



TUGAS AKHIR - TL141584

Analisis Elemen Hingga Pada Proses Bending Pipa Berpenampang Lingkaran dan Elips dengan Laser

Felix Andiana Putra
NRP 2712 100 085

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 ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL141584

Finite Element Analysis on Laser Bending Process of Circular And Elliptical Tube

Felix Andiana Putra
NRP 2712 100 085

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

MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING DEPARTEMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**ANALISIS ELEMEN HINGGA PADA PROSES BENDING
PIPA BERPENAMPANG LINGKARAN DAN ELIPS
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 :

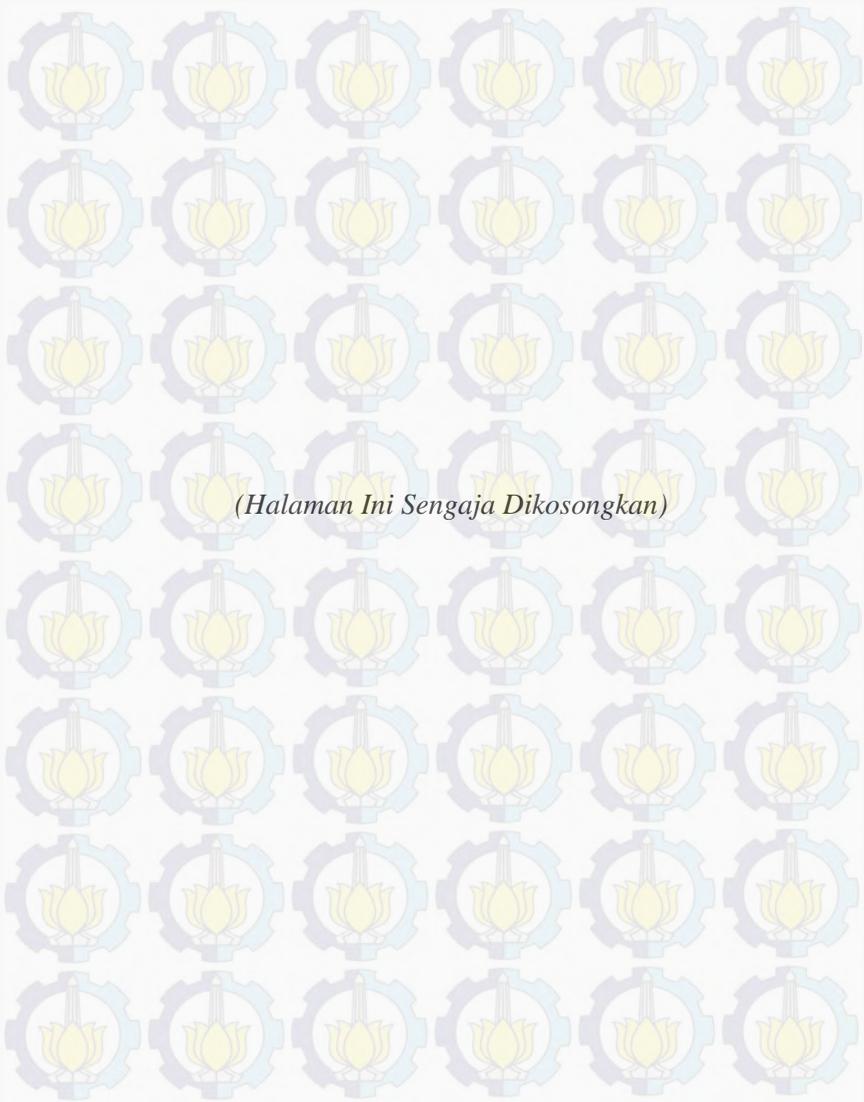
FELIX ANDIANA PUTRA

NRP. 2712100085

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir :

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





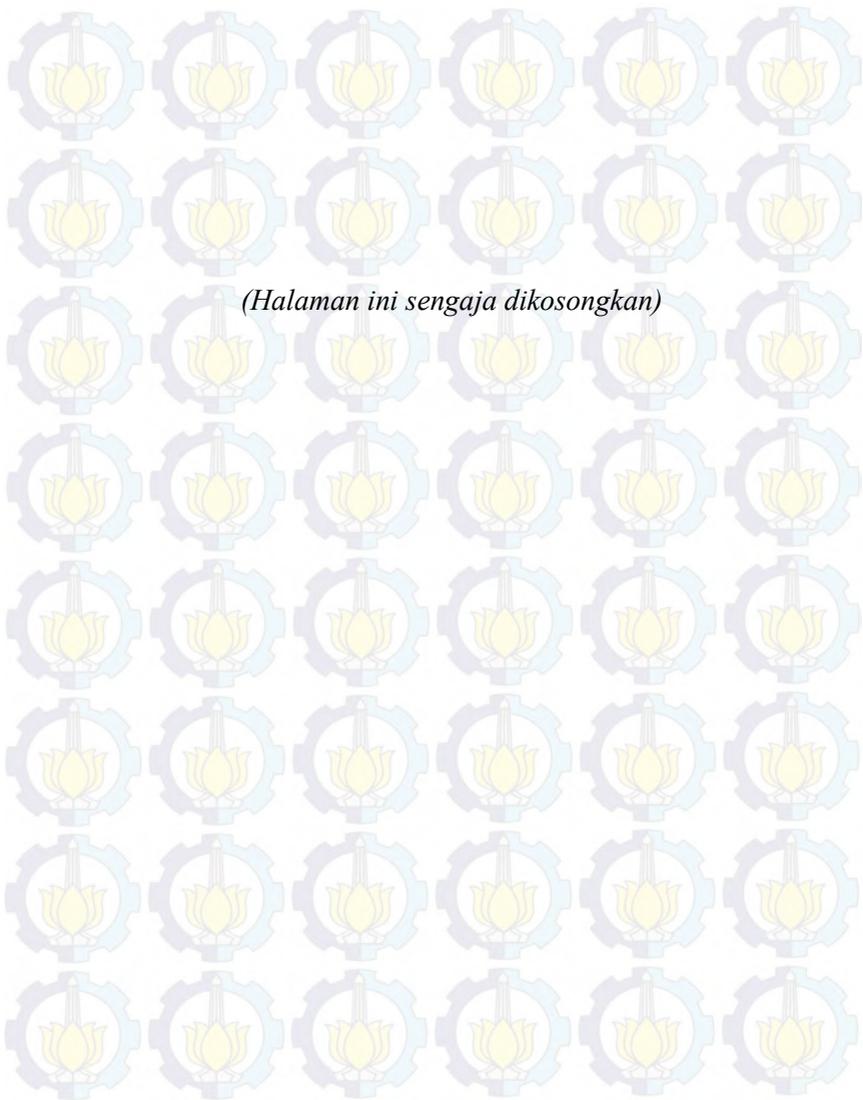
ANALISIS ELEMEN HINGGA PADA PROSES BENDING PIPA BERPENAMPANG LINGKARAN DAN ELIPS DENGAN LASER

Nama : Felix Andiana Putra
NRP : 2712100085
Jurusan : Teknik Material & Metalurgi
Dosen Pembimbing : Mas Irfan P.H., S.T., M.Sc., Ph.D.
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.

Abstrak

Proses bending pada pipa merupakan suatu proses yang penting pada bidang manufaktur produk perpipaan. Akhir-akhir ini dikembangkan suatu metode terbaru dalam proses bending yaitu proses bending dengan menggunakan sumber panas berupa sinar laser. Akan tetapi untuk melakukan eksperimen dengan menggunakan metode ini, memerlukan biaya yang besar dan memakan waktu yang lama, oleh karena itu penelitian dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga. Material yang dipakai adalah AISI 304L stainless steel karena penggunaannya yang cukup luas. Terdapat variasi yang dilakukan dalam penelitian ini yaitu yang pertama adalah bentuk penampang lingkaran dan elips dengan ratio radius pertama 1.5 kali radius lingkaran dan radius kedua 0.5 kali radius lingkaran, lalu variasi lainnya adalah laser power, scanning speed, scanning path masing-masing dua variasi. Dari simulasi yang dilakukan didapatkan hasil yang menghasilkan tegangan, distorsi dan bend angle terbesar adalah skema axial dengan power 2000W scanning speed 10 mm/s dengan nilai 637 MPa untuk pipa circular dan 759 untuk elips dan yang terendah adalah skema circumferential power 1000W speed 20mm/s dengan nilai tegangan 50 MPa untuk circular dan 246 MPa untuk elips.

Kata Kunci: *Analisa elemen hingga, laser forming, laser bending, laser power, scanning path, scanning speed, pipa, advanced manufacture*



FINITE ELEMENT ANALYSIS ON LASER BENDING PROCESS OF CIRCULAR AND ELLIPTICAL TUBE

Name : Felix Andiana Putra
SRN : 2712100085
Major : Material and Metallurgical Engineering Dept
Advisor : Mas Irfan P.H., S.T., M.Sc., Ph.D.
Lectures Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.

Abstract

Tube bending is an important manufacturing of pipe products. Recently developed a latest method of bending process, namely laser forming that's used heat source of laser beam. But, to make an experiment with this method, it's needed expensive cost and not time efficient. Therefore, it's done by doing some experiments by finite element method. Material used in this simulation is stainless steel AISI 304L because it's most widely used. There are some variations used in this simulation, first is the geometry of the tube, the first one is circular and the other one is elliptical. The other variations are laser power, scanning speed, and scanning path (axial and circumferential). The result is the highest residual stress was produced by the combination of axial scanning with 2000W power, 10 mm/s speed with value of 637 MPa for circular tube and 759 MPa for elliptical tube. The lowest stress was produced by combination of circumferential scan with 1000W power and 20 mm/s speed with value 50 MPa for circular tube and 246 MPa for elliptical tube.

Keywords: *Finite Element Analysis, laser forming, laser bending, laser power, scanning path, scanning speed, tube advanced manufacture*



DAFTAR ISI

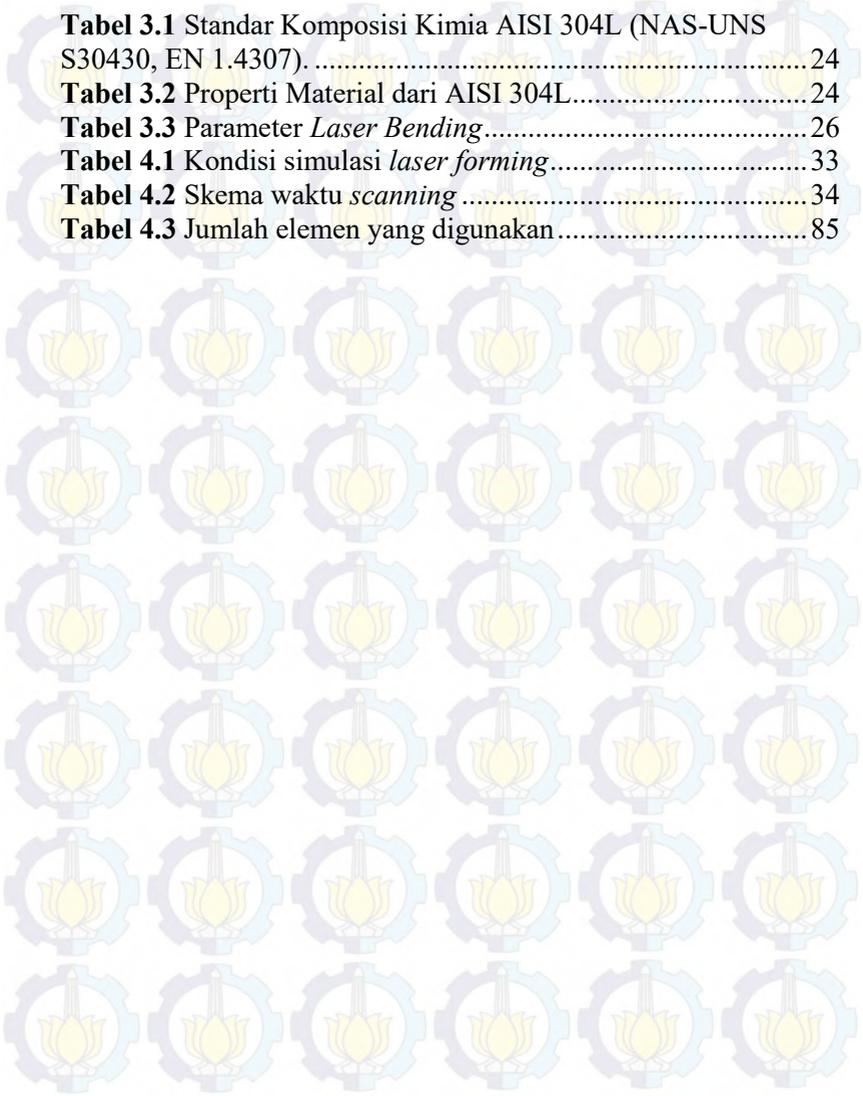
LEMBAR JUDUL	i
TITLE	iii
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN	
I.1. Latar Belakang	1
I.2. Rumusan Permasalahan	3
I.3. Batasan Masalah	3
I.4. Tujuan	4
I.5. Manfaat	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
II.1. Pemodelan <i>Bending</i> Pipa dengan Menggunakan Laser..	5
II.2. Mekanisme <i>Bending</i> dengan <i>Laser Forming</i>	10
II.3. Metode Elemen Hingga	17
II.3.1. Perpindahan Panas dalam FEM	18
BAB III METODOLOGI	
III.1. Metode Penelitian	23
III.2. Spesifikasi Material dan Parameter <i>Laser Bending</i>	24
III.2.1. Material Pipa	24
III.2.2. Geometri Pipa	24
III.2.3. Parameter <i>Laser Bending</i>	25
III.3. Peralatan	26
III.4. Proses Penelitian	26
III.4.1. Pemodelan pipa	27
III.4.2. Pemodelan material properties	29
III.4.3. Pemodelan <i>boundary condition</i>	30
III.4.4. Pemodelan tipe pembebanan	30

III.4.5. Tipe analisa	31
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	
IV.1. Pipa <i>Circular</i>	35
IV.1.1. Respon Termal.....	35
IV.1.2. Respon Tegangan.....	47
IV.2. Pipa Elips	61
IV.2.1. Respon Termal.....	61
IV.2.2. Respon Tegangan.....	71
IV.3. Analisis Sensitivitas	85
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
V.1. Kesimpulan.....	89
V.2. Saran.....	90
DAFTAR PUSTAKA	91
BIODATA PENULIS	95



DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Standar Komposisi Kimia AISI 304L (NAS-UNS S30430, EN 1.4307).....	24
Tabel 3.2 Properti Material dari AISI 304L.....	24
Tabel 3.3 Parameter <i>Laser Bending</i>	26
Tabel 4.1 Kondisi simulasi <i>laser forming</i>	33
Tabel 4.2 Skema waktu <i>scanning</i>	34
Tabel 4.3 Jumlah elemen yang digunakan	85





(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Grafik <i>bending angle</i> vs: (a) <i>scanning speed</i> ; dan (b) <i>laser power</i> . (Li, 2001).	6
Gambar 2.2 Representasi dari skema <i>scanning</i> dan tegangan. (Safdar 2007).....	7
Gambar 2.3 Skema dari <i>scanning schemes</i> : (a) <i>Circumferential scanning</i> ; dan (b) <i>Axial scanning</i> . (Zhang, 2006)	8
Gambar 2.4 Grafik <i>bending angle</i> vs: (a) <i>yield strength</i> ; (b) <i>specific heat</i> ; (c) koefisien muai termal; (d) konduktivitas panas; (e) densitas; dan (f) modulus <i>young</i> . (Yanjin, 2005).....	9
Gambar 2.5 Skema <i>laser forming</i> dengan <i>axial scanning</i> . (Safdar, 2007).....	10
Gambar 2.6 Model geometri sederhana untuk analisis analitik dengan pendekatan energy: (a) pemanasan; dan (b) pendinginan. (Jung, 2006).....	12
Gambar 2.7 Tahapan pada BM: a) pemberian tegangan termal oleh sinar laser; b) munculnya <i>buckling</i> (tekukan) akibat tegangan termal; c) munculnya deformasi plastis dan elastis; d) meningkatnya <i>bend angle</i> (sudut tekukan) (Jung, 2006).....	13
Gambar 2.8 Proses <i>laser forming</i> akibat <i>upsetting mechanism</i> (Jung, 2006).....	14
Gambar 2.9. Mekanisme proses <i>laser forming</i> (Jung, 2006).....	15
Gambar 2.10 Gambar skema <i>laser tube bending</i> . (Zhang, 2006).	15
Gambar 2.11 konfigurasi <i>laser tube forming</i> ; (a) Geometri asal; (b) tegangan dan <i>displacement</i> pada mekanisme <i>buckling</i> pada <i>laser forming</i> ; (c) penjelasan <i>bending angle</i> pada pipa. (Hsieh, 2005).....	16
Gambar 2.12 Ilustrasi skema dari mekanisme <i>upsetting</i> pada <i>axial scanning</i> . (Jung, 2006)	17
Gambar 2.13 Proses Pengerjaan pada Metode Elemen Hingga.	17
Gambar 2.14 Perpindahan panas yang terjadi pada proses <i>laser forming</i> . (Jung,2006)	19
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	23

Gambar 3.2 a) Geometri pipa lingkaran b) Geometri pipa elips c) Dimensi penampang lingkaran d) Dimensi penampang elips	25
Gambar 3.3 Diagram alir pemodelan menggunakan metode elemen hingga.....	27
Gambar 3.4 Hasil <i>meshing</i> pada pipa berpenampang lingkaran	28
Gambar 3.5 Hasil <i>meshing</i> pada pipa berpenampang elips.....	29
Gambar 3.6 Material properties yang di-input.....	29
Gambar 4.1 Distribusi temperatur pada: (a) detik 1; (b) detik 2; (c) detik 12; (d) detik 37; (e) detik 38; dan (f) 138. <i>Case 1 (Axial Scanning)</i>	36
Gambar 4.2 Distribusi temperatur pada: (a) detik 1; (b) detik 2; (c) detik 12; (d) detik 37; (e) detik 38; dan (f) 138. <i>Case 5 (Circumferential Scanning)</i>	37
Gambar 4.3 Temperatur vs waktu untuk <i>axial scanning</i> pipa <i>circular</i>	39
Gambar 4.4 Temperatur vs waktu (<i>Scan</i> kedua) untuk <i>axial scanning</i> pipa <i>circular</i>	39
Gambar 4.5 Temperatur vs waktu untuk <i>circumferential scanning</i> pipa <i>circular</i>	41
Gambar 4.6 Temperatur vs waktu (<i>Scan</i> kedua) untuk <i>circumferential scanning</i> pipa <i>circular</i>	42
Gambar 4.7 <i>Thermal Gradient</i> arah-x Vs Waktu.....	43
Gambar 4.8 <i>Thermal Gradient</i> arah-y Vs Waktu.....	44
Gambar 4.9 <i>Thermal Gradient</i> arah-z Vs Waktu	45
Gambar 4.10 Representasi dari konsep perkembangan tegangan.....	46
Gambar 4.11 Distribusi tegangan pada arah <i>scanning</i>	48
Gambar 4.12 Distribusi tegangan pada pipa (σ_z) pada skema aksial pada detik ke: (a) 0.125; (b) 1; (c) 138. Deformasi diperbesar 100x untuk memperjelas	49
Gambar 4.13 Distribusi tegangan pada pipa (σ_z) pada skema <i>circumferential</i> pada detik ke: (a) 0.125; (b) 1; (c) 138. Deformasi diperbesar 100x untuk memperjelas	50
Gambar 4.14 <i>Displacement</i> pada arah-y (<i>bending</i>) pada bagian atas pada skema <i>axial</i>	53

Gambar 4.15 <i>Displacement</i> pada arah-y (<i>bending</i>) pada bagian atas pada skema <i>circumferential</i>	54
Gambar 4.16 Historis <i>displacement-y</i> pada ujung pipa circular.	55
Gambar 4.17 <i>Displacement</i> arah-x (<i>lateral bending</i>) <i>top path</i> ..	56
Gambar 4.18 <i>Displacement</i> arah-x (<i>lateral bending</i>) <i>side path path</i>	57
Gambar 4.19 Profil penampang dari pipa pada <i>axial scanning</i> pada $z = 50$ mm	59
Gambar 4.20 Profil penampang dari pipa pada <i>circumferential scanning</i> pada $z = 50$ mm.....	59
Gambar 4.21 Distribusi temperatur pada: (a) detik 1; (b) detik 2; (c) detik 12; (d) detik 37; (e) detik 38; dan (f) 138. <i>Case 1 (Axial Scanning)</i>	62
Gambar 4.22 Distribusi temperatur pada: (a) detik 1; (b) detik 2; (c) detik 12; (d) detik 37; (e) detik 38; dan (f) 138. <i>Case 5 (Circumferential Scanning)</i>	63
Gambar 4.23 Temperatur vs waktu (<i>Scan</i> kedua) untuk <i>axial scanning</i> pipa elips	65
Gambar 4.24 Temperatur vs waktu (<i>Scan</i> kedua) untuk <i>circumferential scanning</i> pipa elips.....	67
Gambar 4.25 <i>Thermal Gradient</i> arah-x Vs Waktu.....	68
Gambar 4.26 <i>Thermal Gradient</i> arah-y Vs Waktu.....	69
Gambar 4.27 <i>Thermal Gradient</i> arah-z Vs Waktu.....	70
Gambar 4.28 Historis distribusi tegangan pada arah <i>scanning</i> ..	71
Gambar 4.29 Distribusi tegangan pada pipa (σ_z) pada skema aksial pada detik ke: (a) 0.125; (b) 1; (c) 138. Deformasi diperbesar 50x untuk memperjelas.	73
Gambar 4.30 Distribusi tegangan pada pipa (σ_z) pada skema <i>circumferential</i> pada detik ke: (a) 0.125; (b) 1; (c) 138. Deformasi diperbesar 50x untuk memperjelas	74
Gambar 4.31 <i>Displacement</i> pada arah-y (<i>bending</i>) pada bagian atas pada skema <i>axial</i>	77
Gambar 4.32 <i>Displacement</i> pada arah-y (<i>bending</i>) pada bagian atas pada skema <i>circumferential</i>	78
Gambar 4.33 Historis <i>displacement-y</i> pada ujung pipa elips.....	79

Gambar 4.34 Displacement arah-x (<i>lateral bending</i>) top path ..	80
Gambar 4.35 Displacement arah-x (<i>lateral bending</i>) side path path.....	81
Gambar 4.36 Profil penampang dari pipa pada <i>axial scanning</i> pada z = 50 mm	82
Gambar 4.37 Profil penampang dari pipa pada <i>circumferential</i> <i>scanning</i> pada z = 50 mm.....	83
Gambar 4.38 Distribusi temperatur pada: detik 1 untuk <i>meshing</i> : (a) normal; (b) <i>finer</i> ; (c) <i>finest</i> ; dan detik 138 untuk <i>meshing</i> : (d) normal; (e) <i>finer</i> ; dan (f) <i>finest</i>	86
Gambar 4.39 Distribusi tegangan arah sumbu-z pada detik 1 pada <i>meshing</i> : (a) normal; (b) <i>finer</i> ; (c) <i>finest</i> ; dan detik ke 138 untuk <i>meshing</i> : (d) normal; (e) <i>finer</i> ; dan (d) <i>finest</i>	87



BAB I

PENDAHULUAN

Pada bab ini akan dibahas hal-hal mengenai latar belakang, rumusan masalah, batasan penelitian, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

I.1. Latar Belakang

Proses *bending* pada pipa sangat penting pada proses manufaktur *boiler*, permesinan, *heat exchanger*, dan produk-produk perpipaan. Proses *bending* pada pipa dapat dilakukan baik secara hot atau *cold working*, pada proses *cold working* produk yang dihasilkan akan lebih rigid. Proses hot working biasanya digunakan pada proses *bending* untuk radius *bending* yang kecil dan diameter pipa yang besar yang sulit dilakukan dalam kondisi dingin. Proses *bending* secara mekanik memiliki keterbatasan yaitu tidak dapat melakukan *bending* dengan radius *bending* yang kecil dikarenakan penipisan material pada bagian luar dari pipa (*extrados*), yang menyebabkan adanya tegangan yang memungkinkan terjadinya kegagalan (*failure*). Untuk mengatasi permasalahan tersebut maka diperlukan peralatan yang lebih kompleks seperti *pressure bending*, tetapi proses ini dapat menyebabkan terjadinya *buckling* pada *intrados* (bagian dalam tekukan yang bersentuhan dengan *die*). Keterbatasan lainnya dari proses *bending* secara mekanik adalah sulit memproses material yang keras dan getas (*brittle*). Di samping itu terdapat radius *bending* minimum sebuah pipa dapat diproses *bending* secara mekanik yang dikarenakan adanya kemungkinan terjadinya *tensile failure*. Radius minimum ini berbanding lurus dengan diameter luar dan berbanding terbalik dengan regangan dari material, oleh karena itu material yang akan diproses *bending* dengan radius *bending* yang kecil harus diproses *annealing* terlebih dahulu agar keuletannya meningkat.

Pada beberapa tahun terakhir, telah dikembangkan suatu metode terbaru dalam proses *bending* yaitu laser *forming*. Sinar

laser dapat dikontrol lebih presisi jika dibandingkan dengan sumber panas lainnya seperti plasma. Laser *forming* merupakan proses pembentukan yang dilakukan tanpa adanya kontak (*noncontact forming*) dan proses yang tidak menimbulkan efek *spring-back* (*spring-back-free*). Proses ini tidak memerlukan gaya eksternal sehingga tidak dibutuhkan peralatan-peralatan yang dijumpai pada proses *bending* secara mekanik. Proses *bending* terjadi akibat adanya deformasi plastis dari tegangan termal yang timbul dari siklus termal secara terus menerus dari sinar laser yang tidak linear. Ada lima keuntungan dari proses dengan menggunakan laser *forming* ini (Jung, 2006), di antaranya: 1) proses yang lebih fleksibel karena tidak menggunakan *hard tooling*, 2) deformasi lebih presisi karena tidak ada efek *spring-back* sehingga kualitas produk lebih baik, 3) proses dapat dilakukan pada area-area yang tidak dapat dilakukan oleh proses mekanik karena laser *forming* merupakan *noncontact forming*, 4) dapat dilakukan untuk material yang keras dan getas, 5) dapat digunakan untuk bentuk yang kompleks dan rumit dengan mengatur pola iradiasi. Selain itu Jung juga mengemukakan tiga kerugian dari proses ini di antaranya: 1) prosesnya agak lambat dibandingkan dengan proses mekanik, 2) menggunakan banyak energi karena sumber dari laser memiliki faktor konversi energi yang rendah, 3) butuh peralatan keselamatan dari pantulan dari sinar laser yang sangat berbahaya.

Penelitian terbaru dari laser *forming* telah banyak dilakukan dengan proses dengan menggunakan pemanasan dengan garis lurus (*straight-line heating*). Akan tetapi penelitian seperti itu memakan waktu yang banyak dan menggunakan biaya yang besar dan juga memiliki keterbatasan dalam hasil yang meluas karena banyak variabel yang harus diatur. Selain itu mekanisme pembentukan dengan laser sendiri belum dapat dijelaskan dengan penuh secara empiris karena prosesnya yang masih kompleks, deformasi termal dipengaruhi oleh parameter-parameter seperti laser *power*, *scanning speed*, *beam diameter*, *scan pattern*, dan *material properties* serta geometri dari material yang digunakan.

Untuk menganalisis perilaku yang ditimbulkan dari proses *laser forming* dan mengkarakterisasi kualitas dari bagian yang dibentuk, pendekatan secara numerik sangat dibutuhkan. Analisa numerik juga digunakan untuk melihat pengaruh perubahan *input* yang digunakan terhadap proses yang berlangsung. Terakhir, karena informasi dari sifat mekanik dan termal dari *laser forming* yang tidak dapat dianalisis dengan menggunakan eksperimen karena sangat kompleks sehingga dilakukan dengan menggunakan analisa numerik.

I.2. Rumusan Permasalahan

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

1. Bagaimana pengaruh geometri penampang pipa (lingkaran dan elips) terhadap distorsi dan distribusi tegangan pada proses *bending* pipa?
2. Bagaimana pengaruh *laser power* terhadap distorsi dan distribusi tegangan pada proses *bending* pipa?
3. Bagaimana pengaruh *scanning speed* terhadap distorsi dan distribusi tegangan pada proses *bending* pipa?
4. Bagaimana pengaruh *scanning path* terhadap distorsi dan distribusi tegangan pada proses *bending* pipa?

I.3. Batasan Masalah

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. Waktu pendinginan berhenti pada detik ke 138.

6. Panas yang timbul akibat *strain energy* akibat deformasi plastis diabaikan karena sangat kecil dibandingkan dengan *input* panas dari sinar laser
7. Efek Bauschinger diabaikan

Efek dari *creep* diabaikan karena tidak ada siklus beban termal yang terlibat

I.4. Tujuan

Tujuan yang diangkat dalam penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh geometri penampang pipa (lingkaran dan elips) terhadap distorsi dan distribusi tegangan pada proses *bending* pipa.
2. Menganalisis pengaruh *laser power* terhadap distorsi dan distribusi tegangan pada proses *bending* pipa.
3. Menganalisis pengaruh *scanning speed* terhadap distorsi dan distribusi tegangan pada proses *bending* pipa.
4. Menganalisis pengaruh *scanning path* terhadap distorsi dan distribusi tegangan pada proses *bending* pipa.

I.5. Manfaat

Adapun manfaat yang dapat diambil dari penelitian ini yaitu sebagai referensi pengembangan dalam proses manufaktur lanjut (*advanced manufacturing process*) dalam dunia industri dan sebagai referensi untuk peneliti-peneliti berikutnya dalam membuat prototipe dari metode ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

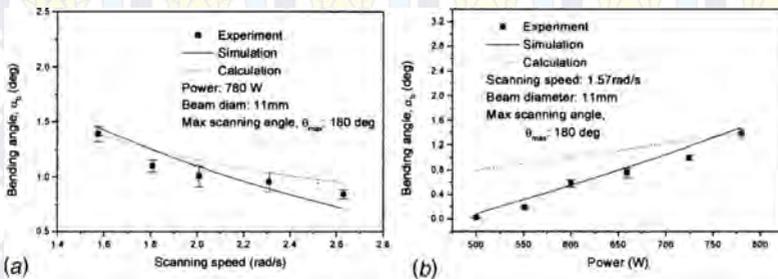
Pada penelitian ini, proses *bending* dengan menggunakan laser bertujuan untuk menekukkan pipa dengan sudut tertentu tanpa menggunakan proses secara mekanik. Mekanisme terjadinya tegangan sisa dan distorsi dari proses *bending* yang dilakukan akan dijelaskan bersama analisa numerik yang dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga pada Bab II di bawah.

II.1. Pemodelan *Bending* Pipa dengan Menggunakan Laser

Hao (2003) melakukan sebuah studi mengenai analisis elemen hingga pada proses *bending* pipa dengan menggunakan laser. Analisis yang dilakukan adalah analisis elemen hingga termal-mekanik *transient* untuk menginvestigasi tegangan dan regangan yang terjadi selama proses laser *bending*. Simulasi dari sinar laser yang bergerak *dimodelkan* dengan beban dengan waktu tertentu. Pada penelitiannya, Hao menggunakan pipa baja karbon rendah yang salah satu ujungnya dijepit dan pada proses *bending* kemudian pipa dirotasikan 180° pada sumbu aksial dengan kecepatan yang berbeda-beda dengan ukuran sinar laser 5 sampai 10 kali dari tebal pipanya. Hasil dari percobaan yang dilakukan Hao menunjukkan bahwa pada daerah yang terkena panas, ekspansi termal yang terjadi akan berubah menjadi plastic *compressive strain* (regangan tekan plastis) akibat restriksi pada daerah di sekitarnya. Hal ini menyebabkan *intrados* (bagian dalam tekukan) menjadi lebih pendek dibandingkan *extrados* (bagian luar tekukan) setelah proses pendinginan dan akan pipa akan menekuk akibat perbedaan panjang antara *intrados* dan *extrados*. Hao juga menemukan adanya tegangan sisa pada *intrados* yang diakibatkan pada distribusi temperatur yang tidak merata selama proses *scanning*.

Li (2001) melakukan sebuah penelitian tentang mekanisme, analisis, dan prediksi pada *laser bending* pipa. Penelitian tersebut menggunakan pipa AISI 1010. Variasi yang dilakukan meliputi

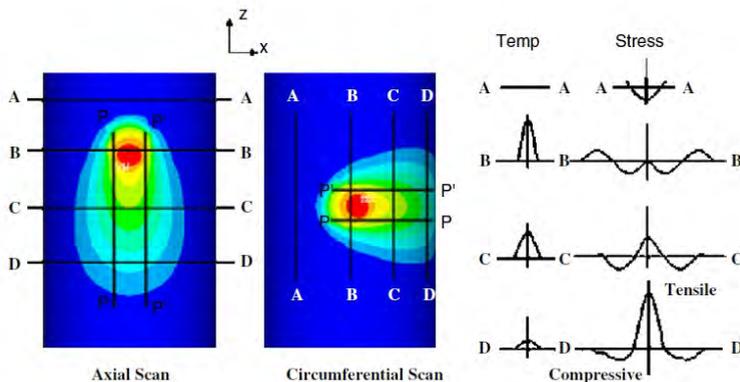
laser *power*, *scanning speed*, diameter sinar, sudut *scanning* maksimum dan rasio diameter dengan tebal. Hasil dari simulasi yang dilakukan oleh Li di antaranya adalah, *bending angle* akan semakin kecil seiring dengan penambahan *scanning speed* sedangkan akan naik seiring dengan penambahan *laser power*. Hal tersebut dikarenakan dengan bertambahnya *scanning speed* maka temperatur pada *heat affected zone* (HAZ) akan berkurang, dengan berkurangnya temperatur maka koefisien absorpsi akan berkurang sehingga *specific heat* dan koefisien muai termal akan meningkat sehingga akan menimbulkan perbedaan panjang antara daerah yang terkena dampak dari panas dan yang tidak, sedangkan dengan penambahan *laser power* maka temperatur akan meningkat sehingga terjadi hal yang berlawanan dengan yang terjadi di atas. Gambar 2.1 berikut merupakan grafik pengaruh *scanning speed* dan *laser power* terhadap *bending angle*.



Gambar 2.1 Grafik *bending angle* vs: (a) *scanning speed*: dan (b) *laser power*. (Li, 2001)

Safdar (2007) meneliti mengenai efek dari *scanning schemes* terhadap *bending angle*, distorsi dan distribusi tegangan pada AISI 304L. Skema yang diteliti ada dua yaitu *axial scanning* dan *circumferential scanning*. Hasil dari percobaan tersebut adalah *axial scanning* menghasilkan sudut tekukan (*bending angle*) dua kali lebih besar dibandingkan dengan *circumferential scanning*. Dengan demikian jumlah *scan* dapat dikurangi dan proses akan semakin cepat, selain itu dengan jumlah *scan* yang lebih sedikit

maka akan memperbaiki sifat korosi dari material. *Axial scanning* menghasilkan distorsi yang lebih sedikit di permukaan bagian dalam dibandingkan dengan *circumferential scanning* di mana hal ini sangat berguna pada penggunaan pipa untuk aliran. Meskipun pada *circumferential scanning* menghasilkan *bending angle* yang lebih kecil tetapi ada keuntungannya sendiri yaitu dengan banyaknya jumlah *scan* yang digunakan akan mempengaruhi sifat korosi dari material. Jadi *scanning schemes* yang berbeda dapat dipakai pada aplikasi yang berbeda untuk hasil yang lebih optimum. Gambar 2.2 di bawah merupakan representasi dari *axial* dan *circumferential scanning* dan pengaruhnya terhadap tegangan.

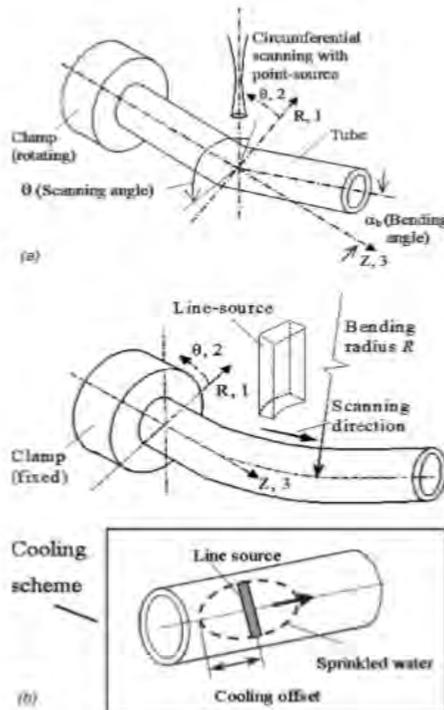


Gambar 2.2 Representasi dari skema *scanning* dan tegangan. (Safdar 2007)

Safdar (2007) juga meneliti efek dari geometri dari sinar laser terhadap distorsi dan distribusi tegangan pada proses *laser bending* pipa. Safdar menemukan bahwa geometri sinar laser dapat dijadikan parameter untuk memanipulasi distribusi tegangan untuk mengoptimasi proses dari *laser bending* pada pipa. Sinar laser dengan bentuk donut menghasilkan *lateral bending* yang paling kecil. Meskipun sinar berbentuk lingkaran menghasilkan *bending angle* yang lebih besar tetapi distorsi yang dihasilkan jauh lebih besar dibandingkan dengan bentuk-bentuk lainnya. Sinar laser berbentuk segitiga menghasilkan distorsi yang paling kecil pada

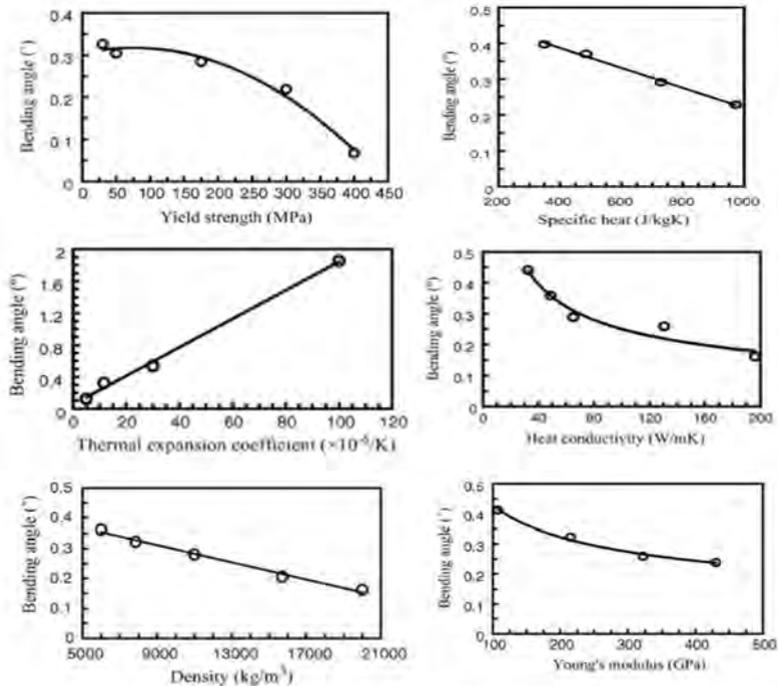
permukaan bagian dalam di mana hal ini sangat berguna pada penggunaan aliran dalam pipa. Di sisi lainnya sinar berbentuk persegi panjang menghasilkan distorsi yang paling kecil di permukaan bagian luar. Ini menandakan bahwa geometri sinar laser yang berbeda dapat digunakan untuk aplikasi yang berbeda.

Selain Safdar, Zhang (2006) juga telah meneliti sebelumnya mengenai pengaruh *scanning schemes* pada proses *laser tube bending*. Gambar 2.3 berikut merupakan skema dari *scanning schemes* baik *axial scanning* maupun *circumferential scanning*.



Gambar 2.3 Skema dari *scanning schemes*: (a) *Circumferential scanning*; dan (b) *Axial scanning*. (Zhang, 2006)

Zhang menemukan bahwa mekanisme yang mendominasi adalah *upsetting mechanism*. Dan skema *axial scanning* lebih baik di sisi konsumsi daya maupun waktu proses dibandingkan dengan *circumferential scanning*. Selain itu *ovality* yang terjadi pada *axial scanning* lebih besar dibandingkan dengan *circumferential scanning*.



Gambar 2.4 Grafik *bending angle* vs: (a) *yield strength*; (b) *specific heat*; (c) koefisien muai termal; (d) konduktivitas panas; (e) densitas; dan (f) modulus *young*. (Yanjin, 2005)

Yanjin (2005) juga meneliti mengenai pengaruh sifat material baik termal maupun mekanik terhadap proses *laser forming*. Hasil dari penelitiannya adalah yang pertama, material dengan modulus elastisitas yang kecil dan *yield strength* yang kecil akan

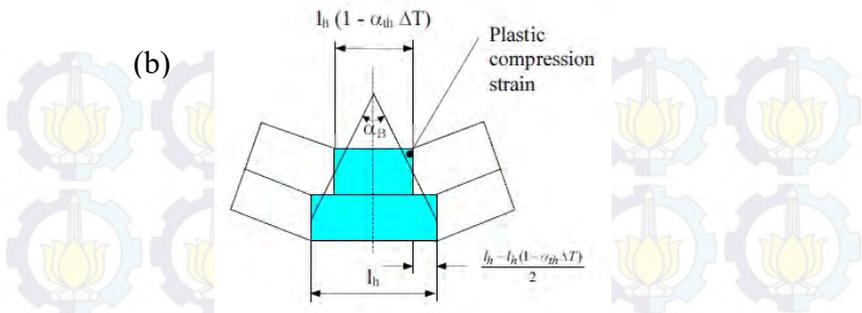
menghasilkan *bending angle* yang besar dimana *bending angle* lebih sensitif terhadap *yield strength*. Lalu yang kedua koefisien muai termal berbanding lurus dengan *bending angle*, ketika koefisien muai termal mendekati nol maka *bending angle* juga mendekati nol. Koefisien termal ini merupakan factor yang sangat mempengaruhi mekanisme dari *laser bending*. Ketiga, koefisien konduktivitas panas yang kecil sangat membantu untuk membentuk gradien temperatur yang tajam, dan membuat *bending angle* meningkat ketika parameter lain dibuat konstan. Hubungan antara *bending angle* dan konduktivitas panas ini adalah fungsi logaritmik. Grafik pengaruh sifat material baik termal maupun mekanik terhadap *bending angle* dapat dilihat pada gambar 2.4.

Hao (2003) meneliti mengenai pengaruh *laser power* dan jumlah iradiasi terhadap *bending angle*. Hasilnya adalah dengan bertambahnya *laser power* maka *bending angle* juga akan meningkat sedangkan untuk jumlah iradiasi tidak memiliki hubungan yang linier dengan *bending angle*.

Němeček (2012) memberikan perbedaan antara metode laser dengan *welding* konvensional. Perbedaan antara lain panas yang diberikan lebih kecil daripada metode konvensional yang menghasilkan lebih sedikit batas butir yang kasar pada daerah HAZ dan juga daerah HAZ lebih kecil. Adapun keuntungan dari proses dengan menggunakan laser dari *welding* konvensional antara lain, daerah HAZ yang lebih kecil, tegangan termal yang kecil dan distorsi yang kecil. Proses yang dilakukan proses laser juga dapat diotomisasi sehingga mudah dikontrol jika dibandingkan dengan proses konvensional dan juga proses laser tidak memberikan beban tekanan pada benda uji.

II.2. Mekanisme *Bending* dengan *Laser Forming*

Skema dari percobaan *laser bending* dapat dilihat pada gambar 2.5 di bawah.



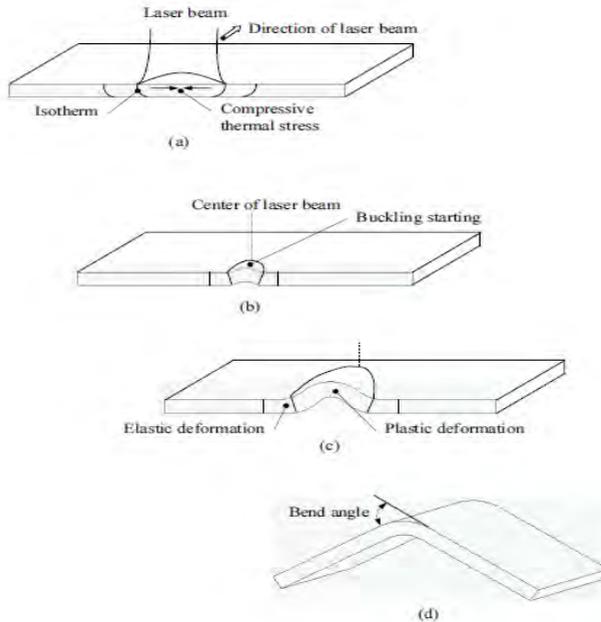
Gambar 2.6 Model geometri sederhana untuk analisis analitik dengan pendekatan energy: (a) pemanasan; dan (b) pendinginan. (Jung, 2006)

2. *Buckling Mechanism (BM)*

Terjadi dengan mengurangi *feed rate* dan menaikkan diameter sinar laser untuk menghindari *gradient temperature* yang tinggi seperti yang terjadi pada mekanisme TGM di atas. Arah tekukan tidak berubah selama proses pemanasan dan pendinginan sehingga arah tekukan tidak ditentukan oleh proses. Mekanisme ini dilakukan pada *bending pipa*. Arah *bending* bergantung pada:

- *Boundary condition*
- *Internal stress*
- *External force*

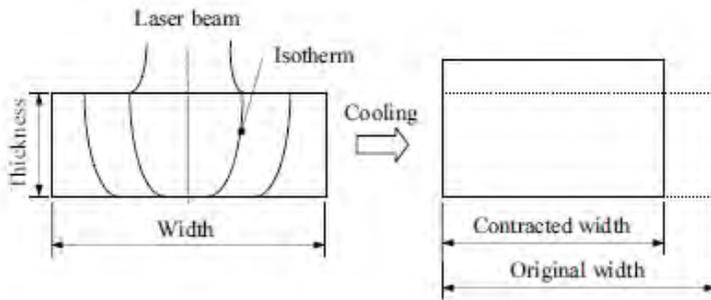
Adapun tahap-tahap pada mekanisme ini dapat dilihat pada gambar 2.7 di bawah.



Gambar 2.7 Tahapan pada BM: a) pemberian tegangan termal oleh sinar laser; b) munculnya *buckling* (tekukan) akibat tegangan termal; c) munculnya deformasi plastis dan elastis; d) meningkatnya *bend angle* (sudut tekukan) (Jung, 2006)

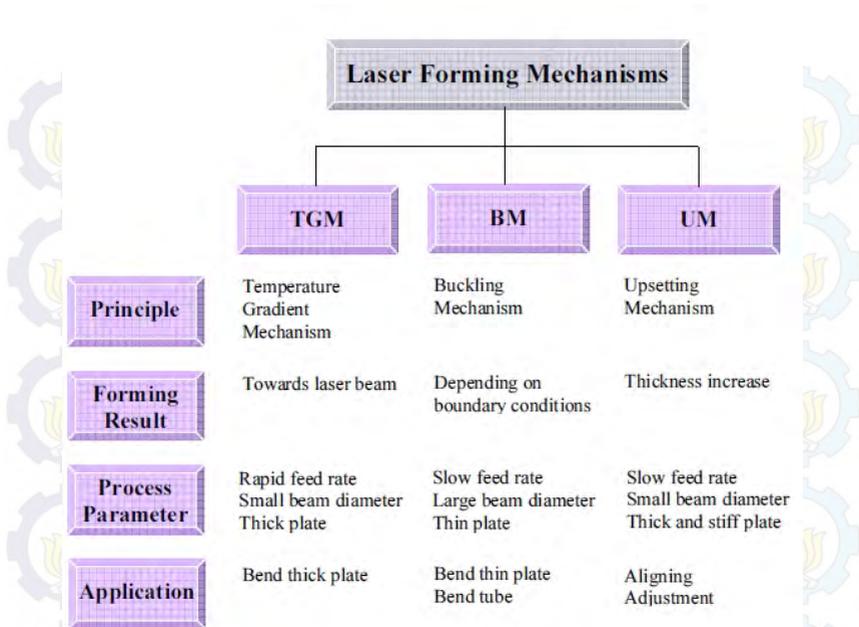
3. *Upsetting Mechanism* (UM)

Mekanisme ini terjadi di mana logam bertambah panjang pada arah ketebalan selama proses pemanasan dan berkontraksi pada arah panjang selama pendinginan, di mana yang paling berpengaruh pada mekanisme ini adalah distribusi temperatur selama proses. Gambar 2.8 menjelaskan tentang mekanisme ini.

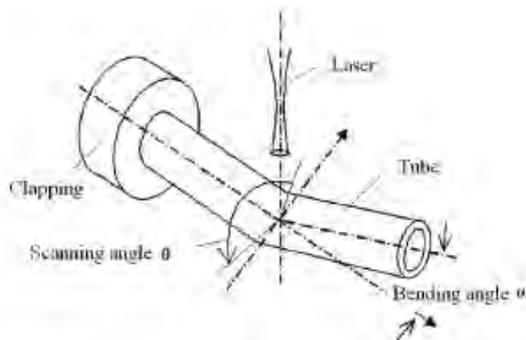


Gambar 2.8 Proses *laser forming* akibat *upsetting mechanism* (Jung, 2006)

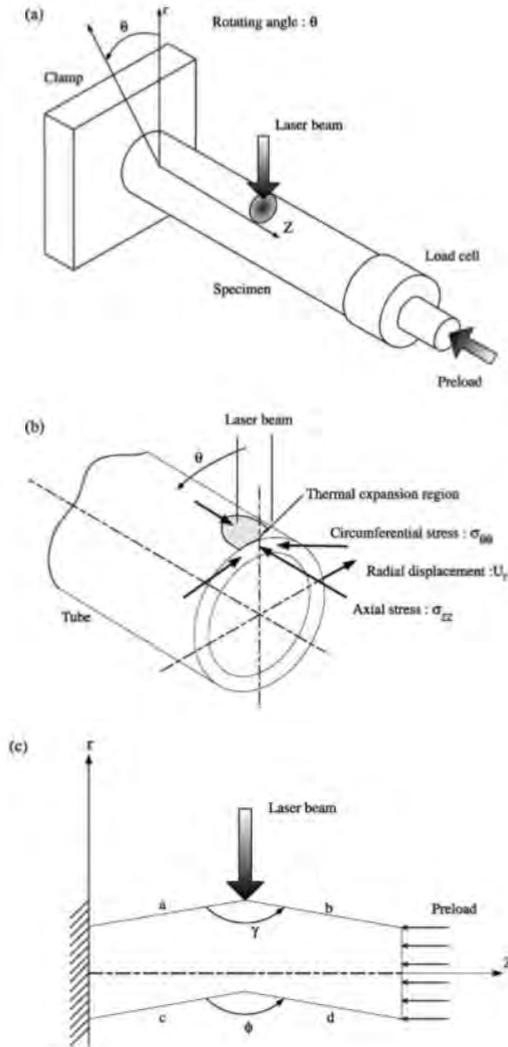
Gambar 2.9 merupakan ringkasan mekanisme untuk proses *laser forming*. Sedangkan untuk skema *bending* pada pipa dengan laser dapat dilihat pada gambar 2.10. Pada skema tersebut nantinya pipa dirotasi 180 derajat dan diameter sinar laser harus lebih besar dari tebal pipa tapi tidak boleh terlalu jauh berbeda juga. Hasilnya, daerah yang dikenai sinar akan lebih homogen pada arah ketebalan dan akan mengalami *strain compressive plastic deformation* akibat dari ekspansi termal yang terjadi pada daerah sekitarnya. Gambar 2.11 di bawah merupakan gambar mekanisme *buckling* yang terjadi pada pipa. Sedangkan untuk mekanisme *upsetting* pada proses *bending* pipa dapat dilihat pada gambar 2.12



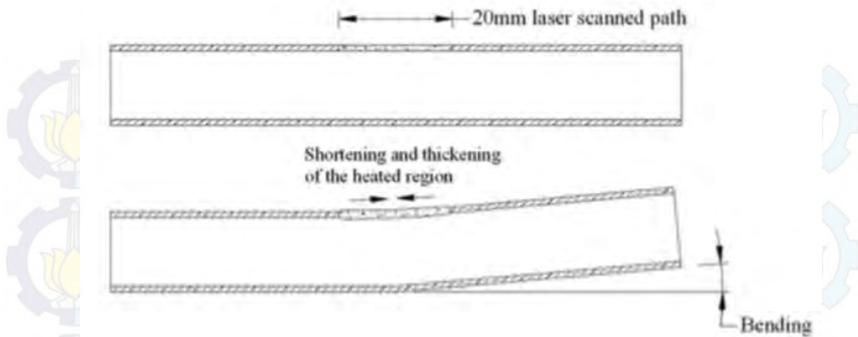
Gambar 2.9. Mekanisme proses *laser forming* (Jung, 2006)



Gambar 2.10 Gambar skema *laser tube bending*. (Zhang, 2006)

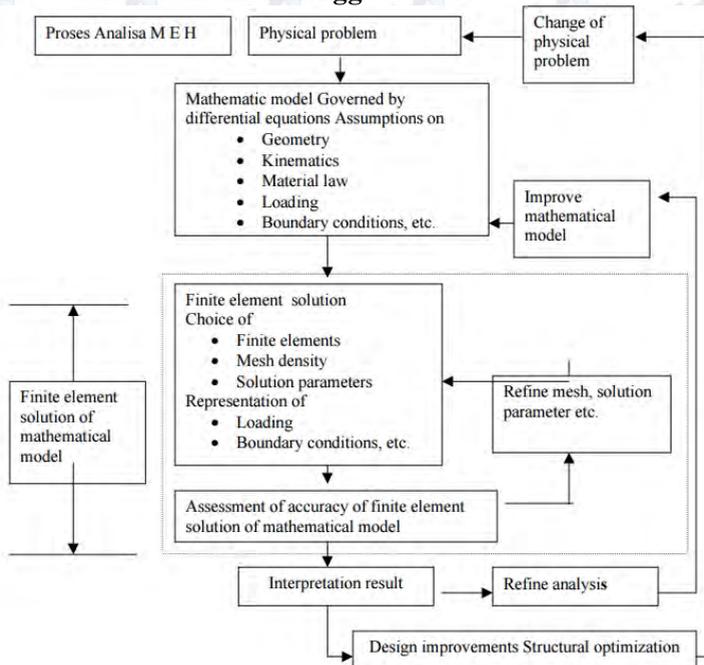


Gambar 2.11 konfigurasi *laser tube forming*; (a) Geometri asal; (b) tegangan dan *displacement* pada mekanisme *buckling* pada *laser forming*; (c) penjelasan *bending angle* pada pipa. (Hsieh, 2005)



Gambar 2.12 Ilustrasi skema dari mekanisme *upsetting* pada *axial scanning*. (Jung, 2006)

II.3. Metode Elemen Hingga



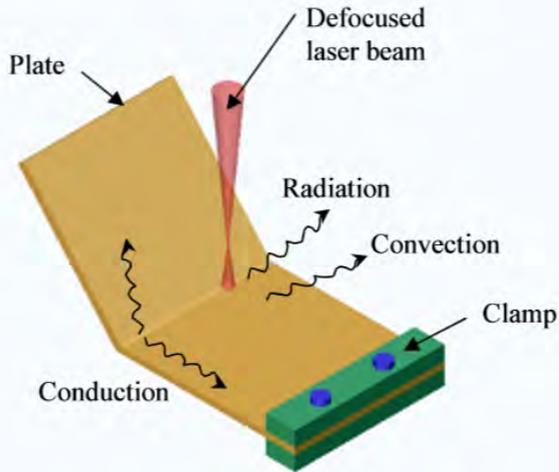
Gambar 2.13 Proses Pengerjaan pada Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan metode numerik dengan basis komputasi untuk memecahkan persoalan pada bidang *engineering*. Geometri akan dibagi menjadi elemen-elemen yang lebih kecil di mana masing-masing elemen *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 variasional, 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 kontinum, pendekatan *weighted residual*, dan interpolasi fungsi, berdasarkan Huebner dan Meinders.

II.3.1 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 2.14 di bawah macam-macam perpindahan panas dalam permasalahan konduksi, konveksi dan radiasi.

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.



Gambar 2.14 Perpindahan panas yang terjadi pada proses *laser forming*. (Jung,2006)

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

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

Di mana:

ρ = densitas medium

c_p = *specific heat* medium

k = konduktivitas termal medium

\dot{q} = laju panas yang timbul per unit volume medium

$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$ = laju dari waktu perubahan dari energi termal per unit volume

$k \frac{\partial}{\partial x}, k \frac{\partial}{\partial y}, k \frac{\partial}{\partial z}$ = 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:

$$\{q''\} = -k \left(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \right) = -k \nabla T \quad (3.2)$$

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

Sehingga persamaan (3.1) dapat disederhanakan menjadi

$$\rho c_p \frac{\partial}{\partial t} = -\nabla \cdot \{q''\} + \dot{q} \quad (3.3)$$

Untuk *heat flux* permukaan

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

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

Untuk kondisi permukaan konveksi

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

Di mana:

h = koefisien konveksi

T_∞ = Temperatur sekitar

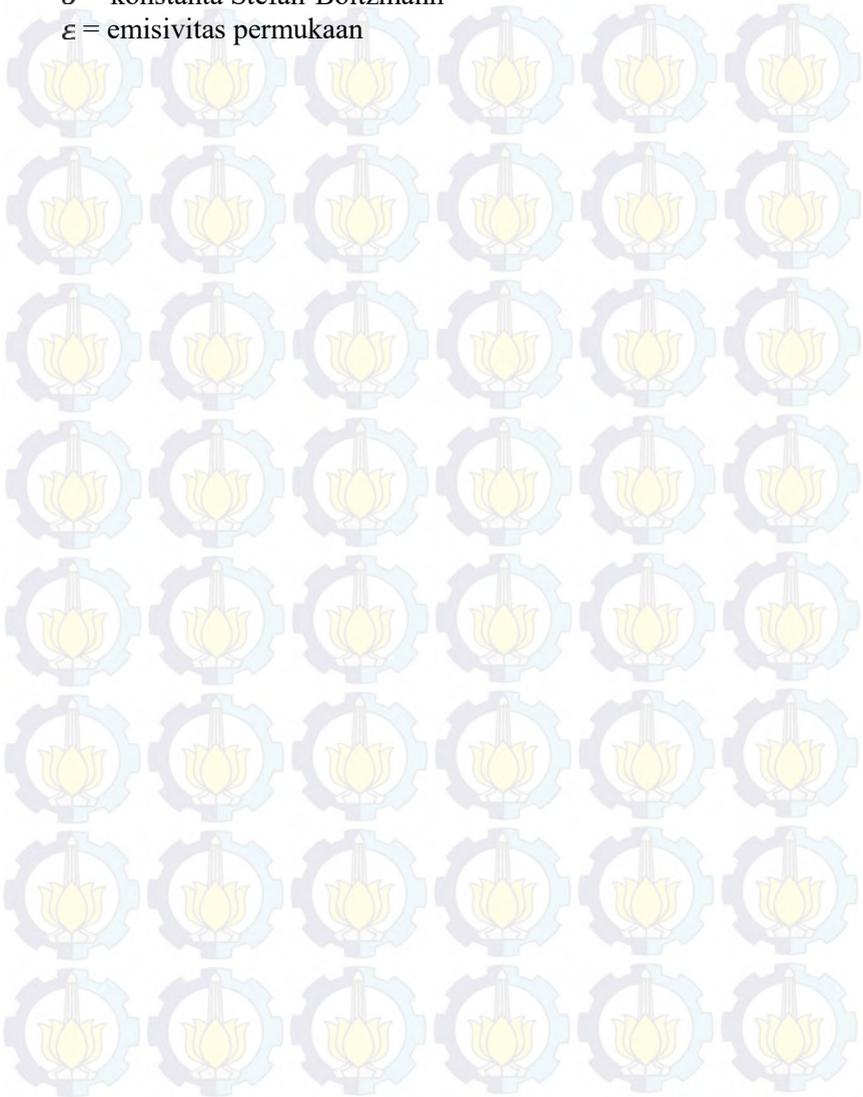
Untuk perpindahan panas secara radiasi:

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

Di mana:

α = Absorptivitas permukaan

q''_r = incident radiant heat flux
 σ = konstanta Stefan-Boltzmann
 ε = emisivitas permukaan

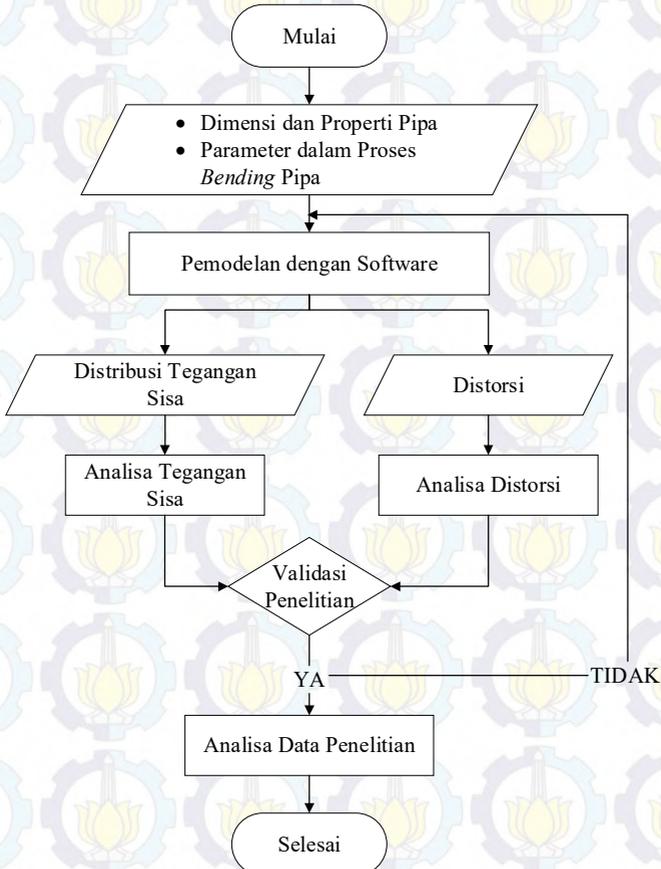




BAB III METODOLOGI

Bab III berisi metode yang digunakan dalam penelitian, spesifikasi material pipa dan pemodelan yang dilakukan dengan menggunakan *software* elemen hingga.

III.1. Metode Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

III.2. Spesifikasi Material dan Parameter *Laser Bending*

III.2.1 Material pipa

Pada penelitian ini, material yang digunakan dalam proses *bending* adalah *stainless steel* 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
Min						18.00	8.00
Max	0.03	2.0	0.045	0.030	1.00	20.00	12.00

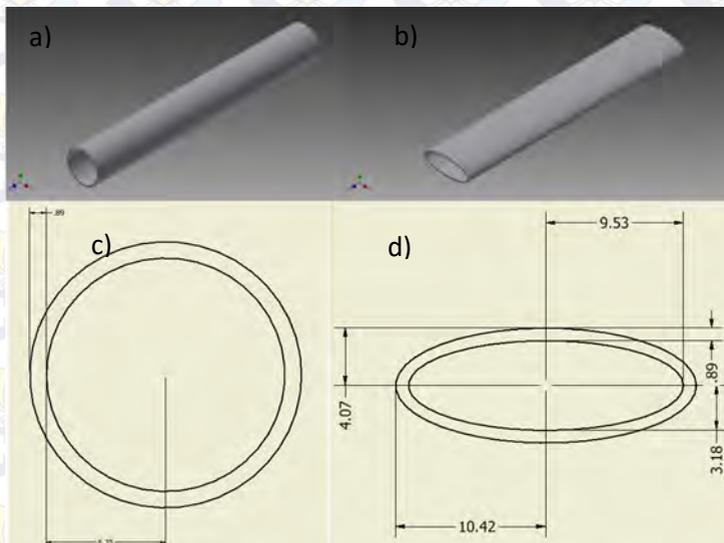
Tabel 3.2 Properti Material dari AISI 304L

Temperatur (K)	200	300	400	600	800	1000	1200	1500
Konduktivitas								
Termal k (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 ρ (kg/m ³)	7854.015							
Koefisien konveksi	20							
Koefisien muai termal α (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 ν	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	—	—

III.2.2 Geometri pipa

Geometri yang dipakai pada penelitian ini terdapat dua geometri, geometri yang pertama berpenampang lingkaran yang ditunjukkan pada gambar 3.2 sedangkan geometri yang kedua berpenampang elips dengan perbandingan radius pertama 1.5 kali

dari radius lingkaran sedangkan radius kedua 0.5 kali radius lingkaran, kedua geometri memiliki panjang yang sama yaitu 100 mm dengan tebal pipa 0.89 mm. Gambar geometri dapat dilihat pada gambar 3.2 dibawah:



Gambar 3.2 a) Geometri pipa lingkaran b) Geometri pipa elips c) Dimensi penampang lingkaran d) Dimensi penampang elips

III.2.3 Parameter *Laser Bending*

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

Tabel 3.3 Parameter *Laser Bending*

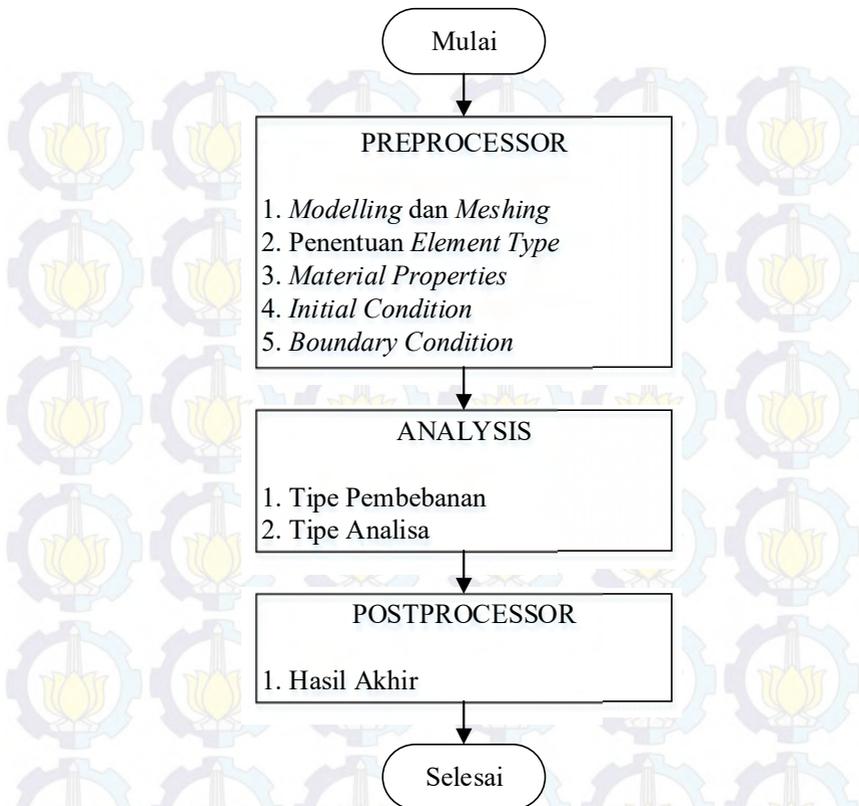
Parameter	I	II
Geometri	Circular	Elips
<i>Laser power (W)</i>	1000	1500
<i>Scanning Speed (mm/s)</i>	10	20
<i>Scanning Path</i>	Axial- Circum	Axial- Circum

III.3. Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian berupa perangkat lunak (*software*) berbasis elemen hingga yaitu ANSYS dengan modul *Mechanical APDL Release 16.0* yang digunakan untuk membuat pemodelan geometri dan memodelkan simulasi *laser bending*.

III.4. Proses Penelitian

Adapun diagram alir pemodelan *bending* pada pipa dengan menggunakan ANSYS Mechanical APDL Release 16.0 dapat dilihat pada gambar 3.4.



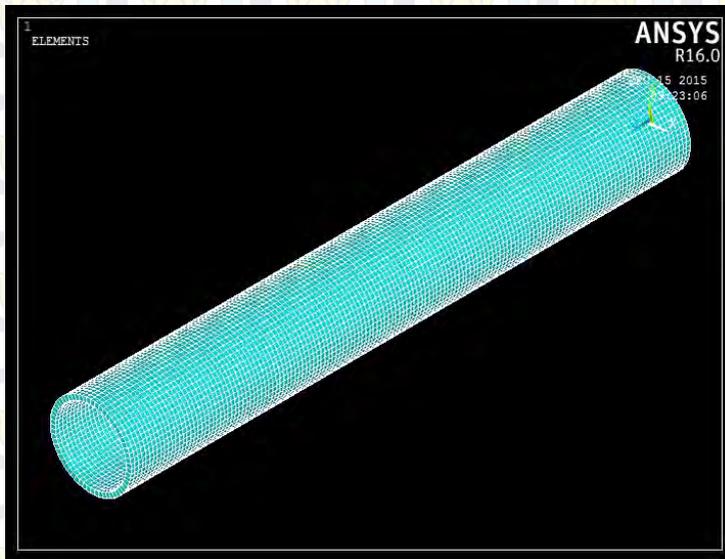
Gambar 3.3 Diagram alir pemodelan menggunakan metode elemen hingga.

III.4.1 Pemodelan pipa

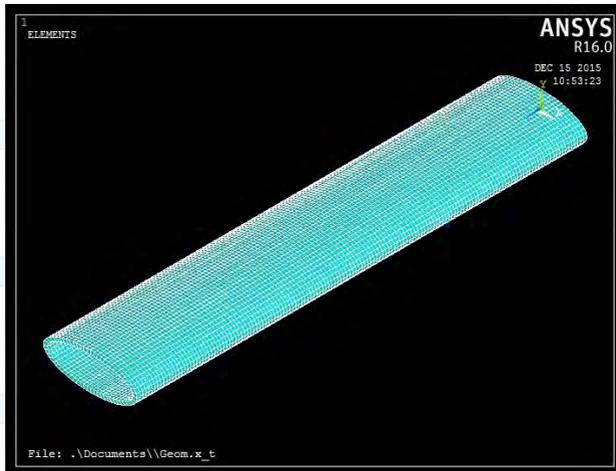
Terdapat dua jenis pipa yang digunakan pada penelitian ini yaitu yang pertama memiliki penampang berbentuk lingkaran dengan diameter 12.7 mm (1/2 inch) dengan tebal 0.89 mm dengan panjang pipa 100 mm dapat dilihat pada gambar 3.2.a. Sedangkan yang kedua memiliki penampang elips dengan perbandingan radius satu dan dua yaitu 1,5:0.5 dari diameter semula dengan tebal 0.89 mm dengan panjang 100 mm dapat dilihat pada gambar 3.2.b.

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

Metode *meshing* yang digunakan pada pipa ini adalah dengan metode *sweep* dengan elemen hexahedron dengan pembagian garis penampang lingkaran sebanyak 60 garis dan pembagian garis longitudinal sebanyak 150 garis. Hasil *meshing* pipa berpenampang lingkaran dapat dilihat pada gambar 3.5 sedangkan pipa berpenampang elips pada gambar 3.6.



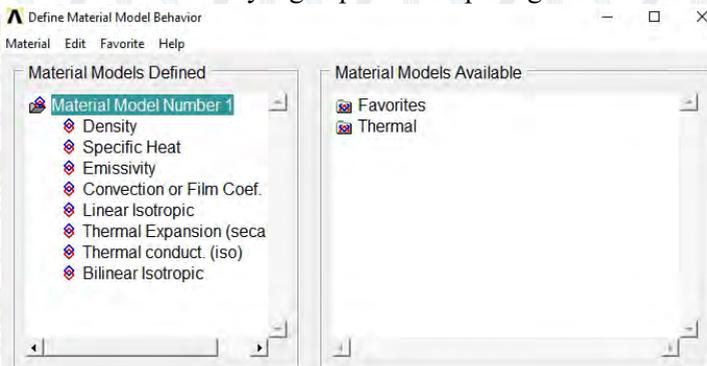
Gambar 3.4 Hasil *meshing* pada pipa berpenampang lingkaran



Gambar 3.5 Hasil *meshing* pada pipa berpenampang elips

III.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, *specific heat*, densitas dan koefisien konveksi yang dapat dilihat pada gambar 3.7



Gambar 3.6 Material properties yang di-input

III.4.3 Pemodelan *boundary condition*

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 *free convection* 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.

III.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 diinputkan pada ANSYS dalam bentuk heat flux, pada scanning path axial, heat flux yang diberikan sepanjang 20 mm di tengah pipa dari posisi z 0.04 mm sampai 0.06 mm, sedangkan pada scanning path circumferential, heat flux diberikan melintang pada z 0.05 mm pada tengah pipa ke arah sumbu x secara melingkar sebanyak 180 derajat. Setelah proses scanning pemanasan maka dilakukan proses pendinginan secara *free convection* selama 10 sekon, proses pemanasan dan pendinginan dilakukan berulang sebanyak empat kali, pada scanning yang berikutnya daya diturunkan menjadi 0.9 kali, scan selanjutnya 0.8 kali dan berlanjut sampai empat kali scan, penurunan daya dilakukan untuk mencegah melting pada pipa pada proses scanning, sedangkan pendinginan yang terakhir dilakukan sampai temperatur mencapai temperatur ruang. 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.

III.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 sparse direct.

Sedangkan analisa yang digunakan pada analisa struktur adalah large displacement static karena beban yang diberikan tetap berupa constraint. Metode yang digunakan yaitu sparse direct.





BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Beberapa simulasi dengan metode elemen hingga mengenai *laser forming bending* pada pipa telah dilakukan dengan berbagai kondisi yang berbeda yang dapat dilihat pada tabel 4.1. Koefisien absorpsi yang digunakan adalah 0.65 dan *beam diameter* yang dipakai adalah empat kali tebal dari pipa sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Safdar pada tahun 2007.

Adapun perbedaan proses menggunakan laser ini dengan metode welding (Dahotre, 2007) antara lain: daerah HAZ yang lebih sempit, kecepatan pada proses laser lebih cepat sehingga terhindar dari melting, power yang digunakan lebih rendah walaupun jika dibandingkan dengan welding yang menggunakan laser, kemudian perbedaannya adalah *beam diameter* yang digunakan lebih kecil. Proses laser jika dibandingkan dengan proses konvensional adalah proses yang lebih mudah dikontrol dan tidak ada tekanan yang diberikan pada benda uji sehingga tegangan termal dan distorsi yang dihasilkan lebih rendah.

Tabel 4.1 Kondisi simulasi *laser forming*

<i>Case</i>	<i>Power (W)</i>	<i>Scanning Speed (mm/s)</i>	<i>Scanning Path</i>
1	1000	10	<i>Axial</i>
2	1000	20	<i>Axial</i>
3	1500	10	<i>Axial</i>
4	1500	20	<i>Axial</i>
5	1000	10	<i>Circumferential</i>
6	1000	20	<i>Circumferential</i>
7	1500	10	<i>Circumferential</i>
8	1500	20	<i>Circumferential</i>

Hasil yang didapatkan dari simulasi berupa distribusi temperatur, historis temperatur pada tengah pipa ($z=50$ mm), historis tegangan, distribusi tegangan dan juga distorsi yang terjadi pada penampang pipa dan *bend angle* (sudut tekukan).

Pada proses *laser forming* ini, setelah proses *scanning* akan dilakukan pendinginan secara *free convection* selama 10 detik kemudian dilakukan kembali pemanasan kedua, di mana daya yang digunakan untuk pemanasan yang kedua dikurangi sepuluh persen dari daya yang pertama, lalu kemudian proses berulang dengan penurunan sepuluh persen sampai pada proses *scanning* yang keempat kemudian terakhir didinginkan selama 100 detik agar temperatur mendekati temperatur ruang. Skema pemanasan dan pendinginan dapat dilihat pada tabel 4.2 di bawah.

Tabel 4.2 Skema waktu *scanning*

<i>Scanning Speed</i>	10 mm/s	20 mm/s
<i>Heating 1 (s)</i>	2	1
<i>Cooling (s)</i>	10	10
<i>Heating 2 (s)</i>	2	1
<i>Cooling (s)</i>	10	10
<i>Heating 3 (s)</i>	2	1
<i>Cooling (s)</i>	10	10
<i>Heating 4 (s)</i>	2	1
<i>Cooling (s)</i>	100	100
Total Time (s)	138	134

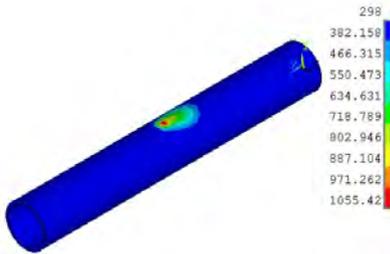
IV.1. Pipa Circular

IV.1.1 Respon Termal

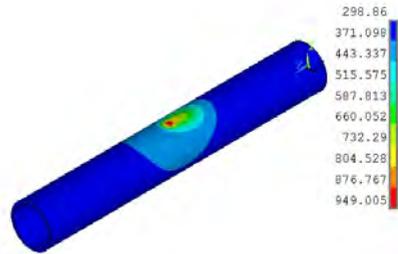
Respon temperatur dari *case 1 (axial)* dapat dilihat pada gambar 4.1 dan *case 5 (circumferential)* yang berupa distribusi temperatur pada (a) detik 1 pada saat *heat flux* melewati tengah pipa, (b) detik 2 pada saat *heating* pertama selesai, (c) detik ke 12 saat *cooling* pertama selesai dan (d) detik 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 *cooling* terakhir selesai dan proses selesai. Dapat dilihat dari gambar distribusi pada *scanning* yang pertama, temperatur maksimum yang tercapai adalah sekitar 1055K atau sekitar 777°C dan pada *scanning* yang keempat mengalami penurunan karena daya yang diturunkan, temperatur yang dicapai pada *scanning* yang keempat hanya mencapai 950K atau 677°C.

Gambar 4.1 menunjukkan distribusi temperatur pada *scanning axial*, panjang lintasan yang dipanaskan pada *scanning axial* ini adalah 20 mm dengan melintasi pusat bagian atas dari pipa. Diambil lintasan sepanjang 20 mm karena mendekati lintasan *circumferential* 180° atau setengah keliling penampang. Dapat dilihat bahwa temperatur maksimum yang dicapai mencapai sekitar 1050K (777°C) saat terjadi proses pemanasan (a), lalu panas yang ditransfer ke material akan secara cepat hilang ke sekelilingnya dengan efek konduksi sehingga daerah sekitarnya menerima panas (b). Setelah pemanasan selesai, material didinginkan secara konveksi selama sepuluh detik, pada proses konveksi ini juga terjadi proses konduksi sehingga temperatur pada daerah yang dikenai *heatflux* tadi akan turun sedangkan daerah di sekitarnya akan menerima panas secara konduksi sehingga temperaturnya naik (c).

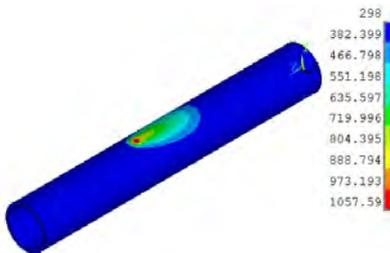
(a)



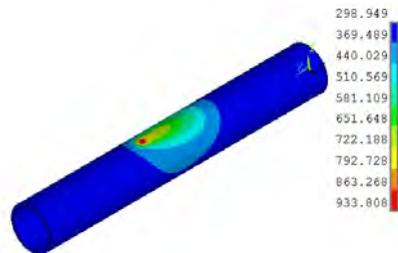
(d)



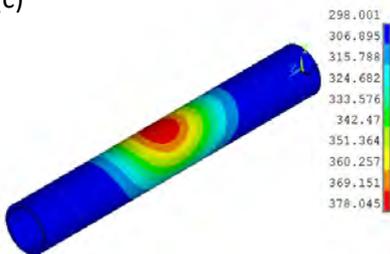
(b)



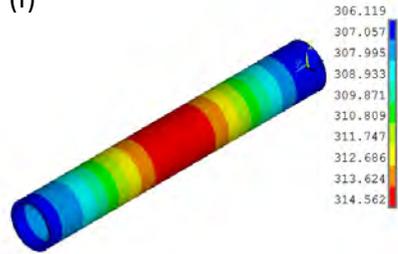
(e)



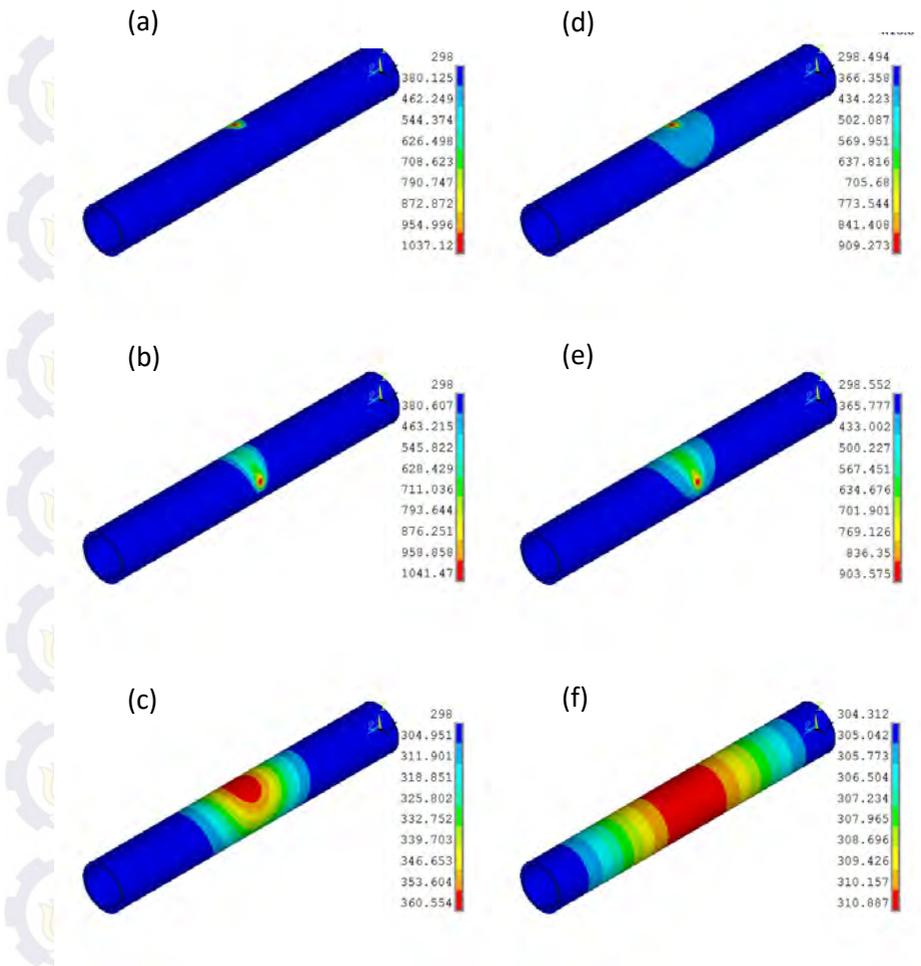
(c)



(f)



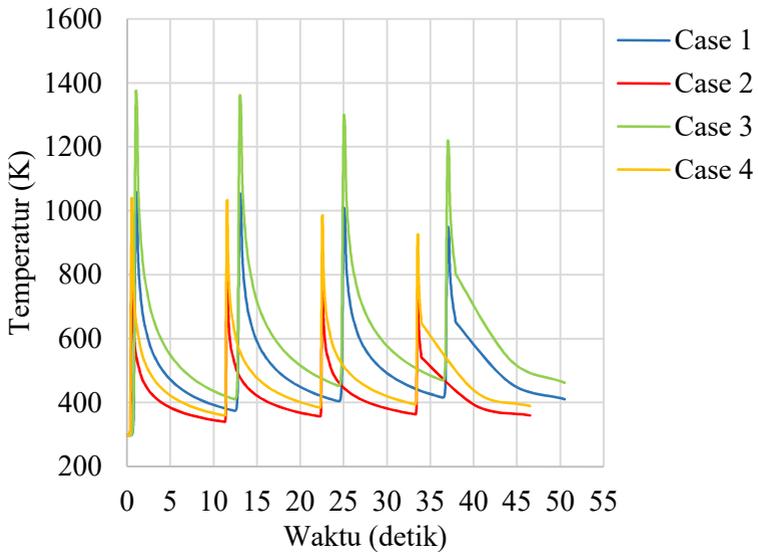
Gambar 4.1 Distribusi temperatur pada: (a) detik 1; (b) detik 2; (c) detik 12; (d) detik 37; (e) detik 38; dan (f) 138. *Case 1 (Axial Scanning)*.



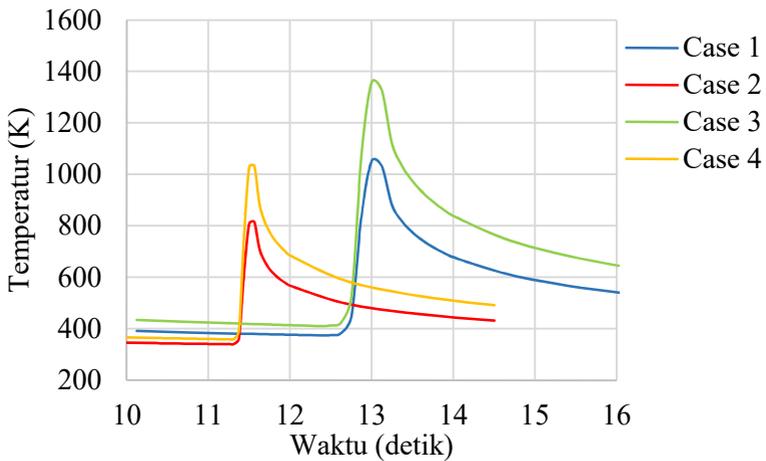
Gambar 4.2 Distribusi temperatur pada: (a) detik 1; (b) detik 2; (c) detik 12; (d) detik 37; (e) detik 38; dan (f) 138. *Case 5 (Circumferential Scanning)*.

Tetapi setelah pendinginan selama sepuluh detik, temperatur uniform belum tercapai akan tetapi sudah dilakukan proses *scan* yang kedua. Pada gambar (d) proses *scan* keempat, temperatur yang dicapai akan turun dibandingkan temperatur yang pertama karena daya yang digunakan pada *scan-scan* berikutnya setelah *scan* satu dikurangi sebanyak 10% agar tidak mencapai temperatur melting dari material. Pada proses pendinginan terakhir (f), dilakukan selama 100 detik agar temperatur mencapai temperatur ruang, setelah proses simulasi, temperatur akhir dari material berada pada range 306K-314K (33°C-41°C), dimana temperatur minimum terdapat di tepi *axial* dari pipa dan akan naik ke arah tengah dari pipa dan maksimalnya pada titik tengah pada pipa. Temperatur sisa ini dapat diabaikan pada analisis ini karena ekspansi termal pada temperatur tersebut hampir sama nilainya dengan temperatur ruang.

Gambar 4.2 menunjukkan distribusi temperatur pada material *case 5* yang menggunakan *scanning circumferential* dengan lintasan pada $z=50$ mm melintang sejauh 180° . Dapat dilihat temperatur maksimum yang dicapai pada saat *scan* pertama dari detik nol sampai detik kedua, pada saat *heat flux* melewati tengah-tengah pipa pada $x=0$, temperatur maksimum yang dicapai adalah sekitar 1037K (764°C) (a). Pada saat *scan* pertama selesai pada detik kedua, temperatur maksimum menjadi 1040K dan daerah sekitar yang terkena dampak dari pemanasan juga menerima panas akibat konduksi (b), pada saat proses pendinginan selama 10 detik, temperatur pada lintasan yang dilewati *heat flux* akan turun karena panas berpindah ke material sekitarnya secara konduksi dan hilang ke udara secara konveksi (c). Sedangkan pada *scan* ke empat saat daya diturunkan, maka temperatur maksimum hanya mencapai 900K atau sekitar 627°C (d), dan pada pendinginan terakhir dilakukan selama 100 detik dan temperatur menjadi 310K (37°C) pada pusat (f).

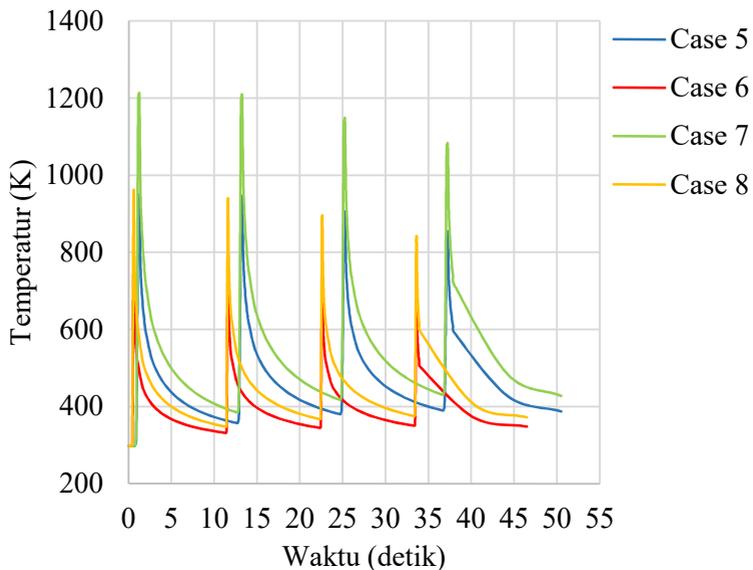


Gambar 4.3 Temperatur vs waktu untuk *axial scanning* pipa *circular*



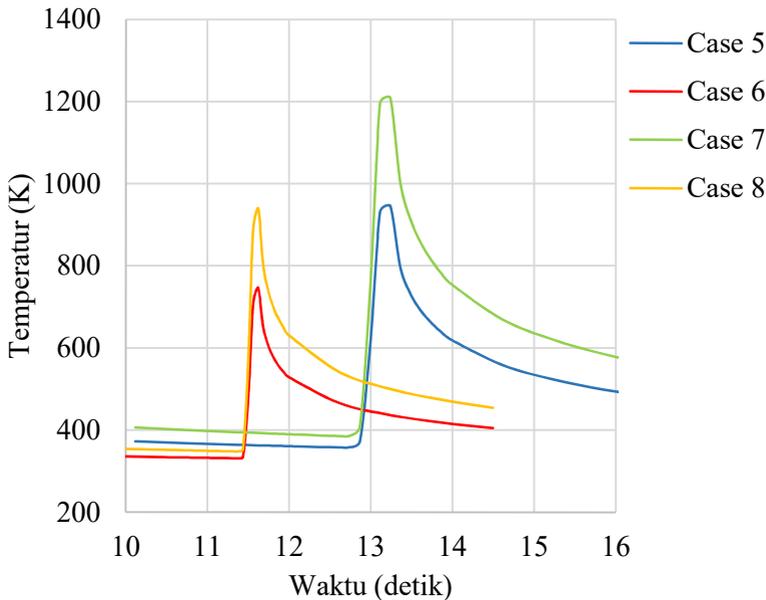
Gambar 4.4 Temperatur vs waktu (*Scan kedua*) untuk *axial scanning* pipa *circular*

Pada gambar 4.3 menunjukkan grafik historis temperatur pada *laser forming* pipa *circular* dengan lintasan *scanning axial*. Dapat dilihat pada gambar 4.4 bahwa yang mencapai temperatur tertinggi adalah *case 3* di mana pada *case 3* ini menggunakan daya (*power*) 1500W dengan kecepatan *scanning* 10mm/s, dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa dengan semakin besarnya daya maka panas yang dihasilkan akan semakin tinggi, dan semakin lambat kecepatan pemanasan maka panas yang diberikan akan semakin lama sehingga panas yang dihasilkan akan lebih tinggi jika dibandingkan dengan kecepatan yang lebih tinggi. Dapat dilihat pula temperatur paling kecil dari antara keempat *case* tersebut adalah *case dua* di mana menggunakan daya paling rendah dan kecepatan lebih cepat. Kecepatan yang semakin cepat akan menyebabkan temperatur pada *heat affected zone* menurun sehingga koefisien penyerapan panas akan berkurang dan koefisien muai termalnya akan meningkat juga *specific heat* akan meningkat (Li, 2001). Dari gambar historis temperatur 4.4 tersebut juga dapat dilihat lebar kurva yang menandakan kecepatan pendinginan dari spesimen dengan *case* tersebut, jika dilihat yang memiliki kurva paling lebar adalah kurva *case* dengan *power* yang lebih tinggi dan kecepatan lebih rendah. Jadi semakin tinggi temperatur pada spesimen maka laju pendinginannya akan semakin tinggi. Sebenarnya hal tersebut tidak terlalu signifikan karena material yang digunakan sama, berbeda jika material yang digunakan berbeda, maka laju pendinginannya akan signifikan karena dipengaruhi oleh perpindahan panas yang dipengaruhi oleh konduktivitas dari material tersebut serta dari koefisien konveksi yang dalam kasus ini menggunakan media pendingin yang sama yaitu udara secara *free convection*.



Gambar 4.5 Temperatur vs waktu untuk *circumferential scanning* pipa *circular*

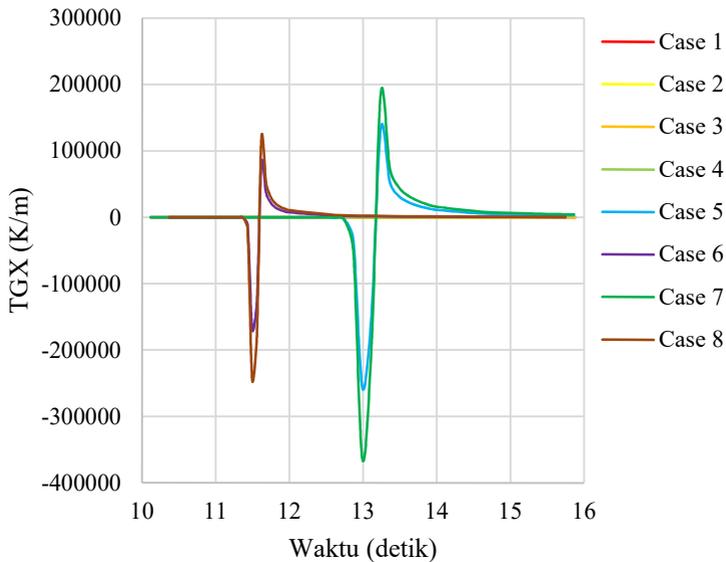
Pada gambar 4.5 dapat dilihat perbandingan historis temperatur pada pusat pipa pada saat *scanning circumferential*. Sama halnya dengan *axial scanning*, pada *circumferential scanning*, case 7 ($P=1500\text{W}$ dan $v=10\text{ mm/s}$) memiliki temperatur yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan case lainnya, hal ini juga menambah bukti bahwa laser *power* akan menaikkan *heat flux* sehingga temperatur akan semakin tinggi, dan juga dengan semakin cepatnya kecepatan pemanasan maka panas yang berpindah akan semakin sedikit sehingga temperaturnya akan lebih kecil jika dibandingkan dengan kecepatan yang lebih kecil.



Gambar 4.6 Temperatur vs waktu (*Scan* kedua) untuk *circumferential scanning* pipa circular

Pada gambar 4.6 dapat dilihat perbandingan peak temperatur pada saat *scan* kedua dengan skema *circumferential*, sama seperti di skema *axial* di mana temperatur pada *case* 3 paling tinggi dan *case* 2 paling rendah. Tapi apabila dibandingkan antara temperatur skema *axial* gambar 4.4 dengan skema *circumferential* gambar 4.6, maka dapat dilihat bahwa temperatur pada skema *axial* lebih tinggi daripada temperatur pada skema *circumferential*. Dari gambar historis temperatur 4.6 tersebut juga dapat dilihat lebar kurva yang menandakan kecepatan pendinginan dari spesimen dengan *case* tersebut, jika dilihat yang memiliki kurva paling lebar adalah kurva *case* dengan *power* yang lebih tinggi dan kecepatan lebih rendah. Jadi semakin tinggi temperatur pada spesimen maka laju pendinginannya akan semakin tinggi.

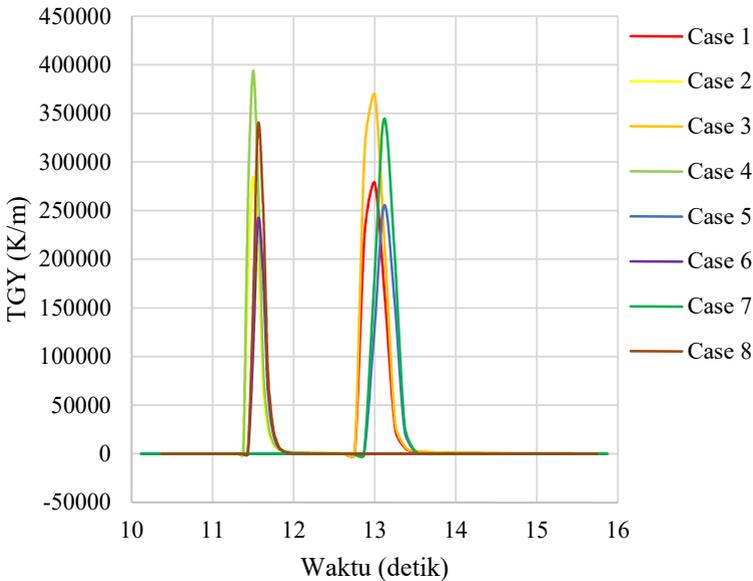
Selain distribusi temperatur, yang perlu diperhatikan pada analisa termal ini adalah distribusi *thermal gradient* dan historis *thermal gradient* karena *thermal gradient* ini berkaitan dengan distribusi tegangan yang dihasilkan pada analisa struktur. Untuk itu pada gambar 4.7 disajikan historis *thermal gradient* pada arah-x.



Gambar 4.7 *Thermal Gradient* arah-x Vs Waktu

Gambar 4.7 menunjukkan *gradient* termal pada arah-x. Dapat dilihat pada skema *circumferential* (case 5-8), *gradient* termal membentuk pola turun dan naik, pada kecepatan 20 mm/s, *gradient* termal terendah terjadi pada detik ke 11,5 yaitu pada saat *heat flux* melewati tengah pipa, sedangkan pada kecepatan 10 mm/s terjadi pada detik ke 13. Range TGX tertinggi dialami oleh case 7 yaitu *circumferential* dengan *power* yang lebih tinggi. Jika dilihat dari grafik yang lebih mempengaruhi *gradient* termal adalah kecepatan *scanning*. Pada skema *axial* (case 1-4) garis TGX

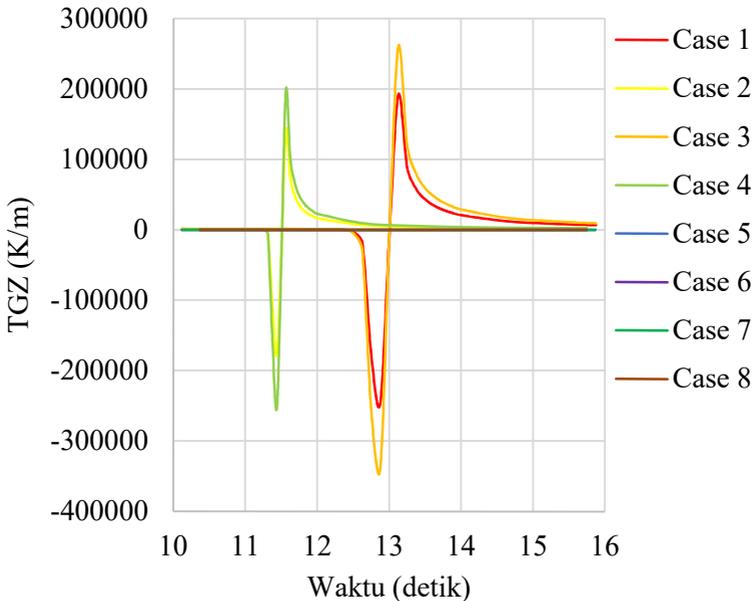
mendekati nol, hal tersebut karena arah *scanning* pada *axial* bergerak ke arah sumbu-z (arah *lateral*), sedangkan pada *circumferential* arah *scanning* melingkari tengah pipa ke arah sumbu-x.



Gambar 4.8 *Thermal Gradient* arah-y Vs Waktu

Gambar 4.8 menunjukkan variasi *thermal gradient* pada arah-y (kedalaman) pada titik tengah. Dapat dilihat perbedaan letak puncak dari *thermal gradient* di mana pada *scanning* dengan kecepatan 10 mm/s terletak pada sekitar detik ke 11.5 sedangkan pada kecepatan 20 mm/s terletak pada sekitar detik ke 13. Dapat dilihat bahwa *axial scan* memiliki besaran *thermal gradient* yang paling besar, di mana yang paling besar yaitu yang menggunakan *power* 1500W dan kecepatan 20 mm/s, artinya semakin besar daya maka *thermal gradient* semakin tinggi dan semakin tinggi kecepatan *scan* maka *thermal gradient* juga akan semakin tinggi

akan tetapi kecepatan *scan* ini tidak terlalu banyak mempengaruhi besaran *thermal gradient* dibandingkan dengan pengaruh daya.

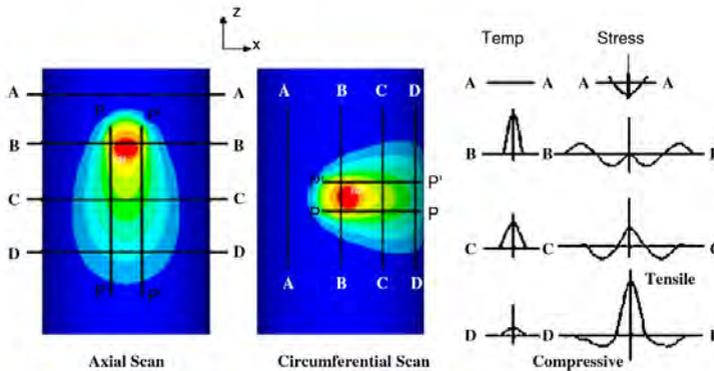


Gambar 4.9 *Thermal Gradient* arah-z Vs Waktu

Gambar 4.9 menunjukkan *thermal gradient* arah-z dari detik 10 sampai 16 di mana untuk *axial scan* searah dengan arah *scan* sedangkan untuk *circumferential scan* merupakan arah *lateral* sehingga berlawanan dengan *thermal gradient* arah x pada gambar 4.7. dapat dilihat pada gambar bahwa hasil menyerupai hasil *thermal gradient* arah x, bedanya jika di *thermal gradient* x yang mendekati nol adalah *axial scan* (case 1-4), di *thermal gradient* z ini yang mendekati nol adalah *circumferential scanning*, jadi dapat diambil kesimpulan jika besaran *thermal gradient* akan bernilai mendekati nol pada arah *lateral* dari *scan*. Untuk besaran yang terbesar masih sama seperti pada *thermal gradient* arah x dimana

yang paling berpengaruh adalah daya (*power*) di mana semakin besar daya maka besaran dari *thermal gradient* akan semakin besar.

Thermal gradient secara langsung mempengaruhi distribusi tegangan (*stress*), di mana tegangan ini akan mempengaruhi besarnya *bending angle* dan distorsi. Sangat penting untuk mengetahui bagaimana hubungan antara distribusi temperatur terhadap perkembangan (*development*) tegangan dan distorsi yang kemudian menghasilkan *bending angle*.



Gambar 4.10 Representasi dari konsep perkembangan tegangan.

Gambar 4.10 mengindikasikan distribusi temperatur yang *transien* dengan distribusi tegangan pada *axial scan* dan *circumferential scan*. Pipa dibagi menjadi empat bagian untuk mempermudah pemahaman bagaimana distribusi temperatur dan arahnya mempengaruhi distribusi tegangan. Empat bagian itu dibagi oleh garis AA, BB, CC, dan DD.

Bagian AA merupakan bagian pada pipa yang memiliki jarak di depan posisi dari laser. Tegangan pada bagian AA bernilai kecil dan merupakan *compressive stress* yang terbentuk akibat pergeseran laser ke arah bagian AA. Hal ini dikarenakan oleh peristiwa ekspansi dari material pada daerah *heated zone* yang menginduksikan tegangan kompresi ke arah depan dari *laser beam*. Bagian BB merupakan bagian dengan temperatur maksimum di mana hal tersebut mempengaruhi daerah ini menjadi daerah dengan

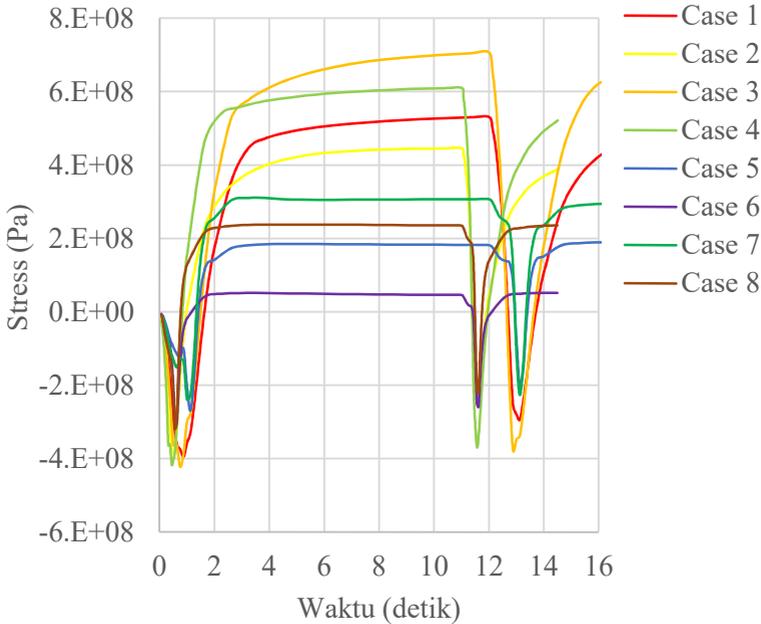
ekspansi termal terbesar. Ekspansi termal ini diakibatkan oleh daerah sekitar zona pemanasan yang temperaturnya lebih rendah sehingga menghasilkan tegangan kompresi. Bagaimanapun, material pada pusat bagian BB dengan temperatur yang lebih tinggi menghasilkan tegangan yang rendah karena proses *yielding*. Bagian CC merupakan bagian yang berada sedikit di belakang dari daerah temperatur maksimum. Ekspansi material pada bagian BB diakibatkan oleh material pada bagian CC yang memiliki temperatur lebih rendah yang oleh karenanya menimbulkan *tensile stress*. Juga, karena laser telah melewati daerah CC ini, maka setelahnya material akan mulai dingin. Ketika material ini berkontraksi, material di sekelilingnya akan membatasi kontraksinya sehingga akan meningkatkan *tensile stress*. Perkembangan tegangan pada daerah DD hampir mirip dengan daerah CC, perbedaannya hanya pada besaran tegangan pada bagian DD lebih besar dibandingkan dengan daerah CC. Daerah temperatur maksimum pada arah *scanning* terikat dengan dua garis paralel yaitu PP dan P'P'. Material pada daerah tersebut akan secara langsung mengalami deformasi plastis sedangkan material di luar daerah tersebut kebanyakan akan mengalami deformasi elastis.

Dapat dilihat pada gambar 4.10 bahwa orientasi tegangan akan berbeda dengan arah *scanning* yang berbeda karena adanya perbedaan distribusi temperatur. Pada gambar 4.10 menunjukkan bahwa pada *axial scanning*, distribusi tegangan berada pada sumbu-z sedangkan pada *circumferential scanning*, distribusi tegangan mirip dengan *axial scanning* tapi pada sumbu-x. perbedaan arah orientasi tegangan akan menyebabkan perbedaan besaran *internal force* pada ketiga arah *orthogonal*, yang mempengaruhi *bending angle* dan distorsi dari material yang dipanaskan.

IV.1.2 Respon Tegangan

Konsep perkembangan tegangan pada gambar 4.10 pada respon termal di atas dapat diverifikasi oleh gambar 4.11 yang

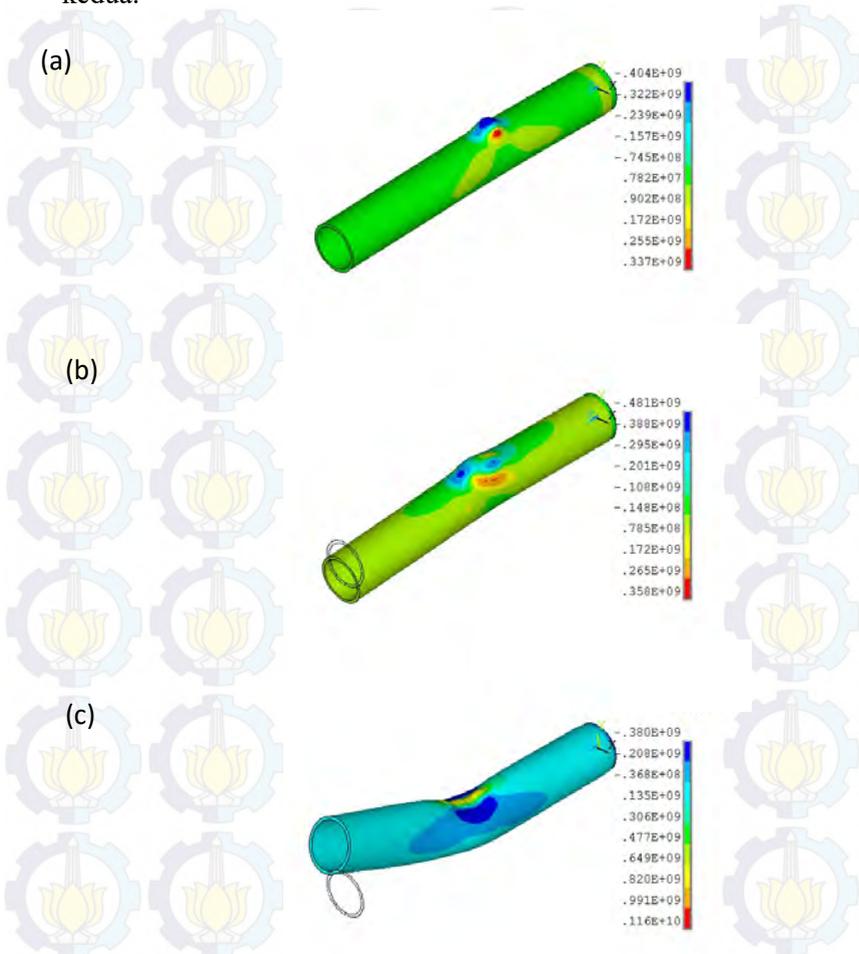
menunjukkan historis tegangan pada *node* di tengah pipa pada arah *scanning axial* dan *circumferential* pada *scan* pertama dan kedua.



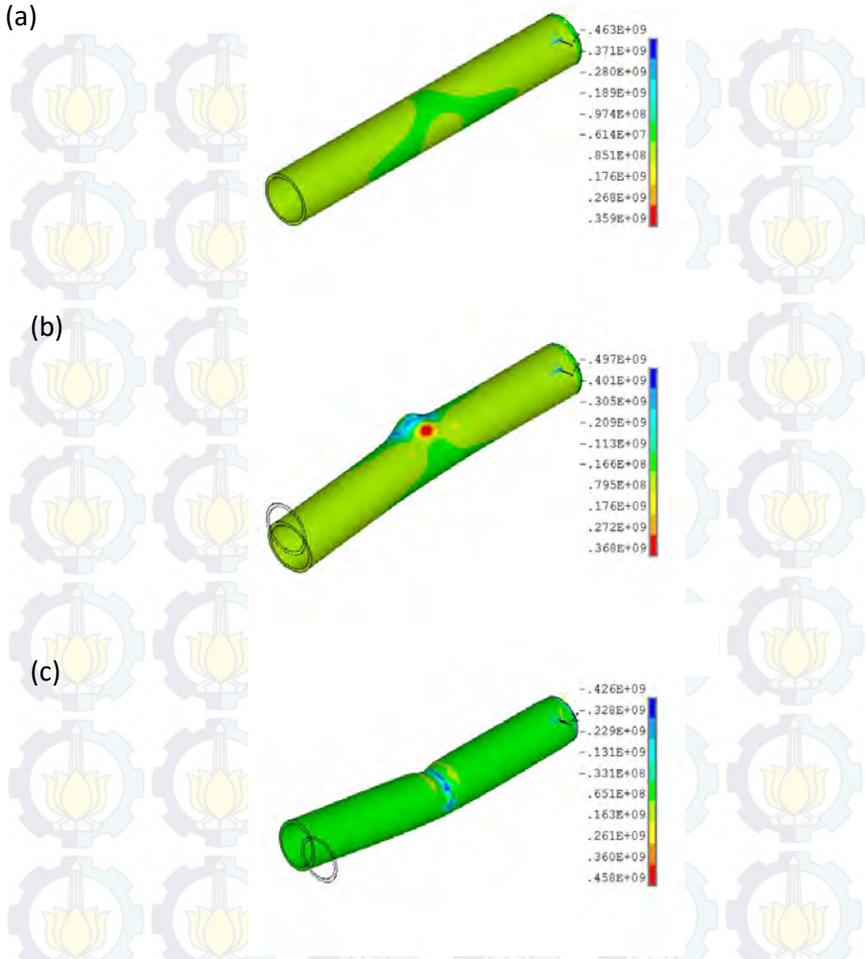
Gambar 4.11 Distribusi tegangan pada arah *scanning*

Dapat dilihat ketika sinar laser bergerak mendekati *node* referensi, *compressive stress* mulai muncul ditandai pada detik sebelum dua untuk kecepatan 10 mm/s dan detik 1 untuk kecepatan 20 mm/s grafik menuju arah negative yang menandakan tegangan bersifat *compressive*. Tegangan akan bernilai paling kecil (hampir nol) ketika laser berada pada *reference node* karena pada saat tersebut tercapai temperatur maksimum dan material mengalami *yield*. Pada saat laser bergerak dari *reference node*, seketika itu juga terjadi *tensile stress* yang diakibatkan oleh *high temperature zone*

akibat sinar laser. Perilaku yang sama ditunjukkan pada *scan* yang kedua.



Gambar 4.12 Distribusi tegangan pada pipa (σ_z) pada skema aksial pada detik ke: (a) 0.125; (b) 1; (c) 138. Deformasi diperbesar 100x untuk memperjelas.



Gambar 4.13 Distribusi tegangan pada pipa (σ_z) pada skema *circumferential* pada detik ke: (a) 0.125; (b) 1; (c) 138. Deformasi diperbesar 100x untuk memperjelas.

Respon tegangan pada pipa dapat dilihat pada gambar 4.12 untuk skema aksial dan 4.13 untuk skema *circumferential*. Harus diberi catatan bahwa yang diplot pada kedua gambar tersebut adalah tegangan pada sumbu z karena tegangan tersebut yang akan menyebabkan perubahan secara angular pada pipa baik pada skema *circumferential* ataupun *axial*. Tegangan yang bernilai positif diwakili oleh daerah berwarna merah yang mengindikasikan *tensile stress* sedangkan nilai tegangan yang negative diwakili oleh daerah dengan warna biru yang mengindikasikan *compressive stress*. Daerah yang tidak diwarnai menandakan posisi atau letak dari specimen sebelum terjadi proses atau posisi awal specimen, pada gambar tersebut hanya dapat terlihat posisi awal penampang saja.

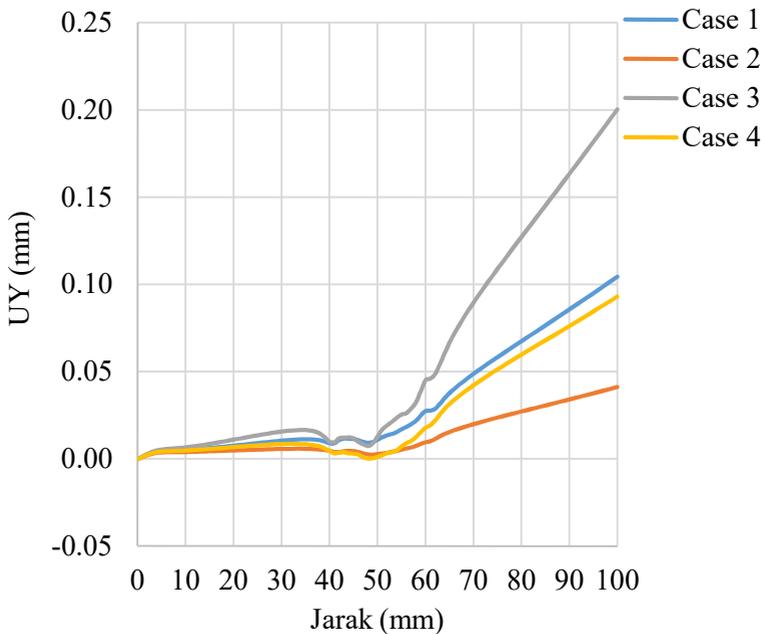
Gambar 4.12 menunjukkan distribusi tegangan pada permukaan pipa pada skema *axial* dengan *power* 1500W dan kecepatan 10 mm/s yang dibagi menjadi tiga tahapan yang berbeda. Tahapan yang pertama berada pada awal *scanning* pada detik ke 0.125 (a). Tahapan kedua pada saat *scanning* melewati tengah dari 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 4.12 (a) bahwa ketika proses pemanasan dimulai, nilai *compressive stress* nya sangat tinggi mencapai 400 MPa pada zona yang dipanaskan dan daerah di sekelilingnya yang diakibatkan oleh tingginya ekspansi termal oleh temperatur yang tinggi sehingga mengakibatkan *counter-bending* yang terjadi pada saat tersebut. Sedangkan pada daerah yang berwarna merah atau di sebelah dari zona biru terdapat *tensile stress* dengan nilai maksimum 337 MPa yang dihasilkan sebagai reaksi dari ekspansi termal pada daerah sekitar yang dipanasi sehingga membatasi ekspansi termal tersebut. Gambar 4.12 (b) sudah terjadi proses pendinginan pada daerah yang telah dipanaskan sebelumnya, *compressive stress* yang tadi terjadi berubah menjadi *tensile stress* (maksimum 358 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 4.12 (c)

Gambar 4.13 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 4.13 (a) bahwa ketika proses pemanasan dimulai, nilai *compressive stress* nya sangat tinggi mencapai 460 MPa pada zona yang dipanaskan dan daerah di sekelilingnya yang diakibatkan oleh tingginya ekspansi termal oleh temperatur yang tinggi sehingga mengakibatkan *counter-bending* yang terjadi pada saat tersebut. Sedangkan pada daerah yang berwarna merah atau disebelah dari zona biru terdapat *tensile stress* dengan nilai maksimum 350 MPa yang dihasilkan sebagai reaksi dari ekspansi termal pada daerah sekitar yang dipanasi sehingga membatasi ekspansi termal tersebut. Gambar 4.13 (b) sudah terjadi proses pendinginan pada daerah yang telah dipanaskan sebelumnya, *compressive stress* yang tadi terjadi berubah menjadi *tensile stress* (maksimum 368 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 4.13 (c)

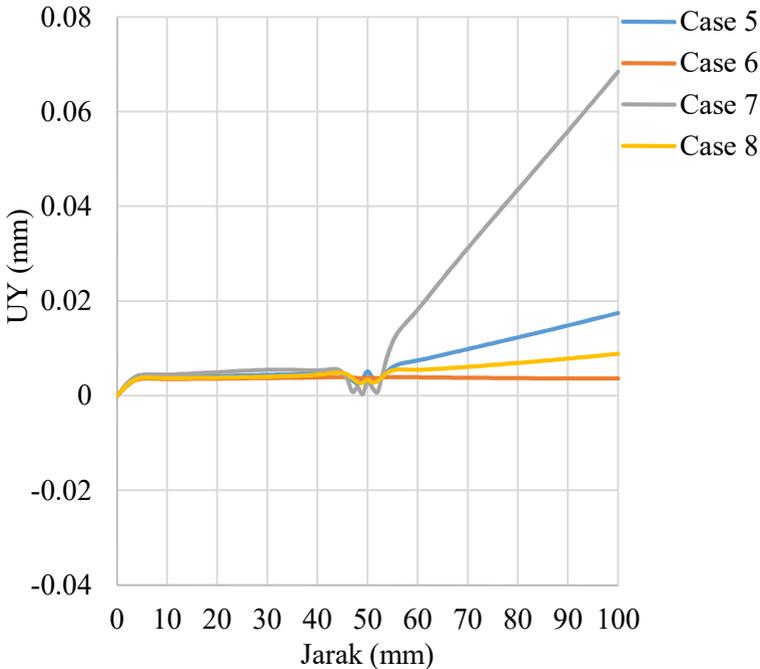
Jika dibandingkan gambar 4.12 dan 4.13 terdapat perbedaan distribusi tegangan yang didasari karena perbedaan lintasan pemanasan, di mana pada skema aksial distribusi tegangan lebih ke arah sumbu z sehingga *bending* yang terjadi terjadi sepanjang sumbu-x yang dipanasi sedangkan pada skema *circumferential* karena lintasan yang dipanaskan berada sepanjang sumbu-x maka *bending* pada sumbu-z yang terjadi hanya bersifat local sehingga *bend angle* yang terjadi tidak begitu besar. Untuk

melihat lebih jelas maka akan diplot displacement terhadap sumbu y



Gambar 4.14 Displacement pada arah-y (*bending*) pada bagian atas pada skema *axial*.

Dapat dilihat dari gambar 4.14 yang mengalami *displacement y* terbesar adalah *case 3* yang memiliki daya lebih besar dan kecepatan lebih rendah lalu diikuti oleh *case 1* yang memiliki daya lebih rendah daripada *case 3* lalu yang memiliki *displacement y* terendah adalah *case 2* yang memiliki *power* lebih rendah dan kecepatan lebih cepat, dari hasil yang didapat maka dapat diambil kesimpulan bahwa dengan semakin besarnya daya maka *displacement y* akan semakin besar sedangkan untuk kecepatan yang meningkatkan *displacement y* adalah dengan memperlambat kecepatan *scanning*.

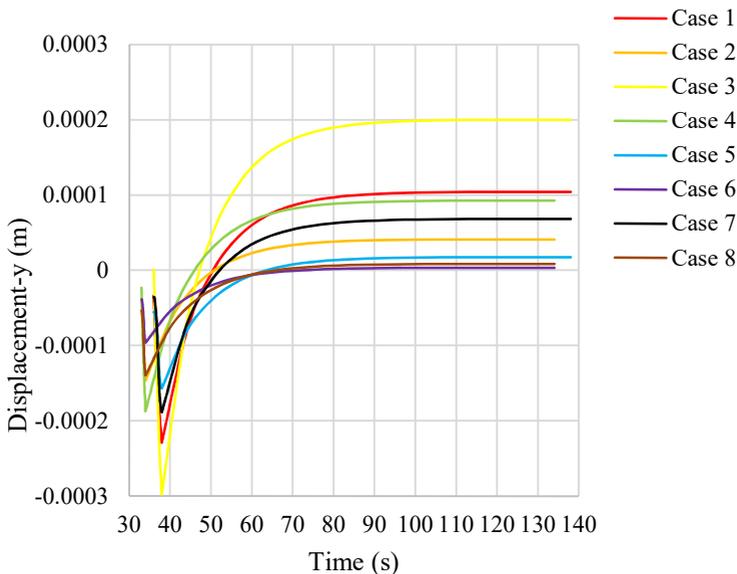


Gambar 4.15 *Displacement* pada arah-y (*bending*) pada bagian atas pada skema *circumferential*.

Sama seperti pada skema aksial, skema *circumferential* (gambar 4.15) juga memiliki urutan *displacement y* yang sama yaitu *case* dengan *power* yang lebih tinggi dan kecepatan yang lebih kecil memiliki *displacement* pada sumbu *y* paling tinggi. Akan tetapi jika dibandingkan dengan skema aksial, *displacement* pada skema *circumferential* ini lebih kecil, *displacement* pada aksial *scan* lebih dari dua kali dari *circumferential scan*, hal tersebut telah dijelaskan sebelumnya pada distribusi tegangan pada sumbu *z* di mana pada skema aksial, distribusi berada di sepanjang

sumbu z sedangkan untuk skema *circumferential* berada pada sepanjang sumbu melingkar sehingga menghasilkan sudut *bending* yang bersifat lokal sehingga *displacement* nya tidak terlalu besar. Apalagi skema *circumferential* dengan *power* yang lebih kecil dan kecepatan *scanning* yang lebih cepat hampir tidak ada *displacement* yang terjadi karena tegangan yang terjadi tidak cukup untuk menciptakan distorsi.

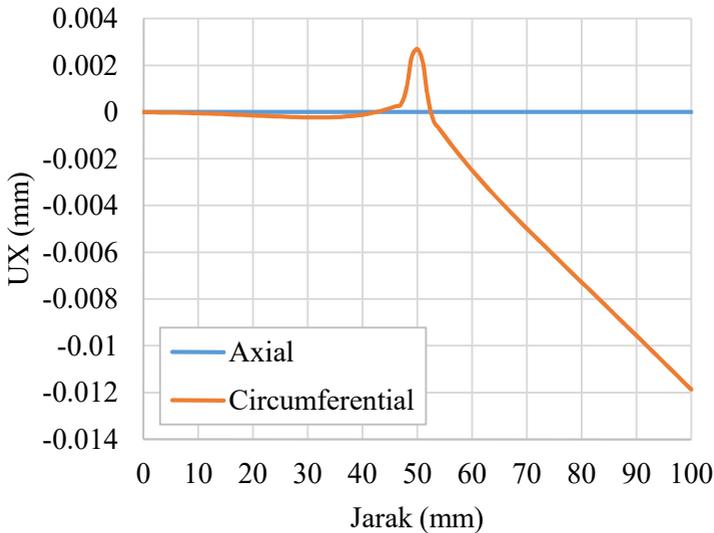
Sudut *bending* dapat ditentukan dengan menghitung *displacement* pada sumbu- y sepanjang garis tepi ke tepi dari $z=0$ sampai $z = 100$ mm. Jadi sesungguhnya *displacement-y* sepanjang bagian atas pipa merepresentasikan sudut *bending*. Selain itu akan dilihat pula historis *displacement-y* terhadap waktu yang merupakan representasi dari springback dari pipa yang disajikan pada gambar 4.16



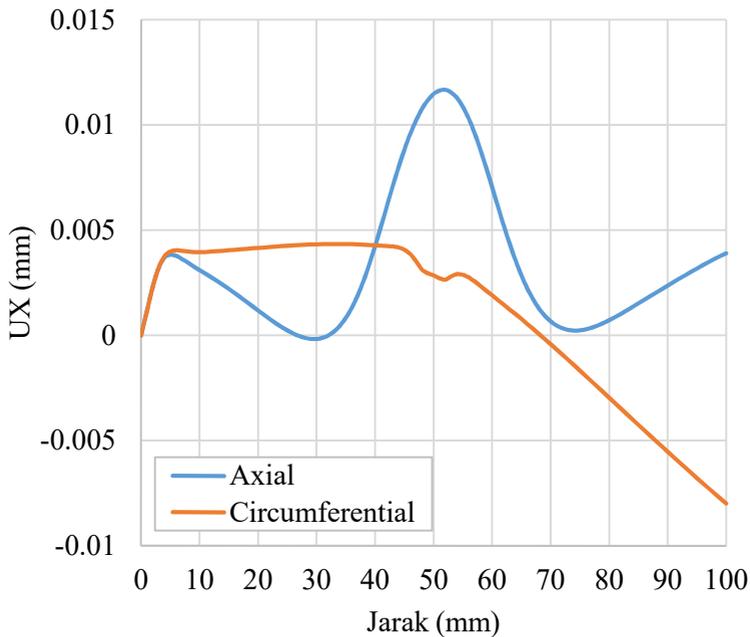
Gambar 4.16 Historis *displacement-y* pada ujung pipa circular.

Dapat dilihat pada gambar 4.16 bahwa pada proses pemanasan maka pipa akan *bending* ke arah sumbu- y negative dan

pada saat pendinginan akan *bending* ke arah sumbu-y positif pada saat tertentu akan berhenti dan membentuk trend garis lurus yang berarti proses sudah selesai. Dapat dilihat yang mengalami gradient paling curam adalah *case 3* di mana merupakan kombinasi dari skema *axial* dengan *power* 1500W dan kecepatan 10 mm/s. untuk yang memiliki gradient terendah adalah kombinasi antara skema *circumferential* yang menggunakan *power* 1000W dengan kecepatan 20 mm/s. untuk titik maksimal *displacement*, dapat dilihat pada semua *case* hampir terjadi pada waktu yang sama yaitu berada pada range waktu 70-80 detik dan setelah itu akan stagnan, dari grafik tersebut juga dapat dilihat bahwa *displacement* pada saat pemanasan nilainya lebih tinggi (arah negative) dibandingkan saat proses pendinginan selesai (arah positif).



Gambar 4.17 Displacement arah-x (*lateral bending*) top path.



Gambar 4.18 Displacement arah-x (*lateral bending*) side path path.

Selain *displacement-y*, yang akan ditampilkan adalah *displacement* pada sumbu-x pada bagian atas pipa pada gambar 4.17 dan pada bagian samping pipa pada gambar 4.18. Pada gambar 4.17 menunjukkan gambar *displacement* pada sumbu-x yang diukur pada *top path*. *Displacement* pada ujung pipa pada arah-x (jarak 100mm) merepresentasikan *lateral bending*. Kondisi idealnya tidak boleh ada *lateral bending* yang terjadi pada proses. Pada hasil yang didapatkan dapat diketahui bahwa pada *axial scan* hampir tidak ada *lateral bending* yang terjadi sehingga dapat dikatakan baik. Berbeda pada hasil yang didapatkan pada *scan circumferential* di mana terdapat *lateral bending* walaupun besaran

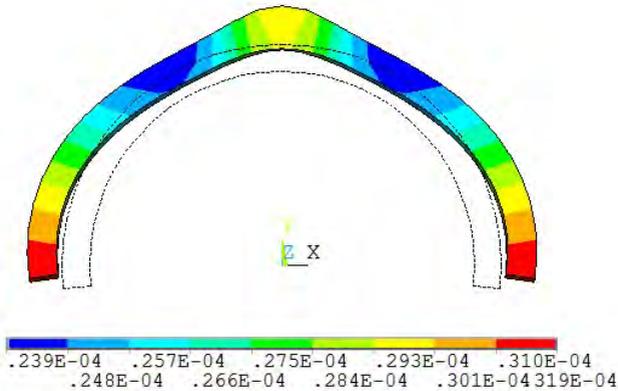
displacement pada arah *lateral* nya jauh di bawah *displacement* pada arah *bending*.

Gambar 4.18 menunjukkan *displacement* pada arah-x tapi dengan *path* yang berbeda dari gambar 4.17 yaitu dengan *side path*. Segala distorsi pada arah-x di *side path* merepresentasikan material yang menonjol baik ke dalam ataupun keluar dari sisi samping pipa. Distorsi pada sumbu *y* dan *z* pada *side path* tidak terlalu kritis karena mirip dengan distorsi pada *top path*. *Lateral bending* pada *side path* pipa dapat dilihat pada gambar 4.18 dimana pada *scan axial* tidak terdapat *lateral bending* yang berarti jika dibandingkan dengan *scan circumferential*, tetapi masih ada bagian yang menonjol pada bagian tengah pipa pada skema *axial*.

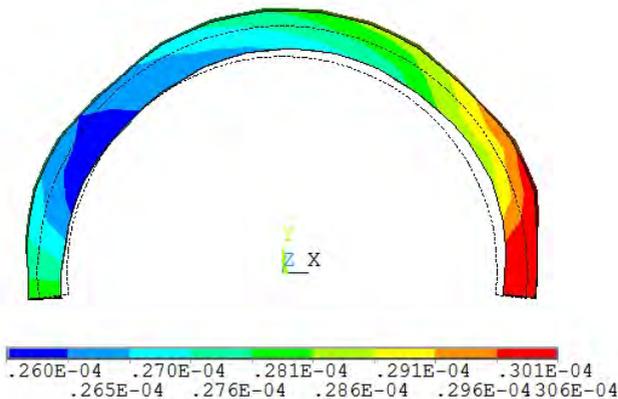
Analisis distorsi pada *top* dan *side path* dapat memberikan gambaran yang baik untuk melihat distorsi yang dihasilkan dengan skema *scan* yang berbeda. Hasilnya bahwa *displacement-y* pada *scan axial* besarnya hampir dua kali dari *circumferential scan* dengan *power* yang sama dan kecepatan yang sama. *Axial scan* juga tidak menghasilkan *lateral bending* yang tinggi akan tetapi ada tonjolan pada sekitar tengah pipa. Pada gambar 4.19 dan 4.20 akan disajikan distorsi pada penampang pipa pada bagian tengah.

Pada gambar 4.19 dapat dilihat bahwa pada *axial scan*, pada dinding bagian luar terdapat tonjolan pada bagian atas yang merenggang yang menghasilkan *ovality*. Pada bagian dalam pun memiliki hasil yang sama dengan bagian luar tapi dengan besaran yang lebih kecil. Sedangkan dari gambar 4.20 pada *circumferential scanning* terlihat adanya distorsi yang tidak simetris pada sumbu-x sehingga pada pipa di sebelah sumbu *x* negatif terlihat agak mengembung karena adanya ekspansi termal sehingga ketebalan bertambah sedangkan pada sebelah sumbu *x* positif terdapat pergeseran dinding bagian luar ke arah sumbu *x* positif. Jadi jika dibandingkan dengan *axial scan* maka terlihat penampang pipa pada *circumferential* ini asimetris yang disebabkan oleh adanya *lateral bending*, bandingkan dengan *lateral bending* yang ada pada *axial scan*. Dapat dilihat pula pada gambar 4.19 bahwa distorsi pada dinding bagian dalam bernilai kecil, sangat diharapkan bahwa

distorsi pada bagian dalam pipa sangat kecil karena dapat mengganggu aplikasi dari pipa itu sendiri seperti aplikasi pada aliran, distorsi yang besar pada bagian dalam akan mengganggu karakteristik aliran dari fluida yang akan dialiri tentunya.



Gambar 4.19 Profil penampang dari pipa pada *axial scanning* pada $z = 50$ mm



Gambar 4.20 Profil penampang dari pipa pada *circumferential scanning* pada $z = 50$ mm

Dari serangkaian proses yang dilakukan, dapat diambil kesimpulan bahwa yang mempengaruhi untuk meningkatkan hasil *bending* adalah menaikkan *power* dan menurunkan kecepatan *scanning*. Akan tetapi ada konsekuensi yang ditimbulkan untuk menghasilkan sudut *bending* yang tinggi yaitu akan menghasilkan residual stress yang lebih tinggi dan distorsi yang lebih tinggi. Deformasi plastis akan meningkat seiring dengan meningkatnya *power* input yang dapat dibuktikan dari tingginya stress yang dihasilkan pada daerah HAZ. Bagaimanapun, distribusi tegangan memiliki trend yang sama untuk masing masing *power*. Semakin tingginya temperatur maka temperature akan meningkat begitu juga dengan kecepatan yang lebih rendah maka temperature akan lebih tinggi, temperature yang lebih tinggi akan menyebabkan flow stress pada daerah tekukan lebih rendah dan hampir seluruhnya bersifat plastis tetapi temperatur pada daerah yang tidak dikenai laser *scanning* akan tetap berada pada temperature ruang saat proses *scanning* sehingga *bending* pada daerah tersebut bersifat elastis. Dengan berkurangnya daerah HAZ sepanjang arah *axial* menyebabkan pipa mengalami *bending* dengan arah menuju laser beam. (Hsieh 2005).

Hal yang paling mempengaruhi terjadinya *bending* adalah tegangan pada arah *axial*. Deformasi yang terjadi merupakan hasil dari shortening pada arah *axial* dan *displacement* pada bagian luar. Dapat diketahui dari hasil penelitian bahwa *displacement* yang tertinggi akan berada pada ujung pipa. *Bending* yang terjadi diinisiasi oleh adanya gradien termal yang berkombinasi dengan deformasi plastis, jadi dapat dikatakan bahwa semakin tinggi termal gradien maka deformasi yang dihasilkan semakin tinggi. (Hsieh, 2005). Untuk skema *axial* yang memiliki tegangan terendah adalah *case 2* yaitu kombinasi *power* 1000W dengan kecepatan 20 mm/s dengan nilai kurang lebih 450 MPa sedangkan untuk distorsi *displacement-y* terendah adalah *case 2* juga dengan distorsi 0.04 mm. Sedangkan untuk skema *circumferential* yang memiliki tegangan terendah adalah *case 6* dengan nilai kurang lebih 50 MPa dan distorsi terkecil juga terjadi pada *case 6* dengan

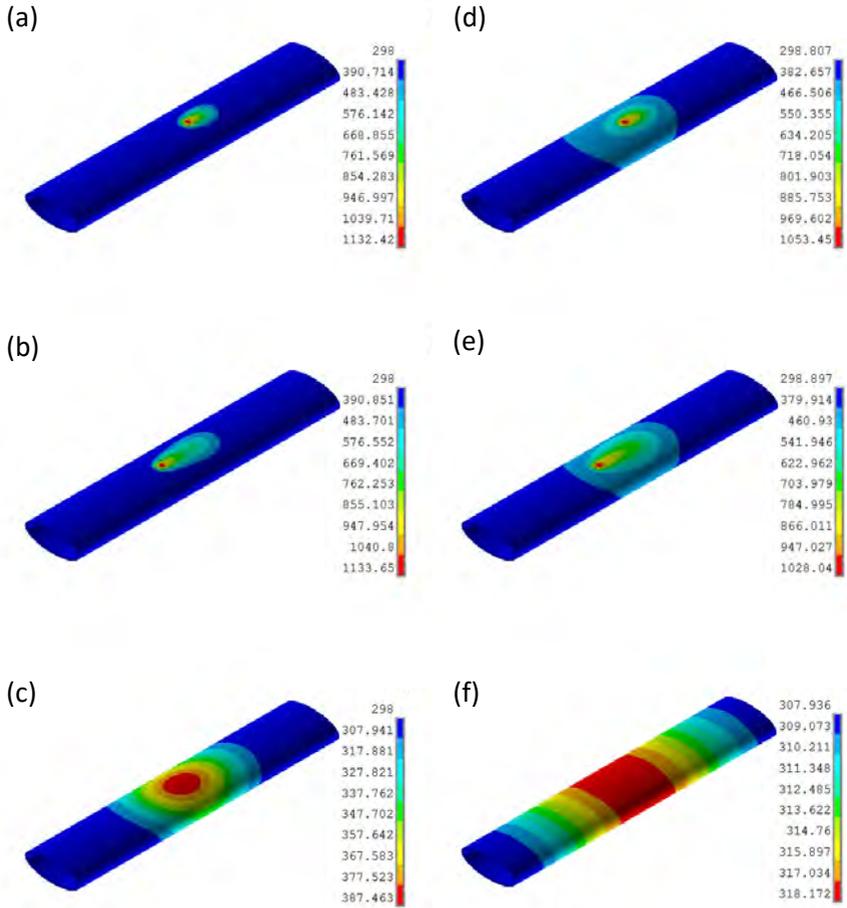
nilai 0.0025 mm. akan tetapi pada *case* ini *displacement* yang terjadi sangat kecil sehingga *bending* yang terjadi kecil, oleh karena itu yang direkomendasikan untuk dilakukan adalah *case* 1 untuk skema aksial karena memiliki tegangan yang tidak terlalu tinggi yaitu sekitar 500 MPa dan distorsi 0.1 mm. Sedangkan untuk skema *circumferential*, yang direkomendasikan adalah *case* 5 dengan nilai tegangan sekitar 190 MPa dengan distorsi 0.02 mm.

IV.2. Pipa Elips

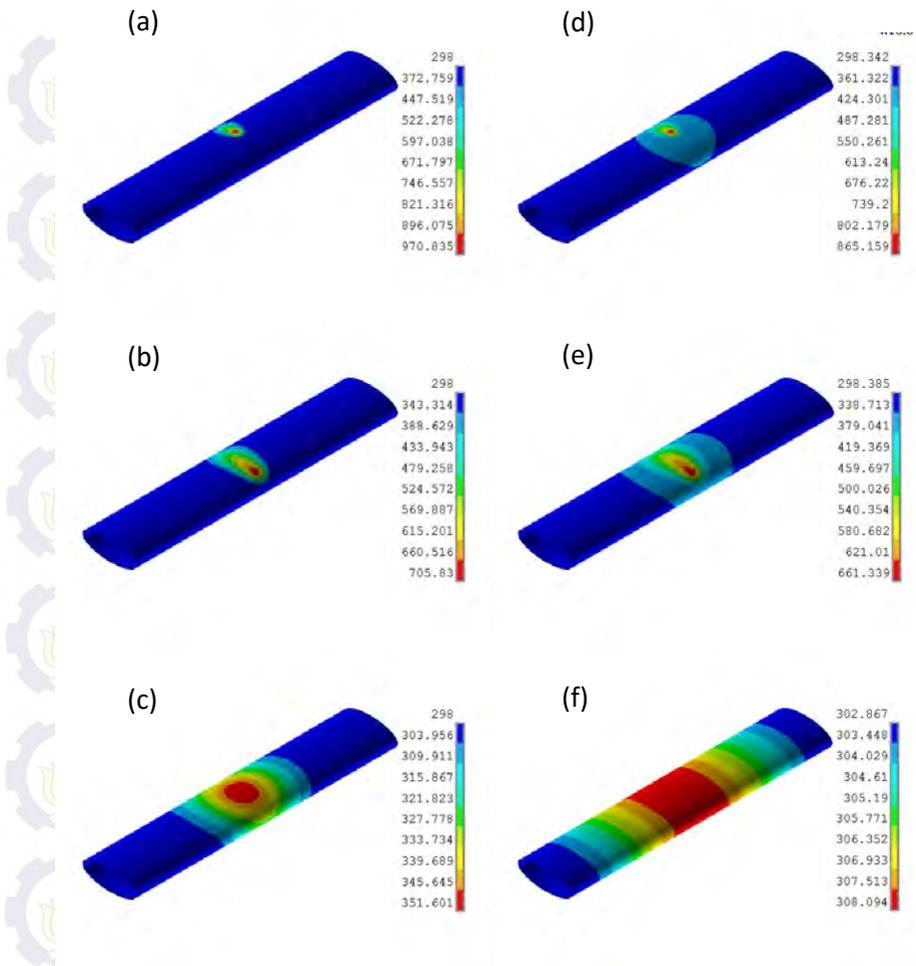
IV.2.1 Respon Termal

Respon temperatur dari *case* 1 (*axial*) dapat dilihat pada gambar 4.20 dan *case* 5 (*circumferential*) pada gambar 4.21 yang berupa distribusi temperatur pada (a) detik 1 pada saat *heat flux* melewati tengah pipa, (b) detik 2 pada saat *heating* pertama selesai, (c) detik ke 12 saat *cooling* 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 *cooling* terakhir selesai dan proses selesai.

Dapat dilihat dari gambar distribusi pada *scanning* yang pertama, temperatur maksimum yang tercapai adalah sekitar 1133K atau sekitar 860°C dan pada *scanning* yang keempat mengalami penurunan karena daya yang diturunkan, temperatur yang dicapai pada *scanning* yang keempat hanya mencapai 1053K atau 780°C. Jika dibandingkan dengan pipa *circular* maka dapat dilihat bahwa temperatur pada pipa elips dengan kondisi yang sama menghasilkan temperatur yang lebih tinggi dari temperatur pada pipa *circular* walaupun besarnya tidak terlalu signifikan tetapi tentu saja hasil ini akan mempengaruhi hasil dari proses yang dilakukan. Sedangkan untuk skema *circumferential*, temperatur yang dihasilkan lebih kecil. Jika dibandingkan dengan distribusi temperatur pada pipa *circular* distribusi temperatur pada skema *axial* pipa elips ini lebih rendah, perbedaan temperatur ini disebabkan perbedaan panjang intasan *scanning* dan juga luas permukaan pipa yang menyebabkan perbedaan *heat transfer rate* sehingga temperatur yang dihasilkan akan berbeda.



Gambar 4.21 Distribusi temperatur pada: (a) detik 1; (b) detik 2; (c) detik 12; (d) detik 37; (e) detik 38; dan (f) 138. *Case 1 (Axial Scanning)*.

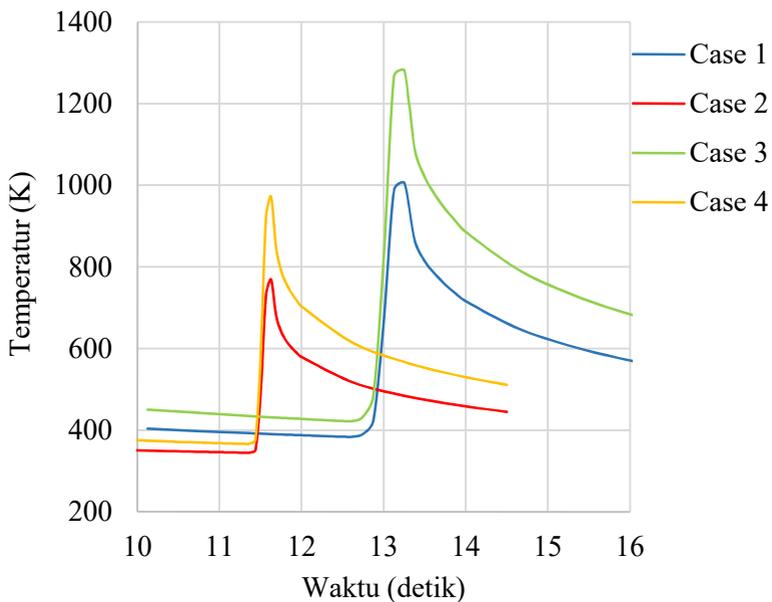


Gambar 4.22 Distribusi temperatur pada: (a) detik 1; (b) detik 2; (c) detik 12; (d) detik 37; (e) detik 38; dan (f) 138. *Case 5 (Circumferential Scanning)*.

Gambar 4.21 menunjukkan distribusi temperatur pada *scanning axial*, panjang lintasan yang dipanaskan pada *scanning axial* ini adalah 20 mm dengan melintasi pusat bagian atas dari pipa. Dapat dilihat bahwa temperatur maksimum yang dicapai mencapai sekitar 1130K (857°C) saat terjadi proses pemanasan (a), lalu panas yang ditransfer ke material akan secara cepat hilang ke sekelilingnya dengan efek konduksi sehingga daerah sekitarnya menerima panas (b). Setelah pemanasan selesai, material didinginkan secara konveksi selama sepuluh detik, pada proses konveksi ini juga terjadi proses konduksi sehingga temperatur pada daerah yang dikenai *heatflux* tadi akan turun sedangkan daerah di sekitarnya akan menerima panas secara konduksi sehingga temperaturnya naik (c). Tetapi setelah pendinginan selama sepuluh detik, temperatur uniform belum tercapai akan tetapi sudah dilakukan proses *scan* yang kedua. Pada gambar (d) proses *scan* keempat, temperatur yang dicapai akan turun dibandingkan temperatur yang pertama karena daya yang digunakan pada *scan-scan* berikutnya setelah *scan* satu dikurangi sebanyak 10% agar tidak mencapai temperatur melting dari material. Pada proses pendinginan terakhir (f), dilakukan selama 100 detik agar temperatur mencapai temperatur ruang, setelah proses simulasi, temperatur akhir dari material berada pada range 307K-318K (34°C-45°C), dimana temperatur minimum terdapat di tepi *axial* dari pipa dan akan naik ke arah tengah dari pipa dan maksimalnya pada titik tengah pada pipa. Temperatur sisa ini dapat diabaikan pada analisis ini karena ekspansi termal pada temperatur tersebut hampir sama nilainya dengan temperatur ruang.

Gambar 4.22 menunjukkan distribusi temperatur pada material *case 5* yang menggunakan *scanning circumferential* dengan lintasan pada $z=50$ mm dari sumbu x negatif menuju ke sumbu x positif. Dapat dilihat temperatur maksimum yang dicapai pada saat *scan* pertama dari detik nol sampai detik kedua, pada saat *heat flux* melewati tengah-tengah pipa pada $x=0$, temperatur maksimum yang dicapai adalah sekitar 970K (697°C) (a). Pada saat

scan pertama selesai pada detik kedua, temperatur maksimum menjadi 1040K dan daerah sekitar yang terkena dampak dari pemanasan juga menerima panas akibat konduksi (b), pada saat proses pendinginan selama 10 detik, temperatur pada lintasan yang dilewati *heat flux* akan turun karena panas berpindah ke material sekitarnya secara konduksi dan hilang ke udara secara konveksi (c). Sedangkan pada *scan* ke empat saat daya diturunkan, maka temperatur maksimum hanya mencapai 865K atau sekitar 592°C (d), dan pada pendinginan terakhir dilakukan selama 100 detik dan temperatur menjadi 308K (35°C) pada pusat (f).

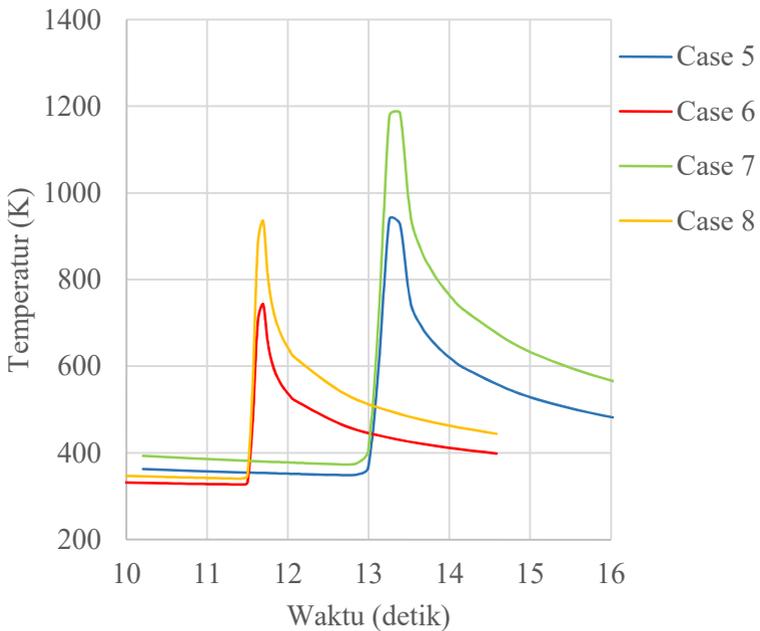


Gambar 4.23 Temperatur vs waktu (*Scan* kedua) untuk *axial scanning* pipa elips

Pada gambar 4.23 menunjukkan grafik historis temperatur pada *laser forming* pipa elips dengan lintasan *scanning axial*. Dapat dilihat pada gambar 4.23 bahwa yang mencapai temperatur tertinggi adalah *case 3* di mana pada *case 3* ini menggunakan daya (*power*) 1500W dengan kecepatan *scanning* 10mm/s, dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa dengan semakin besarnya daya maka panas yang dihasilkan akan semakin tinggi, dan semakin lambat kecepatan pemanasan maka panas yang diberikan akan semakin lama sehingga panas yang dihasilkan akan lebih tinggi jika dibandingkan dengan kecepatan yang lebih tinggi. Dapat dilihat pula temperatur paling kecil dari antara keempat *case* tersebut adalah *case dua* di mana menggunakan daya paling rendah dan kecepatan lebih cepat. Kecepatan yang semakin cepat akan menyebabkan temperatur pada *heat affected zone* menurun sehingga koefisien penyerapan panas akan berkurang dan koefisien muai termalnya akan meningkat juga *specific heat* akan meningkat (Li, 2001).

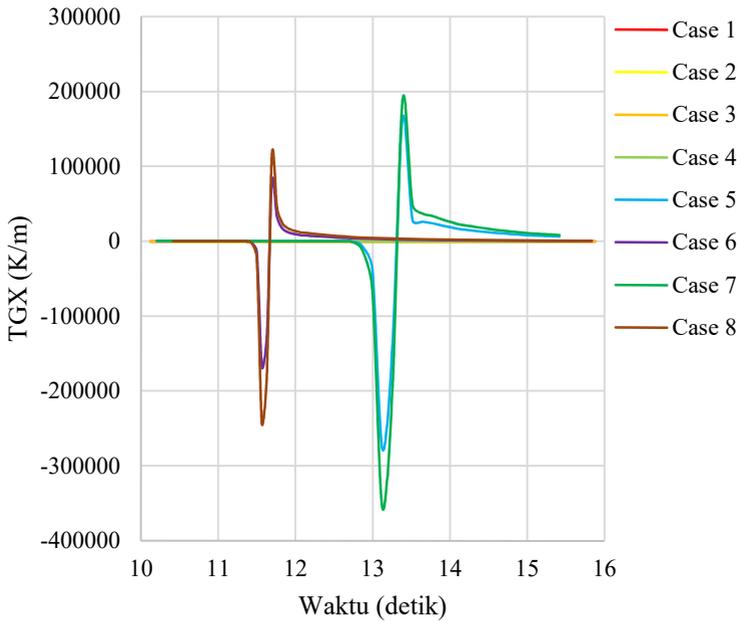
Pada gambar 4.24 dapat dilihat perbandingan peak temperatur pada saat *scan* kedua dengan skema *circumferential*, sama seperti di skema *axial* di mana temperatur pada *case 3* paling tinggi dan *case 2* paling rendah. Tapi apabila dibandingkan antara temperatur skema *axial* gambar 4.4 dengan skema *circumferential* gambar 4.24, maka dapat dilihat bahwa temperatur pada skema *axial* lebih tinggi daripada temperatur pada skema *circumferential*.

Jika kedua skema pada pipa elips tersebut dibandingkan dengan pipa *circular* terdapat perbedaan, jika pada skema pada pipa elips, temperatur sedikit lebih rendah daripada pada pipa *circular* baik pada skema *axial* maupun pada skema *circumferential*, alasannya sudah dijelaskan sebelumnya bahwa pada pipa elips, panas yang berpindah baik secara konduksi maupun konveksi lebih banyak. Dan pada skema *circumferential*, perbedaan panjang lintasan menjadi salah satu factor yang mempengaruhinya di mana jika dibandingkan, panjang lintasan *circumferential*nya lebih pendek daripada pipa *circular*.



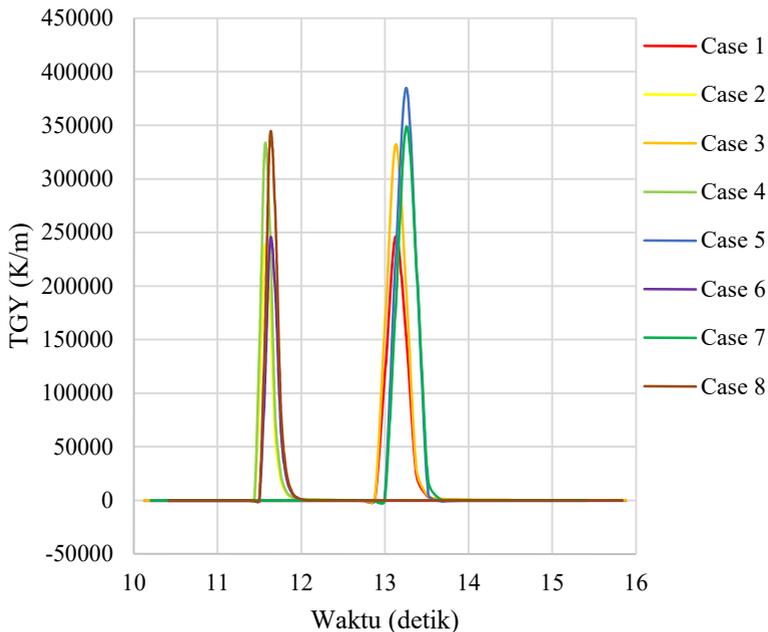
Gambar 4.24 Temperatur vs waktu (*Scan* kedua) untuk *circumferential scanning* pipa elips

Untuk memahami distribusi tegangan pada proses dengan melibatkan temperatur, tidak dapat dipisahkan dari *gradient* termal yang terjadi selama proses. Nantinya distribusi tegangan akan dianalisis pada bagian selanjutnya, sebelum itu, perlu dilihat juga analisis termal lain yaitu *thermal gradient* pada arah x, *thermal gradient* pada arah y dan *thermal gradient* pada arah z. *Thermal gradient* pada arah x disajikan pada gambar 2.25. *thermal gradient* pada arah y pada gambar 2.26 dan *thermal gradient* pada arah z pada gambar 2.27.



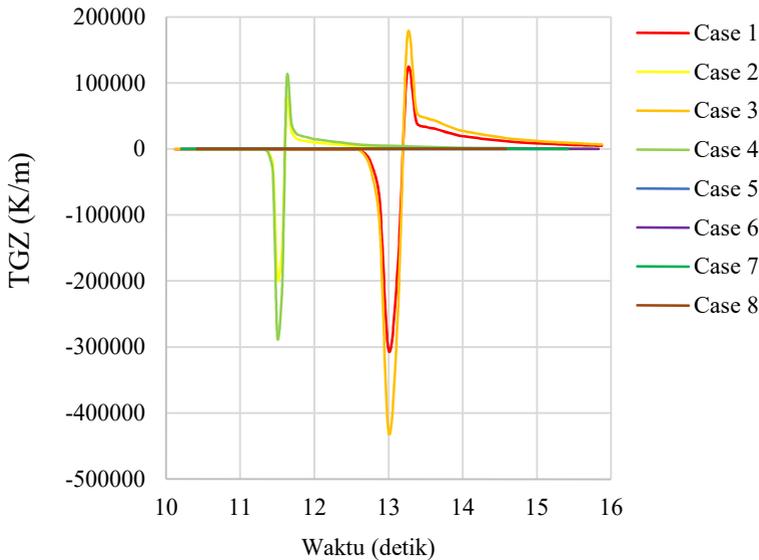
Gambar 4.25 *Thermal Gradient* arah-x Vs Waktu

Pada gambar 4.25 di atas dapat dilihat bahwa pada skema *axial* (*case* 1 sampai 4), *thermal gradient* pada arah x bernilai mendekati nol, sedangkan pada skema *circumferential* (*case* 5 sampai 8) dapat dilihat pola yang menunjukkan awalnya *thermal gradient* akan bernilai negative pada saat *heat flux* mengenai material dan kemudian akan bernilai positif sesaat setelah waktu tersebut, dapat dilihat range tertinggi dimiliki oleh *case* yang memiliki *power* lebih besar dan kecepatan lebih rendah yaitu pada *case* 7. Hal tersebut juga tidak berbeda jauh dengan apa yang terjadi pada pipa *circular* yang dilihat pada sub bab sebelumnya.



Gambar 4.26 *Thermal Gradient* arah-y Vs Waktu

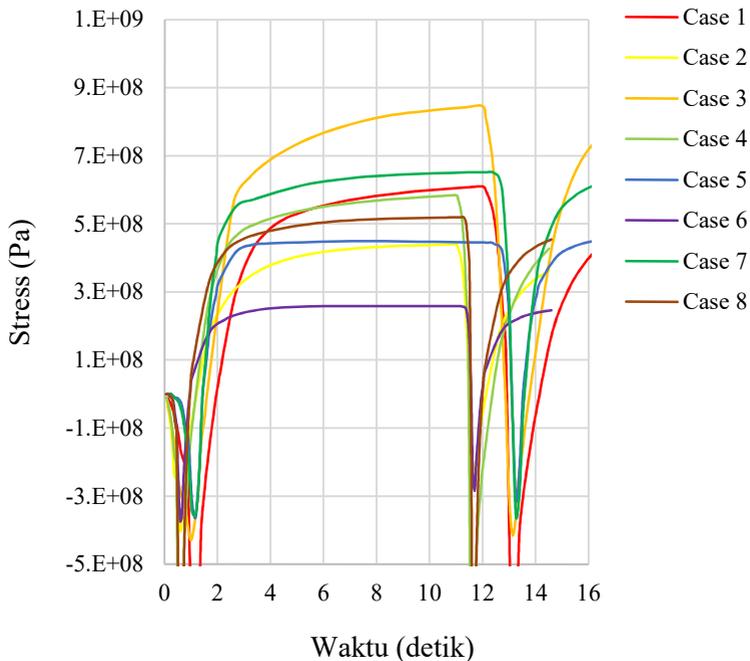
Gambar 4.26 menunjukkan variasi *thermal gradient* pada arah-y pada titik tengah. Dapat dilihat perbedaan letak puncak dari *thermal gradient* di mana pada *scanning* dengan kecepatan 10 mm/s terletak pada sekitar detik ke 11.5 sedangkan pada kecepatan 20 mm/s terletak pada sekitar detik ke 13. Dapat dilihat bahwa *axial scan* memiliki besaran *thermal gradient* yang paling besar, di mana yang paling besar yaitu yang menggunakan *power* 1500W dan kecepatan 20 mm/s, artinya semakin besar daya maka *thermal gradient* semakin tinggi dan semakin tinggi kecepatan *scan* maka *thermal gradient* juga akan semakin tinggi.



Gambar 4.27 *Thermal Gradient* arah-z Vs Waktu

Gambar 4.27 menunjukkan *thermal gradient* arah-z dari detik 10 sampai 16 di mana untuk *axial scan* searah dengan arah *scan* sedangkan untuk *circumferential scan* merupakan arah *lateral* sehingga berlawanan dengan *thermal gradient* arah x pada gambar 4.25. dapat dilihat pada gambar bahwa hasil menyerupai hasil *thermal gradient* arah x, bedanya jika di *thermal gradient* x yang mendekati nol adalah *axial scan* (case 1-4), di *thermal gradient* z ini yang mendekati nol adalah *circumferential scanning*, jadi dapat diambil kesimpulan jika besaran *thermal gradient* akan bernilai mendekati nol pada arah *lateral* dari *scan*. Untuk besaran yang terbesar masih sama seperti pada *thermal gradient* arah x dimana yang paling berpengaruh adalah daya (*power*) di mana semakin besar daya maka besaran dari *thermal gradient* akan semakin besar.

IV.2.2 Respon Tegangan



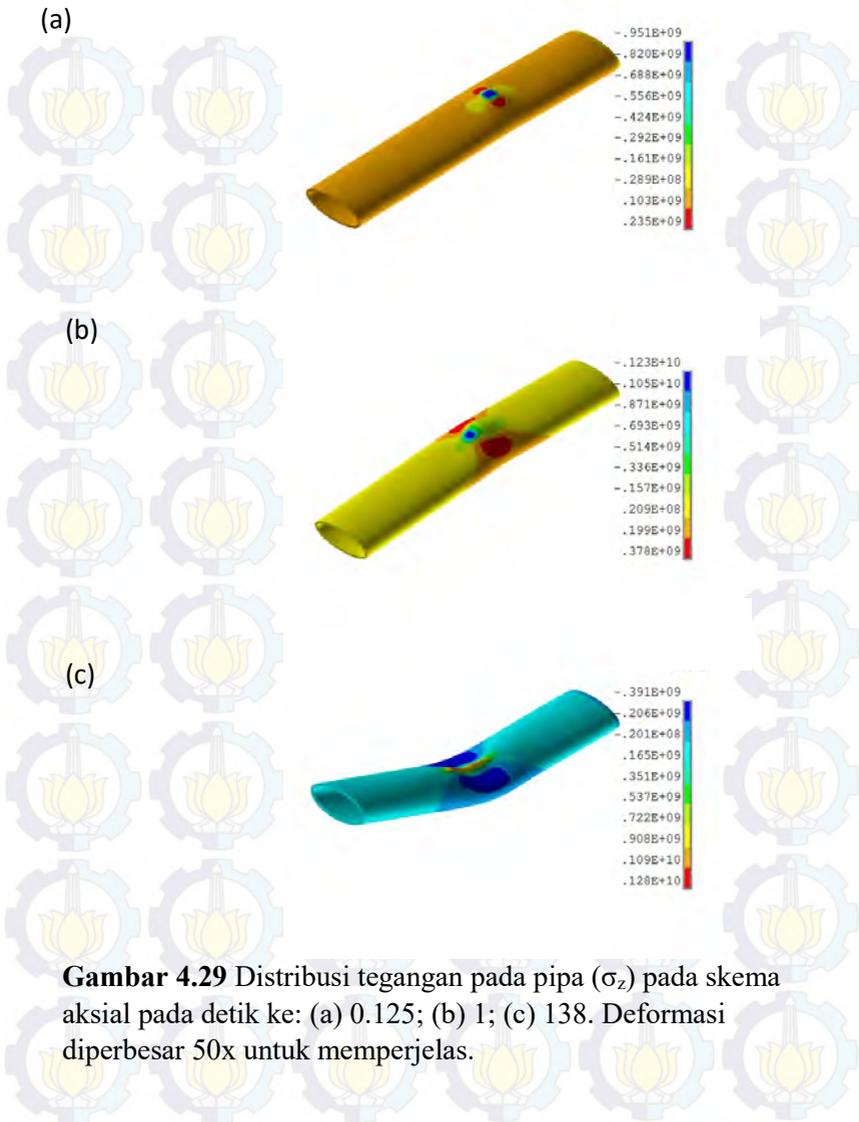
Gambar 4.28 Historis distribusi tegangan pada arah *scanning*

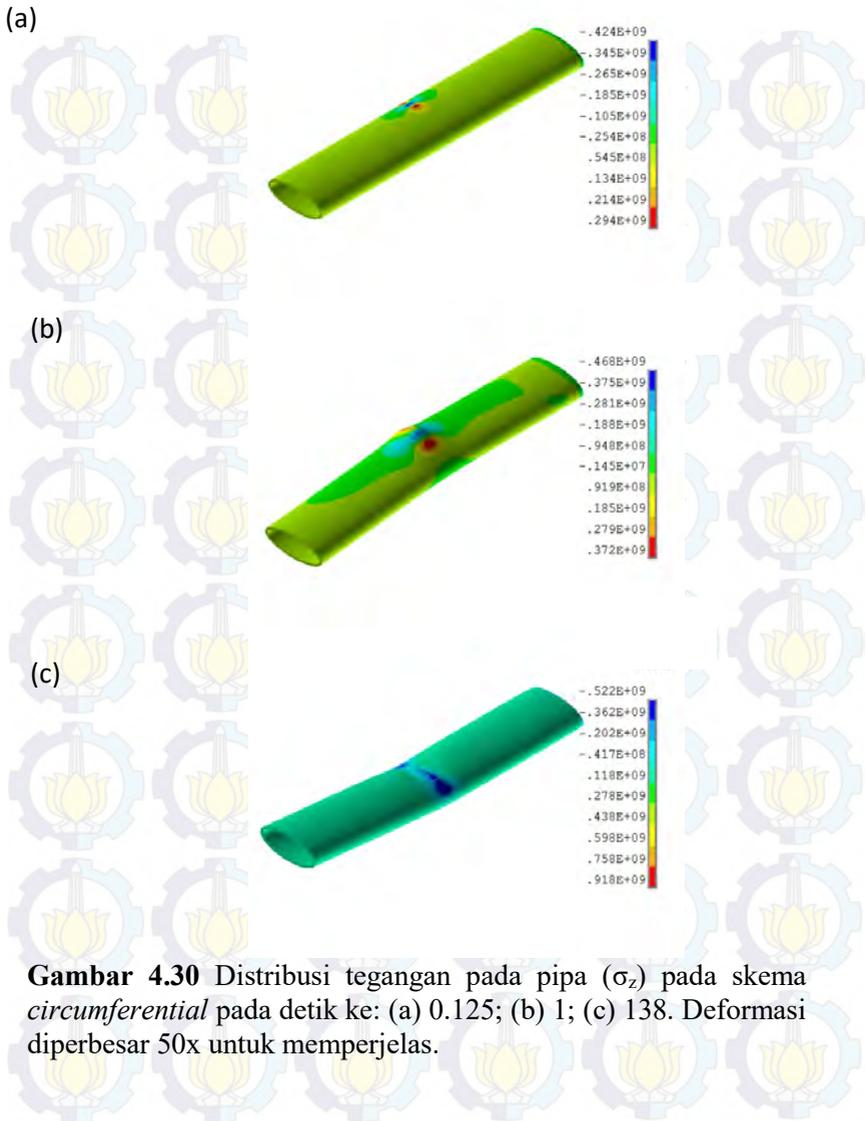
Pada gambar 4.28 dapat dilihat distribusi tegangan yang dihasilkan pada proses laser *bending* pada pipa berpenampang elips pada rentan waktu dari awal *scan* sampai detik ke-16 yaitu sampai *scan* kedua. Pola yang dihasilkan mirip dengan historis temperatur pada pipa *circular*. Dapat dilihat bahwa pada waktu laser mendekati *reference node* maka tegangan yang dihasilkan menunjukkan sumbu negatif yang berarti tegangan bersifat *compressive* dan pada saat laser tepat berada pada *reference node* maka tegangan yang dihasilkan mendekati nol karena adanya pengaruh temperatur yang tinggi, sedangkan ketika laser melewati

reference node maka tegangan naik pada saat titik tertentu akan berupa garis lurus karena terjadi proses pendinginan, dan pada saat proses *scan* kedua akan terjadi pola yang berulang seperti yang terjadi pada *scan* yang pertama. Dapat dilihat yang menghasilkan tegangan tertinggi adalah *case 3* dan *7* yaitu yang memiliki *power* lebih tinggi dan kecepatan *scanning* yang lebih lambat, namun yang lebih tinggi adalah *case 3* yang menggunakan skema *axial* daripada *case 7* yang menggunakan skema *circumferential*.

Jika dibandingkan hasil tegangan antara pipa *circular* dan pipa elips, dapat dilihat tegangan pada pipa elips lebih tinggi daripada tegangan pada pipa *circular*. Namun perbedaannya hanya sedikit saja. Hal tersebut juga dikarenakan perbedaan terhadap penampang pipa yang menyebabkan distribusi *thermal gradient* yang berbeda. Dapat dilihat pada pembahasan sebelumnya bahwa *thermal gradient* pada penampang elips akan berbeda dengan penampang *circular*.

Respon tegangan pada pipa dapat dilihat pada gambar 4.29 untuk skema aksial dan 4.30 untuk skema *circumferential*. Harus diberi catatan bahwa yang di-plot pada kedua gambar tersebut adalah tegangan pada sumbu *z* karena tegangan tersebut yang akan menyebabkan perubahan secara angular pada pipa baik pada skema *circumferential* ataupun *axial*. Tegangan yang bernilai positif diwakili oleh daerah berwarna merah yang mengindikasikan *tensile stress* sedangkan nilai tegangan yang negative diwakili oleh daerah dengan warna biru yang mengindikasikan *compressive stress*. Terdapat skala yang dapat dilihat pada bagian kanan gambar yang menunjukkan nilai dari tegangan untuk masing-masing warna pada gambar.





Gambar 4.29 menunjukkan distribusi tegangan pada permukaan pipa elips pada skema *axial* 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 4.28 (a) bahwa ketika proses pemanasan dimulai, nilai *compressive stress* nya sangat tinggi mencapai 900 MPa pada zona yang dipanaskan dan daerah di sekelilingnya yang diakibatkan oleh tingginya ekspansi termal oleh temperatur yang tinggi sehingga mengakibatkan *counter-bending* yang terjadi pada saat tersebut. Sedangkan pada daerah yang berwarna merah atau disebelah dari zona biru terdapat *tensile stress* dengan nilai maksimum 235 MPa yang dihasilkan sebagai reaksi dari ekspansi termal pada daerah sekitar yang dipanasi sehingga membatasi ekspansi termal tersebut. Gambar 4.28 (b) sudah terjadi proses pendinginan pada daerah yang telah dipanaskan sebelumnya, *compressive stress* yang tadi terjadi berubah menjadi *tensile stress* (maksimum 378 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)

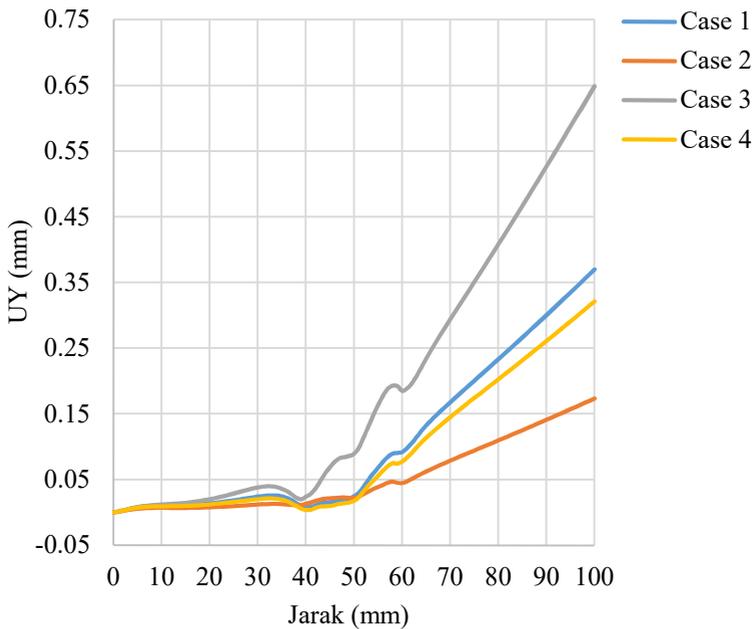
Gambar 4.30 menunjukkan distribusi tegangan pada permukaan pipa pada skema *circumferential* dengan *power* 1500W dan kecepatan 10 mm/s yang dibagi menjadi tiga tahapan yang berbeda. Tahapan yang pertama berada pada awal *scanning* pada detik ke 0.125 (a). Tahapan kedua pada saat *scanning* melewati 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 4.30 (a) bahwa ketika proses pemanasan dimulai, nilai *compressive stress* nya sangat tinggi mencapai 425 MPa pada zona yang dipanaskan dan daerah di sekelilingnya yang diakibatkan oleh tingginya

ekspansi termal oleh temperatur yang tinggi sehingga mengakibatkan counter-*bending* yang terjadi pada saat tersebut. Sedangkan pada daerah yang berwarna merah atau disebelah dari zona biru terdapat *tensile stress* dengan nilai maksimum 295 MPa yang dihasilkan sebagai reaksi dari ekspansi termal pada daerah sekitar yang dipanasi sehingga membatasi ekspansi termal tersebut. Gambar 4.30 (b) sudah terjadi proses pendinginan pada daerah yang telah dipanaskan sebelumnya, *compressive stress* yang tadi terjadi berubah menjadi *tensile stress* (maksimum 372 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 4.30 (c)

Jika dibandingkan gambar 4.29 dan 4.30 terdapat perbedaan distribusi tegangan yang didasari karena perbedaan lintasan pemanasan, di mana pada skema aksial distribusi tegangan lebih ke arah sumbu z sehingga *bending* yang terjadi terjadi sepanjang sumbu-x yang dipanasi sedangkan pada skema *circumferential* karena lintasan yang dipanaskan berada sepanjang sumbu-x maka *bending* pada sumbu-z yang terjadi hanya bersifat local sehingga *bend angle* yang terjadi tidak begitu besar.

Jika dibandingkan hasil *bending* dari pipa *circular* dan elips maka dapat dilihat bahwa *bending* pada pipa elips menghasilkan sudut *bending* yang lebih tinggi, akan tetapi distorsi pada penampang pun akan lebih tinggi yang akan dijelaskan lebih lanjut pada bab ini.

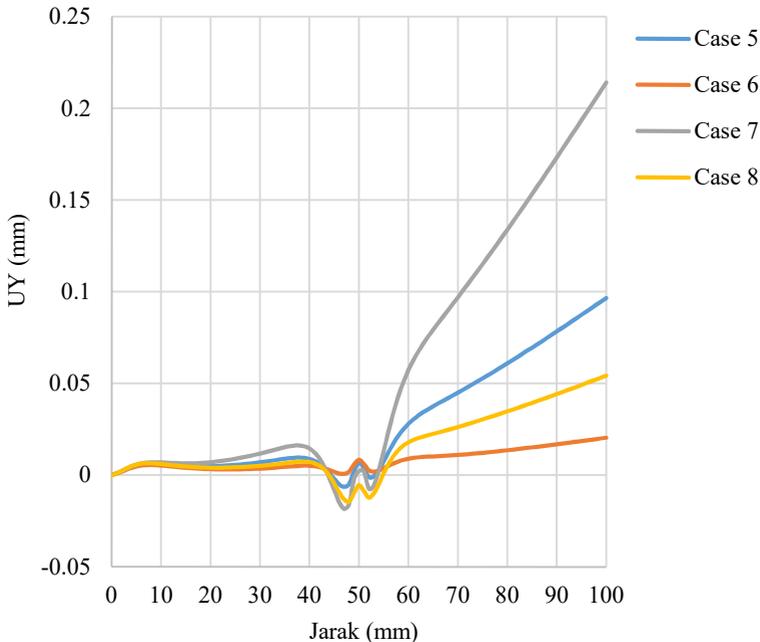
Untuk melihat lebih jelas maka akan diplot *displacement* pada sumbu-y untuk melihat perubahan posisi dari sumbu-y sepanjang pipa yang dapat dilihat pada gambar 4.31 untuk skema aksial dan gambar 4.32 untuk skema *circumferential*.



Gambar 4.31 *Displacement* pada arah-y (*bending*) pada bagian atas pada skema *axial*.

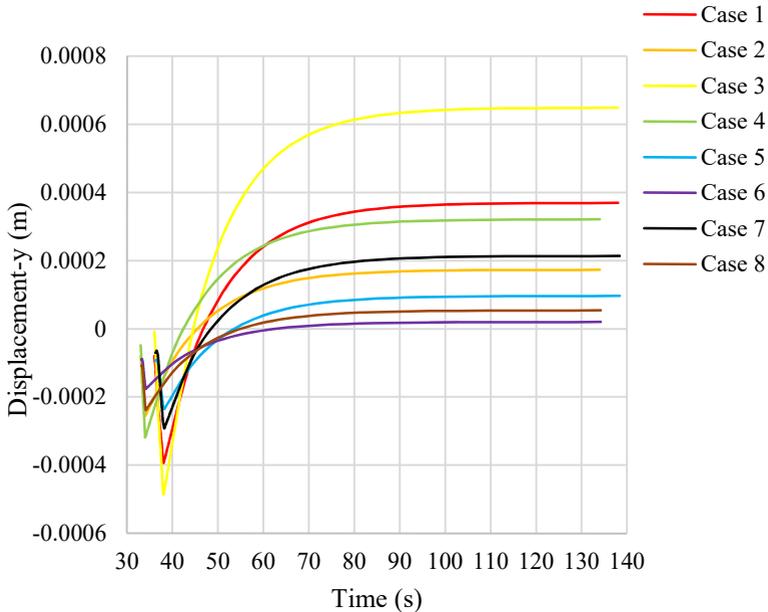
Jika dilihat pada grafik, maka dapat diambil kesimpulan bahwa yang memiliki sudut *bending* paling tinggi adalah *case 3* yang memiliki *power* lebih tinggi dengan kecepatan *scanning* lebih rendah diikuti dengan *power* yang lebih rendah dengan kecepatan yang sama. Jadi dapat diambil kesimpulan bahwa semakin lambat kecepatan *scanning* maka sudut *bending* yang dihasilkan semakin tinggi, hal ini juga berkaitan dengan tegangan yang dihasilkan yang telah dibahas sebelumnya yang merupakan hasil dari *thermal gradient* hasil dari analisis termal. Akan tetapi jika dilihat pada jarak sekitar tengah pipa (50 mm) maka akan terlihat distorsi yang menyebabkan permukaan pipa tidak halus yang dikhawatirkan

akan mengganggu aplikasi dari pipa itu seperti aplikasi untuk aliran dalam pipa yang bisa menyebabkan aliran turbulen.



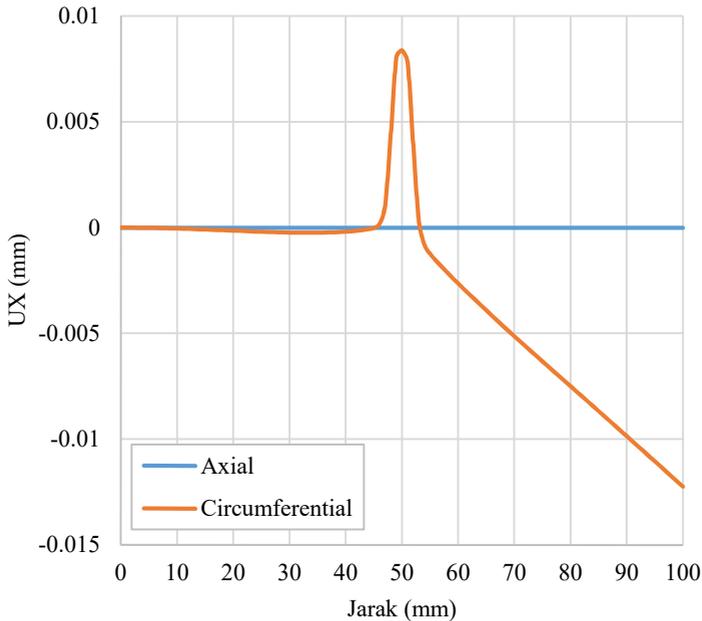
Gambar 4.32 *Displacement* pada arah-y (*bending*) pada bagian atas pada skema *circumferential*.

Gambar 4.32 menunjukkan *displacement-y* untuk skema *circumferential*, urutan yang memiliki *displacement* tertinggi sama seperti yang ada pada skema *axial* yaitu yang memiliki *power* lebih tinggi dan kecepatan lebih rendah. Yang berbeda adalah pola yang terbentuk, dapat dilihat bahwa pada skema *circumferential*, distorsi pada tengah pipa lebih buruk ditandai dengan grafik yang turun naik pada tengah pipa yang menandakan pipa mengalami deformasi ke bagian dalam pipa yang tentunya tidak diharapkan karena dapat berakibat pada penggunaan pipa.



Gambar 4.33 Historis *displacement-y* pada ujung pipa elips.

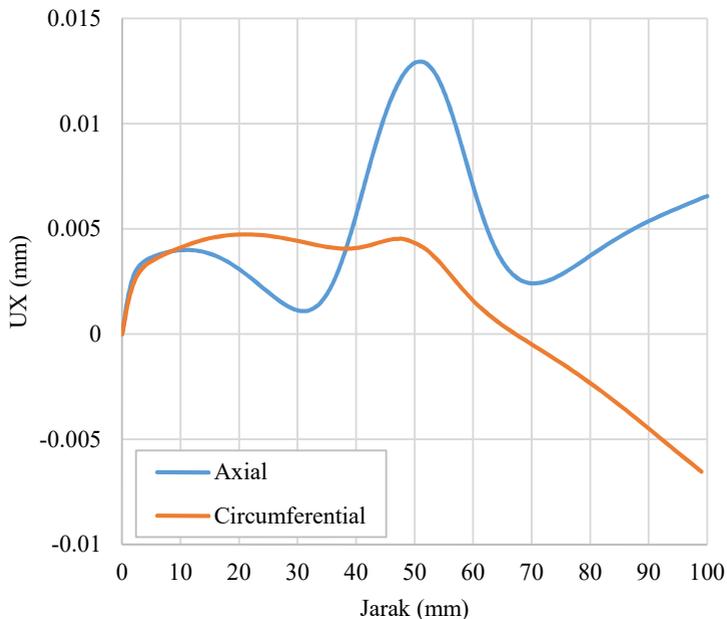
Dapat dilihat pada gambar 4.33 bahwa pada proses pemanasan maka pipa akan *bending* ke arah negative dan pada saat pendinginan akan *bending* ke arah positif pada saat tertentu akan berhenti dan membentuk trend garis lurus yang berarti proses sudah selesai. Dapat dilihat yang mengalami gradient paling curam adalah *case 3*. untuk yang memiliki gradient terendah adalah kombinasi antara skema *circumferential* yang menggunakan *power* 1000W dengan kecepatan 20 mm/s. untuk titik maksimal *displacement*, dapat dilihat pada semua *case* hampir terjadi pada waktu yang sama yaitu berada pada range waktu 70-80 detik dan setelah itu akan stagnan, dari grafik tersebut juga dapat dilihat bahwa *displacement* pada saat pemanasan besarnya lebih rendah daripada pendinginan, hal ini berlawanan dengan apa yang terjadi pada pipa circular.



Gambar 4.34 Displacement arah-x (*lateral bending*) top path

Pada gambar 4.34 menunjukkan gambar *displacement* pada sumbu-x yang diukur pada *top path*. *Displacement* pada ujung pipa pada arah-x (jarak 100 mm) merepresentasikan *lateral bending*. Kondisi idealnya tidak boleh ada *lateral bending* yang terjadi pada proses. Pada hasil yang didapatkan dapat diketahui bahwa pada *axial scan* hampir tidak ada *lateral bending* yang terjadi sehingga dapat dikatakan baik. Berbeda pada hasil yang didapatkan pada *scan circumferential* di mana terdapat *lateral bending* walaupun besaran *displacement* pada arah *lateral* nya jauh di bawah *displacement* pada arah *bending*. Jika dibandingkan dengan hasil yang didapatkan pada pipa *circular* dapat dilihat bahwa nilai *displacement* pada pipa elips ini lebih tinggi untuk

yang menggunakan skema *circumferential*, sedangkan untuk yang menggunakan skema *axial*, baik pipa *circular* ataupun pipa elips sama-sama memiliki nilai *displacement* mendekati nol.

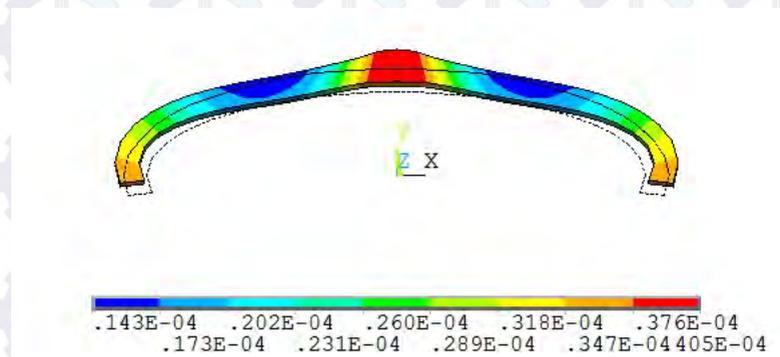


Gambar 4.35 *Displacement* arah-x (*lateral bending*) *side path* *path*.

Gambar 4.35 menunjukkan *displacement* pada arah-x tapi dengan *path* yang berbeda dari gambar 4.34 yaitu dengan *side path*. Segala distorsi pada arah-x di *side path* merepresentasikan material yang menonjol baik ke dalam ataupun keluar dari sisi samping pipa. Distorsi pada sumbu *y* dan *z* pada *side path* tidak terlalu kritis karena mirip dengan distorsi pada *top path*. *Lateral bending* pada *side path* pipa dapat dilihat pada gambar 4.33 dimana pada *scan axial* tidak terdapat *lateral bending* yang berarti jika dibandingkan

dengan *scan circumferential*, tetapi masih ada bagian yang menonjol pada bagian tengah pipa pada skema *axial*.

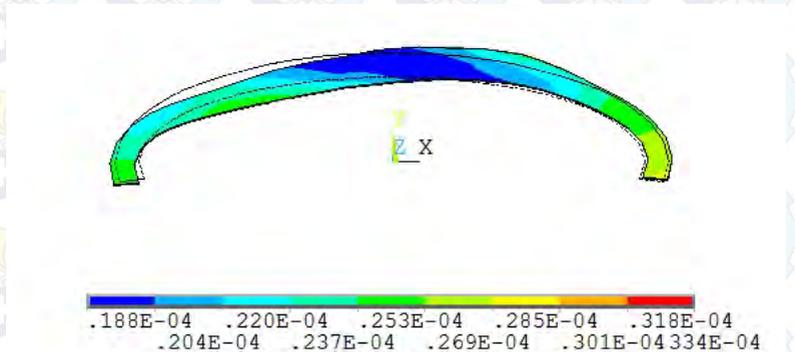
Analisis distorsi pada *top* dan *side path* dapat memberikan gambaran yang baik untuk melihat distorsi yang dihasilkan dengan skema *scan* yang berbeda. Hasilnya bahwa *displacement-y* pada *scan axial* besarnya hampir dua kali dari *circumferential scan* dengan *power* yang sama dan kecepatan yang sama. *Axial scan* juga tidak menghasilkan *lateral bending* yang tinggi akan tetapi ada tonjolan pada sekitar tengah pipa. Pada gambar 4.36 dan 4.37 akan disajikan distorsi pada penampang pipa pada bagian tengah.



Gambar 4.36 Profil penampang dari pipa pada *axial scanning* pada $z = 50$ mm

Dari gambar 4.36 di atas dapat dilihat penampang pipa elips pada bagian tengah setelah proses *bending* dengan skema aksial, dapat dilihat bahwa terjadi ovalisasi akibat adanya distorsi, akan tetapi *thinning* yang terjadi tidak terlalu besar, hanya ada bagian yang menonjol pada bagian atas pipa dimana bagian tersebut merupakan daerah yang dikenai panas secara langsung sehingga memiliki *thermal gradient* yang tinggi yang menyebabkan adanya perbedaan temperatur yang tinggi antara daerah yang dilewati dan yang ada di sekitarnya sehingga akan

menimbulkan ekspansi material saat pemanasan dan kontraksi saat pendinginan, hal inilah yang menyebabkan adanya tegangan pada daerah yang dipanaskan dan sekelilingnya dan menyebabkan adanya *bending*.



Gambar 4.37 Profil penampang dari pipa pada *circumferential scanning* pada $z = 50$ mm

Pada gambar 4.37 dapat dilihat profil penampang pada pipa elips yang diproses dengan skema *circumferential*, berbeda dengan pipa elips yang menggunakan skema *axial*, pada skema *circumferential* ini terlihat ada distorsi berupa penipisan penampang dan jugapenebalan penampang yang menyebabkan penampang yang tidak simetris, penipisan ini juga akan berbahaya jika penipisan yang terjadi terlalu tinggi, akan tetapi jika dilihat dari gambar dan skala yang ada bahwa penipisan yang terjadi tidak terlalu besar.

Dari semua hasil yang didapatkan, dapat dilihat tidak ada perbedaan yang berarti antara geometri *circular* ataupun elips, dari distribusi temperatur hanya berbeda sedikit di mana pada geometri elips, temperatur lebih rendah akan tetapi distribusi tegangannya lebih tinggi dan distorsinya lebih besar.

Dari serangkaian proses yang dilakukan, dapat diambil kesimpulan bahwa yang mempengaruhi untuk meningkatkan hasil *bending* adalah menaikkan *power* dan menurunkan kecepatan *scanning*. Akan tetapi ada konsekuensi yang ditimbulkan untuk menghasilkan sudut *bending* yang tinggi yaitu akan menghasilkan residual stress yang lebih tinggi dan distorsi yang lebih tinggi.

Hal yang paling mempengaruhi terjadinya *bending* adalah tegangan pada arah *axial*. Deformasi yang terjadi merupakan hasil dari shortening pada arah *axial* dan *displacement* pada bagian luar. Dapat diketahui dari hasil penelitian bahwa *displacement* yang tertinggi akan berada pada ujung pipa. *Bending* yang terjadi diinisiasi oleh adanya gradien termal yang berkombinasi dengan deformasi plastis, jadi dapat dikatakan bahwa semakin tinggi termal gradien maka deformasi yang dihasilkan semakin tinggi. (Hsieh, 2005)

Untuk skema *axial* yang memiliki tegangan dan distorsi terendah adalah *case 2* dengan nilai kurang lebih 400 MPa dengan distorsi 0.16 mm. Sedangkan untuk skema *circumferential* yang memiliki tegangan dan distorsi terendah adalah *case 6* dengan nilai kurang lebih 275 MPa dan distorsi terkecil juga terjadi pada *case 6* dengan nilai 0.025 mm.

Proses *laser forming* ini menghasilkan permukaan yang tidak rata sepanjang lintasan yang dipanaskan, sehingga memerlukan proses untuk menghaluskan permukaan tersebut dengan proses machining yang sesuai. Dari hasil simulasi dapat dikatakan yang memiliki *bending angle* terbesar adalah dengan *power* lebih tinggi dan kecepatan lebih rendah, jika dilihat dari efektifitas maka proses yang paling baik adalah yang menggunakan *power* 1500W dengan kecepatan 10 mm/s karena menghasilkan *bending angle* paling tinggi. Jadi perlu dipertimbangkan kapan memerlukan skema *axial* kapan memerlukan skema *circumferential*, jika ingin membentuk *bending* yang merata dan lebih halus maka menggunakan skema *axial*, sedangkan jika ingin membentuk *bending* yang bersifat local maka menggunakan skema *axial*, untuk menghasilkan distorsi

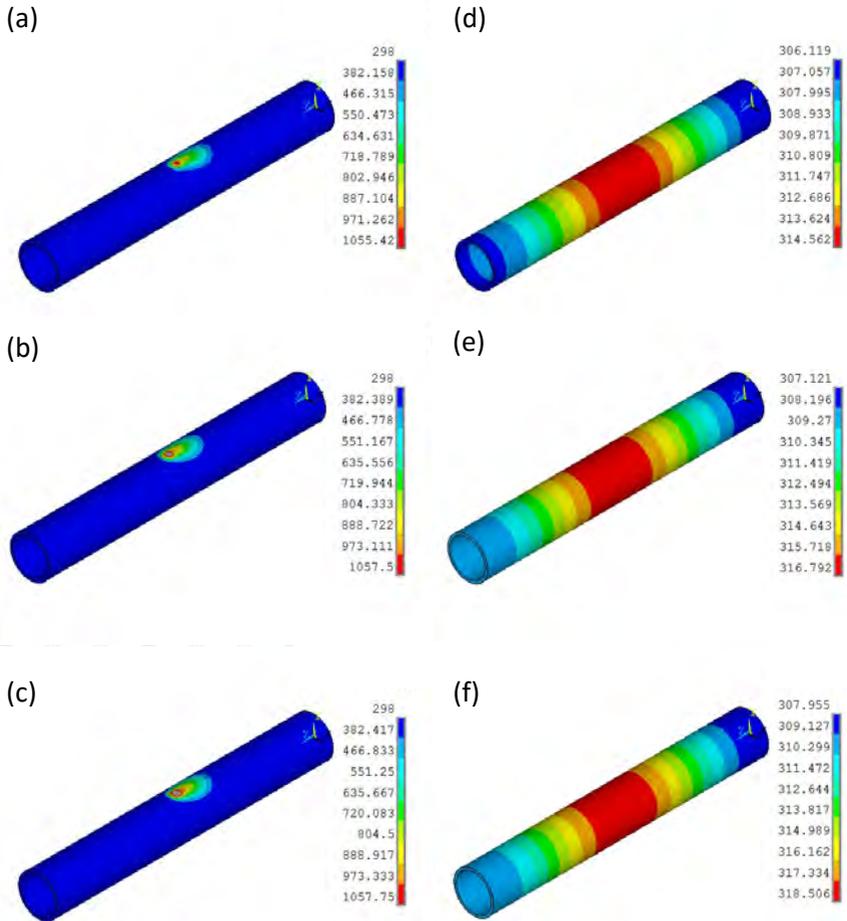
yang kecil maka *power* yang digunakan jangan terlalu besar karena meningkatkan tegangan dan distorsi. Akan lebih baik jika menggunakan *power* yang tidak terlalu tinggi tetapi waktu scan-nya yang diperlambat.

IV.3. Analisis Sensitivitas

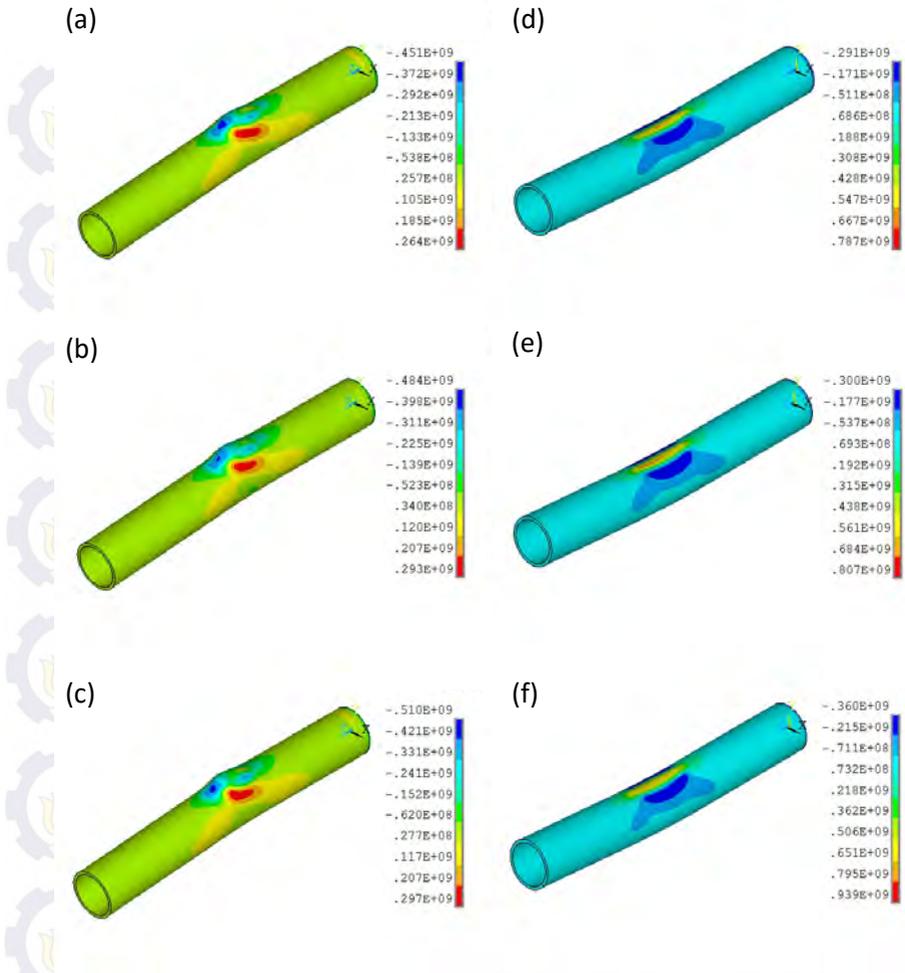
Analisis sensitivitas digunakan untuk mengetahui pengaruh jumlah elemen yang ditentukan dari hasil *meshing* terhadap solusi hasil *modelling* dalam tulisan ini yaitu terhadap termal dan struktur dalam bentuk distribusi temperatur, distribusi tegangan dan hasil *displacement*. Variasi *meshing* yang digunakan untuk menentukan sensitivitas ini ada tiga, yaitu normal, *finer* dan *finest*, normal adalah *meshing* yang digunakan, *finer* adalah *meshing* yang lebih halus dan *finest* adalah *meshing* yang paling halus. Jumlah elemen untuk masing-masing *meshing* dapat dilihat pada tabel 4.3.

Tabel 4.3 Jumlah elemen yang digunakan

<i>Mesh</i>	Jumlah Elemen
Normal	9000
<i>Finer</i>	11500
<i>Finest</i>	31500



Gambar 4.38 Distribusi temperatur pada: detik 1 untuk *meshing*: (a) normal; (b) *finer*; (c) *finest*; dan detik 138 untuk *meshing*: (d) normal; (e) *finer*; dan (f) *finest*.



Gambar 4.39 Distribusi tegangan arah sumbu-z pada detik 1 pada *meshing*: (a) normal; (b) *finer*; (c) *finest*; dan detik ke 138 untuk *meshing*: (d) normal; (e) *finer*; dan (d) *finest*.

Gambar 4.36 merupakan perbandingan temperatur antar *meshing*, dapat dilihat perbedaan antara *meshing* normal, *finer* dan *finest* dimana tidak terdapat perbedaan yang signifikan dengan perubahan elemen.

Gambar 4.37 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*.

Dari hasil-hasil analisis termal dan struktur untuk masing-masing *meshing* dapat diambil *meshing* normal karena walaupun dengan *meshing* yang tidak sebanyak dengan *mesh* lainnya tapi tetap menghasilkan hasil yang sama sehingga dengan menggunakan *meshing* yang lebih sedikit dapat lebih meningkatkan efisiensi dari penggunaan waktu *solving* dari simulasi.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

V.1. Kesimpulan

Dari hasil dan analisis data yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan:

1. Tegangan dan distorsi pada pipa *elips* lebih rendah daripada pada pipa lingkaran yang dipengaruhi oleh distribusi *thermal gradient* pada pipa *circular* yang lebih rendah, di mana pada pipa *circular* memiliki tegangan minimum 50 MPa dengan distorsi 0.0025 mm .
2. Laser *power* yang lebih tinggi akan menyebabkan perubahan temperatur yang lebih tinggi sehingga *thermal gradient* lebih tinggi dan termal ekspansi akan terjadi lebih besar sehingga menghasilkan tegangan yang lebih besar dan akan membuat *bending angle* lebih besar, power yang menghasilkan tegangan dan distorsi terendah adalah kombinasi power 1000 dengan kecepatan scan 20 mm/s skema *circumferential* dengan nilai tegangan 50 MPa untuk *circular* dan 275 MPa untuk *elips* dan distorsi 0.0025 mm untuk pipa *circular* dan 0.025 mm untuk *elips*.
3. *Scanning speed* yang lebih lambat akan membuat proses *laser forming* lebih lama sehingga panas yang diterima oleh pipa akan lebih banyak sehingga meningkatkan temperatur yang lebih tinggi sehingga tegangan yang dihasilkan lebih tinggi dan *bending angle* lebih besar.
4. *Scanning path* berpengaruh terhadap distorsi di mana pada skema *axial* tidak terjadi *lateral bending* akan tetapi pada *circumferential scanning* terjadi *lateral bending*, dan pada *axial scanning bending angle* yang terbentuk lebih besar.

V.2. Saran

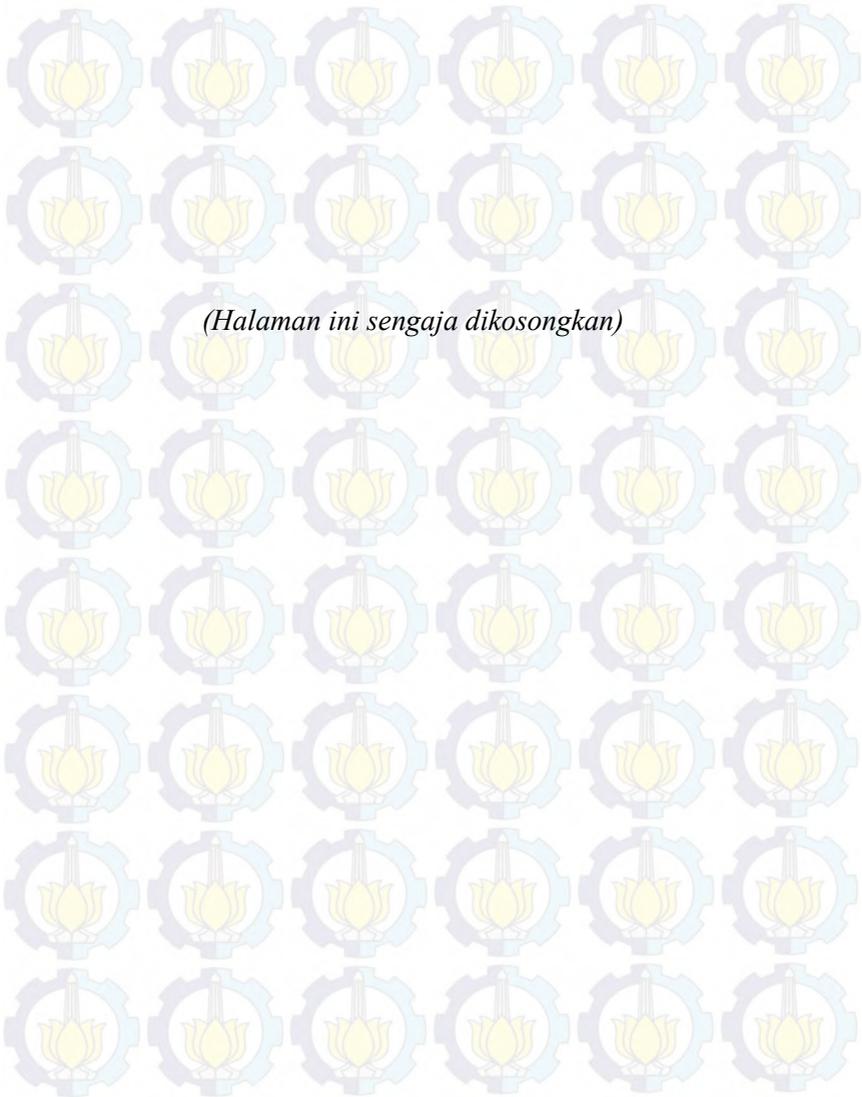
1. Dilakukan penelitian lebih lanjut dengan menggunakan kombinasi antara skema *axial* dan *circumferential* ataupun dengan *multipass*.
2. Dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh panjang lintasan yang dilalui oleh sinar laser.
3. Dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh ketebalan dan panjang pipa terhadap hasil *laser forming*.

DAFTAR PUSTAKA

- Dahotre, Narendra B., dan Harimkar Sandip P. 2007. **Laser Fabrication and Machining of Materials**. Knoxville: Springer.
- Feifei, Song, Yang He, Li Heng, Zhan Mei, dan Li Guang Jun. 2013. "Springback prediction of thick-walled high-strength titanium tube bending". **Chinese Journal of Aeronautics** 26 (5): 1336-1345
- 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 5th 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
- Kyrzanidi, An.K, Th.B. Kermandidis, 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
- Li, H., H. Yang, F. F. Song, M. Zhan, dan G. J. Li. 2012. "Springback characterization and behaviors of high-strength Ti-3Al-2.5V tube in cold rotary draw bending". **Journal of Materials Processing Technology** 212: 1973-1987
- Li, Wenchuan, dan Y. Lawrence Yao. 2001. "Laser Bending of Tubes: Mechanism, Analysis, and Prediction". **Journal of Manufacturing Science and Engineering** vol. 123 (11): 674-680
- 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
- Maji, Kuntal, Ruchir Shukla, A.K. Nath, dan D.K. Pratihari. 2013. "Finite Element Analysis and Experimental Investigations on Laser Bending of AISI304 Stainless Steel Sheet". **Procedia Engineering** 64: 528-535
- Němeček, Stanislav, dkk. 2012. "Differences between laser and arc welding of HSS steels". **Physics Procedia** 39:67-74
- 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
- Vollersten, F., M. Geiger, dan W.M. Li. 1993. "FDM and FEM simulation of laser forming: a comparative study". **In: Proceeding of the Fourth International Conference on Technology of Plasticity**: 1793-1798
- Wang, X.Y., J. Wang, W.J. Xu, dan D.M. Guo. 2014. "Scanning path planning for laser bending of straight tube into curve tube". **Optics & Laser Technology** 56: 43-51
- 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



BIODATA PENULIS



Penulis yang bernama lengkap Felix Andiana Putra dilahirkan di Cianjur pada tanggal 27 Juli 1994. Penulis merupakan anak pertama dari 2 bersaudara, dan telah menempuh pendidikan formal yaitu SD Kristen Kanaan Cianjur, SMP Maria Goretti Sungailiat dan SMAN 1 Sungailiat. Setelah lulus dari SMA, penulis mengikuti tes dan diterima sebagai calon Mahasiswa Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya 2012.

Penulis melanjutkan studi di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS dengan nomor registrasi pokok 2712 100 085.

Semasa kuliah, penulis terdaftar aktif sebagai asisten laboratorium kimia material pada tahun 2014-2015, dan menjadi asisten laboratorium korosi dan kegagalan material pada tahun 2015.

Selesaiannya tugas akhir ini mengantarkan penulis memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) pada Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Institut Teknologi sepuluh Nopember Surabaya.

Email : felix.andiana@gmail.com