, mekanisme upsetting merupakan mekanisme yang berdasarkan peningkatan ketebalan dan kekakuan untuk menghindari terjadinya buckling dan melibatkan diameter laser yang lebih kecil. Dalam proses mekanisme upsetting, lembaran logam hampir memuai secara konstan mengikuti arah penebalan selama pemanasan dan lebarnya menyusut ketika pendinginan. Sehingga, ketebalan dari plat meningkat. Proses pemanasan ini diulang sepanjang lebar plat dari material untuk merubah ketebalan plat. Mekanisme ini dapat digunakan untuk membentuk bidang lembaran menjadi bagian yang dapat dibentuk dengan teknik pemanasan yang baik.



**Gambar 2.12** Pembentukan dengan laser melalui mekanisme upsetting (Jung, 2006)

## 2.3 Proses pembentukan dengan Laser

### 2.3.1 Penjelasan Proses

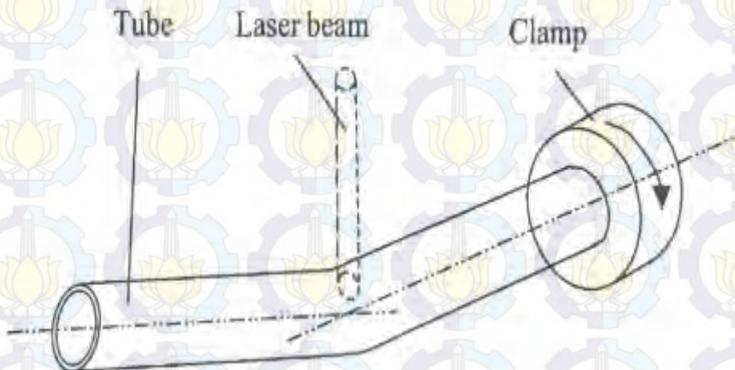
Melalui gambar 2.13 dapat digambarkan skema radiasi sinar laser yang menghasilkan sudut tekuk dari pipa logam. Salah satu sisi lembaran dijepit pada alat CNC (*Computer Numerical Control*). Pemanasan pada permukaan material dengan sinar laser dilakukan pada satu sisi dengan arah yang ditentukan sementara meja CNC bergerak. Mencairnya permukaan benda kerja dihindari dengan mengatur parameter laser yang seperti energi laser, feed rate dan diameter sinar. Lembaran logam memuai pada daerah yang dipanaskan dan tegangan termal muncul dengan dibatasi oleh logam dasar disekitarnya.



Tegangan termal menimbulkan adanya sudut tekukan atau sudut bending pada lembaran logam . Prinsip deformasi termal akan dijelaskan secara rinci dalam bagian berikut . Intensitas radiasi adalah  $10^3 \sim 10^4 \text{ W / cm}$  . Perangkat sumber sinar laser sudah termasuk excimer , karbon dioksida (  $\text{CO}_2$  ) dan neodmium : yttrium-aluminium garnet ( Nd : YAG ) . Pilihan laser tergantung pada aplikasinya. Laser excimer dapat digunakan untuk produksi komponen dengan panjang dan lebar dimensi di kisaran 10 mikro meter karena durasi sinyal yang sangat pendek .

Walaupun pembentukan dengan laser menggunakan energi yang aktif dari sinar laser dan bukan dari gaya eksternal, gaya gravitas dapat mempengaruhi daerah pinggir tekukan karena berat dari plat itu sendiri. Pengaruh gaya gravitasi dapat bisa diabaikan jika bagian yang dibentuk relatif besar.

Pada umumnya, pelapisan(contohnya, grafit atau fostat) digunakan untuk meningkatkan kemampuan material untuk menyerap energi laser. Tanpa adanya pelapisan, laju penyerapan energi dapat ditingkatkan dengan cahaya yang terpolarisasi atau dengan laser Nd:YAG.



**Gambar 2.13** skema laser bending pipa dengan penjepit di salah satu ujungnya(Hao, 2003)

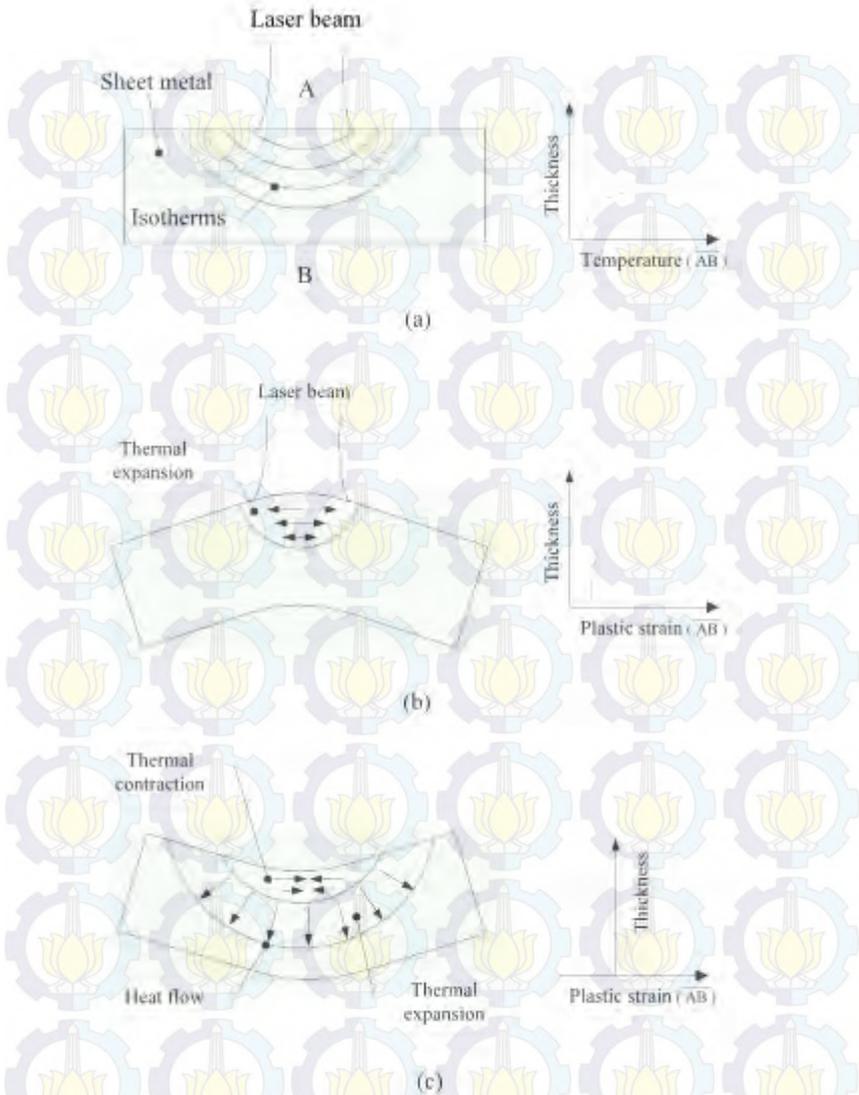


Terdapat satu atau dua sudut tekuk atau *bend angle* yang dihasilkan setiap radiasi. Sudut tekuk dapat mencapai 180° derajat dengan pengulangan radiasi. Arah jalur laser tergantung pada bentuk yang dihasilkan. Pada kasus sederhana, sebuah titik dapat menjadi jalur laser. Pada contoh lainnya, sebuah garis lurus dapat sepanjang benda kerja menjadi jalur laser.

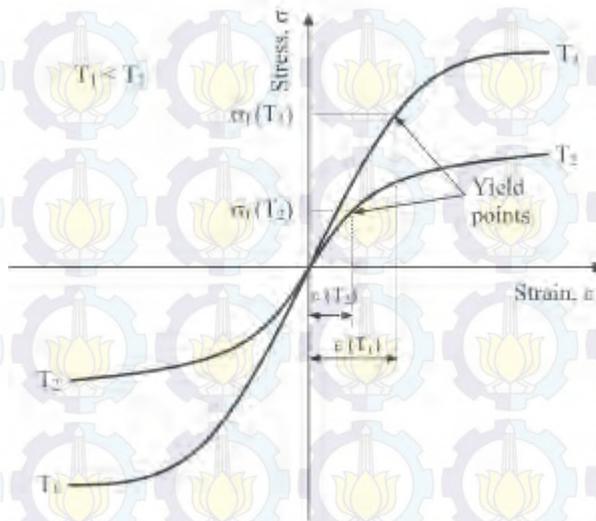
### 2.3.1 Prinsip Deformasi Termal

Dalam pembentukan logam konvensional seperti bending, drawing, stamping dan pressing, sebuah lembaran metal terdeformasi plastis ketika benda tersebut diberikan tegangan lebih besar dari titik luluhnya. Pada pembentukan dengan laser, deformasi plastis terjadi akibat tegangan termal yang diberikan pada permukaan benda kerja saat pemanasan dengan laser dan juga pendinginan.

Gambar 2.14 menunjukkan mekanisme gradien temperatur yang terjadi pada proses pembentukan dengan laser. Ketika sinar laser dengan intensitas daya yang tinggi meradiasi sepanjang permukaan benda kerja, permukaan material tersebut menyerap sebagian energi dari laser dan energi termal tersebut dihantarkan kedalam material dengan laju yang lebih rendah dari penyerapan energi pada permukaan, sehingga menghasilkan perbedaan temperatur pada setiap ketebalan material. Hal ini mengakibatkan ekspansi termal yang berbeda pada setiap ketebalan. Awalnya, material memua pada daerah yang dipanasi sehingga keseluruhan benda kerja menekuk menjauhi dari sinar laser. Ini disebut dengan '*counter-bending*'. Ekspansi termal ini dikonversi menjadi tegangan regangan elastis dan tegangan kompresid karena pemuaian bagian material yang dipanaskan dibatasi oleh material dasar sekitarnya. Ketika tegangan mencapai tegangan aliran gradien temperatur, ekspansi termal tambahan akan dikonversikan menjadi regangan plastis. Untuk mencapai efisiensi yang baik, ekspansi termal harus lebih banyak dikonversikan ke regangan plastis dari pada regangan elastis. Jumlah regangan elastis dapat dikurangi dengan menggunakan temperatur tinggi.

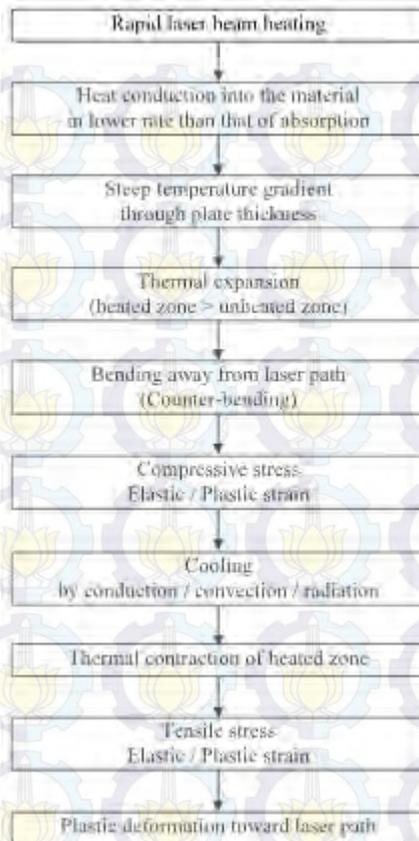


**Gambar 2.14** Mekanisme gradien temperatur yang terjadi pada proses pembentukan dengan laser; (a) gradien temperatur; (b) saat pemanasan; (c) ketika pendinginan. (Jung, 2006)



**Gambar 2.15** Hubungan tegangan-regangan dari material terhadap temperatur. (Jung, 2006)

Seperti yang digambarkan pada gambar 2.15, regangan elastis sebagai fungsi dari temperatur,  $\epsilon(T)$ , ditentukan dari modulus elastisitas  $E$  dan tegangan alir atau *flow stress*  $\sigma_f(T)$ , dimana  $\epsilon(T) = \sigma_f(T) / E$ . Ketikan pendinginan karena konduktifitas panas ke material, material menyusut pada lapisan atas benda kerja sehingga terdapat tegangan tarik yang lebih besar pada bagian atas. Oleh sebab itu, benda kerja bengkok secara plastis menuju jalur sinar laser yang mendingin untuk menormalisasikan tegangan tarik yang lebih tinggi seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.15. Sebuah diagram untuk proses pembentukan dengan laser ditunjukkan pada gambar 2.16 dibawah ini.



**Gambar 2.16** Diagram alir proses pembentukan dengan laser.(Jung,2006)

#### 2.4 Faktor yang mempengaruhi dalam Laser Bending

Berdasarkan penelitian - penelitian yang telah dilakukan terdapat pengaruh dari faktor - faktor terhadap perubahan geometri dari laser bending. Faktor ini cukup penting dalam proses laser bending dan dapat dikategorikan menjadi tiga bagian yaitu parameter energi, sifat material dan geometri benda kerja.



### 2.4.1 Parameter energi

Pembentukan dengan laser diasosiasikan dengan penyerapan energi kedalam benda kerja karena proses tersebut berdasarkan pemanasan permukaan logam dengan sinar laser. Perpindahan panas ke permukaan logam dari sinar laser ke permukaan logam normal dan diekspresikan oleh persamaan dari radius sinar:

$$q(r) = \frac{2 \eta P}{\pi R^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{R^2}\right) \quad (2.1)$$

dimana:

$q$  = heat flux

$\eta$  = adsorptivitas permukaan logam

$P$  = daya sinar laser

$R$  = radius sinar laser

$r$  = jarak dari titik tengah sinar laser

Terlihat bahwa faktor utama yang terlibat dalam absorpsi energi adalah sifat permukaan dari material, daya laser dan kecepatan pergerakan. Diameter sinar dan efek pendinginan dipertimbangkan relatif kurang berpengaruh dari faktor utama dari laser forming.

### 2.4.1 Penyerapan permukaan pada material

Terdapat interaksi yang rumit antara perilaku penyerapan dan parameter proses laser bending. Telah ditunjukkan bahwa intensitas laser memiliki pengaruh besar terhadap sifat absorpsi. Contohnya, penyerapan sinar laser terhadap CO<sub>2</sub> sangat rendah untuk material yang tidak dilapisi. Adsorptivitas, yang bergantung pada jenis material, meningkat ketika sinar laser memiliki panjang gelombang yang pendek (contohnya pada laser YAG).

Penyerapan juga sangat dipengaruhi oleh kondisi permukaan logam. Pelapisan permukaan dapat meningkatkan kemampuan penyerapan. Penggunaan lapisan grafit disarankan



untuk proses ini karena memiliki koefisien absorpsi dalam jangka 60 % - 80 % dan metode pelapisan yang mudah. Beberapa kerugian dari grafit adalah sulitnya untuk mengotomasikan prosedur pelapisan dan juga dengan adanya lapisan akan menambah ketebalan yang tidak seragam sehingga penyerapan panas tidak merata.

### 2.4.2 Daya Laser

Pada umumnya, terdapat hubungan linear antara daya laser dengan sudut bending, dan dalam mesin laser modern, daya laser dikontrol dengan jangkauan yang luas dan rinci (contohnya, 1% - 100 %, setiap 1 % dari nilai daya). Maka dari itu, salah satu cara untuk mengontrol sudut bending dengan mudah adalah dengan daya laser.

Seiring daya meningkat, sudut tekuk meningkat, menuju titik maksimum kemudian turun. Hal ini menandakan bahwa terdapat titik daya optimum laser yang dapat menekuk pipa dengan maksimum.

Sudut tekuk dari paduan aluminium relatif jauh lebih kecil dari daya laser yang diberikan. Hal ini dikarenakan meningkatnya disipasi energi dalam material dan terdapat penurunan efisiensi pada penyerapan energi pada tingkat tinggi.

### 2.4.3 Kecepatan Pergerakan

Kecepatan pergerakan atau *feed rate* merupakan cara paling mudah untuk mengatur penyerapan energi dalam proses pembentukan dengan laser. Sehingga banyak eksperimen yang melakukan variasi kecepatan pergerakan sinar laser. Telah diketahui bahwa adanya hubungan secara linear antara meningkatnya kecepatan pergerakan sinar laser dan penurunan sudut tekuk yang dihasilkan. Fenomena ini terjadi karena jumlah energi panas setiap satuan waktu yang ditransfer kedalam benda kerja semakin sedikit sehingga tekukan yang dihasilkan juga turut mengecil.



Walaupun jumlah energi pemanasan yang masuk tetap konstan, jika *feed rate* bertambah maka sudut tekukan yang dihasilkan akan lebih besar. Hal ini terjadi karena perbedaan kecepatan akan mengubah profil temperatur. Pada kecepatan rendah, profil temperatur akan lebih homogen karena terdapat banyak waktu bagi energi panas masuk kedalam tebal logam. Sehingga regangan plastis dari lapisan logam yang diradiasi dan tidak terkena radiasi lebih kecil. Untuk kecepatan pergerakan yang lebih besar, terdapat gradien temperatur yang curam pada benda kerja dan menghasilkan kompresi plastis yang lebih besar. Watkins mengatakan bahwa sudut tekuk meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan sinar laser sampai kecepatan tertentu. Sehingga, terdapat kecepatan optimum yang dapat menghasilkan gradien temperatur yang tepat untuk membuat sudut tekuk maksimum.

#### **2.4.4 Diameter Sinar Laser**

Efek dari diameter sinar laser terhadap hasil proses *laser bending* relatif kurang berpengaruh bila dibandingkan dengan daya laser atau kecepatan pergerakan. Walaupun begitu, diameter sinar tetap mempengaruhi hasil *laser bending* karena terlibat dengan kerapatan energi.

Efek dari pembesaran diameter dari sinar laser akan memperkecil sudut tekuk yang terbentuk. Meningkatnya diameter sinar akan mengurangi kerapatan energi yang dapat mereduksi sudut tekuk.

#### **2.4.5 Pengaruh pendinginan**

Dalam mekanisme gradien temperatur, perubahan sudut benda kerja dihasilkan oleh perbedaan temperatur antara lapisan logam atas yang teradiasi laser dan lapisan logam bagian bawah yang lebih rendah temperturnya. Scully sudah mengkaji pengaruh pendinginan untuk efisiensi proses dengan meningkatkan perbedaan temperatur. Ditunjukkan bahwa



pendinginan tidak berpengaruh terhadap sudut tekuk yang terbentuk seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.1

**Tabel 2.2** Pengaruh pendinginan terhadap sudut yang dihasilkan

Metode Pendinginan	Sudut Tekuk (°)
Air, konveksi natural, dengan penyangga baja	1.16
Air, konveksi natural, tanpa penyangga baja	1.08
Biang Es, seluruh bagian dalam Biang Es	1.11
Induksi udara paksa, ditahan salah satu ujungnya	1.13
Konveksi udara normal pada meja aluminium	1.28

(Jung, 2006)

#### 2.4.6 Sifat Material

Sifat material berperan penting dalam proses *laser forming* karena proses tersebut berdasarkan ekspansi termal akibat pemanasan dengan sinar laser. Sifat yang penting diperhatikan adalah konduktivitas termal, kapasitas panas, massa jenis dan koefisien muai.

Hubungan linear terjadi antara sudut tekuk dengan rasio antara koefisien muai terhadap kapasitas panas volumetrik (diekspresikan sebagai perkalian antara *specific heat* dengan massa jenis). Besaran dari ekspansi termal ditentukan dengan peningkatan temperatur dan koefisien muai untuk seluruh mekanisme *laser forming*.

Konduktivitas termal merupakan parameter penting yang mempengaruhi profil temperatur pada benda kerja saat diberikan pemanasan. Hal tersebut menentukan gradien temperatur sepanjang tebal dan permukaan benda kerja. Sehingga, parameter ini terlibat dalam mekanisme temperatur gradient. Konduktivitas termal berpengaruh lebih kecil pada mekanisme upsetting dan



bending bila dibandingkan temperatur gradien karena perbedaan temperatur lebih kecil pada mekanisme tersebut.

Pengaruh dari sifat mekanik dapat dijelaskan dengan material kekuatan rendah dan material dengan kekuatan tinggi. Pada material kekuatan rendah (contohnya seperti baja paduan rendah) memiliki perbandingan rendah antara tegangan alir atau *flow stress* terhadap modulus elastisitas. Perbandingan tegangan alir terhadap modulus elastisitas sama dengan regangan elastis pada kekuatan luluh. Material kekuatan rendah memiliki regangan elastis yang kecil pada titik luluh. Sehingga, regangan elastis yang irreversible atau tidak dapat kembali seperti semula kecil. Material dengan sifat ini memiliki efisiensi tinggi dalam pengkonversian energi ekspansi termal menjadi regangan plastis. Pada hal sebaliknya, material kekuatan tinggi (contohnya paduan titanium) menunjukkan rasio tinggi antara tegangan alir terhadap modulus elastisitas. Regangan elastis pada titik luluh pada material kekuatan tinggi dua kali atau lebih besar pada material kekuatan rendah. Sehingga, regangan elastis yang reversibel terdapat pada material kekuatan tinggi yang mengakibatkan sudut tekuk yang dihasilkan lebih kecil bila dibandingkan dengan material kekuatan rendah. Pada sebuah eksperimen, sudut tekuk yang dihasilkan oleh baja karbon rendah AISI 1018 lebih banyak bila dibandingkan dengan plat baja HY-80.

#### 2.4.7 Geometri benda kerja

Parameter geometri benda kerja yang berpengaruh pada proses *laser bending* adalah ketebalan, panjang dan lebar. Faktor geometri yang sangat penting adalah ketebalan. Dimana terdapat hubungan yang berbanding terbalik antara sudut tekuk yang dihasilkan dengan kuadrat ketebalan benda kerja, terutama pada mekanisme gradien temperatur. Meningkatkan *bend edge* akan meningkatkan sudut tekuk tiga kali lipat. Walaupun hal ini berefek lebih kecil dari pada pengaruh tebal benda kerja, hal ini perlu dipertimbangkan terutama pada komponen berdimensi kecil yang akan dilakukan proses *laser bending*. Ketika jalur lintasan



sinar laser diposisikan dengan pinggir benda keraj, maka akan terjadi penurunan sudut tekuk. Sudut tekuk maksimum yang dapat diperoleh yaitu pada bagian tengah benda kerja. Hal ini dapat terjadi karena dua hal, pertama, ketika jalur pemanasan dengan pinggir, pola aliran panas berubah pinggir benda kerja. Daerah dekat dengan pinggiran yang dipanaskan memiliki temperatur yang lebih tinggi dengan daerah yang jauh dari pinggiran benda kerja sehingga memiliki distribusi temperatur yang seragam, maka menghasilkan sudut tekuk yang lebih kecil. Kedua, ketika jalur pemanasan dekat dengan ujung benda kerja, kekakuan *bending* yang ditimbulkan tidak simetris sehingga semakin sedikit sudut yang dihasilkan.

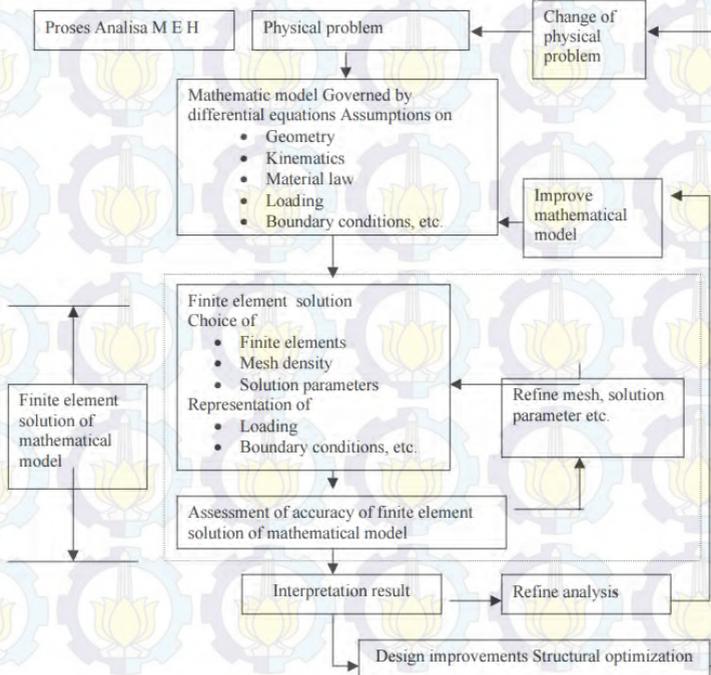
## **2.5 Metode Elemen Hingga**

### **2.5.1 Pengertian Umum**

Metode Elemen Hingga adalah metode numerik berbasis komputer untuk memecahkan masalah teknik di dalam geometri bidang atau volume yang ditetapkan pengguna atau user. Geometri tersebut dibagi menjadi elemen-elemen. Setiap elemen memiliki node yang digunakan untuk mewakili nilai variabel (contohnya, temperatur, tegangan dan perpindahan panas) yang membawahi elemen fungsi interpolasi (disebut juga fungsi aproksimasi). Persamaan matriks menjabarkan sifat-sifat setiap elemen. Hal tersebut ditentukan dengan menggunakan salah satu dari tiga pendekatan, yaitu; pendekatan langsung, pendekatan variasiional, atau pendekatan *weighted residual*. Setiap persamaan matriks digabungkan untuk menemukan persamaan sistem secara keseluruhan. Nilai nodal dari variabel lapangan dimasukkan pada persamaan sistem. Nilai nodal yang tidak diketahui dari masalah akan diperoleh dengan menyelesaikan persamaan sistem. Masalah teknik yang umum ditangani oleh Metode Elemen Hingga antara lain adalah: struktural, termal, aliran fluida, listrik, magnet, kebisingan akustik dan lain - lain. Di dalam proses pembentukan laser ini akan melibatkan



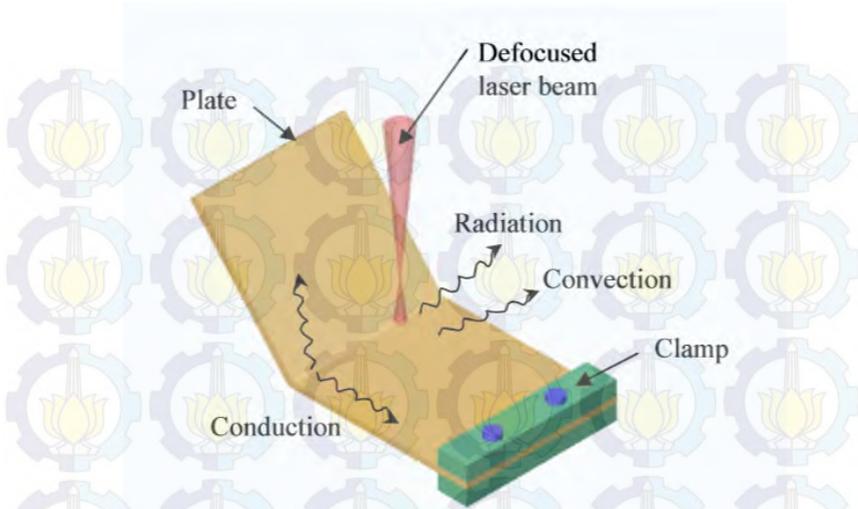
masalah struktural dan termal. Di bagian ini, konsep dari FEM dijelaskan secara singkat dalam hal masalah perpindahan panas.



**Gambar 2.17** Proses Pengerjaan pada Metode Elemen Hingga (Sonief, 2005.)

### 2.5.2 Perpindahan Panas dalam FEM

Perpindahan panas terjadi pada proses *bending* dengan laser akibat pemanasan pada permukaan logam dari sinar laser yang ditembakkan. Dapat dilihat pada gambar 2.18 di bawah macam-macam perpindahan panas dalam permasalahan konduksi, konveksi dan radiasi.



**Gambar 2.18** Perpindahan panas yang terjadi pada proses *laser forming* (Jung,2006)

Panas berpindah secara konduksi pada bagian dalam dari logam sedangkan pada daerah sekitar logam, perpindahan panas terjadi secara konveksi dan radiasi. Distribusi temperatur dapat dihitung dengan menggunakan metode elemen hingga.

Medium yang homogen dan distribusi temperatur  $T(x, y, z)$  dinyatakan dalam koordinat Cartesius. Distribusi temperature pada volume tertentu dinyatakan dalam persamaan hukum konversi energi termal sebagai berikut

$$\rho c_p \frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial}{\partial z} \right) + q \quad (3.1)$$

Dimana:

$\rho$  = densitas medium

$c_p$  = *specific heat* medium

$k$  = konduktivitas termal medium

$q$  = laju panas yang timbul per unit volume medium



$\rho c_F \frac{\bar{a}}{\bar{a}} =$  laju dari waktu perubahan dari energi termal per unit volume

$k \frac{\bar{a}}{\bar{a}}, k \frac{\bar{a}}{\bar{a}}, k \frac{\bar{a}}{\bar{a}} =$  laju perpindahan panas per unit area (*heat flux*) pada koordinat  $x, y, z$

Persamaan (3.1) merupakan bentuk umum dari persamaan difusi panas.

Untuk perpindahan secara konduksi, persamaan *heat flux* lebih umum dinyatakan dalam hukum Fourier:

$$\{q''\} = -k \left( \frac{\bar{a}}{\bar{a}} + \frac{\bar{a}}{\bar{a}} + \frac{\bar{a}}{\bar{a}} \right) = -k \nabla T \quad (3.2)$$

Tanda negatif menandakan panas selalu berpindah menuju temperatur yang lebih rendah.

Sehingga persamaan (3.1) dapat disederhanakan menjadi

$$\rho c_F \frac{\bar{a}}{\bar{a}} = -\nabla \cdot \{q''\} + \dot{q} \quad (3.3)$$

Untuk *heat flux* permukaan

$$-k \nabla T = q'' \quad \text{untuk } \textit{heat flux} \quad (3.4a)$$

$$\nabla T = 0 \text{ permukaan adiabatik} \quad (3.4b)$$

Untuk kondisi permukaan konveksi

$$-k \nabla T = h [T_\infty - T_{(x,y,z,t)}] \quad (3.4c)$$

Dimana:

$h =$  koefisien konveksi

$T_\infty =$  Temperatur sekitar

Untuk perpindahan panas secara radiasi:

$$-k \nabla T = \alpha q''_r - \sigma T_{(x,y,z,t)}^4 \quad (3.4d)$$

Dimana:

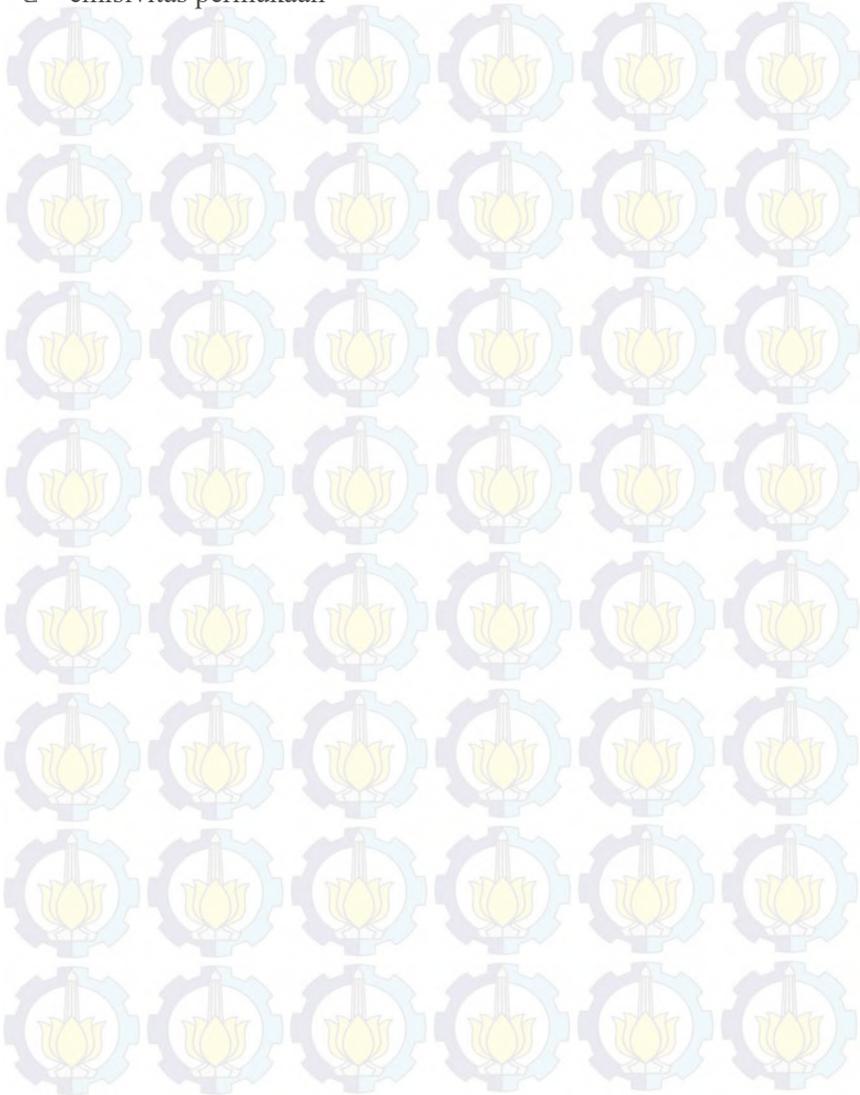
$\alpha =$  Absorptivitas permukaan

$q''_r =$  *incident radiant heat flux*



$\sigma$  = konstanta Stefan-Boltzmann

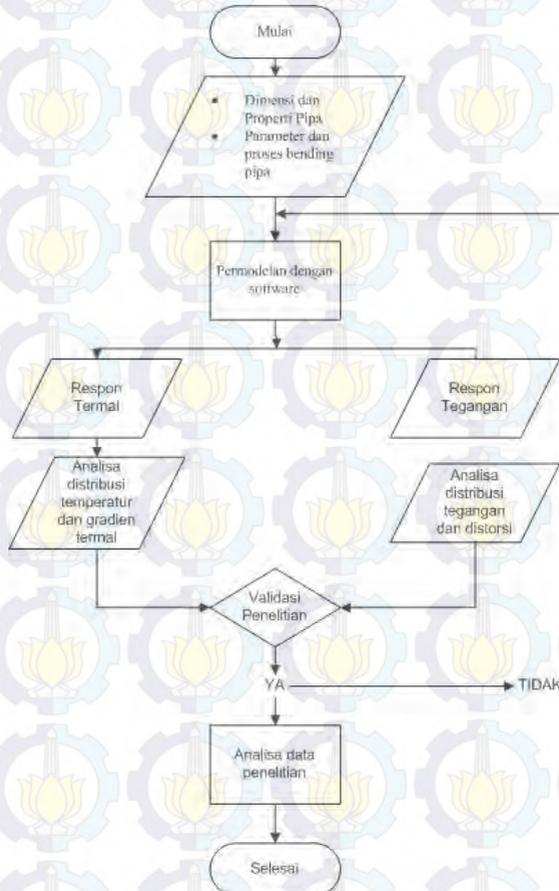
$\varepsilon$  = emisivitas permukaan





### BAB III METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian



## 3.2 Spesifikasi Material dan Parameter *Laser Bending*

### 3.2.1 Material pipa

Pada penelitian ini, material yang digunakan dalam proses *bending* adalah *stainlesssteel* AISI 304L. Data-data properti material yang didapat berasal dari jurnal (Safdar, 2006), North American Stainless dengan standar UNS S30430, EN 1.4307 dan ASM Handbook Vol 1. Untuk komposisi AISI 304L dapat dilihat pada tabel 3.1 sedangkan untuk properti materialnya disajikan pada tabel 3.2

**Tabel 3.1** Standar Komposisi Kimia AISI 304L (NAS-UNS S30430, EN 1.4307)

Unsur	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
<b>Min</b>						18.00	8.00
<b>Max</b>	0.03	2.0	0.045	0.030	1.00	20.00	12.00

**Tabel 3.2** Properti Material dari AISI 304L

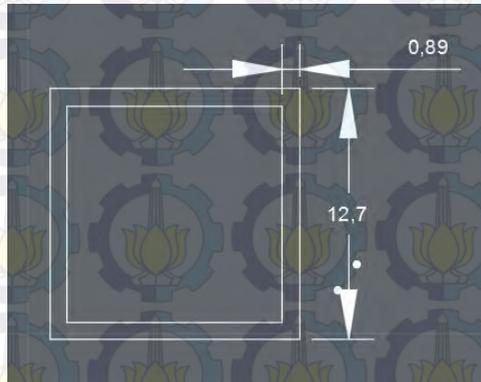
Temperatur (K)	200	300	400	600	800	1000	1200	1500
Konduktivitas								
Termal $\kappa$ (W/m.K)	12.6	14.9	16.6	19.8	22.6	25.4	28	31.7
Specific heat $C_p$	402	477	515	557	582	611	640	682
Densitas $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	7854.015							
Koefisien konveksi	20							
Koefisien muai termal $\alpha$ (1/K)	1.70E-05 (293)	1.70E-05 (473)	1.80E-05 (673)	1.90E-05 (873)	1.95E-05 (1073)	2.00E-05 (1273)	—	—
Poisson's ratio $\nu$	0.29	0.29	0.2925	0.296	0.308	0.33	0.36	0.39
Modulus elastisitas $E$ (GPa)	193 (293)	191 (373)	183 (473)	168 (673)	148 (873)	128 (1073)	110 (1273)	
Yield stress (MPa)	410 (293)	331 (478)	265 (813)	214 (923)	112 (1143)	66 (1253)	—	—
Modulus tangen (MPa)	29,370	27,791	23,435	21,761	18,413	16,739	—	—

### 3.2.2 Geometri pipa

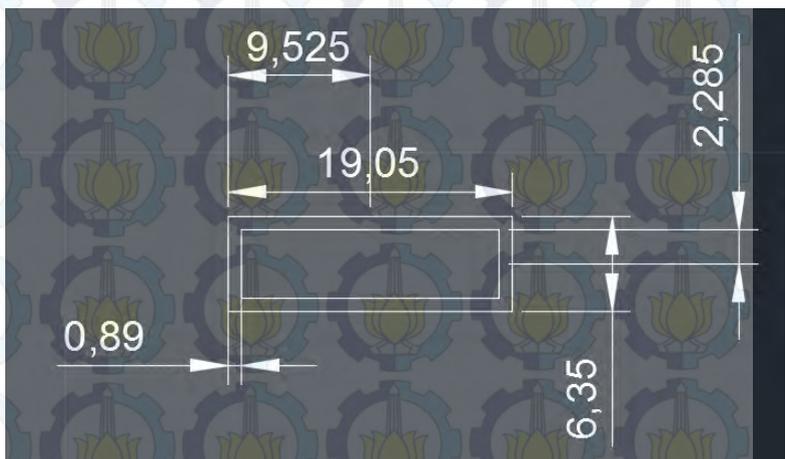
Geometri yang dipakai pada penelitian ini terdapat dua geometri, geometri yang pertama berpenampang persegi yang seperti pada gambar 3.2 sedangkan geometri yang kedua berpenampang persegi panjang dengan perbandingan panjang 1.5



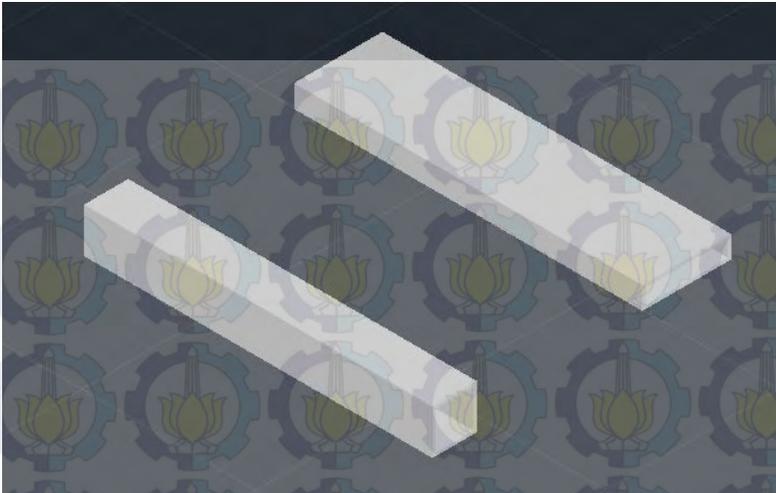
kali dari panjang sisi persegi dan lebar 0.5 kali panjang sisi persegi, kedua geometri memiliki panjang yang sama yaitu 100 mm dengan tebal pipa 0.89 mm. Gambar geometri dapat dilihat pada gambar - gambar dibawah ini:



**Gambar 3.2** Penampang melintang pipa persegi



**Gambar 3.3** Penampang melintang pipa persegi panjang



**Gambar 3.4** Model 3 dimensi pipa persegi dan persegi panjang

### 3.2.3 Parameter *Laser Bending*

Adapun parameter yang dipakai dalam penelitian kali ini dibagi ke dalam beberapa variabel seperti *laser power*, *scanningspeed*, *scanningpath* disajikan dalam tabel 3.3.

**Tabel 3.3** Parameter *Laser Bending*

Parameter	I	II
Geometri	Persegi	Persegi Panjang
<i>Laser power (W)</i>	1000	1500
<i>ScanningSpeed (mm/s)</i>	10	20
<i>ScanningPath</i>	Axial-Circum	Axial-Circum

### 3.3 Peralatan

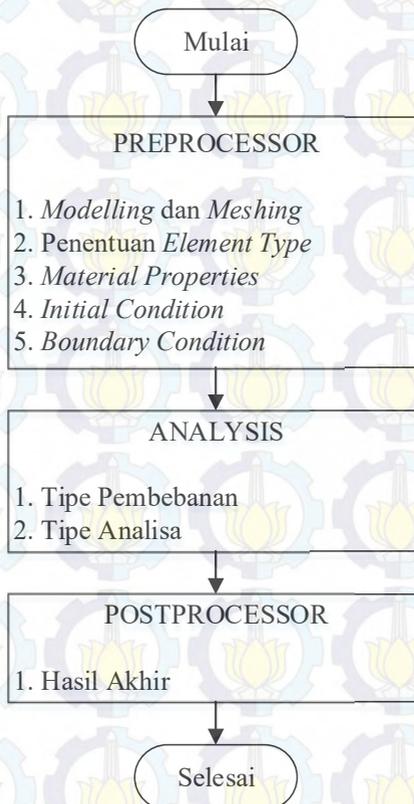
Peralatan yang digunakan dalam penelitian berupa perangkat lunak (*software*) berbasis elemen hingga yaitu ANSYS



dengan modul *Mechanical APDL Release 15.0* yang digunakan untuk membuat pemodelan geometri dan memodelkan simulasi *laser bending*.

### III.1. Proses Penelitian

Adapun diagram alir pemodelan *bending* pada pipa dengan menggunakan ANSYS Mechanical APDL Release 15.0 dapat dilihat pada gambar 3.5.



**Gambar 3.5** Diagram alir pemodelan menggunakan metode elemen hingga.

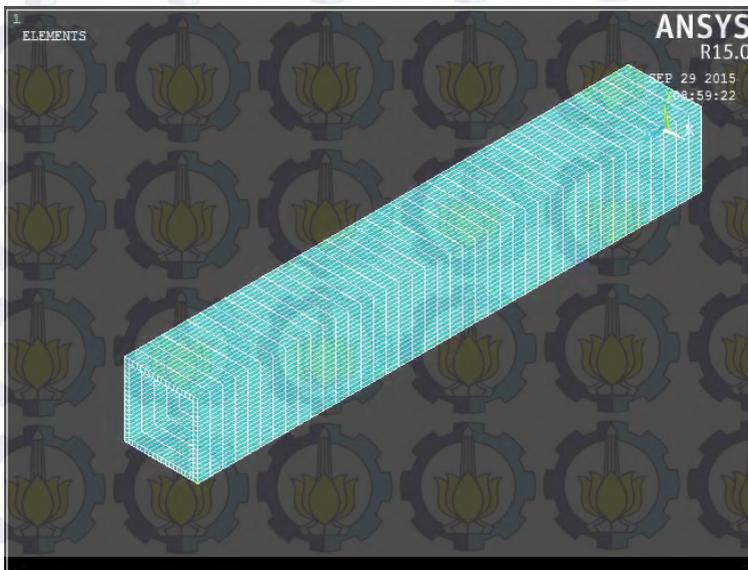


### 3.4.1 Pemodelan pipa

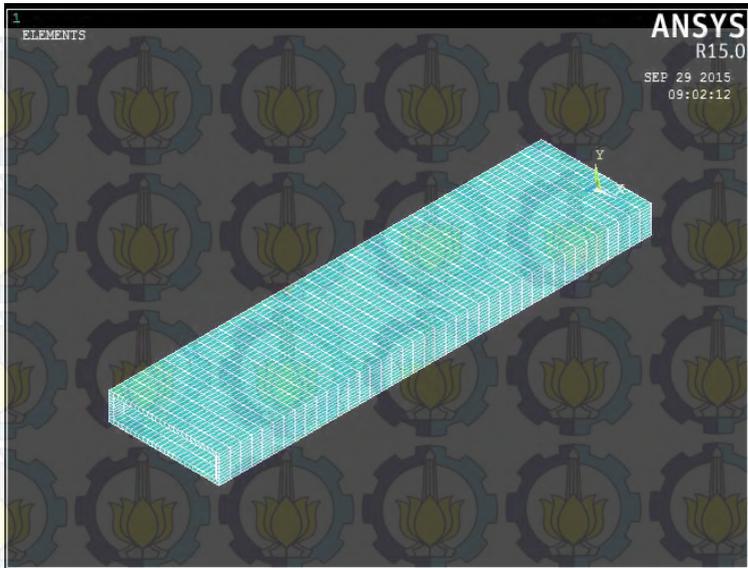
Terdapat dua jenis pipa yang digunakan pada penelitian ini yaitu yang pertama memiliki penampang berbentuk persegi dan kedua dengan penampang persegi panjang. Kedua pipa memiliki dimensi sesuai dengan gambar 3.2 dan gambar 3.3

Tipe elemen yang digunakan pada analisis termal adalah *brickelement* (SOLID70) karena elemen tersebut lebih akurat dan secara komputasi lebih efisien dibandingkan dengan yang tetrahedron. SOLID70 memiliki 8 *nodes* dengan satu derajat kebebasan (*degreeoffreedom*) temperatur pada masing-masing *node*.

Metode *meshing* yang digunakan pada pipa ini adalah dengan metode *sweep* dengan elemen hexahedron dengan pembagian garis penampang segi empat sebanyak 80 garis dan pembagian garis longitudinal sebanyak 80 garis. Hasil *meshing* pipa berpenampang lingkaran dapat dilihat pada gambar 3.6 sedangkan pipa berpenampang elips pada gambar 3.7.



**Gambar 3.6** Hasil *meshing* pada pipa berpenampang Persegi



**Gambar 3.7** Hasil *meshing* pada pipa berpenampang Persegi Panjang

### 3.4.2 Pemodelan *material properties*

Pada penelitian ini dilakukan dua jenis analisa yaitu termal yang lalu dibaca oleh struktural, oleh karena itu *input material properties* dibagi menjadi dua, yang pertama input material untuk lingkungan termal dan yang kedua untuk lingkungan struktural, *material properties* yang dimasukkan untuk lingkungan termal antara lain konduktivitas termal isotropik, *specifichheat*, densitas dan koefisien konveksi yang dapat dilihat pada gambar 3.8



**Gambar 3.8** Material properties yang di-input

### 3.4.3 Pemodelan *boundarycondition*

Perpindahan panas yang terjadi adalah konveksi dan radiasi dimana konveksi terjadi pada semua permukaan pipa kecuali pada daerah yang dikenai sinar laser, konveksi yang terjadi merupakan *freeconvection* artinya konveksi tanpa ada pengaruh dari luar, sedangkan pada kasus radiasi, emisivitas dianggap konstan dan emisivitas untuk AISI 304L pada temperatur kamar adalah 0.08. Proses adiabatik dianggap terjadi pada *path* pipa yang dikenai sinar laser.

Sedangkan untuk analisis mekanik, salah satu sisi penampang pipa akan dijepit ke segala arah. Sehingga dapat dilihat respon mekanik yang terjadi pada pipa tersebut. Tidak ada *displacement* sepanjang sumbu simetris.

### 3.4.4 Pemodelan tipe pembebanan

Pembebanan pada proses ini dibagi menjadi dua yaitu pembebanan termal dan pembebanan struktural. Pada proses termal, pipa akan diberi panas yang berasal dari laser yang di-inputkan pada ANSYS dalam bentuk *heatflux*, pada *scanning path axial*, *heatflux* yang diberikan sepanjang 20 mm di tengah pipa dari posisi  $z$  0.04 mm sampai 0.06 mm, sedangkan pada jalur pemanasan *circumferential*, *heatflux* diberikan melintang pada  $z$



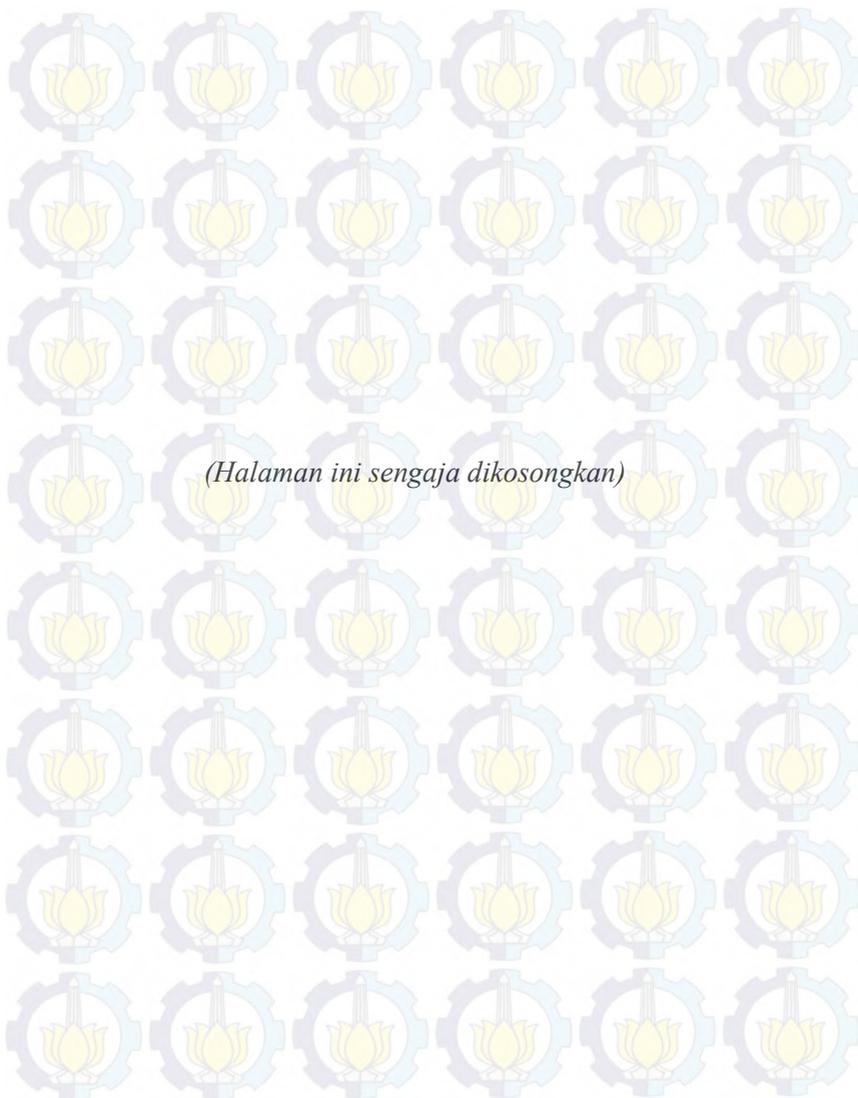
0.05 mm pada tengah sisi kiri pipa melingkari searah jarum jam sebanyak 180 derajat. Setelah proses scanning pemanasan maka dilakukan proses pendinginan secara freeconvection selama 10 detik, proses pemanasan dan pendinginan dilakukan berulang sebanyak empat kali. Dari hasil tersebut maka akan didapatkan hasil distribusi temperatur.

Setelah pembebanan termal selesai maka hasil dari analisa termal, maka akan diberi pembebanan struktur, pada proses laser bending, beban yang diberikan hanya berupa constraint pada ujung pipa ( $z = 0$ ), tidak ada beban berupa tensile ataupun compressive.

#### **3.4.5 Tipe analisa**

Pada proses analisa termal, analisa yang digunakan menggunakan analisa transient karena beban yang diberikan merupakan beban dinamis. Metode analisa yang digunakan menggunakan sparsedirect.

Sedangkan analisa yang digunakan pada analisa struktur adalah largedisplacementstatic karena beban yang diberikan tetap berupa constraint. Metode yang digunakan yaitu sparsedirect.





## BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Proses bending pipa dengan laser ini dilakukan dengan permodelan elemen hingga. Dalam permodelan terdapat empat macam parameter yaitu, bentuk penampang melintang, *scanning path*, daya laser dan *scanning speed*. Terdapat dua variasi untuk setiap parameternya sehingga jumlah perlakuan yang dilakukan pada penelitian ini adalah 16 macam perlakuan. Koefisien absorpsi yang digunakan adalah 0.65 dan diameter sinar laser yang dipakai adalah empat kali tebal dari pipa. Hasil yang didapatkan dari simulasi berupa distribusi temperatur, historis temperature pada tengah pipa ( $z=50$  mm), historis tegangan, distribusi tegangan, distorsi yang terjadi pada penampang pipa dan tekukan. Kondisi perlakuan proses bending pipa dapat dilihat dalam tabel 4.1 di bawah ini.

Tabel 4.1 Kondisi Perlakuan Laser Bending

Perlakuan	Bentuk Penampang	<i>Scanning path</i>	<i>Scanning Speed</i> (mm/s)	Daya Laser (W)
1	Persegi	<i>Axial</i>	10	1000
2	Persegi	<i>Axial</i>	10	1500
3	Persegi	<i>Axial</i>	20	1000
4	Persegi	<i>Axial</i>	20	1500
5	Persegi	<i>Circumferential</i>	10	1000
6	Persegi	<i>Circumferential</i>	10	1500
7	Persegi	<i>Circumferential</i>	20	1000
8	Persegi	<i>Circumferential</i>	20	1500
9	Persegi Panjang	<i>Axial</i>	10	1000
10	Persegi	<i>Axial</i>	10	1500



	Panjang			
11	Persegi Panjang	<i>Axial</i>	20	1000
12	Persegi Panjang	<i>Axial</i>	20	1500
13	Persegi Panjang	<i>Circumferential</i>	10	1000
14	Persegi Panjang	<i>Circumferential</i>	10	1500
15	Persegi Panjang	<i>Circumferential</i>	20	1000
16	Persegi Panjang	<i>Circumferential</i>	20	1500

Pipa dijepit pada salah satu sisi ( $z=0$  mm) kemudian dilakukan pemanasan oleh laser pada bagian tengah pipa ( $z= 50$  mm). Pada *scanning path axial*, panjang *scanning path* yang dipanaskan adalah 20 mm pada bagian atas pipa. Sementara pada *scanning path circumferential*, jalur pemanasan dimulai dari bagian titik tengah sisi pipa mengitari pipa 180 derajat pada sumbu  $z=50$  mm. Setelah proses *scanning* atau pemanasan, dilakukan pendinginan secara *free convection* atau konveksi bebas ke udara sekitar dengan temperatur ruangan (298 K) selama 10 detik. Proses pemanasan dan pendinginan ini diulang sebanyak 4 kali.

**Tabel 4.2** Skema Waktu *Scanning*

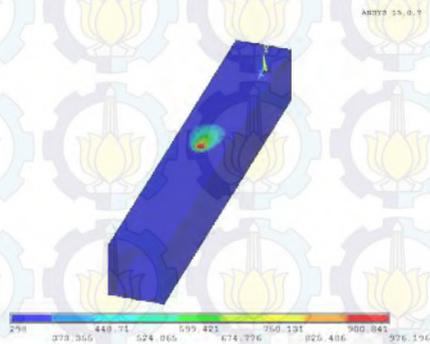
<i>ScanningSpeed</i> (mm/s)	10	20
Pemanasan 1 (s)	2	1
Pendinginan (s)	10	10
Pemanasan 2 (s)	2	1
Pendinginan (s)	10	10



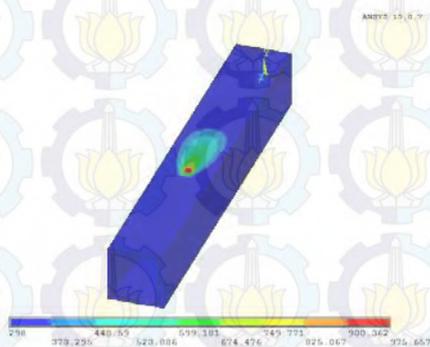
Pemanasan 3 (s)	2	1
Pendinginan (s)	10	10
Pemanasan 4 (s)	2	1
Pendinginan (s)	100	100
Total Waktu (s)	138	134

## 4.1 Pipa Persegi

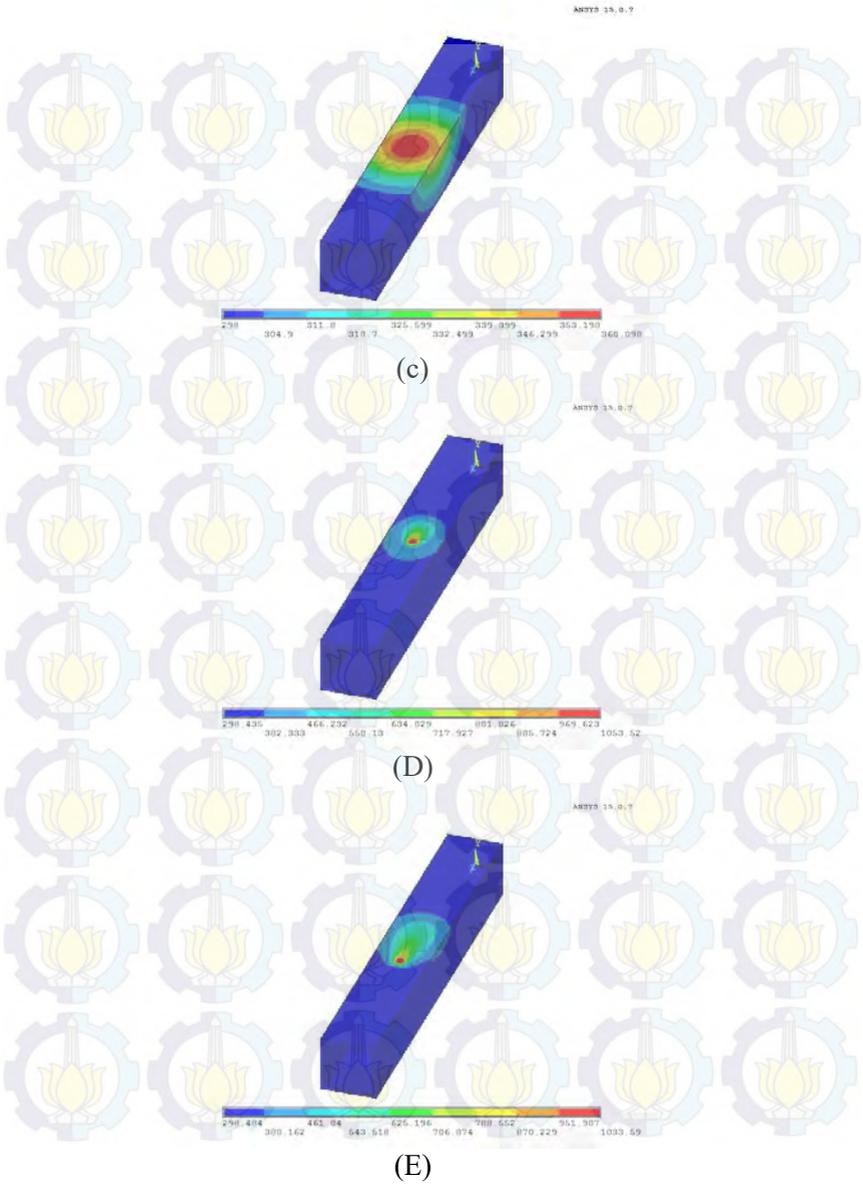
### 4.1.1 Respon Termal

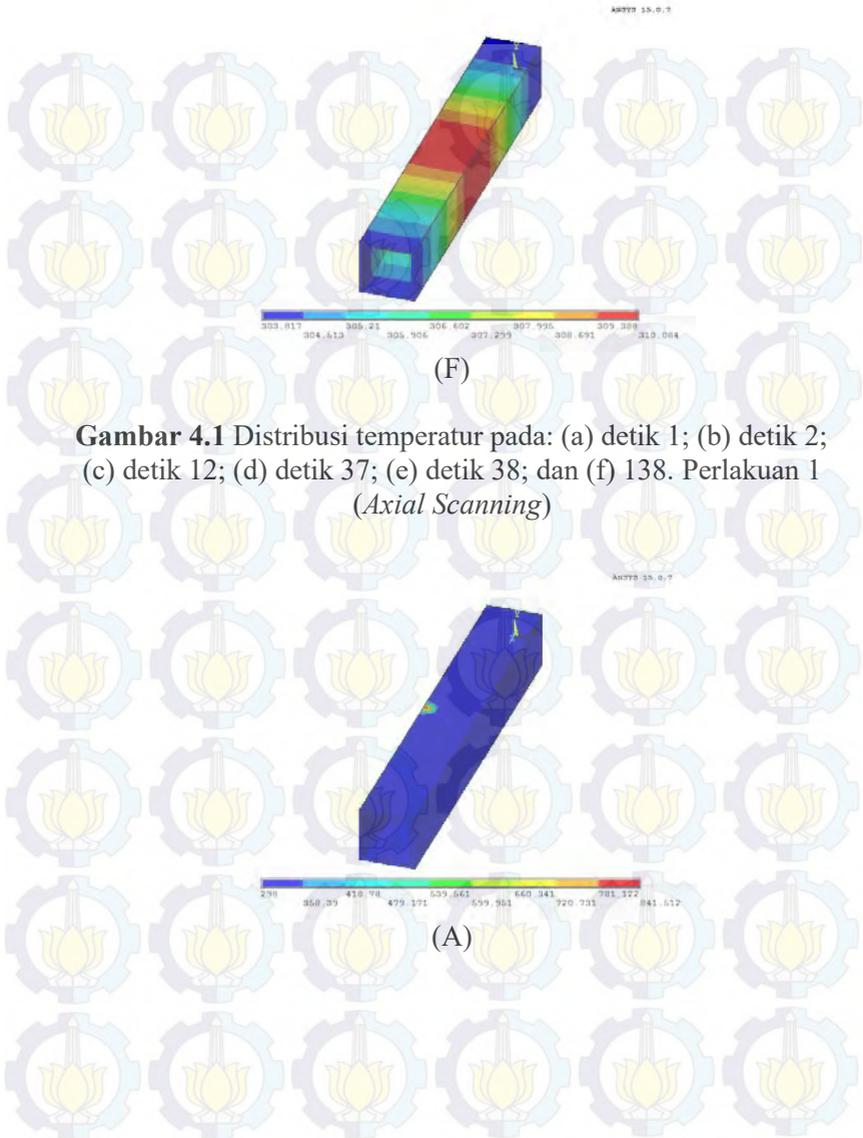


(A)

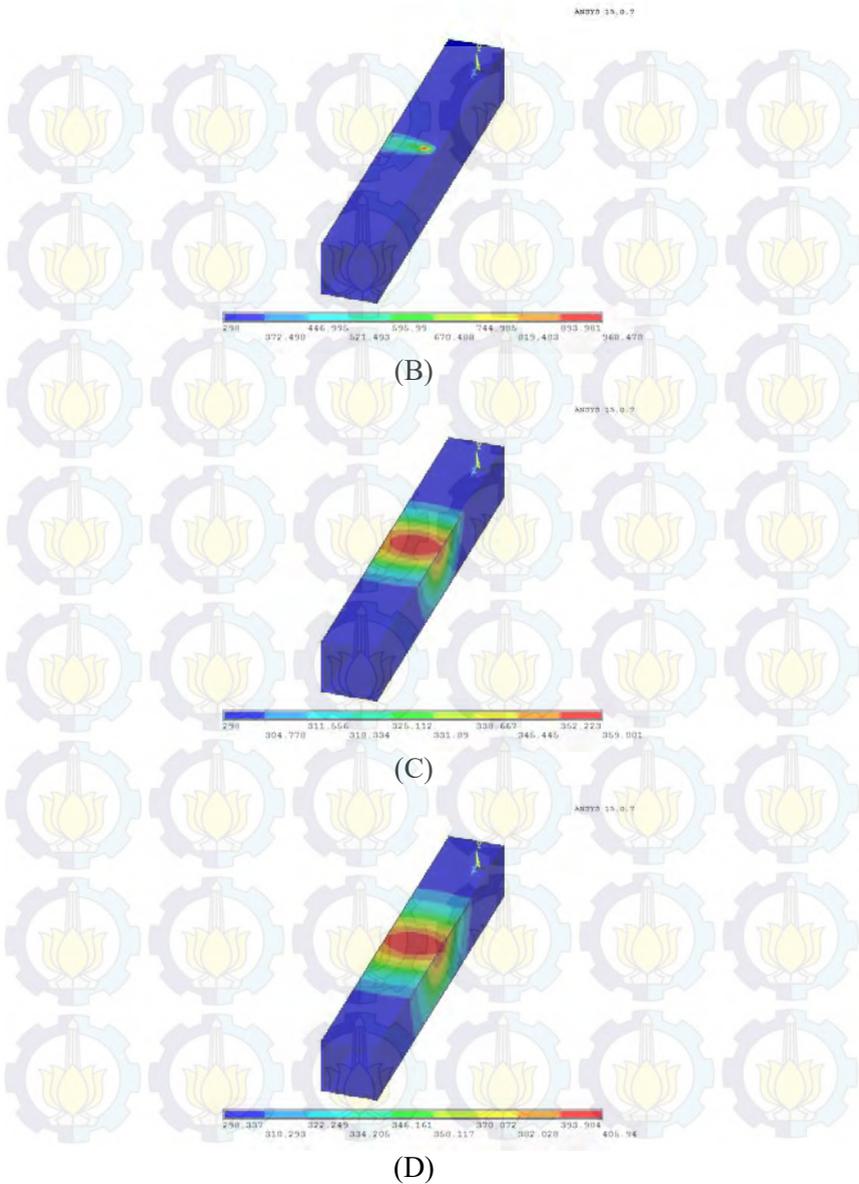


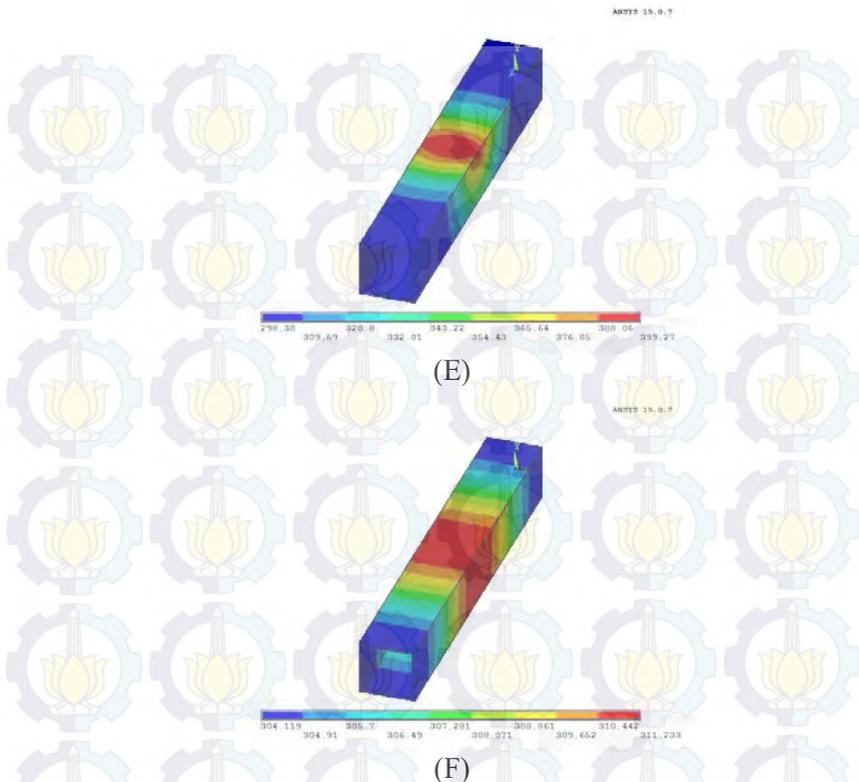
(B)





**Gambar 4.1** Distribusi temperatur pada: (a) detik 1; (b) detik 2; (c) detik 12; (d) detik 37; (e) detik 38; dan (f) 138. Perlakuan 1 (*Axial Scanning*)



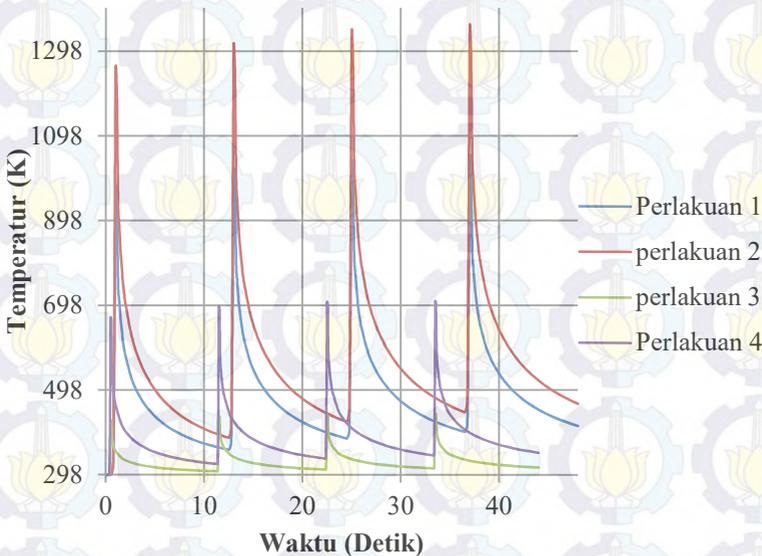


**Gambar 4.2** Distribusi temperatur pada: (a) detik 1; (b) detik 2; (c) detik 12; (d) detik 37; (e) detik 38; dan (f) 138. Perlakuan 5 (*Circumferential Scanning*).

Respon temperature dari perlakuan 1 (*axial*) dapat dilihat pada gambar 4.1 dan perlakuan 5 (*circumferential*) yang berupa distribusi temperature pada (a) detik 1 pada saat heat flux melewati tengah pipa, (b) detik 2 pada saat Pemanasan pertama selesai, (c) detik ke 12 saat Pendinginan pertama selesai dan (d) detik ke 37 saat heat flux melewati tengah pipa pada *scanning* terakhir, (e) detik ke 38 saat *scanning* terakhir selesai, dan (f) detik ke 138 saat Pendinginan terakhir selesai dan proses selesai.



Dapat dilihat dari gambar distribusi pada *scanning* yang pertama dan kedua, dengan skema pemanasan *axial*, temperatur paling tinggi berpusat pada bagian tengah pipa, kemudian secara gradual menurun menuju kedua ujung pipa. Pada skema *axial* pemanasan lebih cenderung terkonsentrasi pada sisi bagian atas pipa ( $y=0,25$  inch). Sementara pada skema pemanasan *circumferential*, selain sisi atas, sisi pinggir pipa ( $x=\pm 0,25$  inch) turut mendapat daerah nilai temperatur maksimum seperti yang ditunjukkan oleh warna merah pada gambar 4.3.

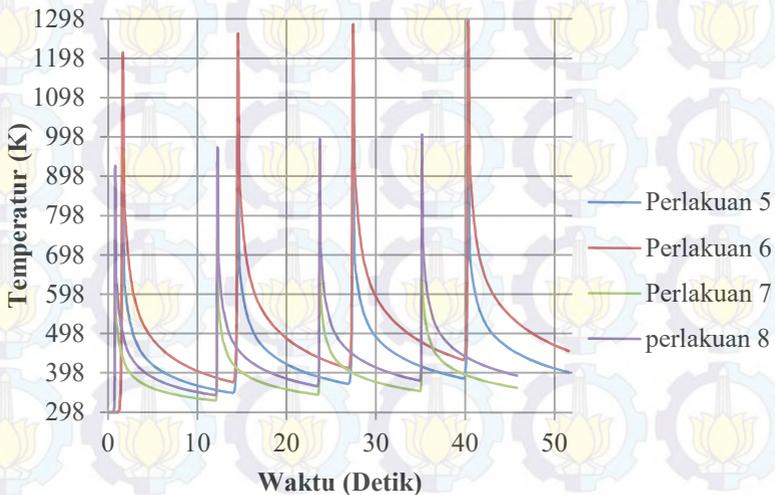


**Gambar 4.3** Grafik Temperatur vs waktu untuk *axial scanning* pipa persegi

Pada gambar 4.3 menunjukkan grafik temperatur terhadap waktu selama 4 kali pemanasan dan pendinginan pada pipa persegi dengan jalur pemanasan *axial*. Temperatur maksimum tertinggi dicapai pada perlakuan 1 sementara temperatur maksimum pada perlakuan 4 merupakan yang paling



rendah dari keempat perlakuan. Dapat dilihat pada gambar tersebut bahwa yang mencapai temperature tertinggi adalah perlakuan 2 yaitu 1354,79 K di mana pada perlakuan 2 ini menggunakan daya sebesar 1500W dengan kecepatan pemanasan 10mm/s. Sementara itu temperatur maksimum yang dicapai perlakuan 3 adalah 442,46K. Pada perlakuan 3 ini daya yang digunakan sebesar 1000W dengan *scanning speed* 20 mm/s.



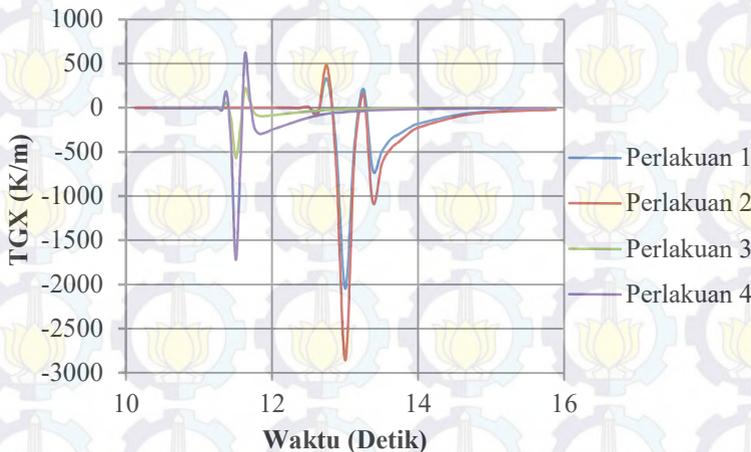
**Gambar 4.4** Grafik Temperatur vs waktu untuk *circumferential scanning* pipa persegi

Pada gambar 4.4, grafik tersebut menunjukkan hubungan temperatur dengan waktu yang dihasilkan pada perlakuan 5 hingga perlakuan 8 dengan jalur pemanasan *circumferential*. Dapat dilihat pada gambar tersebut bahwa yang mencapai temperature tertinggi adalah perlakuan 6 yaitu 1286,43 K di mana pada perlakuan 6 ini menggunakan daya sebesar 1500W dengan kecepatan pemanasan 10mm/s. Sementara itu temperatur maksimum yang dicapai perlakuan 7 adalah 781,75K. Pada

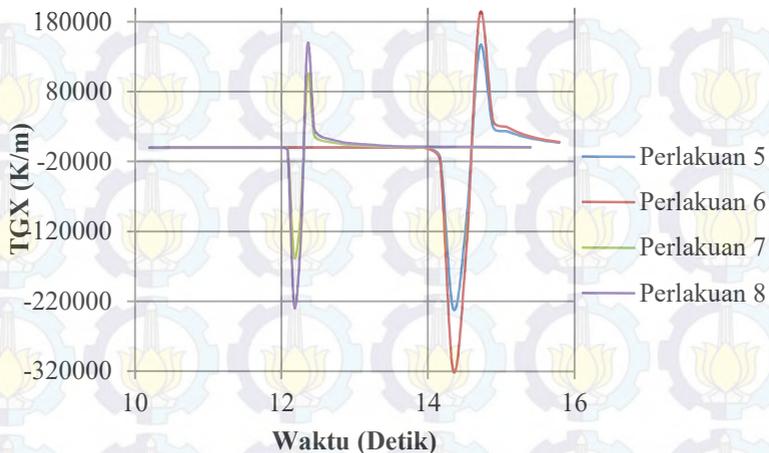


perlakuan 7 ini daya yang digunakan sebesar 1000W dengan *scanning speed* 20 mm/s.

Berdasarkan data tersebut dapat diamati daya laser 1500 W akan menghasilkan temperatur maksimum lebih besar bila dibandingkan daya 1000W. Selain itu, pada kecepatan pemanasan 10 mm/s akan menghasilkan temperatur maksimum yang lebih besar bila dibandingkan kecepatan pemanasan 20 mm/s. Fenomena ini menunjukkan bahwa semakin besar daya laser maka semakin besar pula panas yang masuk ke dalam benda kerja. Kemudian, juga semakin cepat *scanning speed* maka panas yang diterima pipa akan semakin kecil sehingga kecepatan pemanasan berbanding terbalik terhadap temperatur maksimum yang dihasilkan. Jika dibandingkan antara skema aksial dengan circumferential, temperatur pada jalur pemanasan aksial lebih tinggi bila dibandingkan dengan skema circumferential karena pada pipa persegi, panjang jalur pemanasan aksial lebih panjang bila dibandingkan jalur pemanasan circumferential.



**Gambar 4.5** Grafik Gradien Termal sumbu X Vs Waktu (Persegi-Axial) untuk perlakuan 1 hingga perlakuan 4



**Gambar 4.6** Grafik Gradien Termal sumbu X Vs Waktu (Persegi-Circumferential) untuk perlakuan 5 hingga perlakuan 8

Gambar 4.5 diatas menunjukkan gradien temperatur arah sumbu x pada waktu pemanasan kedua untuk perlakuan 1 hingga 4 pada titik tengah pipa ( $z=50$  mm). Pada pemanasan dengan jalur *axial* atau searah sumbu y ini, perbedaan temperatur terhadap sumbu x dapat teramati. Perlakuan 1 dan perlakuan 2 mengalami fluktuasi gradien thermal pada sekitar detik ke 13 saat sinar laser melewati titik tengah pipa. Sementara pada perlakuan 3 dan 4 hal tersebut terjadi pada detik 11 hingga 12. Perbedaan ini disebabkan oleh *scanning* speed yang berbeda. Perlakuan 3 dan 4 memiliki *scanning* speed 20 mm/s sementara perlakuan 1 dan 2 memiliki *scanning* speed 10 mm/s sehingga fluktuasi gradien thermal lebih dahulu terjadi pada *scanning* speed yang lebih cepat.

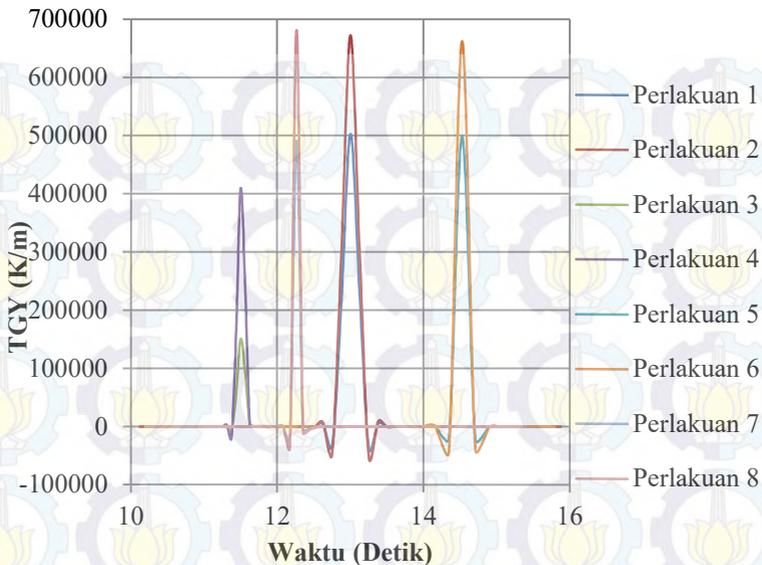
Gambar 4.6 menunjukkan gradien termal arah sumbu x pada perlakuan 5 hingga perlakuan 8. Pada pemberian sinar laser dengan skema *circumferential* ini dapat diamati bahwa *scanning* speed mempengaruhi gradien termal terhadap waktu. Pada



perlakuan 5 dan perlakuan 6 dengan *scanning speed* 10 mm/s akan mengalami fluktuasi pada antara detik 14 dan 15. Sementara pada perlakuan 7 dan perlakuan 8 dengan *scanning speed* lebih cepat yaitu 20 mm/s akan mengalami fluktuasi pada antara detik 12 dan 13.

Naik turunnya gradien temperatur disebabkan perpindahan penyinaran sinar laser. Pada awalnya temperatur pada node titik tengah tidak terdapat perbedaan dengan node sekitar. Kemudian saat mulai terdapat pemberian panas, node titik yang mendapat panas terlebih dahulu mempunyai temperatur yang lebih tinggi dari pada temperatur node titik tengah atau dengan kata lain node titik tengah lebih dingin bila dibandingkan node yang sudah diberi penyinaran laser sehingga gradien temperatur menunjukkan nilai minus. Kemudian pada saat node titik tengah tepat mendapat panas, maka node tersebut mempunyai temperatur yang lebih tinggi dari node yang lain sehingga nilainya menjadi positif.

Besar kecilnya nilai gradien temperatur ini dipengaruhi oleh besar daya laser yang diberikan. Dapat terlihat pada gambar 4.5 dan 4.6, perlakuan dengan daya laser 1500 W akan memiliki nilai gradien temperatur yang lebih besar bila dibandingkan dengan gradien temperatur dengan daya laser 1000 W. Hal ini disebabkan oleh panas yang diberikan oleh laser lebih besar sehingga temperatur yang dihasilkan lebih tinggi.

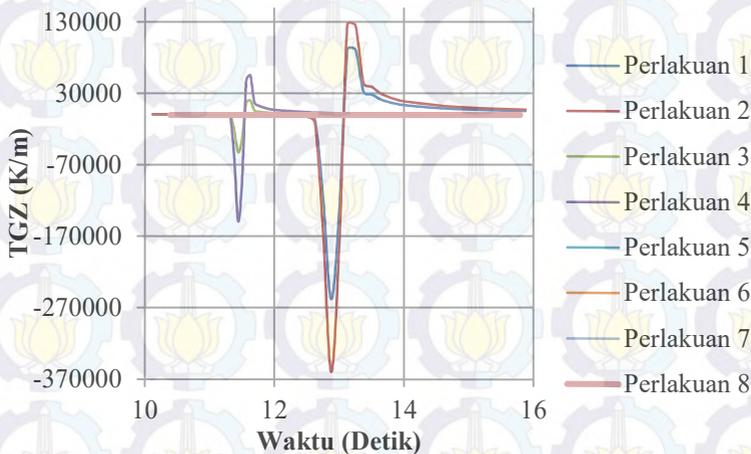


**Gambar 4.7** Grafik gradien temperatur sumbu y terhadap waktu (Persegi *circumferential* dan *Axial*)

Gambar 4.7 menunjukkan variasi gradien pada arah-y (kedalaman) pada titik tengah. Dapat dilihat perbedaan letak puncak dari thermalgradient di mana pada *scanning* dengan kecepatan 10 mm/s terletak pada sekitar detik ke 12,5 untuk skema *axial* dan detik ke 14,7 untuk skema *circumferential*. Sedangkan pada kecepatan 20 mm/s terletak pada sekitar detik ke 11,5 untuk skema *axial* dan detik ke 13 untuk skema *circumferential*. Dapat dilihat bahwa *axialscan* memiliki besaran thermalgradient yang paling besar, di mana yang paling besar yaitu yang menggunakan power 1500W dan kecepatan 20 mm/s, artinya semakin besar daya maka thermalgradient semakin tinggi dan semakin tinggi kecepatan *scan* maka thermalgradient juga akan semakin tinggi, Karena pada kecepatan pemanasan yang lebih lambat, terdapat waktu yang lebih untuk terjadinya proses



konduksi disekitar daerah pemanasan sehingga perbedaan temperatur lebih sedikit.



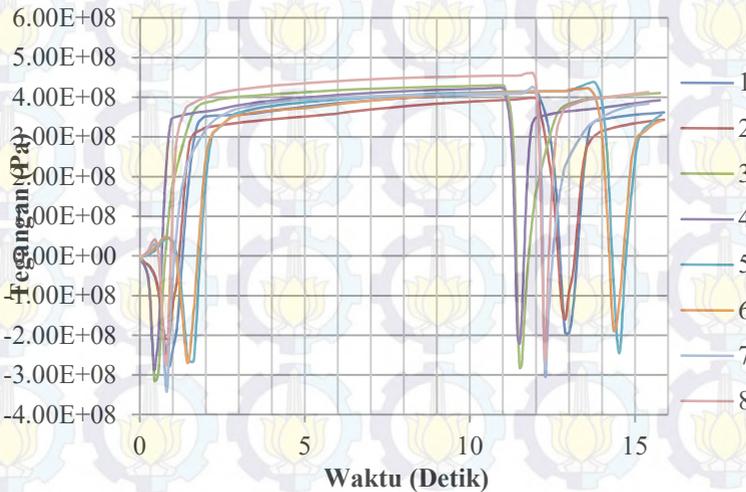
**Gambar 4.8** Gradien temperatur arah sumbu z terhadap waktu (Pipa Persegi Panjang *circumferential* dan *Axial*)

Gambar 4.8 menunjukkan gradien termal arah sumbu z dari detik 10 sampai 16 di mana untuk jalur *axial* pada perlakuan 1 hingga 4 searah dengan arah *scan* sedangkan untuk jalur *circumferential* merupakan arah lateral sehingga berlawanan dengan thermalgradient arah x. Pola gradien thermal sumbu z menyerupai hasil thermal gradient arah x seperti pada gambar 4.5. Namun, pada nilai TGZ skema *circumferential scanning* pada percobaan 5 - 8 mendekati nol, jadi dapat diambil kesimpulan jika besaran gradien termal akan bernilai mendekati nol pada arah lateral dari *scan*. Untuk besaran yang terbesar masih sama seperti pada thermalgradient arah x dimana yang paling berpengaruh adalah daya (power) di mana semakin besar daya maka besaran dari thermalgradient akan semakin besar.



#### 4.1.2 Respon Tegangan

Selanjutnya pada penelitian ini dibahas respon tegangan dalam analisis struktur pipa yang dibending dengan laser sebagai efek dari beban termal. Pada gambar 4.9 dibawah ini dibahas respon tegangan pada arah *scanning* pada detik 0 hingga 16 untuk perlakuan 1 hingga 8 di titik tengah pipa.



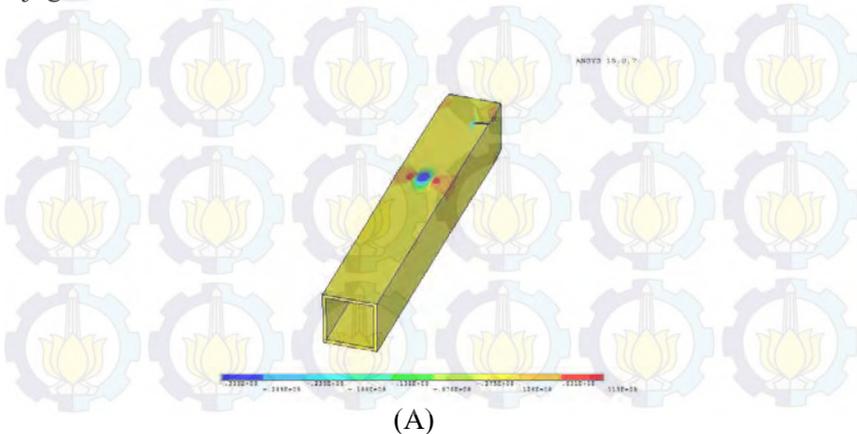
**Gambar 4.9** Grafik Tegangan pada arah pemanasan terhadap waktu dengan skema *axial* dan *circumferential*

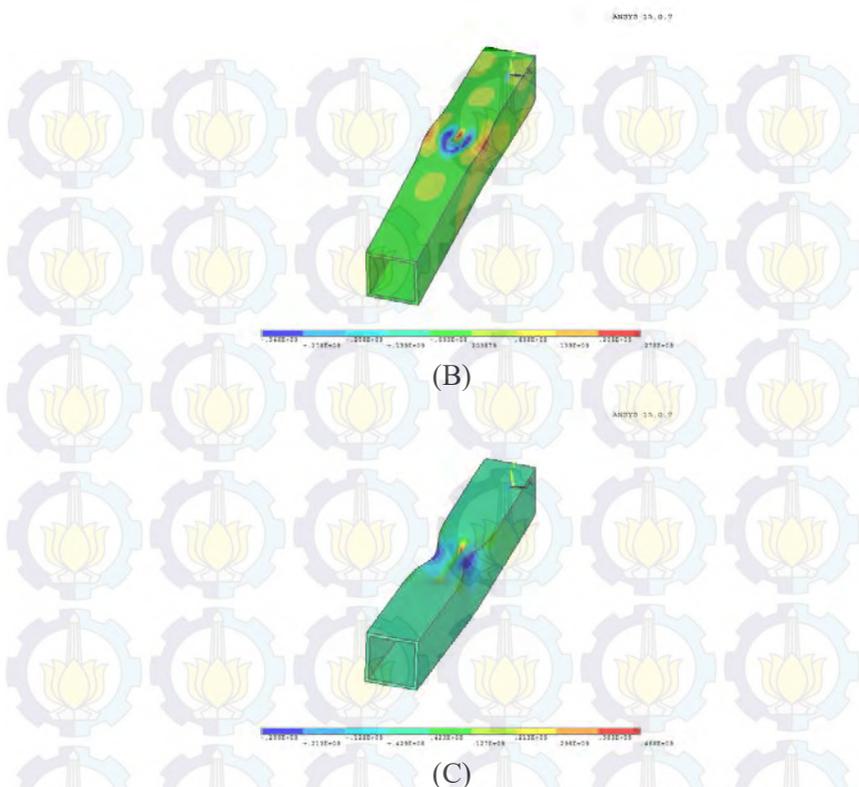
Pada grafik diatas, pola tegangan kompresif dan tensile untuk 8 perlakuan memiliki kecenderungan yang sama. dimulai pada detik ke 0 dan ketika laser mendekati titik tengah pipa, perlakuan dengan *scanning* speed 20 mm/s akan mengalami compressive stress dengan puncak pada detik pertama, sementara perlakuan dengan *scanning* speed 10 mm/s akan mendapatkan puncak compressive stress pada detik kedua. Compressive stress muncul akibat efek dari node yang lain memuai akibat pemanasan dan menekan reference node. Tegangan akan bernilai paling kecil



ketika laser berada pada referencenode karena pada saat tersebut tercapai temperature maksimum dan material mengalami yield. Ketika beam laser meninggalkan node tersebut, node tersebut mengalami pemuaiian, pemuaiian ini ditandai dengan perubahan tegangan menjadi tensile stress.

Berdasarkan grafik diatas, dapat dilihat perlakuan 8 dengan skema circumferential dengan kecepatan pergerakan laser 20 mm/s dan daya laser 1500 W memiliki tegangan tensile 460 MPa, terbesar dari perlakuan yang lain. Sementara pada skema aksial, Perlakuan 3 dengan daya laser 1000 W dengan kecepatan laser 20 mm/s terdapat tegangan tensile maksimum 430 Mpa. Berdasarkan keseluruhan 8 perlakuan terdapat pola semakin kecil tegangan kompresif maka tegangan tariknya semakin besar dan tegangan pada jalur aksial lebih kecil dari pada skema circumferential. Di lain pihak, besar kecilnya tegangan tidak mempengaruhi hasil nilai distorsi. Hal ini disebabkan oleh pengaruh geometri pipa yang berperan terhadap pemanasan. Pada skema aksial, laser tidak melewati siku - siku pipa sementara pada skema circumferential sinar laser melewati siku - siku pipa. Pada sisi siku - siku pipa, sifatnya lebih kaku bila dibandingkan sisi tengah pipa. Sehingga respon pipa terhadap pembebanan termal juga berbeda.





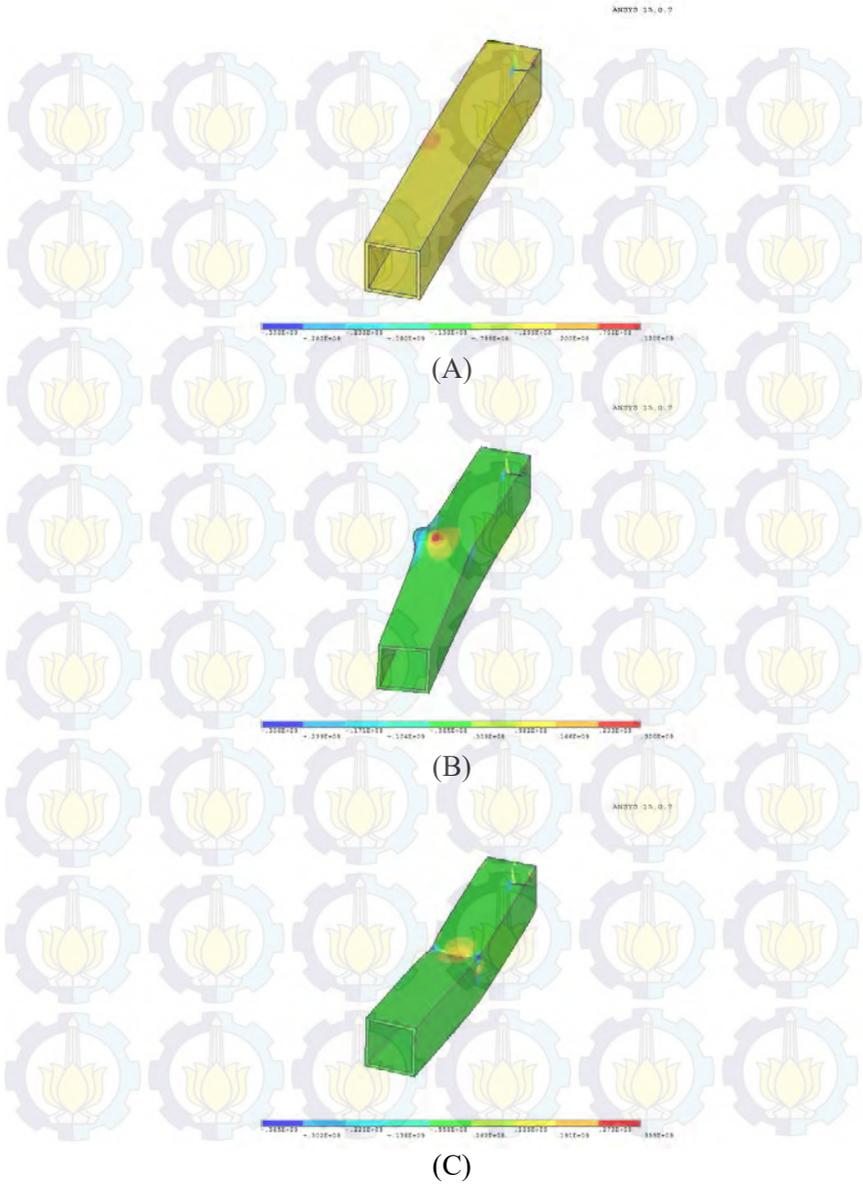
**Gambar 4.10** Distribusi tegangan pada pipa ( $\sigma-z$ ) pada skema aksial pada detik ke: (a) 0.125; (b) 1; (c) 138. Deformasi diperbesar 100x untuk memperjelas

Hasil Tegangan arah sumbu z pada pipa dapat dilihat pada gambar 4.10 untuk skema *axial* dan 4.11 untuk skema *circumferential*. Pada kedua gambar bahwa yang ditampilkan adalah tegangan pada pada arah sumbu z karena tegangan tersebut yang akan menyebabkan perubahan secara angular pada pipa baik pada skema *circumferential* ataupun *axial*. Tegangan yang berwarna merah merupakan tegangan yang bernilai positif atau tegangan yang bersifat tegangan tarik. Selain itu, daerah tegangan



warna biru yang mengindikasikan compressive stress dimana nilai tegangannya berupa negatif.

Gambar 4.10 menunjukkan distribusi tegangan pada permukaan pipa pada skema *axial* dengan daya laser sebesar 1000W dan kecepatan 10 mm/s yang dibagi menjadi tiga tahapan yang berbeda. Tahapan yang pertama yaitu berada pada awal *scanning* pada detik ke 0.125 (a). Tahap kedua pada saat *scanning* melewati tengah dari pipa pada detik pertama (b). Dan tahapan terakhir adalah ketika proses selesai dan proses pendinginan terakhir telah selesai pada detik ke 138 (c). Dapat dilihat pada gambar 4.10 (a) bahwa ketika proses pemanasan dimulai, nilai compressive stress mencapai 339 MPa pada zona yang dipanaskan dengan laser dan daerah sejalar pemanasan diakibatkan oleh tingginya ekspansi termal oleh temperature yang tinggi. Pada daerah tersebut juga terdapat deformasi lokal berupa counter bending. Sedangkan pada daerah yang berwarna merah atau disekitar dari zona biru terdapat tegangan tarik dengan nilai maksimum 113 MPa yang dihasilkan sebagai reaksi dari ekspansi termal pada daerah sekitar yang dipanasi. sehingga membatasi ekspansi termal tersebut. Gambar 4.10 (b) pada detik ke 1 terlihat adanya proses pendinginan pada titik awal pemanasan, dimana tegangan tekan yang tadi terjadi berubah menjadi tegangan tarik (maksimum 278 MPa) yang diakibatkan oleh kontraksi pada daerah awal yang dipanaskan. Setelah proses selesai, tensile stress tetap ada pada permukaan sepanjang lintasan yang dilalui oleh laser dan membentuk sudut bending pada pipa yang dapat dilihat pada gambar 4.10 (c). Selain itu pipa melengkung keatas setelah dilakukan pendinginan. Hal ini disebabkan ketika pada pemanasan Selesai, bagian atas pipa yang terkena laser lebih dahulu terjadi pendinginan dan panas dari bagian atas berpindah ke bagian bawah. Sehingga pada saat pendinginan, bagian atas mengalami kontraksi sementara bagian bawah terjadi pemuaiian sehingga mendorong bagian atas pipa.





**Gambar 4.11** Distribusi tegangan pada pipa ( $\sigma_z$ ) pada skema *circumferential* pada detik ke: (a) 0.125; (b) 1; (c) 138. Deformasi diperbesar 100x untuk memperjelas.

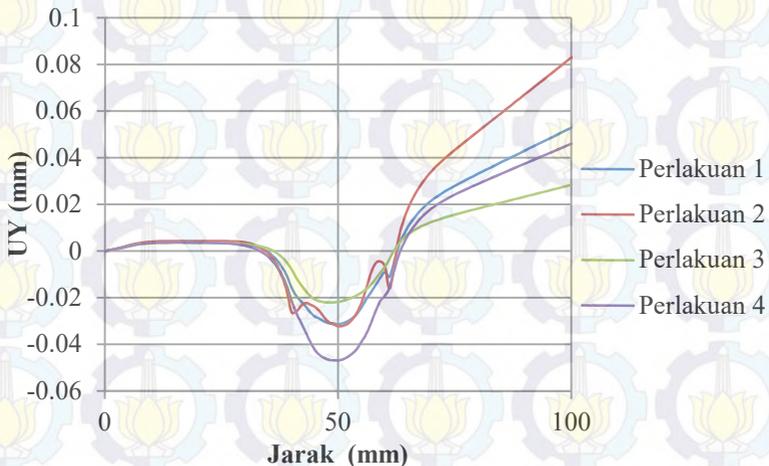
Gambar 4.11 menunjukkan distribusi tegangan pada permukaan pipa pada skema *circumferential* dengan power 1500W dan kecepatan 10 mm/s yang dibagi menjadi tiga tahapan yang berbeda. Tahapan yang pertama berada pada awal *scanning* pada detik ke 0.125 (a). Tahapan kedua pada saat *scanning* melewati tengah dari pipa pada detik pertama (b). Dan tahapan terakhir adalah ketika proses selesai dan proses pendinginan terakhir telah selesai pada detik ke 138 (c). Dapat dilihat pada gambar 4.11 (a) bahwa ketika proses pemanasan dimulai, nilai compressive stress yang tertinggi tercatat 330 MPa pada zona yang dipanaskan dan daerah di sekelilingnya yang diakibatkan oleh tingginya ekspansi termal oleh temperature yang tinggi .. Gambar 4.11 (b) sudah terjadi proses pendinginan pada daerah yang telah dipanaskan sebelumnya, compressive stress yang tadi terjadi berubah menjadi tensile stress (maksimum 300 MPa) yang diakibatkan oleh kontraksi pada daerah yang dipanaskan. Setelah proses selesai, tensile stress tetap ada pada permukaan sepanjang lintasan yang dilalui oleh laser dan membentuk sudut bending pada pipa yang dapat dilihat pada gambar 4.11 (c). Distorsi dapat terlihat pada bagian tengah pipa ( $z=50\text{mm}$ ) sepanjang jalur pemanasan. Hal ini dapat terjadi akibat gradien thermal yang paling ekstrim disepanjang jalur pemanasan *circumferential*.

Berdasarkan skema aksial seperti 4.10 dan skema pemanasan *circumferential* seperti pada gambar 4.11, terdapat perbedaan dalam segi distribusi tegangan dan distorsi, walaupun kedua perlakuan memiliki *scanning speed* dan daya laser yang sama. Pada skema aksial, tegangan regangan yang terjadi pada material lebih banyak terjadi pada arah sumbu z. Sementara pada skema *circumferential*, tegangan dan regangan lebih terkonsentrasi pada arah sumbu x. Kedua skema ini sama - sama



memiliki deformasi lokal pada daerah jalur pemanasan akibat konsentrasi gradien termal yang sangat tinggi.

Besar kecilnya *displacement* atau perpindahan dalam sumbu Y untuk melihat seberapa besar ujung pipa terdeformasi untuk masing masing skema percobaan dapat lebih jauh diamati pada gambar 4.12 dan gambar 4.13 berikut.

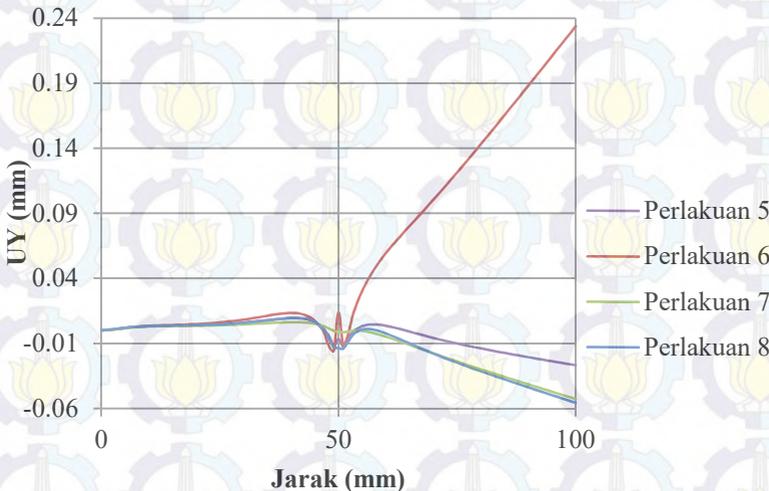


**Gambar 4.12** *Displacement* pada arah-y (bending) pada bagian atas pada skema *axial*.

Dapat dilihat dari gambar 4.12 dengan dari seluruh perlakuan dengan *scanning path*, perlakuan yang mengalami *displacement* atau perpindahan terhadap sumbu y terbesar adalah perlakuan 2 yaitu 0.0829 mm yang memiliki daya paling besar 1500 W dan *scanning speed* paling rendah 10 mm/s lalu diikuti oleh perlakuan 1 yang memiliki daya lebih rendah yaitu 1000 dengan *scanning* 10 mm/s. Pada perlakuan 3 dan perlakuan 4 dengan kecepatan pemanasan 20 mm/s, perlakuan 3 dengan daya laser 1000 W memiliki nilai perpindahan UY terkecil yaitu 0.028 mm pada titik  $z=100$ mm. Berdasarkan hasil yang didapat maka



dapat diambil kesimpulan bahwa dengan semakin besarnya daya maka *displacement* akan semakin besar sedangkan untuk kecepatan yang meningkatkan *displacement* adalah dengan memperlambat kecepatan *scanning*



**Gambar 4.13** *Displacement* pada arah-y (bending) pada bagian atas pada skema *circumferential*.

Sudut bending dapat ditentukan dengan menghitung *displacement* pada sumbu-y sepanjang garis tepi ke tepi dari  $z=0$  sampai  $z = 100$  mm. Jadi sesungguhnya *displacement-y* sepanjang bagian atas pipa merepresentasikan sudut bending.

Pada skema *circumferential* pada gambar 4.15 juga memiliki pola atau urutan *displacement* yang sama yaitu perlakuan dengan power yang lebih tinggi dan kecepatan yang lebih kecil memiliki *displacement* pada sumbu y paling tinggi. Namun, pada skema *circumferential* ini, perlakuan 6 memiliki nilai UY jauh lebih besar yaitu 0,23 mm dan mengarah ke sumbu y positif. Hal ini dapat terjadi karena pipa pada perlakuan 6 ini memiliki 3 macam parameter yang mendukung. Dimana,



perlakuan 6 memiliki jalur *circumferential* dengan jalur pemanasan yang lebih panjang dari pada aksial, daya laser lebih besar, dan *scanning* speed lebih rendah sehingga panas yang diterima pipa pada perlakuan 6 lebih besar ketimbang perlakuan lain. Diikuti dengan perlakuan 5 yang semakin mendekati sumbu y. Dapat dilihat bahwa, jika dibandingkan dengan skema aksial, *displacement* pada skema *circumferential* ini lebih mendekati titik 0. Hal ini disebabkan oleh adanya fenomena *spring back*.

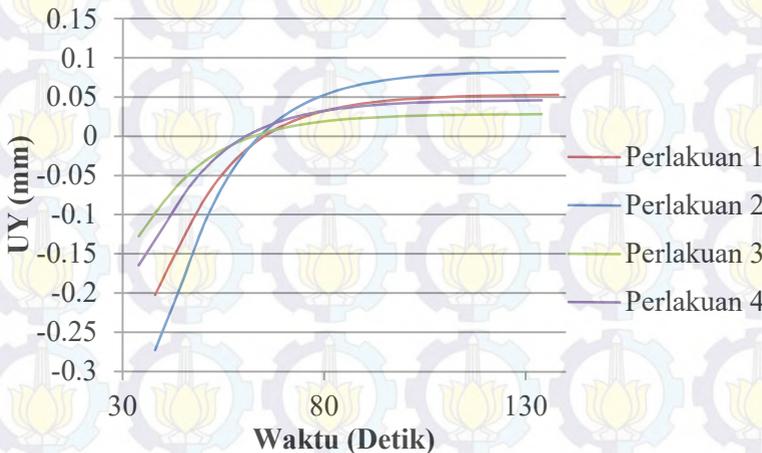
Posisi pipa akan bergerak kembali ke posisi awal pada saat *unloading* atau pelepasan pembebanan, selisih antara titik pada saat pembebanan mulai dilepaskan dan titik posisi akhir pipa berhenti berhenti bergerak inilah yang disebut *spring back*. Pada proses pemanasan dengan jalur laser *circumferential* kali ini, sisi bagian bawah pipa mendapatkan panas yang lebih besar bila dibandingkan jalur pemanasan *axial*. Pada saat terjadi proses pendinginan akhir, panas pada bagian sisi atas pipa berpindah menuju sisi bawah pipa yang lebih dingin. Proses perpindahan panas pada pipa ini menyebabkan sisi bawah pipa memiliki temperatur yang lebih tinggi. Bagian bawah pipa yang masih memiliki temperatur yang lebih tinggi akan memuai sementara bagian atas pipa yang lebih dahulu dingin akan terjadi penyusutan atau kontraksi. Maka dari itu, terjadi perpindahan UY menuju sumbu y positif. Semakin besar panas yang diberikan, maka semakin besar pula pemuaian yang terjadi pada bagian bawah pipa. Hal ini dapat menjelaskan mengapa perlakuan 5 dengan *scanning* speed 10mm/s memiliki nilai UY yang lebih mendekati sumbu Y sama dengan 0 bila dibandingkan nilai UY pada perlakuan 7 dan perlakuan 8 yang memiliki *scanning* speed 20 mm/s.

Dibawah ini terdapat gambar historis *displacement-y* terhadap waktu yang merupakan representasi dari *springback* yang terjadi pada proses pembengkokan yang disajikan pada gambar 4.14 dan 4.15.

Gambar 4.14 dibawah menunjukkan perlakuan 1 hingga perlakuan 4 yaitu dengan jalur pemanasan aksial. Pada saat proses



pemanasan berakhir, pipa mencapai titik tekukan maksimum pada sumbu  $y$  negatif. Kemudian pada saat pendinginan, pipa akan mengalami akan bending ke arah sumbu- $y$  positif pada saat tertentu akan berhenti dan membentuk trend asymptote terhadap sumbu  $x$  yang berarti proses sudah selesai. Dapat dilihat yang mengalami gradient paling curam adalah perlakuan di mana merupakan kombinasi dari skema *axial* dengan daya laser 1500w dan *scanning speed* paling lambat yaitu 10 mm/s.

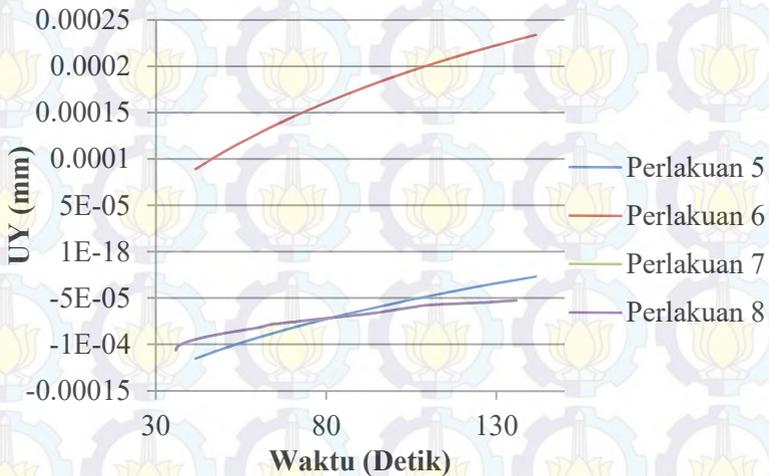


**Gambar 4.14** Historis displacement- $y$  pada ujung pipa persegi dengan jalur pemanasan aksial.

Gambar 4.15 dibawah menunjukkan historis displacement- $y$  pada ujung pipa persegi dengan jalur pemanasan *circumferential*. Sama seperti skema aksial, proses springback ini dimulai ketika pemberian panas dari laser dilepas dan *displacementUY* bergerak ke arah sumbu  $y$  positif. Namun, pada jalur pemanasan *circumferential* terjadi perbedaan dalam laju springback. Pada jalur *circumferential*, laju springback ini memiliki laju yang tetap. Tidak seperti aksial yang lajunya cepat pada awal pendinginan kemudian mengalami perlambatan. Terlihat pada gambar 4.15, pergeseran titik node terhadap sumbu



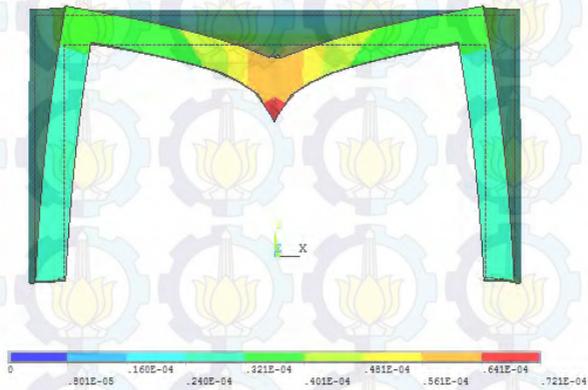
y memiliki kenaikan yang konstant. Pengaruh *scanning speed* dan daya laser tetap mempengaruhi *displacement* UY. Perlakuan 6 dengan daya laser 1500W dan kecepatan pergerakan laser 10 mm/s memiliki gradien yang lebih curam bila dibandingkan dengan perlakuan 7 dengan daya 1000 w dan kecepatan 20 mm/s.



**Gambar 4.15** Historis displacement-y pada ujung pipa persegi dengan jalur pemanasan aksial

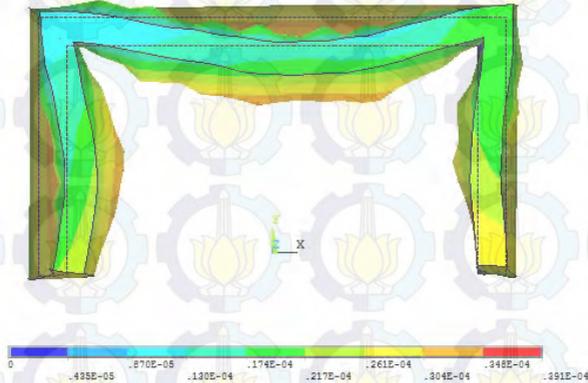


ANSYS 15.0.7



Gambar 4.16 Profil penampang dari pipa pada *axial scanning* pada  $z = 50$  mm

ANSYS 15.0.7



Gambar 4.17 Profil penampang dari pipa pada *circumferential scanning* pada  $z = 50$  mm



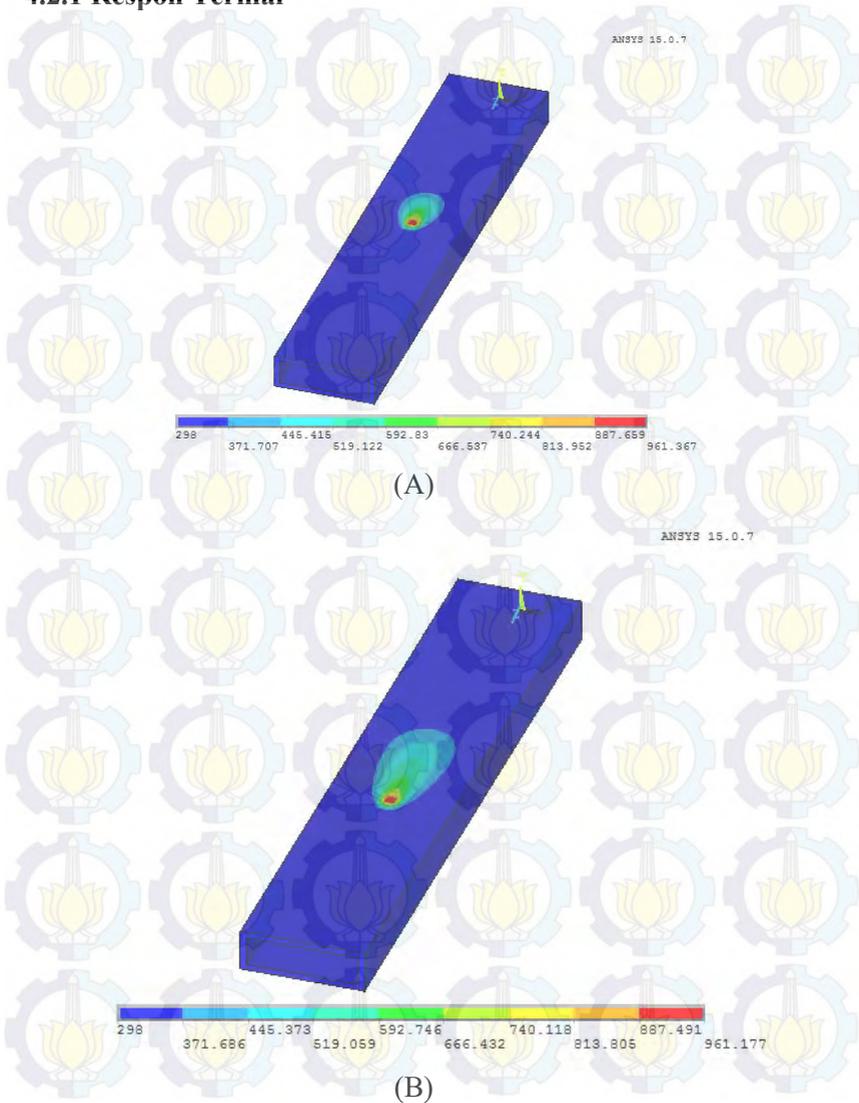
Pada gambar 4.16 dapat dilihat bahwa pada *axial scan*, Pada bagian jalur pemanasan memiliki cekungan kedalam dan pada dinding bagian dalam terdapat tonjolan yang lancip kedalam pipa. Selain itu pada sisi pinggir kiri dan kanan pipa yang tidak terkena pemanasan langsung cenderung miring ke sisi dalam pipa pada bagian atasnya. Sedangkan dari gambar 4.17 pada *circumferential scanning* terlihat adanya distorsi yang simetris ketiga sisi kiri atas dan bawah pipa. Ketiga sisi mempunyai bentuk yang cekung kedalam pipa. Dapat dilihat dari kedua jenis pemanasan *axial* dan *circumferential*, distorsi yang dihasilkan keduanya sama - sama simetris, dan sisi yang terkena panas langsung cenderung cekung kedalam. Hal ini disebabkan oleh adanya jalur pemanasan pada sisi luar pipa. Dengan adanya pemanasan pada bagian luar, bagian dalam mengalami tensile stress sementara pada bagian luar yang terpanasi langsung mengalami compressive stress. Dapat dilihat pula pada gambar 4.14 dan gambar 4.15 bahwa distorsi pada dinding bagian dalam bernilai kecil, maksimum hanya mencapai 0,039 mm. Deformasi lokal yang terdapat pada jalur pemanasan yang berupa kerutan dapat dihilangkan dengan proses machining.

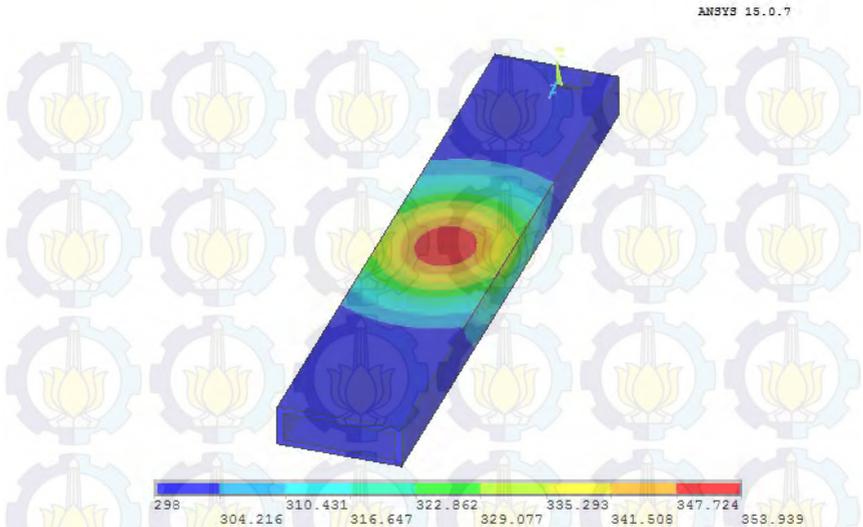
Dalam penampang pipa persegi ini dapat diambil perlakuan mana yang terbaik untuk dilakukan laser bending. Untuk skema axial yang memiliki nilai displacement UY terbesar perlakuan 2 yaitu kombinasi power 1500W dengan kecepatan 10 mm/s dengan nilai 0,0829 mm, tegangan yang tercatat 397 MPa, nilai tegangan tersebut merupakan tegangan terendah di kategori aksial. Kemudian untuk skema circumferential, perlakuan yang memiliki nilai displacement UY terbesar adalah perlakuan 6 dengan nilai 0,2339 mm. Perlakuan 6 ini memiliki daya laser 1500 W dan kecepatan 10 mm/s dengan nilai tegangan maksimum 422 MPa.



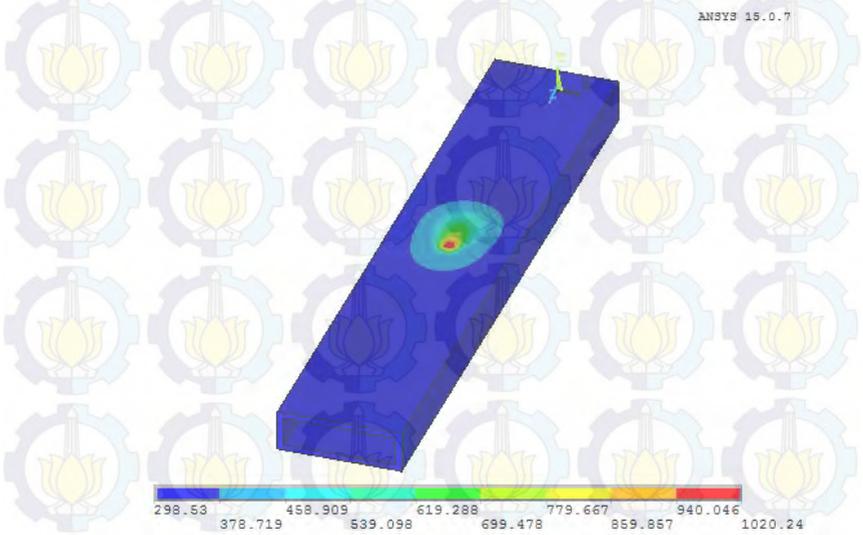
## 4.2 Pipa Persegi Panjang

### 4.2.1 Respon Termal

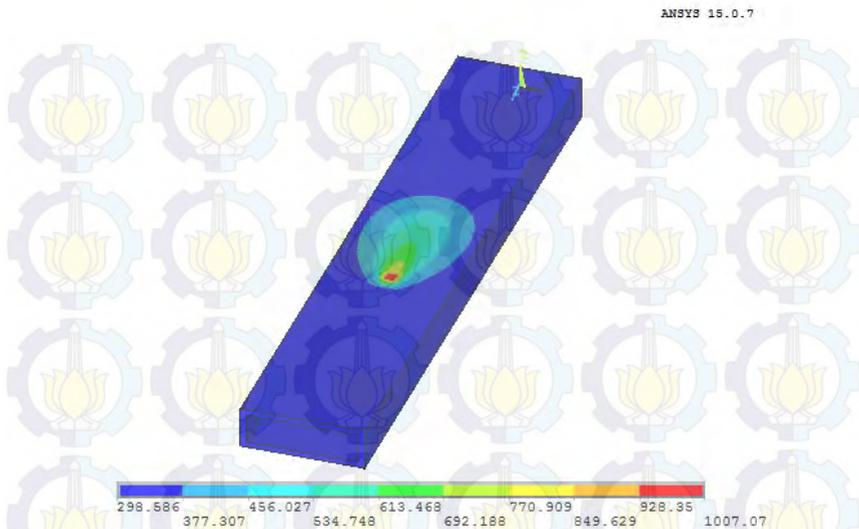




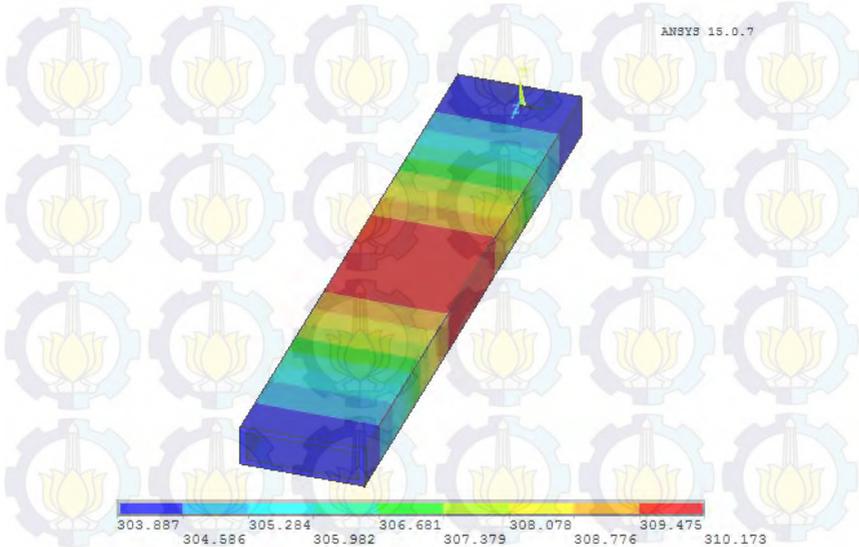
(C)



(D)



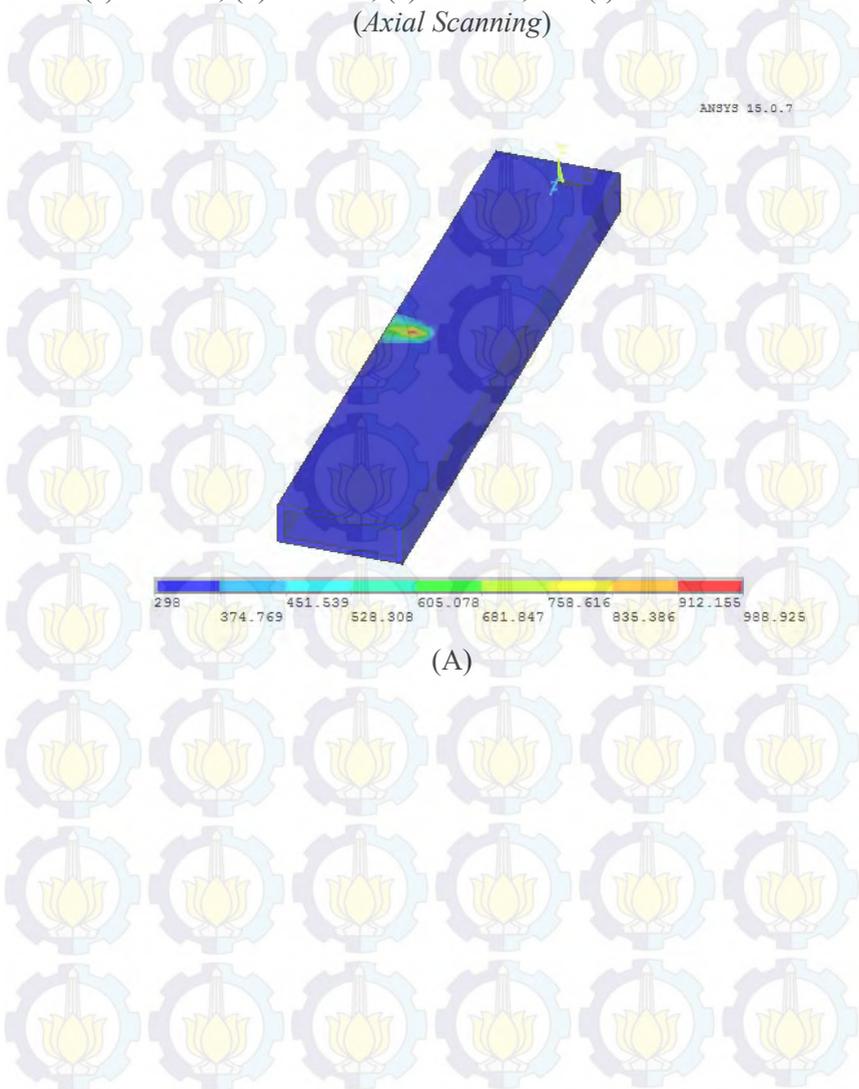
(E)

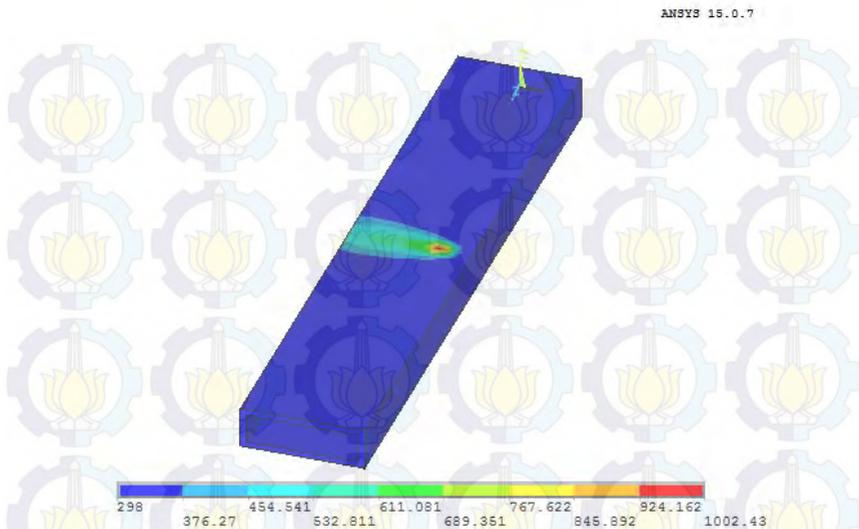


(F)

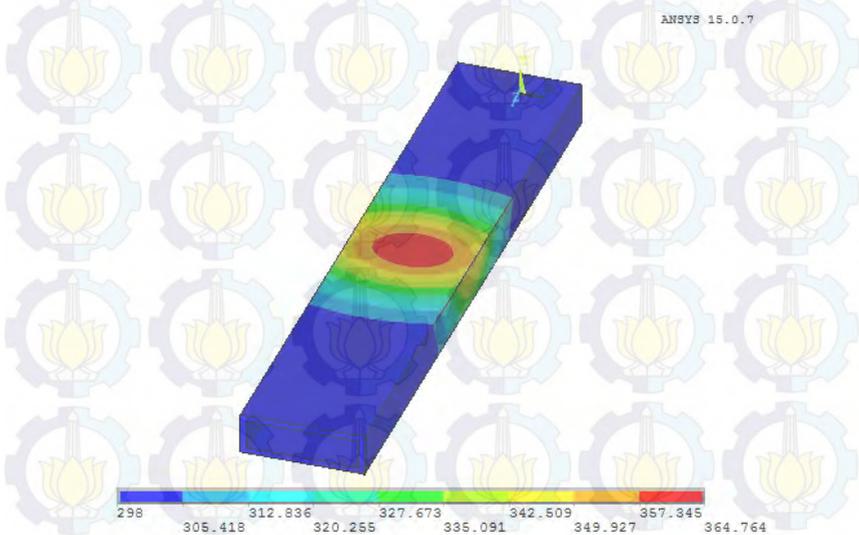


**Gambar 4.18** Distribusi temperatur pada: (a) detik 1; (b) detik 2; (c) detik 12; (d) detik 37; (e) detik 38; dan (f) 138. Perlakuan 1 (*Axial Scanning*)

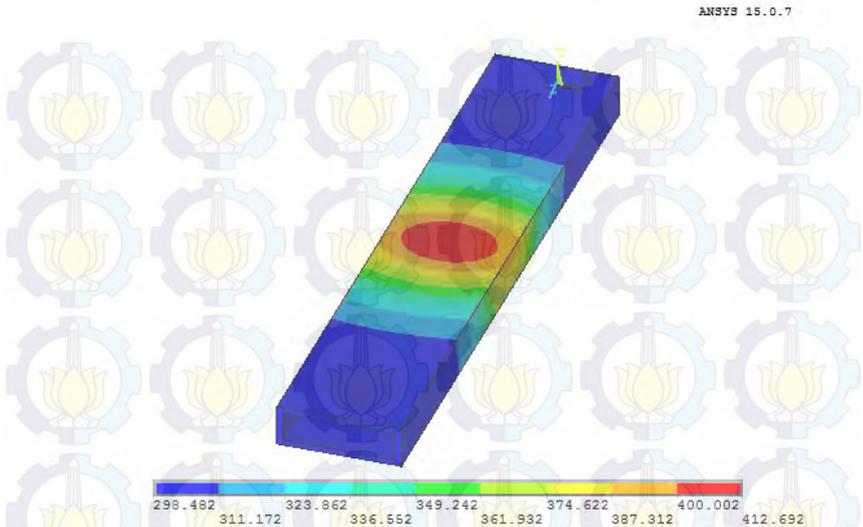




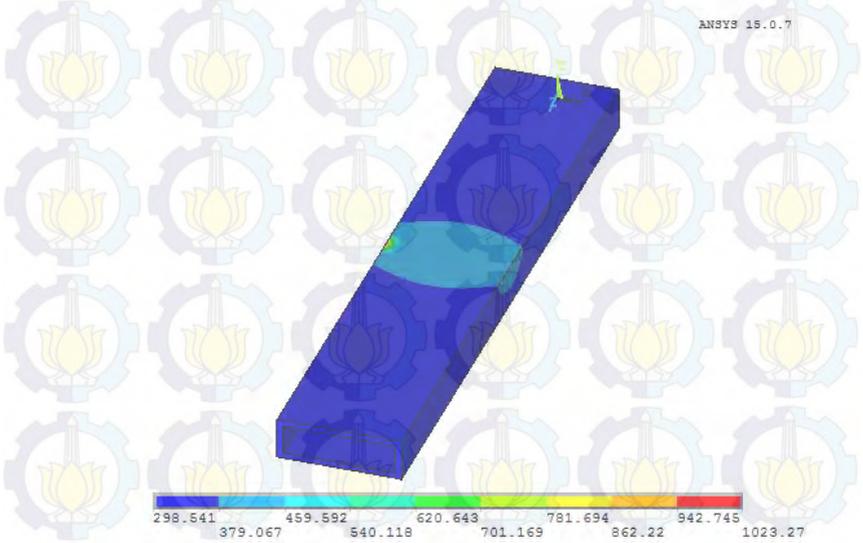
(B)



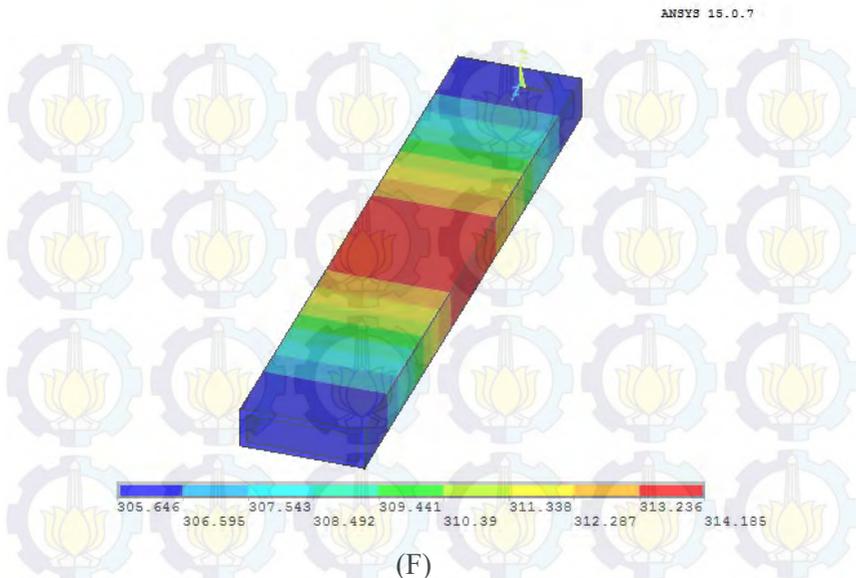
(C)



(D)



(E)

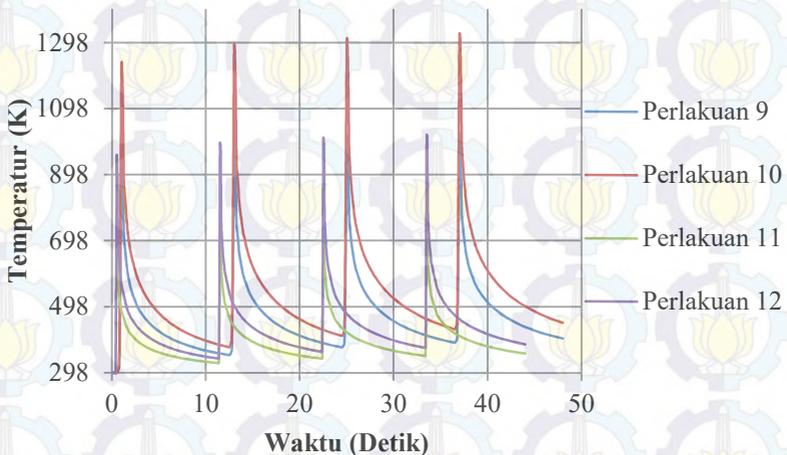


**Gambar 4.19** Distribusi temperatur pada: (a) detik 1; (b) detik 2; (c) detik 12; (d) detik 37; (e) detik 38; dan (f) 138. Perlakuan 5 (*Circumferential Scanning*).

Respon temperatur pada perlakuan 9 (*axial*) dapat dilihat pada gambar 4.18 dan perlakuan 13 (*circumferential*) yang berupa distribusi temperature pada (a) detik 1 pada saat heat flux melewati tengah pipa, (b) detik 2 pada saat Pemanasan pertama selesai, (c) detik ke 12 saat Pendinginan pertama selesai dan (d) detik ke 37 saat heat flux melewati tengah pipa pada *scanning* terakhir, (e) detik ke 38 saat *scanning* terakhir selesai, dan (f) detik ke 138 saat Pendinginan terakhir selesai dan proses selesai. Dapat dilihat dari gambar distribusi pada *scanning* yang pertama dan kedua, dengan skema pemanasan *axial*, temperatur paling tinggi berpusat pada bagian tengah pipa, kemudian secara gradual menurun menuju kedua ujung pipa. Pada skema *axial* pemanasan

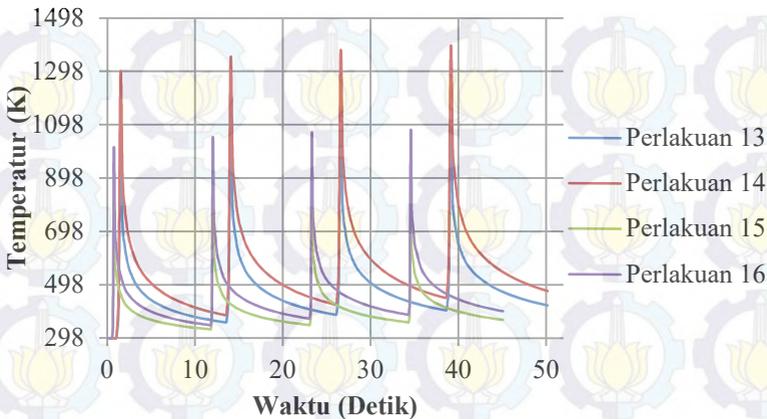


lebih cenderung terkonsentrasi pada sisi bagian atas pipa ( $y=0.25$  inch). Sementara pada skema pemanasan *circumferential*, selain sisi atas, sisi pinggir pipa ( $x=\pm 0,25$  inch) turut mendapat daerah nilai temperatur yang lebih tinggi seperti yang ditunjukkan oleh warna merah pada gambar 4.19 (e) .



**Gambar 4.20** Temperatur vs waktu untuk *axial scanning* pipa Persegi Panjang

Pada gambar 4.20 menunjukkan grafik temperatur terhadap waktu selama 4 kali pemanasan dan pendinginan pada pipa persegi dengan jalur pemanasan *axial*. Temperatur maksimum tertinggi dicapai pada perlakuan 10 sementara temperatur maksimum pada perlakuan 11 merupakan yang paling rendah dari keempat perlakuan. Dapat dilihat pada gambar tersebut bahwa yang mencapai temperature tertinggi adalah perlakuan 10 yaitu 1317 K di mana pada perlakuan 10 ini menggunakan daya sebesar 1500W dengan kecepatan pemanasan 10mm/s. Sementara itu temperatur maksimum yang dicapai perlakuan 11 adalah 800 K. Pada perlakuan 11 ini daya yang digunakan sebesar 1000W dengan *scanning speed* 20 mm/s.



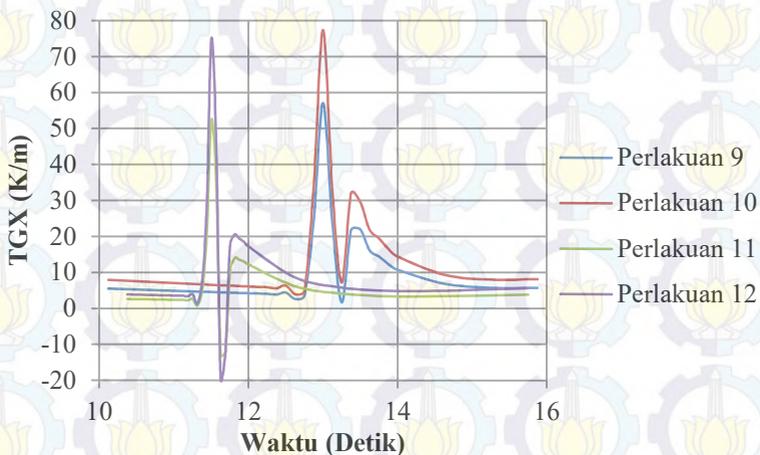
**Gambar 4.21** Temperatur vs waktu untuk *circumferential scanning* pipa Persegi Panjang

Pada gambar 4.21, grafik tersebut menunjukkan hubungan temperatur dengan waktu yang dihasilkan pada perlakuan 13 hingga perlakuan 16 dengan jalur pemanasan *circumferential*. Dapat dilihat pada gambar tersebut bahwa yang mencapai temperature tertinggi adalah perlakuan 14 yaitu 1386 K di mana pada perlakuan 14 ini menggunakan daya sebesar 1500W dengan kecepatan pemanasan 10mm/s. Sementara itu temperatur maksimum yang dicapai perlakuan 15 adalah 841 K. Pada perlakuan 15 ini daya yang digunakan sebesar 1000W dengan *scanning speed* 20 mm/s. Pada pipa berbentuk persegi panjang ini skema cirumferential akan menghasilkan temperatur yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan aksial, karena panjang lintasan aksial pada pipa persegi panjang lebih pendek, sehingga perpindahan panasnya lebih sedikit dengan daya laser dan kecepatan pergerakan laser yang sama.

Berdasarkan data tersebut dapat diamati daya laser 1500 W akan menghasilkan temperatur maksimum lebih besar bila dibandingkan daya 1000W. Selain itu, pada kecepatan pemanasan 10 mm/s akan menghasilkan temperatur maksimum yang lebih



besar bila dibandingkan kecepatan pemanasan 20 mm/s. Fenomena ini menunjukkan bahwa semakin besar daya laser maka semakin besar pula panas yang masuk ke dalam benda kerja. Kemudian, juga semakin cepat *scanning* speed maka panas yang diterima pipa akan semakin kecil sehingga kecepatan pemanasan berbanding terbalik terhadap temperatur maksimum yang dihasilkan. Hal ini terjadi pula pada bagian pembahasan pipa bentuk penampang persegi. Sehingga, pengaruh daya laser dan kecepatan pemanasan berpengaruh untuk kedua bentuk geometri pipa.

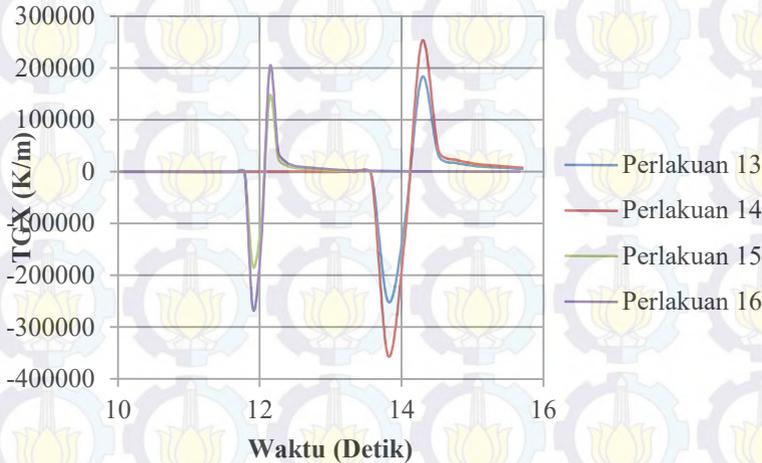


**Gambar 4.22** Thermal Gradient arah-x Vs Waktu (*Axial*) untuk perlakuan 9 hingga perlakuan 12

Gambar 4.22 diatas menunjukkan gradien temperatur arah sumbu x pada waktu pemanasan kedua untuk perlakuan 9 hingga 12 pada titik tengah pipa ( $z=50$  mm). Pada pemanasan dengan jalur *axial* atau searah sumbu y ini, perbedaan temperatur terhadap sumbu x dapat teramati. Perlakuan 9 dan perlakuan 10 mengalami fluktuasi gradien thermal pada sekitar detik ke 13 saat sinar laser melewati titik tengah pipa. Sementara pada



perlakuan 11 dan 12 hal tersebut terjadi pada detik 11 hingga 12. Perbedaan ini disebabkan oleh *scanning* speed yang berbeda. Perlakuan 11 dan 12 memiliki *scanning* speed 20 mm/s sementara perlakuan 9 dan 10 memiliki *scanning* speed 10 mm/s sehingga fluktuasi gradien thermal lebih dahulu terjadi pada *scanning* speed yang lebih cepat.



**Gambar 4.23** Thermal Gradient arah sumbu x Vs Waktu (*Circumferential*) untuk perlakuan 13 hingga perlakuan 16

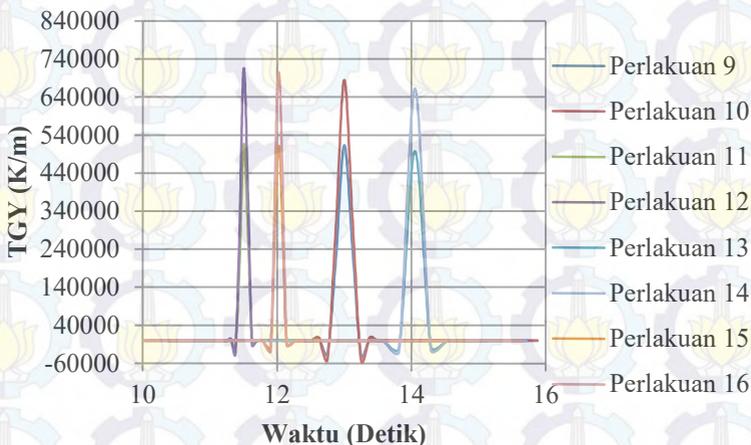
Gambar 4.23 menunjukkan gradien thermal arah sumbu x pada perlakuan 13 hingga perlakuan 16. Pada pemberian sinar laser dengan skema *circumferential* ini dapat diamati bahwa *scanning* speed mempengaruhi gradien thermal terhadap waktu. Pada perlakuan 13 dan perlakuan 14 dengan *scanning* speed 10 mm/s akan mengalami fluktuasi pada antara detik 13,5 dan 15. Sementara pada perlakuan 15 dan perlakuan 16 dengan *scanning* speed lebih cepat yaitu 20 mm/s akan mengalami fluktuasi pada antara detik 11,5 dan 13.

Naik turunnya gradien temperatur disebabkan perpindahan penyinaran sinar laser. Pada awalnya temperatur



pada node titik tengah tidak terdapat perbedaan dengan node sekitar. Kemudian saat mulai terdapat pemberian panas, node titik yang mendapat panas terlebih dahulu mempunyai temperatur yang lebih tinggi dari pada temperatur node titik tengah atau dengan kata lain node titik tengah lebih dingin bila dibandingkan node yang sudah diberi penyinaran laser sehingga gradien temperatur menunjukkan nilai minus. Kemudian pada saat node titik tengah tepat mendapat panas, maka node tersebut mempunyai temperatur yang lebih tinggi dari node yang lain sehingga nilainya menjadi positif.

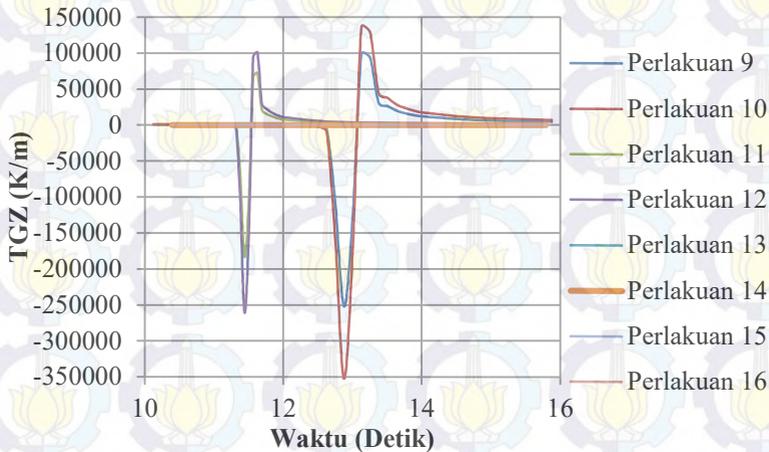
Hal ini juga terjadi pada geometri pipa persegi seperti pada pemaasan sebelumnya. Besar kecilnya nilai gradien temperatur ini dipengaruhi oleh besar daya laser yang diberikan. Dapat terlihat pada gambar 4.22 dan 4.23, perlakuan dengan daya laser 1500 W akan memiliki nilai gradien temperatur yang lebih besar bila dibandingkan dengan gradien temperatur dengan daya laser 1000 W. Hal ini disebabkan oleh panas yang diberikan oleh laser lebih besar sehingga temperatur yang dihasilkan lebih tinggi.



**Gambar 4.24** Gradien temperatur arah sumbu y terhadap waktu (Pipa Persegi Panjang *circumferential* dan *Axial*) untuk perlakuan 9 hingga perlakuan 16



Gambar 4.24 menunjukkan variasi gradien pada arah-y (kedalaman) pada titik tengah. Dapat dilihat perbedaan letak puncak dari gradien temperatur di mana pada *scanning* dengan kecepatan 10 mm/s terletak pada detik ke 13 untuk skema *axial* dan detik ke 14 untuk skema *circumferential*. Sedangkan pada kecepatan 20 mm/s terletak pada detik ke 11,5 untuk skema *axial* dan detik ke 13 untuk skema *circumferential*. Dapat dilihat bahwa *axialscan* memiliki besaran thermalgradient yang paling besar, di mana yang paling besar yaitu yang menggunakan power 1500W dan kecepatan 20 mm/s, artinya semakin besar daya maka thermalgradient semakin tinggi dan semakin tinggi kecepatan *scan* maka thermalgradient juga akan semakin tinggi karena pada kecepatan pemanasan yang lebih lambat, terdapat waktu yang lebih untuk terjadinya proses konduksi disekitar daerah pemanasan sehingga perbedaan temperatur lebih sedikit.

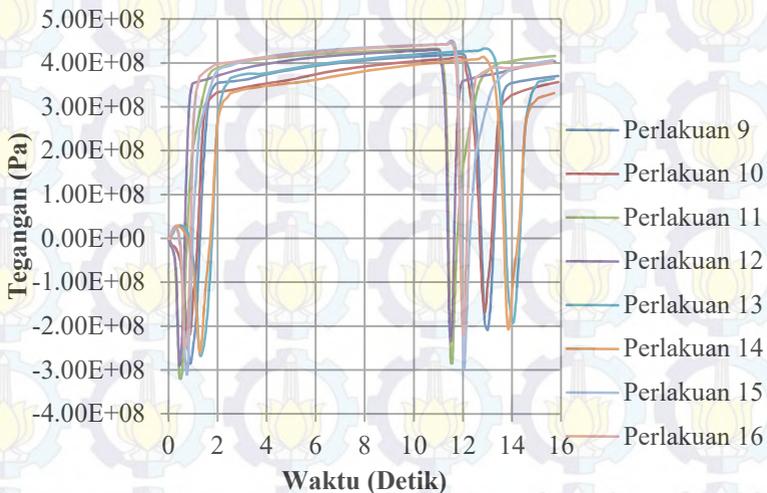


**Gambar 4.25** Gradien temperatur arah sumbu z terhadap waktu (Pipa Persegi Panjang *circumferential* dan *Axial*) untuk perlakuan 9 hingga perlakuan 16



Gambar 4.25 menunjukkan gradien termal arah sumbu z dari detik 10 sampai 16 di mana untuk jalur *axial* pada perlakuan 9 hingga 12 searah dengan arah *scan* sedangkan untuk jalur *circumferential* merupakan arah lateral sehingga berlawanan dengan thermalgradient arah x. Pola gradien thermal sumbu z menyerupai hasil thermal gradient arah x seperti pada gambar 4.22. Namun, pada nilai TGZ skema *circumferential scanning* pada percobaan 13 - 16 mendekati nol, hal ini dapat terjadi karena besaran gradien termal akan bernilai mendekati nol pada arah lateral dari *scan*. Untuk besaran yang terbesar masih sama seperti pada thermalgradient arah x dimana yang paling berpengaruh adalah daya (power) di mana semakin besar daya maka besaran dari thermalgradient akan semakin besar.

#### 4.2.2 Respon Tegangan



**Gambar 4.26** Grafik Tegangan pada arah pemanasan terhadap waktu dengan skema *axial* dan *circumferential*

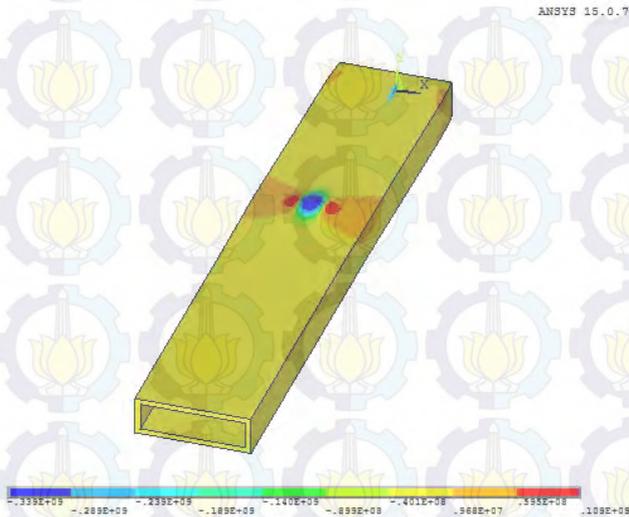


Pada grafik diatas, pola tegangan kompresif dan tensile untuk perlakuan 9 hingga perlakuan 16 memiliki pola yang sama. dimulai pada detik ke 0 dan ketika laser mendekati titik tengah pipa, perlakuan dengan *scanning speed* 20 mm/s akan mengalami compressive stress dengan puncak pada detik pertama, sementara perlakuan dengan *scanning speed* 10 mm/s akan mendapatkan puncak compressive stress pada detik kedua. Compressive stress muncul akibat efek dari node yang lain memuai akibat pemanasan dan menekan reference node. Tegangan akan bernilai paling kecil (hampir nol) ketika laser berada pada referencenode karena pada saat tersebut tercapai temperature maksimum dan material mengalami yield. Ketika beam laser meninggalkan node tersebut, node tersebut mengalami pemuaian, pemuaian ini ditandai dengan perubahan tegangan menjadi tensile stress. Tegangan pipa dengan skema *axial* memiliki nilai yang lebih kecil bila dibandingkan dengan skema *circumferential* untuk daya laser dan kecepatan pemanasan yang sama. Hal ini dapat terjadi karena skema *circumferential* memiliki jalur yang lebih panjang bila dibandingkan jalur aksial terutama pada geometri persegi panjang sehingga lebih banyak panas yang diterima oleh pipa pada jalur *circumferential*.

Berdasarkan grafik diatas, dapat dilihat perlakuan 15 dengan skema *circumferential* dengan kecepatan pergerakan laser 20 mm/s dan daya laser 1000 W memiliki tegangan tensile 451 MPa, terbesar dari perlakuan yang lain. Sementara pada skema aksial, perlakuan 11 dengan daya laser 1000 W dengan kecepatan pergerakan laser 20 mm/s memiliki tegangan tensile terbesar untuk skema aksial dengan nilai 432 Mpa. Berdasarkan keseluruhan perlakuan 8 hingga 16 terdapat pola semakin kecil tegangan kompresif maka tegangan tariknya semakin besar dan tegangan pada jalur aksial lebih kecil dari pada skema *circumferential*. Di lain pihak, besar kecilnya teganan tidak selalu mempengaruhi nilai distorsi. Hal ini disebabkan oleh pengaruh geometri pipa yang berperan terhadap pemanasan. Pada skema aksial, laser tidak melewati siku - siku pipa sementara pada skema



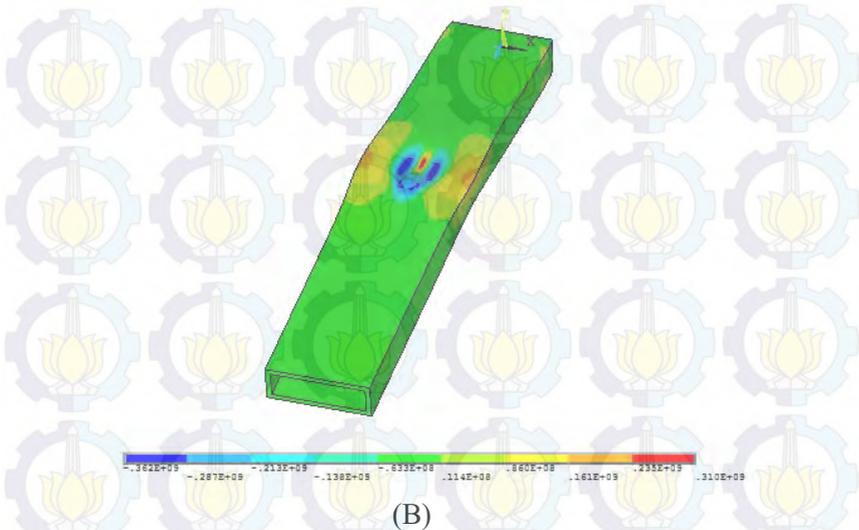
circumferential sinar laser melewati siku - siku pipa. Pada sisi siku - siku pipa, sifatnya lebih kaku bila dibandingkan sisi tengah pipa. Sehingga respon pipa terhadap pembebanan termal juga berbeda



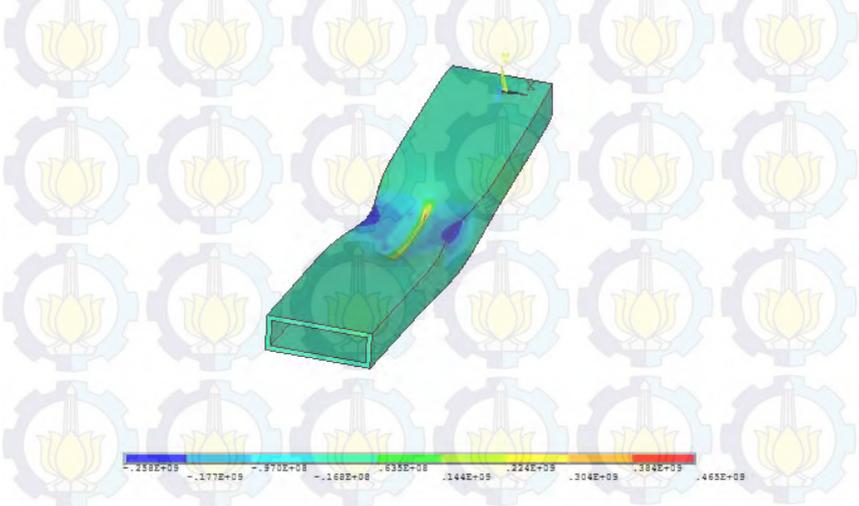
(A)



ANSYS 15.0.7



ANSYS 15.0.7





**Gambar 4.27** Distribusi tegangan pada pipa persegi panjang ( $\sigma-z$ ) pada skema aksial pada detik ke: (a) 0.125; (b) 1; (c) 138.

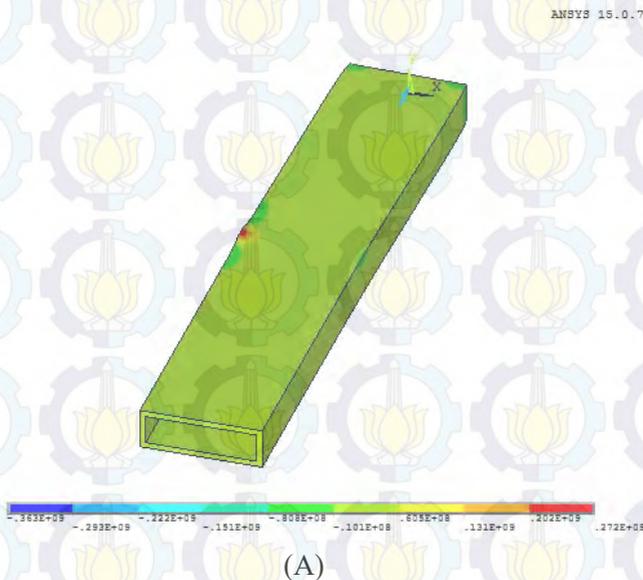
Deformasi diperbesar 100x untuk memperjelas

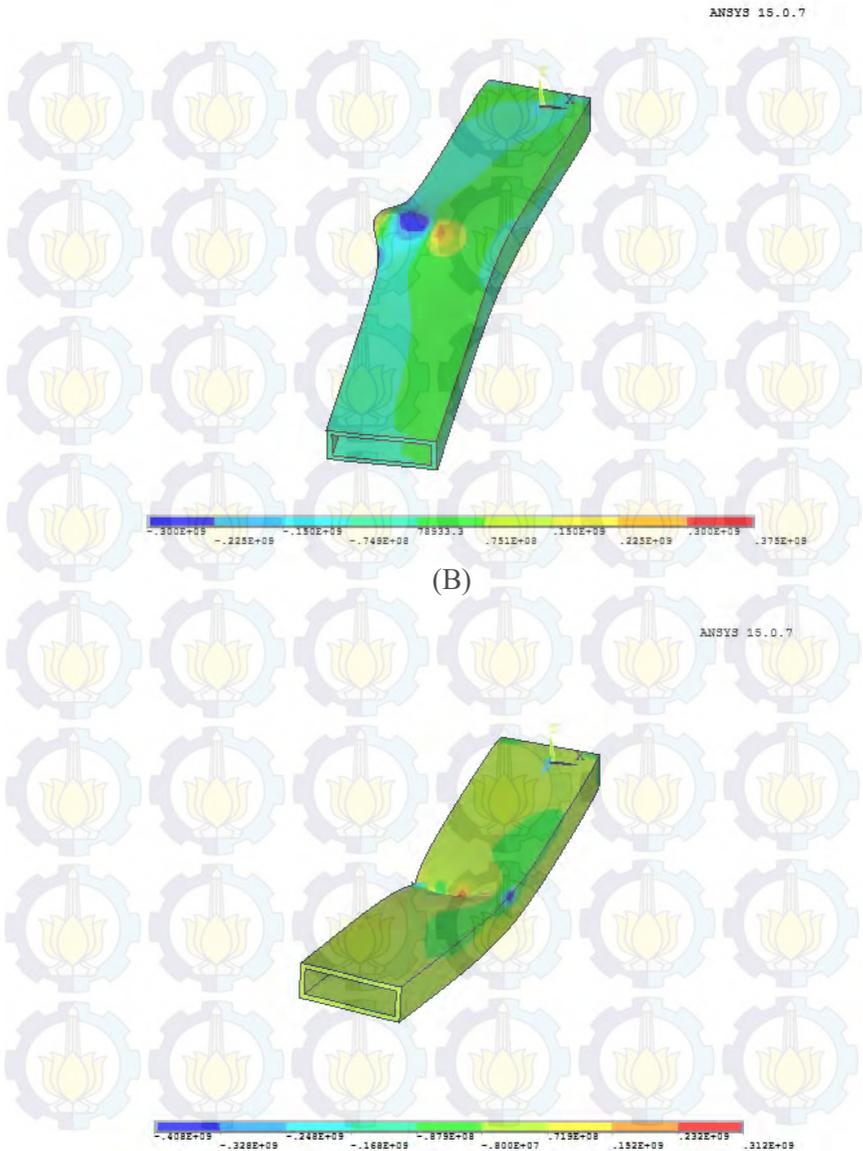
Hasil Tegangan arah sumbu  $z$  pada pipa dapat dilihat pada gambar 4.27 untuk skema *axial* dan 4.28 untuk skema *circumferential*. Pada kedua gambar bahwa yang ditampilkan adalah tegangan pada arah sumbu  $z$  karena tegangan tersebut yang akan menyebabkan perubahan secara angular pada pipa baik pada skema *circumferential* ataupun *axial*. Tegangan yang berwarna merah merupakan tegangan yang bernilai positif atau tegangan yang bersifat tegangan tarik. Selain itu, daerah tegangan warna biru yang mengindikasikan compressive stress dimana nilai tegangannya berupa negatif.

Gambar 4.27 menunjukkan distribusi tegangan pada permukaan pipa pada skema *axial* dengan daya laser sebesar 1000W dan kecepatan 10 mm/s yang dibagi menjadi tiga tahapan yang berbeda. Tahapan yang pertama yaitu berada pada awal *scanning* pada detik ke 0.125 (a). Tahap kedua pada saat *scanning* melewati tengah dari pipa pada detik pertama (b). Dan tahapan terakhir adalah ketika proses selesai dan proses pendinginan terakhir telah selesai pada detik ke 138 (c). Dapat dilihat pada gambar 4.25 (a) bahwa ketika proses pemanasan dimulai, nilai compressive stress mencapai 339 MPa pada zona yang dipanaskan dengan laser dan daerah sejalar pemanasan diakibatkan oleh tingginya ekspansi termal oleh temperature yang tinggi. Pada daerah tersebut juga terdapat deformasi lokal berupa counter bending. Sedangkan pada daerah yang berwarna merah atau disekitar dari zona biru terdapat tegangan tarik dengan nilai maksimum 113 MPa yang dihasilkan sebagai reaksi dari ekspansi termal pada daerah sekitar yang dipanasi. sehingga membatasi ekspansi termal tersebut. Gambar 4.25 (b) pada detik ke 1 terlihat adanya proses pendinginan pada titik awal pemanasan, dimana tegangan tekan yang tadi terjadi berubah menjadi tegangan tarik (maksimum 278 MPa) yang diakibatkan oleh kontraksi pada



daerah awal yang dipanaskan. Setelah proses selesai, tensile stress tetap ada pada permukaan sepanjang lintasan yang dilalui oleh laser dan membentuk sudut bending pada pipa yang dapat dilihat pada gambar 4.27 (c). Selain itu pipa melengkung keatas setelah dilakukan pendinginan. Hal ini disebabkan ketika pada pemanasan selesai, bagian atas pipa yang terkena laser lebih dahulu terjadi pendinginan dan panas dari bagian atas berpindah ke bagian bawah. Sehingga pada saat pendinginan, bagian atas mengalami kontraksi sementara bagian bawah terjadi pemuaian sehingga mendorong bagian atas pipa.







(C)

**Gambar 4.28** Distribusi tegangan pada pipa persegi panjang ( $\sigma-z$ ) pada skema *circumferential* pada detik ke: (a) 0.125; (b) 1; (c) 138. Deformasi diperbesar 100x untuk memperjelas

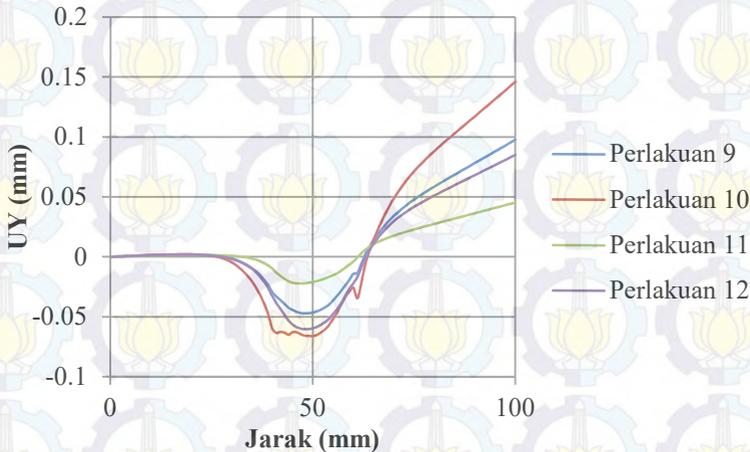
Gambar 4.28 menunjukkan distribusi tegangan pada permukaan pipa pada skema *circumferential* dengan daya laser 1000W dan kecepatan 10 mm/s yang dibagi menjadi tiga tahapan yang berbeda. Tahapan yang pertama berada pada awal *scanning* pada detik ke 0.125 (a). Tahapan kedua pada saat *scanning* melewati tengah dari pipa pada detik pertama (b). Dan tahapan terakhir adalah ketika proses selesai dan proses pendinginan terakhir telah selesai pada detik ke 138 (c). Dapat dilihat pada gambar 4.28 (a) bahwa ketika proses pemanasan dimulai, nilai compressive stress yang tertinggi tercatat 330 MPa pada zona yang dipanaskan dan daerah di sekelilingnya yang diakibatkan oleh tingginya ekspansi termal oleh temperature yang tinggi .. Gambar 4.28 (b) sudah terjadi proses pendinginan pada daerah yang telah dipanaskan sebelumnya, compressive stress yang tadi terjadi berubah menjadi tensile stress (maksimum 300 MPa) yang diakibatkan oleh kontraksi pada daerah yang dipanaskan. Setelah proses selesai, tensile stress tetap ada pada permukaan sepanjang lintasan yang dilalui oleh laser dan membentuk sudut bending pada pipa yang dapat dilihat pada gambar 4.28 (c). Distorsi dapat terlihat pada bagian tengah pipa ( $z=50\text{mm}$ ) sepanjang jalur pemanasan. Hal ini dapat terjadi akibat gradien thermal yang paling ekstrim disepanjang jalur pemanasan *circumferential*.

Berdasarkan skema aksial seperti gambar 4.25 dan skema pemanasan *circumferential* seperti pada gambar 4.26, terdapat perbedaan dalam segi distribusi tegangan dan distorsi, walaupun kedua perlakuan memiliki *scanning speed* dan daya laser yang sama. Pada skema aksial, tegangan regangan yang terjadi pada material lebih banyak terjadi pada arah sumbu z. Sementara pada skema *circumferential*, tegangan dan regangan lebih terkonsentrasi pada arah sumbu x. Kedua skema ini sama - sama



memiliki deformasi lokal pada daerah jalur pemanasan akibat konsentrasi gradien termal yang sangat tinggi.

Besar kecilnya *displacement* atau perpindahan dalam sumbu Y untuk melihat seberapa besar ujung pipa terdeformasi untuk masing masing skema percobaan dapat lebih jauh diamati pada gambar 4.29 dan gambar 4.30 berikut

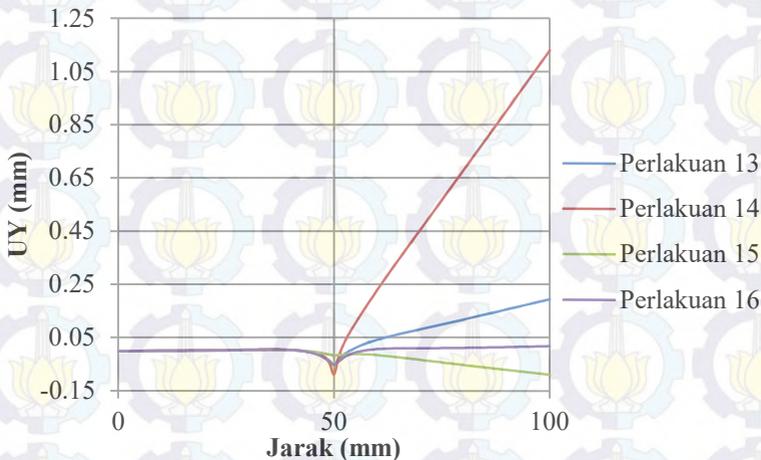


**Gambar 4.29** *Displacement* pada arah-y (bending) pada bagian atas pada skema *axial*.

Dapat dilihat dari gambar 4.29 dengan dari seluruh perlakuan dengan *scanning path*, perlakuan yang mengalami *displacement* atau perpindahan terhadap sumbu y terbesar adalah perlakuan 10 yaitu 0.146 mm yang memiliki daya paling besar 1500 w dan *scanning speed* paling rendah 10 mm/s lalu diikuti oleh perlakuan 9 yang memiliki daya lebih rendah yaitu 1000 dengan *scanning* 10 mm/s. Pada perlakuan 11 dan perlakuan 12 dengan kecepatan pemanasan 20 mm/s, perlakuan 11 dengan daya laser 1000 W memiliki nilai perpindahan UY terkecil yaitu 0.045 mm pada titik  $z=100$ mm. Berdasarkan hasil yang didapat maka dapat diambil kesimpulan bahwa dengan semakin besarnya daya



maka *displacementy* akan semakin besar sedangkan untuk kecepatan yang meningkatkan *displacementy* adalah dengan memperlambat kecepatan *scanning*



**Gambar 4.30** *Displacement* pada arah-y (bending) pada bagian atas pada skema *circumferential*.

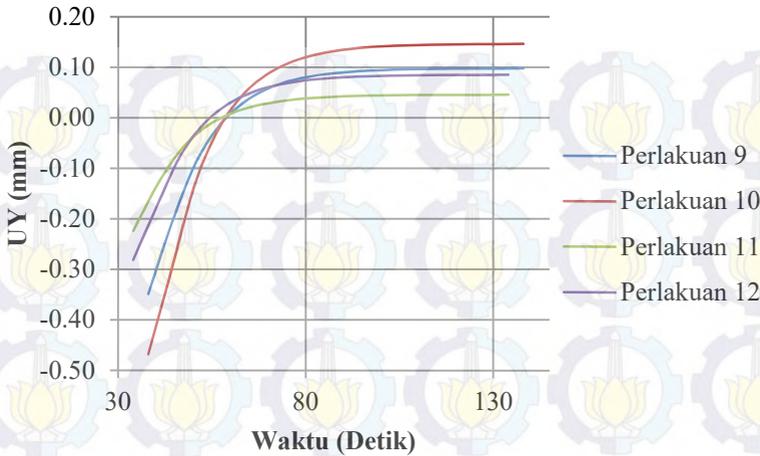
Pada skema *circumferential* pada gambar 4.30 juga memiliki pola atau urutan *displacement* yang sama yaitu perlakuan dengan power yang lebih tinggi dan kecepatan yang lebih kecil memiliki *displacement* pada sumbu y paling tinggi. Namun, pada skema *circumferential* ini, perlakuan 14 memiliki nilai UY jauh lebih besar yaitu 1,08 mm dan mengarah ke sumbu y positif. Hal ini dapat terjadi karena pipa pada perlakuan 14 ini memiliki 3 macam parameter yang mendukung. Dimana, perlakuan 6 memiliki jalur *circumferential* dengan jalur pemanasan yang lebih panjang dari pada aksial, daya laser lebih besar, dan *scanning* speed lebih rendah sehingga panas yang diterima pipa pada perlakuan 6 lebih besar ketimbang perlakuan



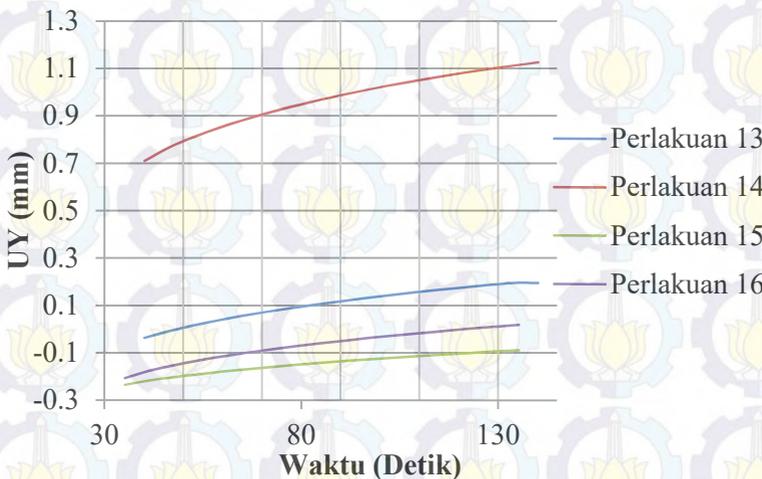
lain. Diikuti dengan perlakuan 5 yang semakin mendekati sumbu y. Dapat dilihat bahwa, jika dibandingkan dengan skema aksial, *displacement* pada skema *circumferential* ini lebih mendekati titik 0.

Hal diatas terjadi karena disebabkan oleh adanya fenomena spring back. Seperti yang dijelaskan pada subbab 4.1.2 tentang respon tegangan pada pipa persegi, fenomena spring back juga terjadi pada pipa berpenampang persegi panjang. Spring back ini merupakan posisi pipa ke posisi awal pada saat *unloading* atau pelepasan pembebanan. Pada proses pemanasan dengan jalur laser *circumferential* kali ini, sisi bagian bawah pipa mendapatkan panas yang lebih besar bila dibandingkan jalur pemanasan *axial*. Pada saat terjadi proses pendinginan akhir, panas pada bagian sisi atas pipa berpindah menuju sisi bawah pipa yang lebih dingin. Proses perpindahan panas pada pipa ini menyebabkan sisi bawah pipa memiliki temperatur yang lebih tinggi. Bagian bawah pipa yang masih memiliki temperatur yang lebih tinggi akan memuai sementara bagian atas pipa yang lebih dahulu dingin akan terjadi penyusutan atau kontraksi. Maka dari itu, terjadi perpindahan UY menuju sumbu y positif. Semakin besar panas yang diberikan, maka semakin besar pula pemuaian yang terjadi pada bagian bawah pipa. Hal ini dapat menjelaskan mengapa perlakuan 13 dan 14 dengan *scanning speed* 10mm/s memiliki nilai UY yang positif bila dibandingkan nilai UY pada perlakuan 15 dan perlakuan 16 yang memiliki *scanning speed* 20 mm/s.

Fenomena kembalinya pipa ke setelah yang terjadi pada pipa berpenampang persegi panjang dapat lebih rinci dijelaskan pada gambar 4.31 dan gambar 4.32. Berdasarkan kedua gambar dibawah, dapat diamati bahwa kedua gambar menunjukkan nilai perpindahan node yang merepresentasikan besar tekukan terhadap waktu. Pola atau tren grafik pada pipa berpenampang persegi panjang ini sama dengan tren pada pipa berpenampang segi empat.



**Gambar 4.31** Historis displacement-y pada ujung pipa persegi panjang dengan jalur pemanasan aksial



**Gambar 4.32** Historis displacement-y pada ujung pipa persegi panjang dengan jalur pemanasan *circumferential*



Pada jalur pemanasan aksial, pada awal pendinginan laju spring back atau kembalinya posisi pipa ke arah sumbu y positif berlangsung cepat hingga ke detik 60 kemudian berangsur - angsur melambat hingga tidak terjadi pergeseran. Semakin besar daya laser dan semakin rendah kecepatan sinar laser maka nilai perpindahan node dari akhir pemanasan hingga waktu pendinginan akhir semakin besar. Hal ini dapat diamati pada perlakuan 10 dan perlakuan 14 dengan daya 1500 W dan kecepatan sinar laser 10 mm/s memiliki pergeseran paling besar. Perlakuan 10 memiliki selisih terbesar yaitu bergeser 0,61 mm ke arah sumbu y positif dari titik  $y=0$  m Sementara pada perlakuan 16 dan

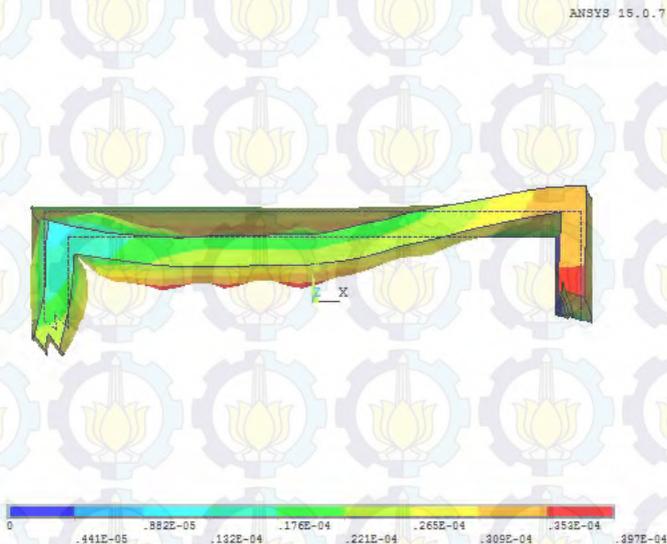


**Gambar 4.33** Profil penampang dari pipa persegi panjang pada *axial scanning* pada  $z = 50$  mm

Pada gambar 4.33 dapat dilihat bahwa pada *axial scan* terdapat bentuk distorsi yang simetris. Pada bagian jalur pemanasan memiliki cekungan kedalam dan pada dinding bagian dalam terdapat tonjolan yang lancip kedalam pipa. Selain itu pada



sisi pinggir kiri dan kanan pipa yang tidak terkena pemanasan langsung cenderung miring ke sisi dalam pipa pada bagian atasnya.



**Gambar 4.34** Profil penampang dari pipa pada *circumferential scanning* pada  $z = 50$  mm

Sedangkan dari gambar 4.34 pada *circumferential scanning* terlihat adanya distorsi yang asimetris. Ketiga sisi mempunyai bentuk yang cekung ke dalam pipa. Namun pada sisi atas pipa, cekungan tidak tepat pada sumbu  $x=0$  tetapi bergeser ke sumbu  $x$  negatif. Hal ini membuat sisi kanan pipa naik ke arah sumbu  $y$  positif dan sisi kiri pipa turun ke arah  $y$  negatif. Hal ini terjadi karena sisi luar pipa yang terlebih dahulu diberi pemanasan adalah sisi sebelah kiri, sehingga pada saat mulai pendinginan sisi sebelah kanan memiliki temperatur lebih tinggi dari pada sisi kiri. Kemudian membuat sisi sebelah kanan pipa memuai dan sisi sebelah kiri menyusut dalam waktu yang bersamaan. Dapat dilihat dari kedua jenis pemanasan *axial* dan



*circumferential*, sisi yang terkena panas langsung cenderung cekung kedalam. Hal ini disebabkan oleh adanya jalur pemanasan pada sisi luar pipa. Dengan adanya pemanasan pada bagian luar, bagian dalam mengalami tensile stress sementara pada bagian luar yang terpanasi langsung mengalami compressive stress. Selain itu, dapat dilihat pada gambar 4.33 bahwa nilai distorsi maksimum pada dinding bagian dalam bergeser 0,079 mm kedalam pipa dan pada skema *circumferential* yang terlihat pada gambar 4.34 nilai distorsi maksimum terdapat pada sisi kanan pipa yaitu terjadi pergeseran 0,039 mm dari titik awal. Deformasi lokal yang terdapat pada jalur pemanasan yang berupa kerutan dapat dihilangkan dengan proses machining.

Dalam penampang pipa persegi panjang ini dapat diambil perlakuan mana yang terbaik untuk dilakukan laser forming. Untuk skema axial, perlakuan yang memiliki nilai displacement UY terbesar adalah perlakuan 10 yaitu kombinasi daya laser 1500W dengan kecepatan 10 mm/s dengan nilai 0,097 mm, tegangan yang tercatat 420 MPa, nilai tegangan tersebut nomor rendah pada kategori aksial. Kemudian untuk skema *circumferential*, perlakuan yang memiliki nilai displacement UY terbesar adalah perlakuan 14 dengan nilai 1,12 mm. Perlakuan 14 ini memiliki daya laser 1500 W dan kecepatan 10 mm/s dengan nilai tegangan maksimum 414 MPa dimana tegangan tersebut merupakan tegangan terendah dari kategori *circumferential*.

### 4.3 Analisa Sensitivitas

Untuk mengetahui pengaruh jumlah elemen yang ditentukan dari hasil meshing terhadap solusi hasil permodelan dalam tulisan ini yaitu terhadap termal dan struktur dalam bentuk distribusi temperature, distribusi tegangan dan hasil *displacement* diperlukan analisa sensitivitas. Variasi meshing yang digunakan untuk menentukan sensitivitas ini ada tiga, yaitu normal, halus dan sangat halus, normal adalah meshing yang digunakan, halus adalah meshing yang lebih halus dan sangat

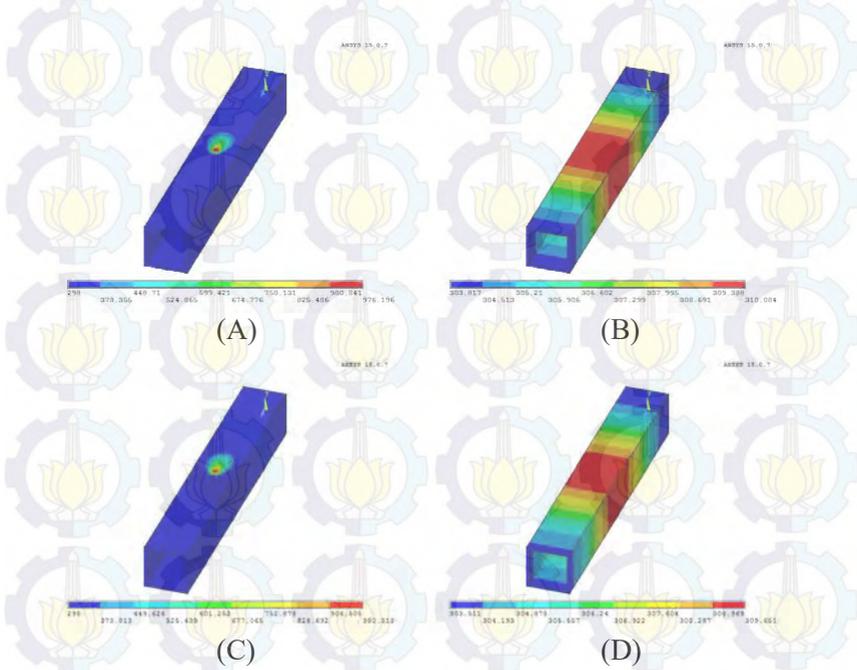


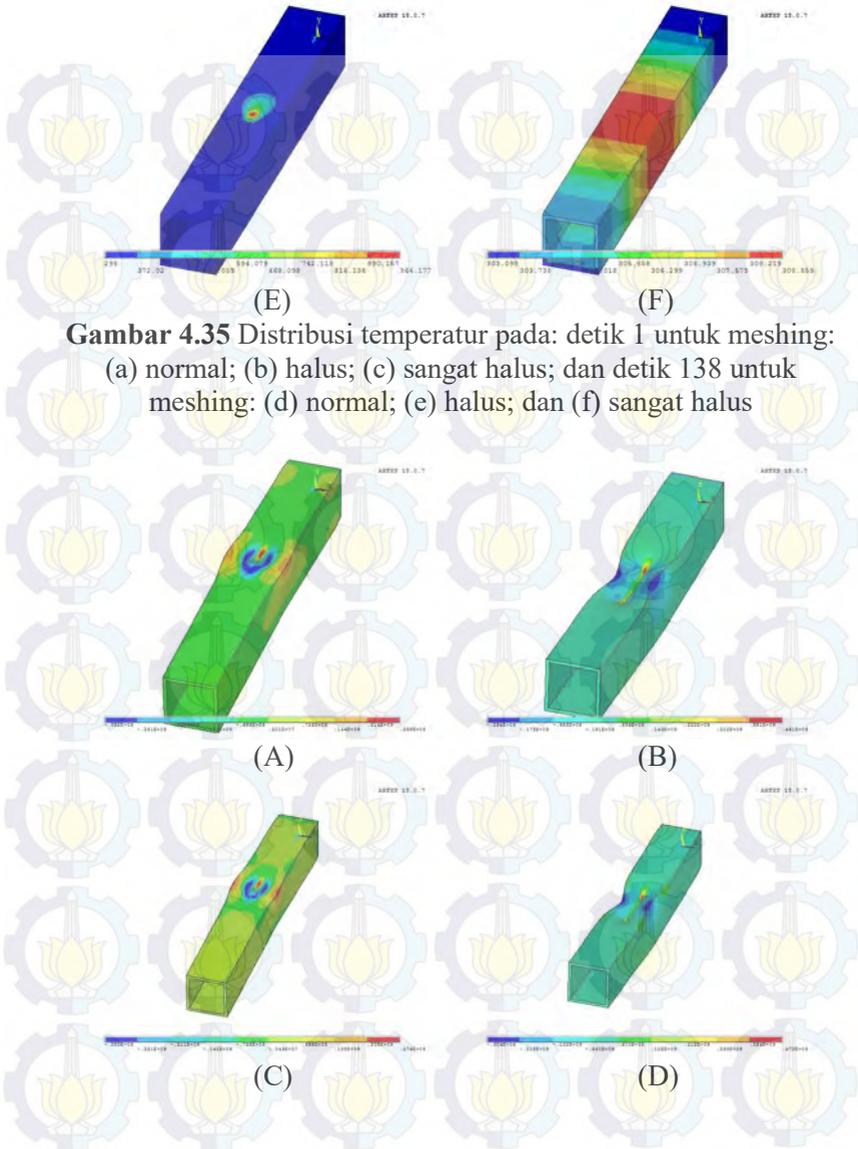
halus adalah meshing yang paling halus. Jumlah elemen untuk masing-masing meshing dapat dilihat pada tabel 4.3 dibawah ini.

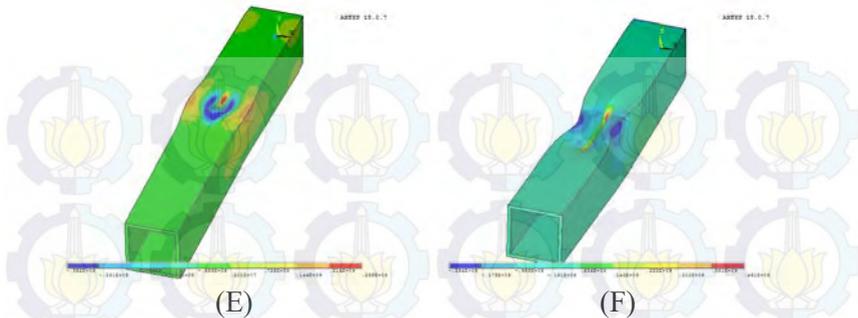
Tabel 4.3 Jumlah elemen yang digunakan

Mesh	Jumlah Elemen
Normal	14904
Halus	15824
Sangat Halus	18654

Gambar 4.35 dibawah merupakan perbandingan temperatur antar meshing, dapat dilihat perbedaan antara meshing normal, halus dan sangat halus dimana tidak terdapat perbedaan yang signifikan dengan perubahan elemen.







**Gambar 4.36** Distribusi tegangan arah sumbu-z pada detik 1 pada meshing: (a) normal; (b) halus; (c) sangat halus; dan detik ke 138 untuk meshing: (d) normal; (e) halus; dan (d) sangat halus.

Melihat gambar 4.34 diatas yang merupakan perbandingan tegangan antar meshing, terdapat perbedaan yang tidak terlalu besar dan tidak signifikan, pola distribusi tegangan pun masih memiliki pola yang sama antar meshing.

Berdasarkan analisis termal dan struktur untuk masing-masing meshing, meshing jenis normal dapat diaplikasikan dalam penelitian ini karena jumlah elemen tidak berpengaruh besar terhadap hasil perlakuan dan meshing normal ini memiliki kelebihan efisiensi waktu dalam menjalankan simulasi permodelan.



## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa:

1. Bentuk penampang persegi persegi panjang memberikan nilai UY yang merepresentasikan tekukan pada pipa lebih tinggi bila dibandingkan dengan bentuk penampang persegi, nilai UY maksimum yang tercatat adalah 1,129 mm. Kemudian, bentuk persegi memiliki nilai tegangan maksimum yang lebih rendah bila dibandingkan dengan bentuk persegi panjang, dengan nilai tegangan maksimum terendah 397 Mpa.
2. Daya laser yang lebih tinggi mengakibatkan temperatur maksimum dan gradien temperatur yang lebih tinggi. Hal tersebut mengakibatkan distorsi pipa yang lebih tinggi juga. Daya laser 1500W memberikan nilai UY paling tinggi sebesar 1,129 mm dengan kombinasi jalur *circumferential*, kecepatan *scanning* 10 mm/s serta tegangan maksimum 414 MPa pada pipa persegi panjang
3. *Scanning* speed lebih lambat membuat panas yang diterima pipa lebih besar. Semakin lambat kecepatannya maka distorsi yang dihasilkan lebih besar. Kecepatan *scanning* 10 mm/s pada pipa persegi panjang mengakibatkan nilai UY paling tinggi sebesar 1,129 mm dan tegangan maksimum 414 Mpa dengan daya laser 1500W.
4. Jalur pemanasan yang lebih panjang mengakibatkan panas yang diterima pipa semakin tinggi sehingga nilai UY yang dihasilkan lebih besar. Namun pada jalur aksial mengakibatkan fenomena *spring back* yang lebih tinggi.



## 5.2 Saran

Untuk penelitian selanjutnya, ada beberapa saran yang dapat diperhatikan, yaitu:

1. Melakukan eksperimen *laser forming* sesuai dengan permodelan yang telah dilakukan.
2. Melakukan penelitian lebih lanjut dengan menggunakan kombinasi jalur aksial dan *circumferential*.
3. Melakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh panjang lintasan yang dilalui oleh sinar laser.
4. Dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh ketebalan dan panjang pipa terhadap hasil laser forming



### DAFTAR PUSTAKA

- Hao, N., dan L. Li. 2003. "An analytical model for laser tube bending". **Applied Surface Science** 208-209: 432-436
- Hao, N., dan L. Li. 2003. "Finite element analysis of laser tube bending process". **Applied Surface Science** 208-209: 437-441
- He, Yang, Li Heng, Zhang Zhiyoung, Zhan Mei, Liu Jing dan Li Guangjun. 2012. "Advances and Trends on Tube Bending Forming Technologies". **Chinese Journal of Aeronautics** 25: 1-12
- Hsieh, Hsieh-Shen, dan Jehnming Lin. 2004. "Thermal-mechanical analysis on the transient deformation during pulsed laser forming". **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 44: 191-199
- Hsieh, Hsieh-Shen, dan Jehnming Lin. 2005. "Study of the buckling mechanism in laser tube forming". **Optics & Laser Technology** 37: 402-409
- Hsieh, Hsieh-Shen, dan Jehnming Lin. 2005. "Study of the buckling mechanism in laser tube forming with axial preloads". **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 45: 1368-1374
- Incropera, F.P., dan D.P. Dewitt. 2002. **Fundamentals of heat and mass transfer** 5<sup>th</sup> edition. New York: John Wiley & Sons, inc.
- Jamil, M.S. Che, E.R. Imam Fauzi, C.S. Juinn, dan M.A. Sheikh. 2015. "Laser bending of pre-stressed thin-walled nickel micro-tubes". **Optics & Laser Technology** 73: 105-117



- Jung, Hyung-Chul. 2006. **A Study on Laser Forming Processes with Finite Element Analysis**. Christchurch: University of Canterbury
- Kyrsanidi, An.K, Th.B. Kermanidis, dan Sp.G. Pantelakis. 2000. "An analytical model for the prediction of distortion caused by the laser forming process". **Journal of Materials Processing Technology** 104: 94-102
- Lee, Kun-Chou, dan Jehnming Lin. 2002. "Transient deformation of thin metal sheets during pulsed laser forming". **Optics & Laser Technology** 34: 639-648
- Maji, Kuntal, Ruchir Shukla, dan A.K. Nath. 2013. "Experimental investigations and statistical analysis of pulsed laser bending of AISI 304 stainless steel sheet". **Optics & Laser Technology** 49: 18-27
- Menecek, Stanislav, Tomas Muzik, dan Michal Misek. 2012. "Differences between laser and arc welding of HSS steels" **Physics Procedia** 39 ( 2012 ) 67 – 74
- Safdar, Shakeel, Lin Li, M.A. Sheikh, dan Zhu Liu. 2006. "Finite element simulation of laser tube bending: Effect of scanning schemes on bending angle, distortions and stress distribution". **Optics & Laser Technology** 39: 1101-1110
- Safdar, Shakeel, Lin Li, M.A. Sheikh, dan Zhu Liu. 2007. "The Effect of Nonconventional Laser Beam Geometries on Stress Distribution and Distortion in Laser Bending of Tubes". **Journal of Manufacturing Science and Engineering** vol. 129 (6): 592-600
- Shen, Hong, dan Frank Vollertsen. 2009. "Modelling of laser forming – An Review". **Computational Material Science** 46: 834-840



Shi, Yongjun, Hong Shen, Zhenqiang Yao, dan Jun Hu. 2007. "Temperature gradient mechanism in laser forming of thin plates". **Optics & Laser Technology** 39: 858-863

Sonief, Arief. 2005. **Diktat Metode Elemen Hingga**. Malang: Universitas Brawijaya

Yanjin, Guan, Sun Sheng, Zhao Guoqun, dan Luan Yiguo. 2005. "Influence of material properties on the laser-forming process of sheet metals". **Journal of Material Processing Technology** 167: 124-131

Yilbas, B.S., dan S.S. Akhtar. 2014. "Laser bending of metal sheet and thermal stress analysis". **Optics & Laser Technology** 61: 34-44

Zhang, Jie, Peng Cheng, Wenwu Zhang, Michael Graham, Jerry Jones, Marshall Jones, dan Y. Lawrence Yao. 2006. "Effect of Scanning Schemes on Laser Tube Bending". **Journal of Manufacturing Science and Engineering** vol. 128 (2):20-33

Zhang, Lu, dan P. Michaleris. 2004. "Investigation of Lagrangian and Eulerian finite element methods for modelling the laser forming process". **Finite Element in Analysis and Design** 40: 383-405





## BIOGRAFI PENULIS



Penulis bernama lengkap Ida Bagus Putra dilahirkan di kota Jakarta pada tanggal 12 Juli 1994. Penulis merupakan anak pertama dari 2 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal mulai dari SD, SMP, dan SMA Santa Laurensia. Setelah lulus SMA pada tahun 2012, penulis melanjutkan studinya di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya tepatnya Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri.

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif di organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Material (HMMT) FTI-ITS Surabaya sebagai staf departemen Keprofesian dan Kesejahteraan Mahasiswa HMMT-FTI ITS (2013-2014) dan staf departemen Pengabdian Masyarakat Tim Pembina Kerohanian Hindu (2013-2014) kemudian di kepengurusan selanjutnya penulis menjabat sebagai staf ahli departemen Pengabdian Masyarakat TPKH ITS (2014-2015)

Pencapaian yang pernah diraih oleh penulis semasa kuliah di ITS adalah finalis *National Scientific Paper Competition* (UI 2013), *International Business Competition* (ITS 2014), Program Mahasiswa Wirausaha ITS (BRI 2014) dan Beasiswa Peningkatan Prestasi Akademik (ITS 2015). Akhir kata bila ada kritik dan saran yang ingin disampaikan bisa dikirim ke email penulis : **bagus.anandya@gmail.com**

