

TUGAS AKHIR – TL184834

ANALISIS NUMERIK PENGARUH KECEPATAN DAN URUTAN PENGELASAN TERHADAP DEFORMASI DAN TEGANGAN SISA PADA SAMBUNGAN T SS400 DI APLIKASI BOOM EKSKAVATOR

SULTHAN NAUFAL ATHARIF
NRP. 02511840000132

Dosen Pembimbing
Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D.
NIP. 197610272003121001
Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc.
NIP. 197604102002121002

Program Studi Teknik Material
Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022



TUGAS AKHIR – TL184834

ANALISIS NUMERIK PENGARUH KECEPATAN DAN URUTAN PENGELASAN TERHADAP DEFORMASI DAN TEGANGAN SISA PADA SAMBUNGAN T SS400 DI APLIKASI BOOM EKSKAVATOR

SULTHAN NAUFAL ATHARIF
NRP. 02511840000132

Dosen Pembimbing
Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D.
NIP. 197610272003121001
Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc.
NIP. 197604102002121002

Program Studi Teknik Material
Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT – TL184834

**NUMERICAL ANALYSIS THE EFFECTS OF WELDING
SPEED AND SEQUENCE ON DEFORMATION AND
RESIDUAL STRESS OF SS400 T JOINT AT EXCAVATOR
BOOM APPLICATION**

SULTHAN NAUFAL ATHARIF
NRP. 02511840000132

Advisor
Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D.
NIP. 197610272003121001
Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc.
NIP. 197604102002121002

Study Program of Materials Engineering
Departement of Materials and Metallurgical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022

(This page is intentionally blank)

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS NUMERIK PENGARUH KECEPATAN DAN URUTAN PENGELASAN TERHADAP DEFORMASI DAN TEGANGAN SISA PADA SAMBUNGAN-T SS400 DI APLIKASI BOOM EKSKAVATOR

TUGAS AKHIR

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

Oleh : **SULTHAN NAUFAL ATHARIF**
NRP. 02511840000132

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

- | | | |
|---|--|---------------|
| 1. Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D. |  | Pembimbing |
| 2. Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc. |  | Ko-Pembimbing |
| 3. Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA |  | Penguji |
| 4. Ir. Moh. Farid, DEA |  | Penguji |



SURABAYA
Juli, 2022

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

APPROVAL SHEET

NUMERICAL ANALYSIS THE EFFECT OF WELDING SPEED AND SEQUENCE ON DEFORMATION AND RESIDUAL STRESS OF SS400 T-JOINT AT EXCAVATOR BOOM APPLICATION

FINAL PROJECT

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

By : **SULTHAN NAUFAL ATHARIF**
NRP. 0251184000132

Approved by Final Project Examiner Team :

1. Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D.  Advisor
2. Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc.  Co-Advisor
3. Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA  Examiner
4. Ir. Moh. Farid, DEA  Examiner



SURABAYA
July, 2022

(This page is intentionally blank)

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa/NRP : Sulthan Naufal Atharif/02511840000132
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi
Dosen Pembimbing/NIP : Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc, Ph.D.
/197610272003121001

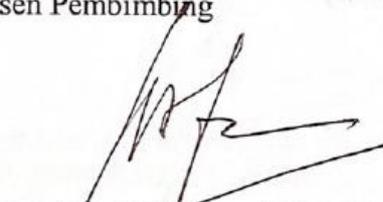
Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “ANALISIS NUMERIK PENGARUH KECEPATAN DAN URUTAN PENGELASAN TERHADAP DEFORMASI DAN TEGANGAN SISA PADA SAMBUNGAN T SS400 DI APLIKASI BOOM EKSKAVATOR” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

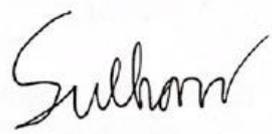
Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 5 Juli 2022

Mengetahui
Dosen Pembimbing

Mahasiswa


(Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D.)
NIP. 197610272003121001


(Sulthan Naufal Atharif)
NRP. 02511840000132

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student/NRP : Sulthan Naufal Atharif/02511840000132
Departement : Material and Metallurgical Engineering
Advisor/NIP : Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D.
/197610272003121001

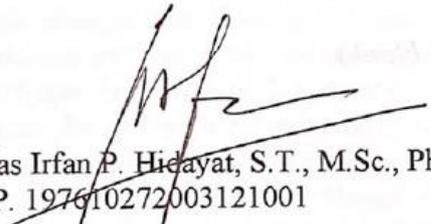
Hereby declare that the Final Project with the title of "NUMERICAL ANALYSIS THE EFFECT OF WELDING SPEED AND SEQUENCE ON DEFORMATION AND RESIDUAL STRESS OF SS400 T JOINT AT EXCAVATOR BOOM APPLICATION" is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

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

Surabaya, 5 Juli 2022

Acknowledged
Advisor

Student


(Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D.)
NIP. 197610272003121001


(Sulthan Naufal Atharif)
NRP. 02511840000132

(This page is intentionally blank)

ANALISIS NUMERIK PENGARUH KECEPATAN DAN URUTAN PENGELASAN TERHADAP DEFORMASI DAN TEGANGAN SISA PADA SAMBUNGAN T SS400 DI APLIKASI BOOM EKSKAVATOR

Nama Mahasiswa / NRP : Sulthan Naufal Atharif / 02511840000132
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing 1 : Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D.
Dosen Pembimbing 2 : Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc.

Abstrak

Ekskavator merupakan salah satu jenis alat berat yang digunakan untuk penggalian tanah, pemindahan material, dan perataan permukaan tanah. Pengelasan merupakan proses yang digunakan untuk fabrikasi ekskavator, khususnya pada bagian boom. Deformasi dan tegangan sisa merupakan masalah yang biasa terjadi pada pengelasan dan dapat menyebabkan dimensi tidak sesuai dan kekuatan rendah. Faktor yang mempengaruhi deformasi dan tegangan sisa adalah masukan panas dan urutan pengelasan. Pada penelitian ini dianalisis pengaruh kecepatan dan urutan pengelasan terhadap deformasi dan tegangan sisa pada sambungan T SS400 dengan metode elemen hingga. Penelitian ini menggunakan software ANSYS untuk analisis elemen hingga dengan variasi urutan pengelasan progresif, simetri dari tepi, simetri dari tengah, mundur bertahap dan kecepatan pengelasan 8,33 mm/s dan 4,55 mm/s. Setelah itu, temperatur, deformasi, dan tegangan sisa dianalisis untuk mendapatkan kecepatan dan urutan pengelasan optimal. Dalam melakukan simulasi, dilakukan tahapan pembebanan termal untuk mengetahui nilai dari temperatur puncak masing-masing variasi dan selanjutnya dilakukan pembebanan struktur untuk mengetahui nilai deformasi dan tegangan sisa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai temperatur puncak tertinggi dimiliki oleh pengelasan dengan kecepatan 4,55 mm/s dan urutan progresif sebesar 3576,8°C, dan nilai temperatur puncak terendah dimiliki oleh pengelasan dengan kecepatan 8,33 mm/s dan urutan simetri dari tengah sebesar 2717,4°C. Untuk nilai tegangan sisa transversal terbesar dimiliki oleh pengelasan dengan kecepatan 4,55 mm/s dan urutan progresif sebesar 385,42 MPa dan nilai tegangan transversal terkecil dimiliki oleh pengelasan dengan kecepatan 8,33 mm/s dan urutan simetri dari tengah sebesar 322,32 MPa. Untuk nilai tegangan sisa longitudinal terbesar dimiliki oleh pengelasan dengan kecepatan 4,55 mm/s dan urutan progresif sebesar 318,26 MPa, dan nilai tegangan sisa longitudinal terkecil dimiliki oleh pengelasan dengan kecepatan 8,33 mm/s dan urutan simetri dari tengah sebesar 280,39 MPa. Untuk deformasi terbesar dihasilkan oleh pengelasan dengan kecepatan 4,55 mm/s dan urutan mundur sebesar 1,298 mm dengan kemiringan 74,35° dan nilai deformasi terkecil dihasilkan oleh pengelasan dengan kecepatan 4,55 mm/s dan urutan simetri dari tepi sebesar 0,88 mm dengan kemiringan 50,61°. Dapat diketahui bahwa semakin cepat kecepatan pengelasan maka nilai deformasi dan tegangan sisa semakin kecil. Urutan pengelasan berpengaruh terhadap besar dan distribusi deformasi dan tegangan sisa. Urutan paling optimal dengan nilai deformasi dan tegangan sisa yang rendah adalah urutan mundur bertahap. Parameter pengelasan yang direkomendasikan adalah WV7 dan WV8.

Kata Kunci: *Deformasi, Metode Elemen Hingga, Tegangan Sisa, Urutan Pengelasan*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

NUMERICAL ANALYSIS THE EFFECT OF WELDING SPEED AND SEQUENCE ON DEFORMATION AND RESIDUAL STRESS OF SS400 T JOINT AT EXCAVATOR BOOM APPLICATION

Student Name / NRP : Sulthan Naufal Atharif / 02511840000132
Departement : Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS
Advisor : Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D.
Co-Advisor : Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc.

Abstract

Excavators are one type of heavy equipment used for soil excavation, material removal, and ground leveling. Welding is a process used for the fabrication of excavators, especially in boom sections. Deformation and residual stresses are common welding problems and can lead to improper dimensions and low strength. Factors affecting deformation and residual stress are heat input and welding sequence. In this study, the effect of speed and order of welding on deformation and residual stress in the T SS400 joint with the finite element method analyzed. This research uses ANSYS software for finite element analysis with variations in the progressive welding sequence, symmetry from the edges, symmetry from the middle, backwards and welding speeds of 8.33 mm/s and 4.55 mm/s. After that, the temperature, deformation, and residual stress were analyzed to get the optimal welding speed and sequence. In conducting the simulation, a thermal loading step is carried out to determine the value of the peak temperature of each variation and then structural loading is carried out to determine the value of deformation and residual stress. The results showed that the highest peak temperature value was owned by welding with a speed of 4.55 mm/s and a progressive sequence of 3576.8 °C, and the lowest peak temperature value was owned by welding with a speed of 8.33 mm/s and a symmetry sequence from the middle of 2717.4 °C. The largest transverse residual stress value is owned by welding with a speed of 4.55 mm/s and a progressive sequence of 385.42 MPa and the smallest transverse stress value is owned by welding with a speed of 8.33 mm/s and the order of symmetry from the middle is 322.32. MPa. For the largest value of longitudinal residual stress is owned by welding with a speed of 4.55 mm/s and a progressive sequence of 318.26 MPa, and the smallest value of longitudinal residual stress is owned by welding with a speed of 8.33 mm/s and a symmetry order from the middle of 280 ,39 MPa. For the largest deformation is produced by welding with a speed of 4.55 mm/s and the backward order is 1.298 mm with a slope of 74.35° and the smallest deformation value is produced by welding with a speed of 4.55 mm/s and the order of symmetry from the edges is 0.88. mm with a slope of 50.61°. It can be seen that the faster the welding speed, the lower the deformation value and residual stress. Welding order affects the magnitude and distribution of deformation and residual stresses. The most optimal sequence with low deformation values and residual stresses is reverse order. The recommended welding parameters are WV7 and WV8.

Keywords: *Deformation, Finite Element Method, Residual Stress, Welding Sequence*

(This page is intentionally blank)

KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian tugas akhir yang berjudul “**Analisis Numerik Pengaruh Kecepatan dan Urutan Pengelasan terhadap Deformasi dan Tegangan Sisa Sambungan T SS400 di Aplikasi Boom Ekskavator**” untuk memenuhi mata kuliah Tugas Akhir yang menjadi salah satu syarat kelulusan di Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama proses penelitian, penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu dan memberi dukungan kepada penulis, diantaranya adalah:

1. Bapak Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D. selaku Kepala Departemen Teknik Material dan Metalurgi, FTIRS, ITS.
2. Bapak Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing pertama yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu kepada penulis dalam pengerjaan Laporan Tugas Akhir.
3. Bapak Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing kedua yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu kepada penulis dalam pengerjaan Laporan Tugas Akhir.
4. Ibu Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si. selaku dosen wali yang telah membimbing dan memberikan banyak saran terkait perkuliahan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
5. Bapak Nadhif Rahmawan selaku pembimbing lapangan PT. X yang telah memberikan banyak masukan terkait topik penelitian.

Penulis berharap penelitian tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi seluruh pihak. Penulis juga menyadari masih banyak kekurangan dalam penulisan ini. Untuk itu, kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak sangat diharapkan.

Surabaya, 5 Juli 2022
Penulis

Sulthan Naufal Atharif

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

Abstrak	xiii
Abstract	xv
KATA PENGANTAR	xvii
DAFTAR ISI	xix
DAFTAR GAMBAR	xxi
DAFTAR TABEL	xxiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	1
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Manfaat Penelitian	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Pengelasan GMAW	3
2.1.1 <i>Short-circuit</i>	4
2.1.2 <i>Globular Transfer</i>	4
2.1.3 <i>Spray Transfer</i>	4
2.2 Parameter Pengelasan	5
2.2.1 Arus Pengelasan	5
2.2.2 Tegangan Pengelasan	5
2.2.3 Kecepatan Pengelasan	6
2.3 <i>Heat Input</i>	6
2.3.1 Distribusi Sumber Panas Goldak	7
2.4 Perpindahan Panas Pengelasan	8
2.4.1 Konduksi	8
2.4.2 Konveksi	9
2.4.3 Radiasi	9
2.5 Siklus Termal Pengelasan	9
2.5.1 Logam Lasan	10
2.5.2 <i>Heat Affected Zone (HAZ)</i>	10
2.5.3 Logam Induk	11
2.6 Deformasi Pengelasan	12
2.7 Tegangan Sisa	13
2.8 Urutan Pengelasan	16
2.9 Metode Elemen Hingga	17
2.10 Ekskavator	19
2.11 Penelitian Sebelumnya	20
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	25
3.1 Diagram Alir	25
3.2 Alat Penelitian	27
3.3 Material dan Parameter Pengelasan	28
3.3.1 JIS G3101-SS400	28
3.3.2 Parameter Pengelasan	28
3.3.3 Variabel Penelitian	29
3.4 Metode Penelitian	30
3.4.1 Pemodelan 3D Material	30

3.4.2	Memasukkan Data Material	31
3.4.3	<i>Meshing</i>	31
3.4.4	<i>Meshing Sensitivity Analysis</i>	31
3.4.5	Analisis Termal	31
3.4.6	Analisis Struktural.....	32
3.5	Rancangan Penelitian	32
3.6	Jadwal Penelitian.....	32
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN.....		33
4.1	<i>Meshing Sensitivity Analysis</i>	33
4.2	Simulasi Pembebanan Termal.....	36
4.2.1	Hasil Temperatur.....	37
4.3	Simulasi Pembebanan Struktural	42
4.3.1	Hasil Tegangan Sisa.....	43
4.3.2	Hasil Deformasi	50
4.4	Pembahasan.....	54
4.4.1	Analisis Temperatur	54
4.4.2	Analisis Tegangan Sisa	55
4.4.3	Analisis Deformasi.....	56
4.4.4	Pengaruh Kecepatan Pengelasan.....	56
4.4.5	Pengaruh Urutan Pengelasan	57
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		59
5.1	Kesimpulan	59
5.2	Saran.....	60
DAFTAR PUSTAKA		xxv
LAMPIRAN A.....		xxix
LAMPIRAN B.....		xxxvii
LAMPIRAN C.....		xxxix
LAMPIRAN D.....		xliii
UCAPAN TERIMA KASIH		xlvi
BIODATA PENULIS.....		xlvii

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Skema pengelasan GMAW (American Welding Society, 2001)	3
Gambar 2.2	<i>Short-circuit mode</i> (American Welding Society, 2001).....	4
Gambar 2.3	<i>Globular transfer</i> (American Welding Society, 2001).....	4
Gambar 2.4	<i>Spray transfer</i> (American Welding Society, 2001).....	5
Gambar 2.5	Model sumber panas Goldak, (a) sistem koordinat <i>butt-joint</i> , (b) sistem koordinat <i>T-joint</i> (G. Fu et al., 2016)	7
Gambar 2.6	Skema perpindahan panas pengelasan (Van der Aa, 2007).....	8
Gambar 2.7	Siklus termal las(International, 1993)	10
Gambar 2.8	Daerah lasan pada baja dengan komposisi karbon 0,15% (International, 1993).....	10
Gambar 2.9	Perubahan bentuk pada struktur las (Masubuchi, 1982).....	12
Gambar 2.10	Tegangan sisa pada pengelasan (Masubuchi, 1982).....	13
Gambar 2.11	Distribusi temperatur dan tegangan yang dihasilkan pada proses pengelasan (American Welding Society, 2001)	14
Gambar 2.12	Metode pengukuran tegangan sisa $\cos\alpha$ (Tanaka, 2019).....	15
Gambar 2.13	Nilai tegangan sisa pada pelat dengan tebal 10 mm material SS400 (Enstein, 2010)	16
Gambar 2.14	Urutan pengelasan pada pengelasan satu lapis (Wirjosumarto & Okumura, 2000).....	17
Gambar 2.15	Nilai tegangan maksimum dari variasi urutan pengelasan (Wirjosumarto & Okumura, 2000).....	17
Gambar 2.16	Bagian pada ekskavator (Mohamed Malo et al., 2019).....	20
Gambar 2.17	<i>Excavator boom PCXX</i>	20
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	25
Gambar 3.2	Diagram alir pemodelan termal	26
Gambar 3.3	Diagram alir pemodelan struktural	27
Gambar 3.4	Desain sambungan las	29
Gambar 3.5	Variabel urutan pengelasan	30
Gambar 3.6	Geometri 3D material	31
Gambar 4.1	<i>Meshing 1</i> , (a) jumlah total elemen 3200, (b) hasil temperatur puncak dan <i>solve time</i>	33
Gambar 4.2	<i>Meshing 2</i> , (a) jumlah total elemen 6004, (b) hasil temperatur puncak dan <i>solve time</i>	34
Gambar 4.3	<i>Meshing 3</i> , (a) jumlah total elemen 14040, (b) hasil temperatur puncak dan <i>solve time</i>	35
Gambar 4.4	<i>Meshing 4</i> , (a) jumlah total elemen 18576, (b) hasil temperatur puncak dan <i>solve time</i>	35
Gambar 4.5	Temperatur puncak pada variasi jumlah elemen	36
Gambar 4.6	(a) Nodal 1 ujung awal pengelasan, (b) nodal 2 ujung akhir pengelasan	38
Gambar 4.7	Lokasi nodal uji temperatur	39
Gambar 4.8	Siklus termal pengelasan pada nodal A	39
Gambar 4.9	Siklus termal pengelasan pada nodal B	40
Gambar 4.10	Siklus termal pengelasan pada nodal C	40
Gambar 4.11	Temperatur puncak pengelasan kecepatan 8,33 mm/s, (a)WV1, (b)WV3, (c)WV5, dan (d)WV7	41
Gambar 4.12	Temperatur puncak pengelasan kecepatan 4,55 mm/s, (a)WV2, (b)WV4, (c)WV6, dan (d)WV8	42

Gambar 4.13	Posisi <i>fixed support</i> pada analisis struktur	43
Gambar 4.14	(a) Pengukuran tegangan sisa longitudinal, (b) pengukuran tegangan sisa transversal	44
Gambar 4.15	Posisi pengukuran tegangan transversal	45
Gambar 4.16	Posisi pengukuran tegangan longitudinal	45
Gambar 4.17	Distribusi tegangan transversal	45
Gambar 4.18	Distribusi tegangan longitudinal	46
Gambar 4.19	Nilai regangan plastis pada pengelasan WV1	46
Gambar 4.20	Nilai regangan plastis pada pengelasan WV2	47
Gambar 4.21	Nilai regangan plastis pada pengelasan WV3	47
Gambar 4.22	Nilai regangan plastis pengelasan WV4	47
Gambar 4.23	Nilai regangan plastis pengelasan WV5	48
Gambar 4.24	Nilai regangan plastis pengelasan WV6	48
Gambar 4.25	Nilai regangan plastis pengelasan WV7	48
Gambar 4.26	Nilai regangan plastis pengelasan WV8	49
Gambar 4.27	Deformasi pada pengelasan dengan kecepatan 8,33 mm/s (a)WV1, (b)WV3, (c)WV5, (d)WV7	51
Gambar 4.28	Deformasi pada pengelasan dengan kecepatan 4,55 mm/s (a)WV2, (b)WV4, (c)WV6, (d)WV8	51
Gambar 4.29	Pengukuran deformasi pada bagian tengah (a) pelat vertikal, (b) pelat horizontal	52
Gambar 4.30	Simpangan pada posisi tengah pelat vertikal	52
Gambar 4.31	Simpangan pada posisi tengah pelat horizontal	53
Gambar 4.32	Distribusi gaya pada daerah lasan	54
Gambar A.1	Penyusunan cabang pada ANSYS Workbench 19.2	xxix
Gambar A.2	Data sifat material pada bagian <i>engineering data</i>	xxix
Gambar A.3	Pembuatan geometri sambungan-T pada SpaceClaim	xxx
Gambar A.4	Pembuatan <i>mesh</i> pada geometri pengelasan	xxx
Gambar A.5	Pemberian beban <i>moving heat flux</i> menggunakan Goldak ACT	xxxii
Gambar A.6	Pemberian kondisi batas konveksi pada permukaan geometri	xxxii
Gambar A.7	Pemberian kondisi batas radiasi pada permukaan geometri	xxxii
Gambar A.8	Hasil simulasi termal berupa <i>temperature</i>	xxxii
Gambar A.9	Kondisi batas <i>fixed support</i> untuk simulasi structural	xxxiii
Gambar A.10	Memasukkan beban termal pada simulasi structural	xxxiii
Gambar A.11	Distribusi tegangan longitudinal menggunakan <i>normal stress</i> pada <i>path</i> searah sumbu-z	xxxiv
Gambar A.12	Distribusi tegangan transversal menggunakan <i>normal stress</i> pada <i>path</i> searah sumbu-x	xxxiv
Gambar A.13	Regangan plastis transversal menggunakan <i>user defined result</i> EPPLX	xxxv
Gambar A.14	Regangan plastis longitudinal menggunakan <i>user defined result</i> EPPLZ	xxxv
Gambar A.15	Hasil deformasi menggunakan <i>total deformation</i>	xxxvi
Gambar B.1	Proses pengelasan sambungan T	xxxvii
Gambar B.2	Hasil deformasi pada pengelasan eksperimen	xxxvii
Gambar C.1	Pembebanan termal dengan metode (a) <i>heat flux</i> dan (b) Goldak	xl

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Penentuan arus dan tegangan pengelasan berdasarkan diameter elektroda (Novianto, 2018).....	5
Tabel 2.2	Nilai efisiensi busur las untuk setiap jenis pengelasan (Grong, 1997).....	6
Tabel 2.3	Sifat mekanik material JIS G3101-SS400	11
Tabel 2.4	Komposisi kimia material JIS G3101-SS400.....	11
Tabel 2.5	Penelitian sebelumnya	21
Tabel 2.6	Referensi penggunaan <i>heat input</i> penelitian sebelumnya.....	24
Tabel 3.1	Sifat termal material SS400 (Jeyakumar & Christopher, 2013).....	28
Tabel 3.2	Sifat mekanik material SS400 (Jeyakumar & Christopher, 2013)	28
Tabel 3.3	Prosedur dan Parameter Pengelasan	29
Tabel 3.4	Variabel penelitian.....	30
Tabel 3.5	Dimensi material	30
Tabel 3.6	Parameter geometri elipsoidal ganda Goldak.....	31
Tabel 3.7	Rancangan penelitian.....	32
Tabel 3.8	Jadwal penelitian	32
Tabel 4.1	Hasil <i>meshing sensitivity analysis</i>	36
Tabel 4.2	Verifikasi temperatur puncak data <i>best practice</i> dengan simulasi	38
Tabel 4.3	Temperatur puncak variasi pengelasan.....	41
Tabel 4.4	Verifikasi data tegangan antara data <i>best practice</i> dengan simulasi	44
Tabel 4.5	Rentang nilai tegangan sisa longitudinal	49
Tabel 4.6	Rentang nilai tegangan sisa transversal	49
Tabel 4.7	Verifikasi data deformasi pada pelat vertikal hasil pengelasan.....	50
Tabel 4.8	Simpangan maksimum pada pelat vertikal hasil pengelasan.....	53
Tabel 4.9	Simpangan maksimum pada pelat horizontal hasil pengelasan.....	54
Tabel C.1	Perbandingan hasil simulasi Goldak dengan <i>heat flux</i> terhadap nilai temperatur.....	xi
Tabel C.2	Perbandingan hasil simulasi Goldak dengan <i>heat flux</i> terhadap besar simpangan maksimum	xi
Tabel C.3	Perbandingan hasil simulasi Goldak dengan <i>heat flux</i> terhadap besar tegangan sisa maksimum	xi
Tabel D.1	Data 1 <i>true stress-plastic strain</i>	xliii
Tabel D.2	Data 2 <i>true stress-plastic strain</i>	xliv

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Ekskavator merupakan salah satu jenis alat berat yang banyak digunakan untuk pekerjaan konstruksi. Ekskavator digunakan di beberapa industri seperti agrikultur, pertambangan, dan konstruksi untuk penggalian tanah, pemindahan material, dan perataan permukaan tanah (Wang et al., 2018). Proses pengelasan digunakan untuk fabrikasi salah satu bagian dari ekskavator yaitu, *boom* atau bahu.

Pengelasan merupakan proses penyambungan dua atau lebih material dengan cara peleburan dan solidifikasi antara benda kerja dengan logam pengisi. Sumber panas yang bergerak menyebabkan perbedaan distribusi temperatur sehingga proses pemuaihan dan penyusutan tidak merata. Pemanasan setempat yang terjadi pada pengelasan dan pendinginan yang cepat dapat menyebabkan tegangan sisa dan deformasi, hal ini dikarenakan perubahan temperatur yang tinggi dapat menimbulkan energi yang tersimpan pada daerah lasan.

Tegangan sisa merupakan tegangan yang bekerja pada material ketika tidak ada beban luar yang bekerja pada material tersebut. Tegangan sisa terjadi akibat dari distribusi tegangan yang tidak merata pada material ketika proses pengelasan terjadi. Adanya tegangan sisa menyebabkan material memiliki kekuatan yang rendah. Deformasi adalah perubahan bentuk yang terjadi pada material akibat dari pembebanan. Deformasi dapat menyebabkan masalah seperti dimensi produk yang tidak sesuai, ketidakakuratan produksi serta kekuatan menurun pada komponen. Di PT. X, terjadi deformasi yang melewati batas toleransi untuk *boom* pengelasan *boom* ekskavator tipe PCXX. Deformasi dan tegangan sisa dapat diminimalisir dengan penentuan kecepatan pengelasan yang berpengaruh terhadap masukan panas dan urutan pengelasan yang tepat.

Beberapa penelitian sudah dilakukan sebelumnya terkait pengaruh kecepatan dan urutan pengelasan terhadap deformasi dan tegangan sisa pada struktur las. Gannon, dkk (2010) melakukan penelitian mengenai pengaruh urutan pengelasan terhadap distribusi tegangan sisa dan distorsi pada pengelasan pelat T-joint dengan metode elemen hingga (Gannon et al., 2010). Fu, dkk (2016) menganalisis terkait efek dari urutan pengelasan terhadap tegangan sisa dan distorsi pada pengelasan sambungan-T menggunakan metode elemen hingga. (G. Fu et al., 2016) Khoshroyan, dkk (2020), dalam penelitiannya mengenai pengaruh parameter dan urutan pengelasan terhadap distribusi temperatur, tegangan sisa, dan distorsi pada pelat sambungan T paduan aluminium A16061-T6 (Khoshroyan & Darvazi, 2020).

Di industri manufaktur, proses yang efisien merupakan hal yang penting untuk meningkatkan kapasitas dan kualitas produksi. Metode elemen hingga dapat menjadi opsi untuk memprediksi tegangan sisa dan deformasi pada struktur las. Analisis secara numerik dan komputasi membuat metode elemen hingga menjadi metode yang efektif dan efisien. Pada penelitian ini akan menganalisis lebih lanjut mengenai pengaruh kecepatan dan urutan pengelasan terhadap deformasi dan tegangan sisa pada sambungan T di aplikasi *boom* ekskavator menggunakan metode elemen hingga.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh kecepatan dan urutan pengelasan terhadap temperatur pada sambungan T SS400 di aplikasi boom ekskavator menggunakan metode elemen hingga?
2. Bagaimana pengaruh kecepatan dan urutan pengelasan terhadap tegangan sisa pada sambungan T SS400 di aplikasi boom ekskavator menggunakan metode elemen hingga?

3. Bagaimana pengaruh kecepatan dan urutan pengelasan terhadap deformasi pada sambungan T SS400 di aplikasi boom ekskavator menggunakan metode elemen hingga?

1.3 Batasan Masalah

Hal-hal yang menjadi batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Jenis material dari logam pengisi dianggap sama dengan material logam induk
2. Kecepatan pengelasan dianggap konstan
3. Jenis sambungan yang dianalisis adalah sambungan-T dengan las satu sisi

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Menganalisis pengaruh kecepatan dan urutan pengelasan terhadap temperatur pada sambungan T SS400 di aplikasi boom ekskavator menggunakan metode elemen hingga
2. Menganalisis pengaruh kecepatan dan urutan pengelasan terhadap tegangan sisa pada sambungan T SS400 di aplikasi boom ekskavator menggunakan metode elemen hingga
3. Menganalisis pengaruh kecepatan dan urutan pengelasan terhadap deformasi pada sambungan T SS400 di aplikasi boom ekskavator menggunakan metode elemen hingga

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang bisa didapatkan dari tugas akhir ini didapatkan sejumlah data mengenai pengaruh kecepatan dan urutan pengelasan terhadap deformasi dan tegangan sisa pada pengelasan sambungan las pelat SS400 di aplikasi boom ekskavator menggunakan metode elemen hingga. Dari data tersebut dapat diaplikasikan di dunia industri dan referensi untuk penelitian selanjutnya.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

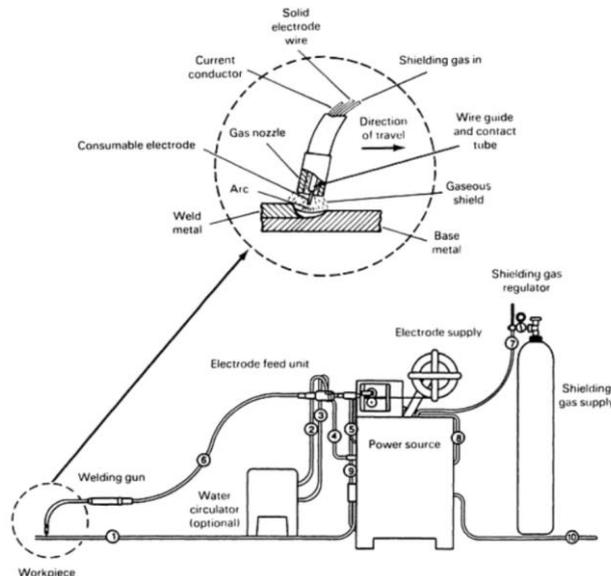
2.1 Pengelasan GMAW

Gas Metal Arc Welding (GMAW) adalah proses pengelasan busur yang menyambungkan logam dengan cara memanaskannya melalui busur listrik yang terbentuk antara elektroda *consumable* (*wire*) dan benda kerja. Selain itu, digunakan gas eksternal yang berperan untuk melindungi busur dan kolam lelehan las. Proses GMAW dapat dioperasikan dalam mode semi-otomatis dan otomatis. Logam baja karbon, baja paduan rendah kekuatan tinggi, baja tahan karat, aluminium, tembaga, dan paduan nikel dapat dilas di semua posisi menggunakan proses ini dengan gas pelindung, elektroda, dan parameter pengelasan yang sesuai (International, 1993).

Dalam proses GMAW, busur terbentuk antara elektroda *consumable* yang disalurkan secara terus menerus kepada benda kerja. Untuk elektroda *consumable*, masukan panas yang diberikan berbentuk energi panas dari lelehan logam pengisi (American Welding Society, 2001). Skema proses pengelasan GMAW dapat dilihat pada **Gambar 2.1**.

Gas pelindung yang dapat digunakan adalah argon, helium, karbon dioksida, hidrogen, oksigen dan campuran dari gas tersebut. Argon, helium dan campuran keduanya digunakan pada logam *nonferrous*, *stainless steel* dan baja paduan. Untuk baja karbon rendah dan baja paduan rendah biasanya menggunakan gas CO₂, karena memiliki karakteristik kecepatan pengelasan yang tinggi, penetrasi yang tinggi, dan biaya yang rendah. Namun, gas CO₂ menghasilkan percikan atau *spatter* yang banyak, sehingga voltase yang rendah digunakan untuk mempertahankan busur yang terbentuk kecil dengan begitu percikan menjadi lebih sedikit (Kou, 2003).

Kelebihan dari GMAW adalah laju pengisian atau deposisi yang tinggi dibandingkan dengan *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) dan *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW), tidak ada batasan panjang elektroda, kecepatan pengelasan yang tinggi, kemampuan untuk membuat lasan panjang tanpa banyak berhenti atau repetisi, dan juga mekanisme transfer logam yang bervariasi membuat penetrasi lasan menjadi berbeda-beda menyesuaikan tipe dan ketebalan logam, sehingga GMAW menjadi fleksibel. Kekurangan dari GMAW adalah peralatan las yang kompleks dengan biaya yang lebih mahal dan tidak *portable*, tidak bisa mencapai area yang sulit dijangkau karena pistol las harus dekat dengan *workpiece* (Henderson, 2006).



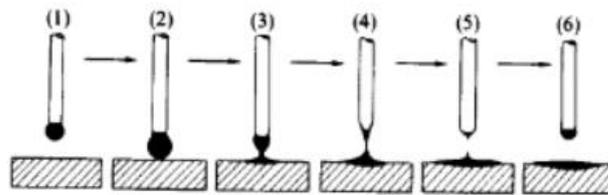
Gambar 2.1 Skema pengelasan GMAW (American Welding Society, 2001)

Salah satu karakteristik dari pengelasan busur *gas metal* adalah mekanisme perpindahan logam dari elektroda ke benda kerja atau yang disebut dengan *metal transfer*. Proses logam berpindah untuk GMAW dapat dibagi menjadi *short-circuit*, *globular transfer*, dan *spray transfer*. Faktor-faktor yang mempengaruhi *metal transfer* GMAW adalah:

- Besaran dan polaritas arus pengelasan,
- Diameter elektroda,
- Komposisi elektroda,
- Ekstensi elektroda, dan
- Komposisi gas pelindung.

2.1.1 *Short-circuit*

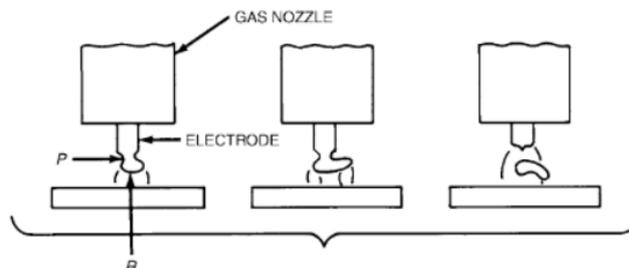
Short-circuit adalah proses perpindahan logam dari ujung elektroda ke benda kerja pada saat elektroda mengalami kontak dengan permukaan kolam las. Logam tidak berpindah melalui busur. Jenis ini memiliki nilai arus dan diameter elektroda terendah pada GMAW (American Welding Society, 2001). Jenis perpindahan ini menghasilkan kolam las yang kecil dan cocok untuk penyambungan bagian yang tipis. Skema perpindahan logam *short-circuit* dapat dilihat pada **Gambar 2.2**.



Gambar 2.2 *Short-circuit mode* (American Welding Society, 2001)

2.1.2 *Globular Transfer*

Mode ini terjadi dengan cara perpindahan logam berbentuk tetesan dengan ukuran yang besar melebihi diameter elektroda yang dipengaruhi oleh gravitasi. Memiliki rata-rata arus yang sedikit lebih tinggi dibandingkan *short-circuit*. Apabila panjang busur pendek karena voltase rendah, menyebabkan tetesan jatuh dengan jarak yang pendek dan menghasilkan percikan atau *spatter* yang banyak. Namun, apabila voltase terlalu tinggi menyebabkan *incomplete fusion*, dan penetrasi tidak tercapai. Hal ini menyebabkan penggunaan mode *globular* terbatas (American Welding Society, 2001). Berikut adalah skema perpindahan logam *globular* pada **Gambar 2.3**.

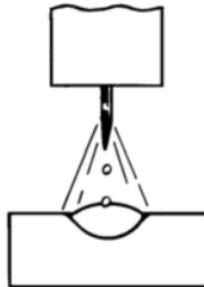


Gambar 2.3 *Globular transfer* (American Welding Society, 2001)

2.1.3 *Spray Transfer*

Ketika arus yang digunakan berada di atas batas kritis, tetesan logam cair berukuran kecil berpindah melalui busur las dipengaruhi oleh gaya elektromagnetik busur las dengan frekuensi

dan kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan mode *globular*. Ilustrasi mode *spray transfer* seperti pada **Gambar 2.4**. Batas kritis arus bergantung pada material, diameter elektroda, dan komposisi gas pelindung yang digunakan. Perpindahan logam lebih stabil dan *spatter* yang sedikit. Mode ini dapat digunakan di berbagai posisi pengelasan dan kondisi (American Welding Society, 2001).



Gambar 2.4 *Spray transfer* (American Welding Society, 2001)

2.2 Parameter Pengelasan

Penentuan parameter pengelasan seperti arus dan tegangan menyesuaikan tebal material dan diameter kawat elektroda yang digunakan serta posisi pengelasan berdasarkan *welding procedure specification* (WPS). Penentuan arus dan tegangan berdasarkan diameter elektroda dapat dilihat pada **Tabel 2.1**. Arus las adalah arus yang dihasilkan oleh sumber listrik atau *power source* yang digunakan untuk proses pengelasan. Dalam proses pengelasan *gas metal arc*, arus las secara berpengaruh terhadap laju pengumpanan kawat atau *wirefeed*. Jika arus ditingkatkan maka laju *wirefeed* meningkat juga (Novianto, 2018).

Tabel 2.1 Penentuan arus dan tegangan pengelasan berdasarkan diameter elektroda (Novianto, 2018)

Diameter Elektroda	Arus (A)	Tegangan (V)	Tebal Material (mm)
0,6 mm	50 – 80	13 – 14	0,5 – 1,0
0,8 mm	60 – 150	14 - 22	0,8 – 2,0
0,9 mm	70 – 220	15 – 25	1,0 – 10
1,0 mm	100 – 290	16 – 29	3,0 – 12
1,2 mm	120 – 350	18 – 32	6,0 – 25
1,6 mm	160 - 390	18 - 34	12 – 50

2.2.1 Arus Pengelasan

Arus pengelasan adalah parameter yang sangat penting karena mempengaruhi kualitas las. Arus berpengaruh terhadap tingkat leleh, tingkat deposisi, kedalaman penetrasi dan jumlah logam dasar meleleh. Jika arus terlalu tinggi, maka penetrasi akan berlebihan, peleburan elektroda berlebihan sehingga penguatan berlebihan, masukan panas berlebih dapat meningkatkan distorsi, dan menyebabkan adanya *weld slag* (Primo, 2014).

2.2.2 Tegangan Pengelasan

Dalam menentukan mode perpindahan logam pada pengelasan GMAW, penting untuk memperhatikan besar tegangan yang digunakan. Tegangan rendah menyebabkan hambatan di seluruh busur sehingga busur padam, yang menghasilkan *transfer dip*. Ketika tegangan busur meningkat, panjang busur meningkat. Hal tersebut menyebabkan lebih banyak kawat untuk

dilelehkan tanpa dimatikan. Peningkatan panjang busur juga meningkatkan lebar manik las (DTWD, 2018).

2.2.3 Kecepatan Pengelasan

Kecepatan pengelasan atau *travel speed* adalah laju busur berjalan sepanjang benda kerja. Kecepatan yang lambat menghasilkan ukuran manik yang besar dan masukan panas yang tinggi ke logam dasar. Masukan panas yang tinggi meningkatkan penetrasi las dan deposit logam las per satuan panjang dan akibatnya menghasilkan manik yang lebar. Meningkatkan kecepatan menghasilkan lebih sedikit logam las yang diendapkan, sehingga masukan panas menjadi rendah dan menghasilkan manik yang sempit dengan penetrasi yang lebih sedikit. Kecepatan yang terlalu tinggi menyebabkan *splatter* yang banyak dan manik-manik menunjukkan bentuk yang tidak teratur karena deposit logam las yang sangat sedikit per satuan panjang lasan. Kecepatan pengelasan dipilih sesuai dengan ketebalan logam yang dilas, desain sambungan, pemasangan sambungan, dan posisi pengelasan (Primo, 2014).

2.3 Heat Input

Masukan panas atau *heat input* adalah besarnya energi panas tiap satuan panjang las ketika sumber panas bergerak. Besarnya masukan panas (*heat input*) pada proses pengelasan dapat dihitung dengan persamaan berikut (Kou, 2003).

$$q = \frac{\eta EI}{v} \quad (2.1)$$

Dimana,

- q : masukan panas, J/mm;
- η : efisiensi busur las;
- E : potensial listrik, volt;
- I : arus listrik, ampere;
- v : kecepatan pengelasan, mm/s

Nilai koefisien efisiensi busur las untuk setiap jenis pengelasan adalah berbeda. Dari rentang efisiensi pada **Tabel 2.2** untuk GMAW dengan gas pelindung CO₂ memiliki nilai efisiensi dengan rentang 0,75 – 0,93 (Grong, 1997).

Tabel 2.2 Nilai efisiensi busur las untuk setiap jenis pengelasan (Grong, 1997)

Jenis Pengelasan	Efisiensi Busur (η)
SAW, baja	0,91 – 0,99
SMAW, baja	0,66 – 0,85
GMAW, CO ₂ – baja	0,75 – 0,93
GMAW, Ar – baja	0,66 – 0,70
GTAW, Ar – baja	0,25 – 0,75
GTAW, He – Al	0,55 – 0,80
GTAW, Ar – Al	0,22 – 0,46

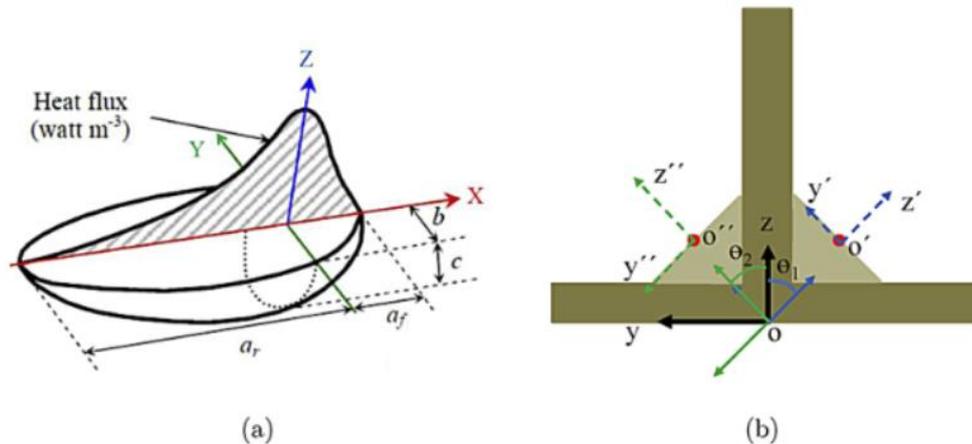
Heat input merupakan faktor penting dalam pengendalian kualitas las karena mempengaruhi laju pendinginan yang berkaitan dengan sifat mekanik, struktur mikro las dan *heat affected zone* (HAZ), dan akibatnya mempengaruhi distribusi tegangan sisa dan deformasi pada objek (Chang & Teng, 2004). *Heat input* yang tinggi akan menyebabkan terjadinya distorsi yang besar baik distorsi sudut, distorsi lengkung, maupun *buckling* (Michaleris, 2011).

2.3.1 Distribusi Sumber Panas Goldak

Energi yang dihasilkan dalam pengelasan dihasilkan dari bermacam-macam sumber tergantung pada proses pengelasannya. Pada pengelasan busur listrik, sumber energi berasal dari listrik yang diubah menjadi energi panas (Kou, 2003). Distribusi temperatur pada pengelasan dipengaruhi oleh *heat flux*, yaitu laju perpindahan energi panas pada suatu permukaan per satuan waktu yang mengenai elemen.

Pada simulasi termal, masukan panas saat pengelasan menggunakan sumber panas volumetrik yang didefinisikan dengan distribusi *heat flux* ellipsoid ganda yang dikembangkan oleh Goldak (J. Goldak et al., 1984). Pada **Gambar 2.5(a)** merupakan *heat flux volumetric* untuk *butt-joint* yang dikembangkan Goldak. Lalu, untuk *T-joint* dilakukan perubahan sistem koordinat seperti pada **Gambar 2.5(b)** (G. Fu et al., 2016). Bentuk ellipsoid ganda merepresentasikan bentuk distribusi sumber panas yang mengenai material. Pengelasan TIG dan MIG/MAG dapat disimulasikan menggunakan modelling elipsoidal ganda dengan hasil yang optimal. Model ini dapat digunakan untuk simulasi berbagai tipe sambungan las, seperti *butt-joint* dan *fillet joint* (Trupiano et al., 2022).

Goldak elipsoidal ganda merupakan *state-of-art* model untuk simulasi termal dengan sumber bergerak *heat flux*. Jika dibandingkan dengan model sebelumnya dengan menyesuaikan kepada pengelasan eksperimental, distribusi temperatur pada bagian depan sumber panas dibuat lebih curam lalu pada bagian tepi belakang lelehan logam, distribusi temperatur tidak terlalu curam. Oleh karena itu digunakan bentuk elipsoidal ganda dimana pada sebelumnya menggunakan bentuk elipsoidal tunggal (J. A. Goldak & Akhlaghi, 2005).



Gambar 2.5 Model sumber panas Goldak, (a) sistem koordinat *butt-joint*, (b) sistem koordinat *T-joint* (G. Fu et al., 2016)

Distribusi ellipsoid depan dan belakang untuk *heat flux* volumetric berdasarkan persamaan berikut.

$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q_s}{bca_f \pi \sqrt{\pi}} \exp - \left(\frac{3x^2}{a_f^2} + \frac{3y^2}{b^2} + \frac{3z^2}{c^2} \right), \quad (2.2)$$

$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q_s}{bca_r \pi \sqrt{\pi}} \exp - \left(\frac{3x^2}{a_r^2} + \frac{3y^2}{b^2} + \frac{3z^2}{c^2} \right), \quad (2.3)$$

$$Q_s = \eta U I, \quad (2.4)$$

$$f_f + f_r = 2, \quad (2.5)$$

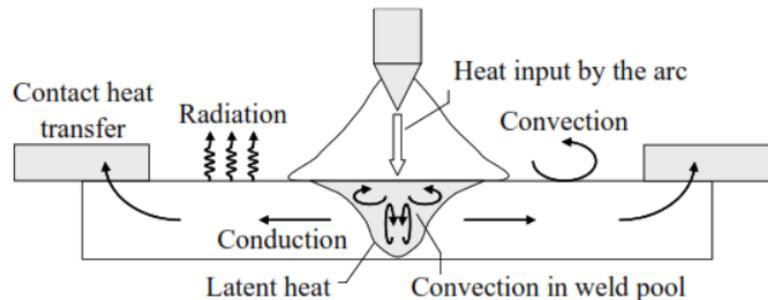
$$f_f = \frac{2}{1 + \frac{a_r}{a_f}}, f_r = \frac{2}{1 + \frac{a_f}{a_r}} \quad (2.6)$$

Dimana,

- q_f : jumlah distribusi panas pada daerah depan elipsoidal pada titik (x, y, z);
- q_r : jumlah distribusi panas pada daerah belakang elipsoidal pada titik (x, y, z);
- b, c, a_f, a_r : parameter geometri elips;
- f_f, f_r : kekuatan distribusi elipsoidal;
- Q_s : distribusi panas dari sumber panas pengelasan (W);
- U : tegangan pengelasan (V);
- I : arus pengelasan (A);
- η : efisiensi busur las.

2.4 Perpindahan Panas Pengelasan

Selama pengelasan, benda kerja mengalami perubahan temperatur yang tidak merata dan terjadi secara cepat. Pada sumber panas pengelasan, material memanas dengan cepat ke temperatur di atas titik leleh. Panas terdistribusi secara konduksi dari lasan ke logam sekitar, dan hilang ke lingkungan secara konveksi dan radiasi. Distribusi termal selama pengelasan tergantung pada banyak faktor, seperti masukan panas pengelasan, jumlah aliran konvektif di kolam las, sifat termal material, pendinginan, dan kontak dengan material sekitarnya. Skema perpindahan panas pengelasan dapat dilihat pada **Gambar 2.6** (Van der Aa, 2007).



Gambar 2.6 Skema perpindahan panas pengelasan (Van der Aa, 2007)

2.4.1 Konduksi

Ketika terjadi distribusi temperatur pada suatu benda, terdapat perpindahan energi antara daerah dengan temperatur tinggi ke daerah dengan temperatur rendah, hal ini disebut dengan konduksi (Iguchi & Ilegbusi, 2014). Perpindahan panas pada pengelasan dapat ditunjukkan melalui persamaan berikut, konduksi panas yang bergantung pada temperature (Zhou & Tsai, 2005).

$$T - T_0 = \frac{Q}{2\pi k(x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}} \exp\left(\frac{-U((x^2 + y^2 + z^2)^{1/2} - x)}{2\alpha}\right) \quad (2.7)$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_M} \quad (2.8)$$

Dimana,

- x : koordinat arah pengelasan;
- y : koordinat melintang kearah pengelasan;

z : koordinat normal permukaan pengelasan;
 U : kecepatan pengelasan, mm/s;
 k : konduktivitas termal, (J/cm s);
 ρ : densitas, g/cm³;
 C_M : panas spesifik, J/g °C;
 Q : *heat flux*, W/mm²;
 T : temperatur las, °C;
 T_0 : temperatur awal benda kerja, °C.

2.4.2 Konveksi

Konveksi adalah perpindahan panas yang disertai dengan pergerakan fluida (Iguchi & Ilegbusi, 2014). Untuk perpindahan panas ke lingkungan melalui konveksi dapat menggunakan persamaan berikut (Dutta & S, 2014).

$$Q_{conv} = A_{surf} \cdot h(T_p - T_0) \quad (2.9)$$

Dimana,

A_{surf} = luas permukaan;
 T_p = temperatur puncak pengelasan;
 T_0 = temperatur lingkungan;
 h = koefisien konveksi;

2.4.3 Radiasi

Radiasi adalah energi elektromagnetik yang dipancarkan suatu benda akibat dari adanya suhu (Iguchi & Ilegbusi, 2014). Perpindahan panas secara radiasi dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Salloomi & Al-Sumaidae, 2017).

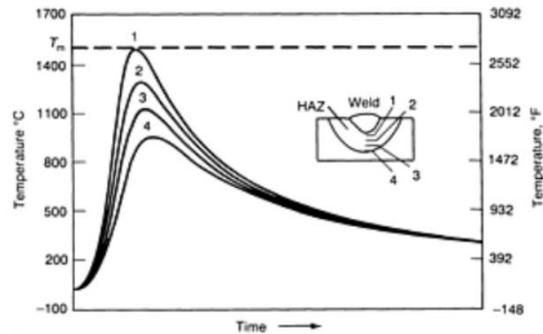
$$Q_{rad} = \sigma \cdot \varepsilon (T_r^4 - T_\infty^4) \quad (2.10)$$

Dimana,

T_r = temperatur permukaan, °C;
 T_∞ = temperatur lingkungan, °C;
 ε = emisivitas termal;
 σ = konstanta *Stefan Boltzmann*, $5.67 \cdot 10^{-8}$ W/m² °C.

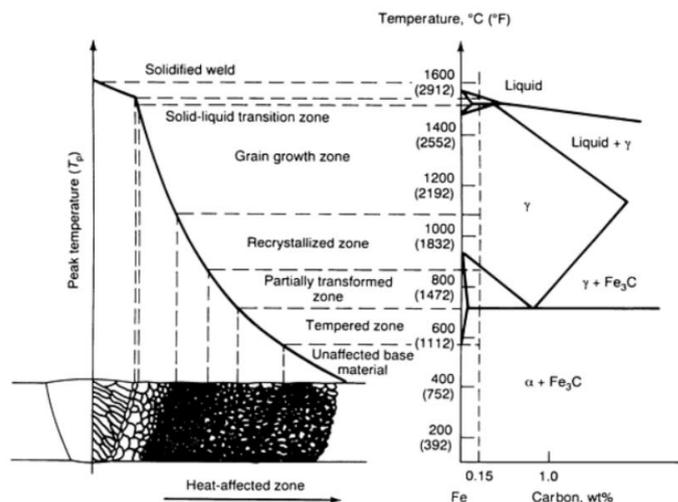
2.5 Siklus Termal Pengelasan

Perubahan temperatur terhadap waktu pada proses pengelasan disebut dengan siklus termal, dimana terjadi proses pemanasan dan pendinginan. Hal ini berpengaruh terhadap struktur mikro, tegangan sisa, dan distorsi pada benda las (American Welding Society, 2001). Pada baja karbon rendah, transformasi martensitik tidak berpengaruh terhadap tegangan sisa dan distorsi, namun pada baja karbon sedang memiliki pengaruh yang signifikan akibat dari transformasi martensitic (Deng, 2009). Siklus termal las dapat dilihat pada **Gambar 2.7**.



Gambar 2.7 Siklus termal las(International, 1993)

Adanya siklus termal dapat membentuk daerah-daerah yang berbeda pada benda kerja seperti pada **Gambar 2.8**, daerah hasil pengelasan sebagai berikut.



Gambar 2.8 Daerah lasan pada baja dengan komposisi karbon 0,15% (International, 1993)

2.5.1 Logam Lasan

Daerah endapan las (*weld deposit*) dari logam ketika pengelasan mencair dan kemudian membeku. Endapan las berasal dari logam induk yang mencair dan logam pengisi (*filler metal*). Sifat mekanik dari logam lasan dipengaruhi oleh jenis elektroda, parameter pengelasan, dan struktur mikro yang terbentuk. Perubahan temperatur, laju solidifikasi, dan laju pendinginan pada daerah batas cair-padat mempengaruhi struktur dari logam lasan (International, 1993).

2.5.2 Heat Affected Zone (HAZ)

Daerah terpengaruh panas atas HAZ adalah daerah dekat logam lasan yang merupakan bagian dari logam induk yang tidak mencair namun struktur mikro dan sifat mekanik berubah akibat dari panas pengelasan. Sifat dari HAZ sangat penting untuk diperhatikan setelah pengelasan, karena daerah ini merupakan daerah terlemah pada daerah lasan. Sifat mekanik dari HAZ dipengaruhi oleh *heat input*, laju pendinginan, struktur mikro yang terbentuk. Struktur mikro yang terbentuk pada HAZ bergantung pada panas yang diterima dan bervariasi seiring dengan pertambahan jarak dari daerah lasan. *Heat input* yang tinggi meningkatkan ukuran HAZ dan menyebabkan kekuatan impak berkurang. Oleh karena itu, ukuran dari HAZ perlu dibuat sempit (Boumerzoug, 2020). Lebar HAZ dapat diestimasi dengan temperatur pemanasan, semakin tinggi temperatur maka HAZ semakin lebar. Rumus temperatur puncak dapat

digunakan untuk estimasi lebar HAZ dengan persamaan sebagai berikut (American Welding Society, 2001).

$$\frac{1}{T_P - T_0} = \frac{\sqrt{2\pi e \rho C h Y}}{H_{net}} + \frac{1}{T_m - T_0} \quad (2.11)$$

Dimana,

- T_p : temperatur puncak, °C;
- T_0 : temperatur awal benda kerja, °C;
- ρ : densitas logam induk, g/cm³;
- C : panas spesifik, cal/g°C;
- h : ketebalan pelat, cm;
- Y : jarak dari daerah batas fusi las, cm;
- H_{net} : energi masukan panas, cal/cm;
- T_m : temperatur leleh/liquidus dari logam yang dilas, °C.

2.5.3 Logam Induk

Bagian ini merupakan bagian dari logam dasar dimana panas dan suhu pengelasan tidak menyebabkan terjadinya perubahan struktur dan sifat. Logam ini merupakan logam yang ingin disambungkan dan pemilihannya berdasarkan aplikasi tertentu serta sifat tertentu (International, 1993).

Pada penelitian ini, logam yang disambungkan memiliki jenis material JIS G3101-SS400. Material SS400 merupakan *general purpose structural steel* menurut standar Jepang yaitu JIS (*Japanese Industrial Standard*). Logam ini merupakan baja karbon rendah yang biasa digunakan untuk bahan konstruksi, alat berat, otomotif, dan konstruksi kapal (Sulamet-Ariobimo et al., 2016).

Karena JIS G3101 SS400 memiliki kandungan karbon yang rendah, maka memiliki sifat keuletan yang tinggi, mudah dibentuk, dan mampu las yang sangat baik. Sifat mekanik material SS400 dapat dilihat pada **Tabel 2.3**. SS400 sering digunakan pada proses pengerjaan panas dan dingin seperti *rolling, forging, stamping*, dan pengelasan. Baja ini juga dapat dilakukan proses perlakuan panas dan pengerasan untuk mendapatkan sifat mekanis yang sesuai, yaitu dengan *normalizing 900 - 950°C, stress relieve 650 - 900°C, carburizing 900 - 950 °C*, dan *hardening 750 - 800 °C* (Primasatya, 2009).

Tabel 2.3 Sifat mekanik material JIS G3101-SS400

<i>Yield Point (MPa)</i>	<i>Tensile Strength (MPa)</i>	<i>Elongation. %</i>
299	440	31

Baja SS400 memiliki ketebalan pelat yang bervariasi, seperti *steel sheet* dan *super heavy steel plate*. Komposisi dari SS400 juga berbeda tergantung dari penggunaannya, dapat dilihat pada **Tabel 2.4** berikut (Prahastho, 2019). Komposisi tersebut didapat dari dokumen *mill certificate* SS400. Dokumen *mill certificate* terdapat di lampiran.

Tabel 2.4 Komposisi kimia material JIS G3101-SS400

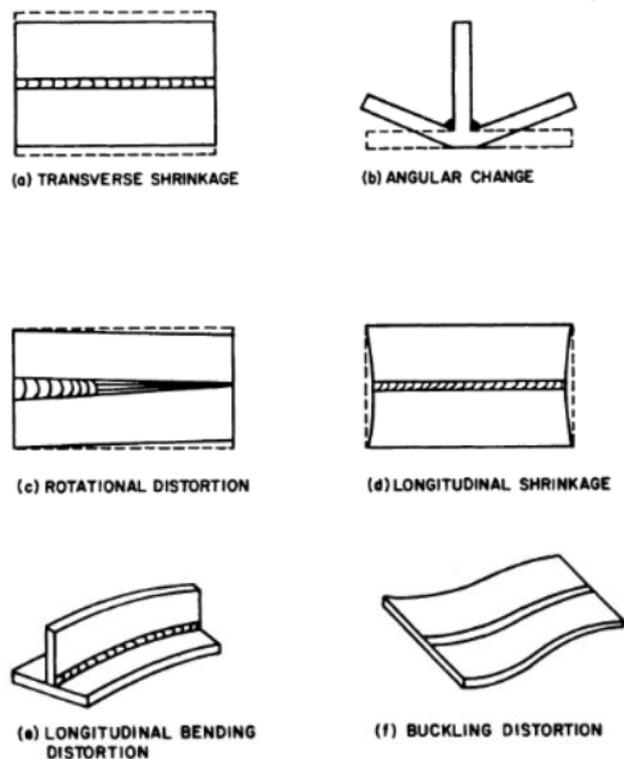
C	Si	Mn	P	S
0,19	0,14	0,3	0,01	0,01

2.6 Deformasi Pengelasan

Deformasi adalah perubahan dimensi atau struktur pada material akibat dari beban dari luar. Perubahan yang terjadi berupa ekspansi dan kontraksi. Awal mula perubahan ini dari perubahan struktur material dalam lalu menyebabkan perubahan dimensi. Pada proses pengelasan, logam las dapat terdeformasi dikarenakan adanya beberapa proses yang terjadi, yaitu pemanasan dan pendinginan yang menyebabkan terjadinya ekspansi dan penyusutan logam las (Mahfud, 2012).

Faktor yang mempengaruhi terbentuknya deformasi las adalah masukan panas dan teknik pengelasan. Dimana pada masukan panas pengelasan dipengaruhi oleh tegangan listrik, arus listrik, kecepatan serta ukuran elektroda, suhu pemanasan mula, tebal pelat, geometri sambungan, jumlah lapisan dari lasan dan urutan pengelasan (Dimas Prasetyo & Yulianto, 2012).

Selama pemanasan dan pendinginan dalam siklus las, regangan termal terjadi pada daerah lasan dan logam dasar. Regangan yang terbentuk ketika pemanasan disertai dengan deformasi plastis. Tegangan yang timbul akibat dari gabungan regangan ini menghasilkan tekanan atau gaya internal yang menyebabkan pembengkokan, tekuk, dan rotasi. Perubahan ini yang disebut dengan distorsi. Perubahan dimensi tersebut dapat dilihat pada **Gambar 2.9** yang diklasifikasikan berdasarkan penampilmannya (Masubuchi, 1982).



Gambar 2.9 Perubahan bentuk pada struktur las (Masubuchi, 1982)

Jenis perubahan dimensi pada gambar tersebut adalah:

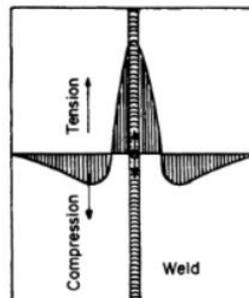
- Transverse shrinkage*, yaitu penyusutan tegak lurus terhadap garis las.
- Angular change*, yaitu perubahan sudut pada benda kerja.
- Rotational distortion*, merupakan distorsi sudut dalam bidang pelat yang berkaitan dengan perluasan bidang panas.
- Longitudinal shrinkage*, yaitu penyusutan material yang searah atau sejajar dengan garis las.

- e. *Longitudinal bending distortion*, yaitu pembengkokan yang melalui garis las dan tegak lurus terhadap pelat
- f. *Buckling distortion*, merupakan fenomena yang berkaitan dengan kompresi yang berkenaan dengan panas dan menyebabkan ketidakstabilan ketika pelatnya tipis.

2.7 Tegangan Sisa

Pada proses pengelasan, bagian yang dilas menerima panas yang bersifat setempat dan selama proses berlangsung terjadi perubahan temperatur sehingga distribusi temperatur tidak merata. Karena panas tersebut, bagian yang dilas mengalami pengembangan termal. Sedangkan bagian yang tidak terkena panas tidak berubah sehingga terjadi penghalangan pengembangan termal yang mengakibatkan terjadinya peregangan. Jika tidak dihindari, peregangan ini akan menyebabkan terjadinya perubahan bentuk yang permanen. Disamping terjadinya perubahan bentuk, yang diakibatkan oleh regangan, terjadi juga tegangan yang sifatnya tetap yang disebut dengan tegangan sisa (Wiryosumarto & Okumura, 2000).

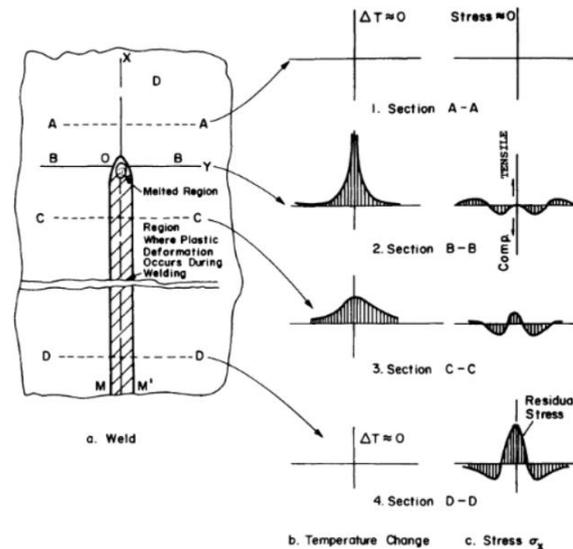
Tegangan sisa yang terjadi pada pengelasan ini dapat dibagi dalam dua kelompok, yaitu: pertama, tegangan sisa karena adanya halangan dalam yang terjadi karena pemanasan dan pendinginan setempat dan kedua tegangan sisa karena adanya halangan luar. Pembentukan tegangan sisa dapat dipengaruhi oleh beberapa hal seperti, batas luluh bahan, suhu pemanasan tertinggi, kecepatan pendinginan, tahanan luar dan pemanasan awal (Wiryosumarto & Okumura, 2000). Ketika suhu pengelasan mencapai temperatur ruangan, terbentuk tegangan sisa tarik pada daerah las dan tegangan sisa tekan pada daerah logam induk sekitar lasan. Tegangan sisa pada pengelasan dapat dilihat pada ilustrasi **Gambar 2.10**



Gambar 2.10 Tegangan sisa pada pengelasan (Masubuchi, 1982)

Mekanisme dari terjadinya tegangan sisa saat pengelasan dapat dilihat pada **Gambar 2.11**, dimana pengelasan dilakukan searah sumbu-x, busur las bergerak dengan kecepatan v . Pada gambar tersebut dapat dilihat distribusi temperatur sepanjang garis pengelasan dengan tegangan yang dihasilkan pada beberapa bagian. Pada bagian A-A, yang berada didepan dari busur las merupakan daerah yang belum terkena panas. Pada bagian B-B memiliki distribusi temperatur terbesar, menghasilkan tegangan *compressive* di sekitar area las dan dikelilingi dengan tegangan *tensile* pada area tepi yang menjauhi las. Lalu, pada area las tidak terdapat tegangan karena terjadi pelelehan logam. Pada area dekat las terjadi tegangan tekan akibat dari ekspansi termal yang ditahan oleh logam sekitarnya yang memiliki temperatur lebih rendah.

Pada bagian C-C, logam las dan logam induk telah mengalami pendinginan sehingga cenderung terjadi penyusutan sehingga menimbulkan tegangan tarik. Seiring dengan pertambahan jarak dari logam las, terjadi tegangan tekan lalu tegangan tarik. Pada daerah ini terjadi deformasi plastis. Pada bagian D-D telah mengalami pendinginan hingga temperatur ruangan, sehingga menghasilkan tegangan tarik yang besar dan tegangan tekan di daerah sekitarnya (American Welding Society, 2001).



Gambar 2.11 Distribusi temperatur dan tegangan yang dihasilkan pada proses pengelasan (American Welding Society, 2001)

Penghitungan tegangan sisa dapat dilakukan berdasarkan regangan yang terjadi menggunakan hubungan antara regangan dan tegangan akibat panas. Perubahan temperatur menghasilkan regangan linier yang merata ke segala arah. Perhitungan regangan yang disebabkan panas dapat dilakukan sebagai berikut.

$$\varepsilon_t = \alpha \cdot (T - T_{ref}) \quad (2.12)$$

Dimana,

- ε_t : regangan termal, mm;
- α : koefisien ekspansi termal;
- T : temperatur akhir, °C;
- T_{ref} : temperatur awal, °C

Untuk regangan tegak lurus garis las dan regangan searah garis las dapat dirumuskan menggunakan persamaan berikut:

$$\sigma_x = \frac{E}{(1-u^2)} [\varepsilon_x + u\varepsilon_y - (1+u)\alpha(\Delta T)] \quad (2.13)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1-u^2)} [\varepsilon_y + u\varepsilon_x - (1+u)\alpha(\Delta T)] \quad (2.14)$$

Dimana,

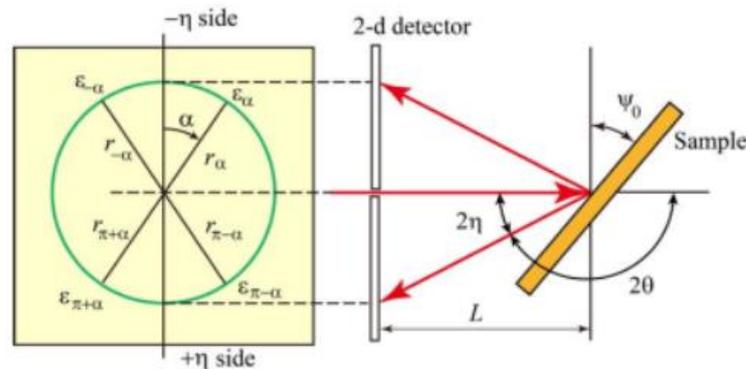
- σ_x : tegangan tegak lurus garis las;
- σ_y : tegangan searah garis las;
- ε_x : regangan tegak lurus garis las;
- ε_y : regangan searah garis las;
- U : rasio poisson;
- E : modulus Young, N/m²

Perbedaan temperatur menyebabkan tegangan dan regangan pada pengelasan. Saat pendinginan, temperatur material turun hingga ke temperatur ruangan, sehingga proses

pemuaian berhenti. Dengan tidak adanya perbedaan temperatur ($\Delta T = 0$), maka tegangan yang dihasilkan disebut tegangan sisa (Dimas Prasetyo & Yulianto, 2012).

Metode *x-ray diffraction* merupakan salah satu pengukuran non-destruktif yang banyak digunakan untuk mengukur tegangan sisa pada material seperti logam. Prinsip dasar pengukuran tegangan sinar-x didasarkan pada difraksi sinar-x oleh kristal. Tegangan ditentukan dari regangan kisi yang diukur dengan difraksi sinar-x menggunakan teori elastisitas (Tanaka, 2019).

Metode $\cos\alpha$ merupakan metode pengukuran tegangan sisa dengan difraksi sinar-x. Tegangan sisa tidak akan ada pada material apabila regangan tidak terjadi. Oleh karena itu, jarak kisi dari difraksi kristal dengan orientasi yang berbeda (ϕ, ψ) memiliki nilai yang sama, begitu juga dengan sudut difraksi. Cincin difraksi (cincin Debye) adalah cincin siklus, di mana jari-jari pada setiap sudut α adalah sama. Jika ada tegangan sisa dalam material, jarak kisi kristal dengan orientasi yang berbeda (ϕ, ψ) menjadi tidak sama. Begitu juga dengan sudut difraksinya. Ini akan menyebabkan distorsi pada cincin Debye, di mana jari-jari pada sudut yang berbeda tidak sama. Dalam metode $\cos\alpha$, sinyal cincin Debye dideteksi oleh area detektor. Kemudian, regangan ϵ_α dimana $\alpha = 0 - 360^\circ$ pada cincin Debye dapat mengukur secara efektif tegangan sisa pada spesimen. Pengukuran tegangan sisa pada metode $\cos\alpha$ didasarkan oleh distorsi pada cincin debye dapat dilihat seperti pada **Gambar 2.12** (Lin et al., 2017).



Gambar 2.12 Metode pengukuran tegangan sisa $\cos\alpha$ (Tanaka, 2019)

Empat regangan yang berada pada cincin debye dianalisis. Regangan pada sudut pusat dilambangkan sebagai ϵ_α , demikian pula regangan pada $-\alpha, (\pi+\alpha), (\pi-\alpha)$ masing-masing dilambangkan sebagai $\epsilon_{-\alpha}, \epsilon_{\pi+\alpha}, \epsilon_{\pi-\alpha}$. Kemudian parameter berikut α_1 dan α_2 didapatkan (Kubo & Sasaki, n.d.).

$$\alpha_1(\phi_0) = \frac{1}{2} [(\epsilon_\alpha - \epsilon_{\pi-\alpha}) + (\epsilon_{-\alpha} - \epsilon_{\pi+\alpha})] \quad (2.15)$$

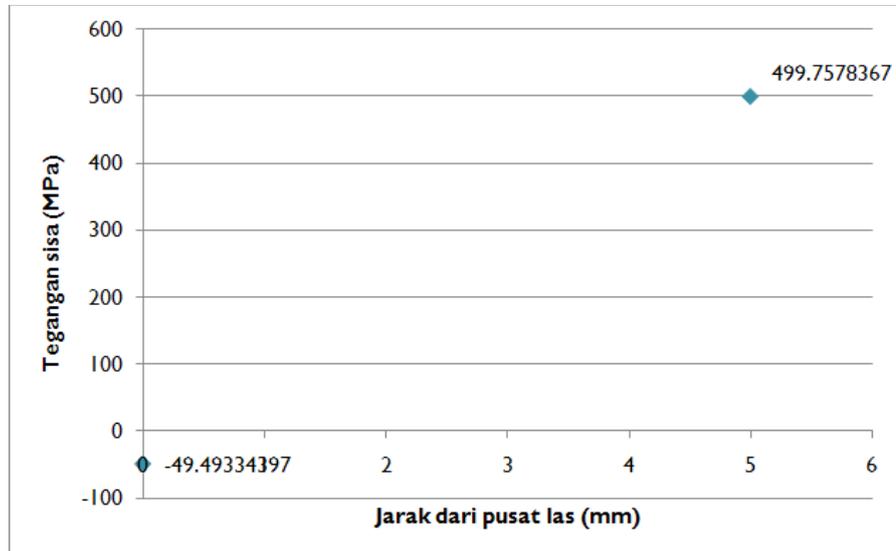
$$\alpha_2(\phi_0) = \frac{1}{2} [(\epsilon_\alpha - \epsilon_{\pi+\alpha}) - (\epsilon_{-\alpha} - \epsilon_{\pi-\alpha})] \quad (2.16)$$

Dan untuk tegangan tarik dan geser dihitung berdasarkan rumus berikut (Kubo & Sasaki, n.d.).

$$\sigma_x = -\frac{E}{1+\nu} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\sin 2\psi_0} \left(\frac{\partial \alpha_1(0)}{\partial \cos \alpha} \right) \quad (2.17)$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\sin 2\psi_0} \left(\frac{\partial \alpha_2(0)}{\partial \sin \alpha} \right) \quad (2.18)$$

Telah dilakukan penelitian untuk menganalisa tegangan sisa setelah pengelasan FCAW oleh (Enstein, 2010) pada pengelasan *butt joint* SS400 dengan ketebalan plat 10 mm menggunakan metode XRD. Pengukuran dilakukan di daerah HAZ dan daerah *weld bead*. Berikut merupakan grafik hasil pengukuran tegangan sisa yang dilakukan pada **Gambar 2.13**.



Gambar 2.13 Nilai tegangan sisa pada pelat dengan tebal 10 mm material SS400 (Enstein, 2010)

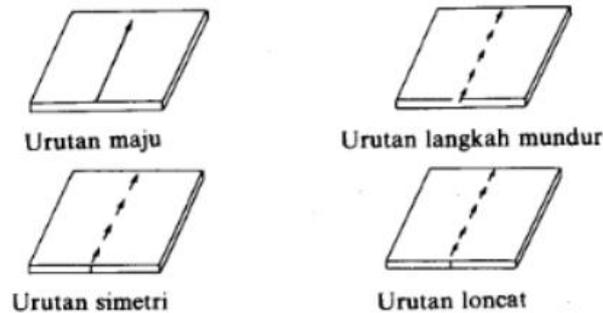
Dari hasil penelitian tersebut, nilai tegangan sisa pada daerah *weld bead* sebesar 499,76 MPa. Dapat disimpulkan bahwa nilai tegangan sisa pada daerah *weld bead* adalah tegangan sisa tarik dan tegangan sisa pada daerah HAZ adalah tegangan sisa tekan (Enstein, 2010).

2.8 Urutan Pengelasan

Urutan pengelasan atau *welding sequence* adalah arah dan urutan bagaimana proses pengelasan dilakukan. Pengembangan urutan pengelasan dilakukan karena terdapat beberapa struktur yang tidak dapat dilakukan *pre-heat* dan *post-heat treatment* (Wiryosumarto & Okumura, 2000).

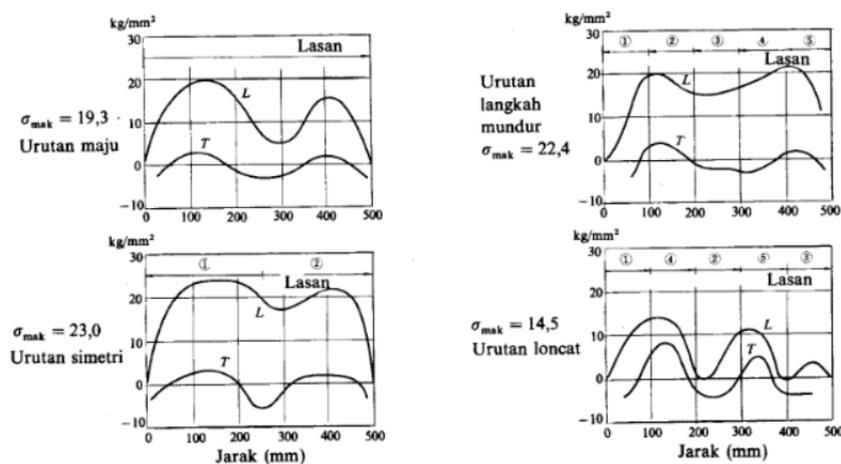
Urutan pengelasan merupakan cara untuk mengurangi tegangan sisa dan deformasi pada pengelasan. Mengoptimalkan urutan pengelasan merupakan aspek penting yang perlu diselidiki secara eksperimental atau numerik sebelum proses manufaktur komponen, karena memiliki pengaruh yang signifikan pada kualitas produk akhir dan dapat mengurangi jumlah pengerjaan yang diperlukan untuk menyelesaikan struktur. Urutan pengelasan memiliki pengaruh terhadap besar dan distribusi dari deformasi pengelasan (G. Fu et al., 2016).

Pada pengelasan yang menggunakan penghalang luar atau terkekang, menentukan urutan pengelasan yang baik dapat meminimalisir adanya tegangan sisa. Contohnya untuk pengelasan satu lapis dengan menggunakan urutan pengelasan maju, simetri, langkah mundur, dan loncat, seperti ilustrasi pada **Gambar 2.14** (Wiryosumarto & Okumura, 2000).



Gambar 2.14 Urutan pengelasan pada pengelasan satu lapis (Wirjosumarto & Okumura, 2000)

Tiap jenis urutan pengelasan dapat menghasilkan nilai tegangan sisa yang berbeda-beda, seperti pada **Gambar 2.15**. Dapat dilihat bahwa tegangan maksimal berada pada urutan pengelasan simetri, sedangkan nilai tegangan terkecil ada pada urutan loncat. Namun, nilai tersebut bisa berbeda-beda menyesuaikan dari bentuk geometri, material, dan parameter pengelasan (Wirjosumarto & Okumura, 2000).



Gambar 2.15 Nilai tegangan maksimum dari variasi urutan pengelasan (Wirjosumarto & Okumura, 2000)

2.9 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga adalah teknik matematis yang digunakan dalam bidang rekayasa untuk menyelesaikan masalah yang kompleks seperti pembebanan, geometri, dan fenomena lainnya. Metode elemen hingga digunakan untuk membagi sistem yang perilakunya tidak dapat diprediksi menggunakan persamaan bentuk tertutup menjadi potongan-potongan kecil, atau elemen, yang solusinya diketahui atau dapat diperkirakan. Geometri sistem didefinisikan oleh sejumlah bagian-bagian kecil yang disebut dengan elemen. Elemen dengan elemen lainnya terhubung melalui titik dalam ruang yang disebut nodal (*node*). Setiap nodal memiliki satu set derajat kebebasan (suhu, perpindahan) yang dapat bervariasi berdasarkan *input* ke sistem. Pendekatan metode elemen hingga adalah menggunakan informasi-informasi pada nodal (*node*). Dalam proses penentuan nodal yang disebut dengan pendeskritan (*discretization*), suatu sistem dibagi menjadi bagian-bagian yang lebih kecil, kemudian penyelesaian masalah dilakukan pada bagian-bagian tersebut dan selanjutnya digabung kembali sehingga diperoleh solusi secara menyeluruh (Thompson & Thompson, 2017).

Perbedaan metode elemen hingga dengan metode konvensional adalah kemampuan untuk merumuskan solusi untuk elemen individu sebelum menggabungkannya untuk mewakili

keseluruhan masalah. Jika dalam analisis tegangan, ditemukan karakteristik gaya perpindahan atau kekakuan dari masing-masing elemen dan kemudian mengumpulkan elemen-elemen tersebut untuk menemukan kekakuan dari keseluruhan struktur. Intinya, masalah yang kompleks tereduksi menjadi serangkaian masalah yang sangat disederhanakan (Jagota et al., 2013).

Penggunaan metode elemen hingga dalam pengembangan produk sudah banyak digunakan. Penggunaannya dalam proses manufaktur meningkat dan merupakan bagian dari bidang aplikasi baru dalam mekanika komputasi. Alasan yang paling penting untuk perkembangan ini adalah kebutuhan industri untuk meningkatkan produktivitas dan kualitas produk, untuk memiliki pemahaman yang lebih baik terhadap pengaruh parameter proses yang berbeda, dan juga untuk mengurangi biaya pengeluaran ketika melakukan *trial and error*. Fenomena yang dimodelkan memainkan peran penting pada berbagai tahap produksi, seperti pengelasan, perlakuan panas dan pengecoran (Anca et al., 2011).

Persamaan elemen hingga untuk mengetahui analisis termal dapat ditulis sebagai berikut (Syahroni & Purbawanto Hidayat, 2012).

$$[C]\{T\} + [K]\{T\} = \{F_T\} \quad (2.19)$$

Dimana:

$$[C] = \int_v \rho C [N]^T [N] dV \quad (2.20)$$

$$[K] = \int_v k [B]^T [B] dV + \int_s h_f [N]^T [N] dS \quad (2.21)$$

$$\{F_T\} = \int_v Q [N]^T dV + \int_s h_f T_{ref} [N]^T dS \quad (2.22)$$

Dimana,

- ρ : densitas, kg/m³;
- C : panas spesifik, J/kg.K;
- k : konduktivitas termal, W/m.K;
- h_f : koefisien panas konveksi, W/m².K;
- Q : laju *internal heat generation* per satuan volume, W/m³;
- $[N]$: matriks dari fungsi bentuk elemen;
- $[B]$: matriks dari turunan fungsi bentuk;
- $\{T\}$: vector temperatur nodal;

Hasil dari distribusi temperatur yang didapat dari persamaan (2.19) dimasukkan ke dalam pemodelan analisis struktural dalam bentuk pembebanan termal. Persamaan analisis struktur metode hingga sebagai berikut (Syahroni & Purbawanto Hidayat, 2012).

$${}^{i+1}[K_1] \{\Delta U\} - {}^{i+1}[K_2] \{\Delta T\} = {}^{i+1}\{R\} - {}^i\{R\} \quad (2.23)$$

yang mana,

$$[K_1] = \int_v [B]^T [D^{ep}] [B] dV \quad (2.24)$$

$$[K_2] = \int_v [B]^T [C_{th}] [M] dV \quad (2.25)$$

$$\{R\} = \int_s [N]^T \{p\} dS + \int_v [N]^T \{f\} dV \quad (2.26)$$

$$[Dep] = [De] + [Dp] \quad (2.27)$$

Dimana,

- $\{\Delta U\}$: peningkatan *nodal displacement*;
- $\{\Delta T\}$: peningkatan temperature nodal;
- $[B]$: matriks dari *strain-displacement*;
- $[D^e]$: matriks kekakuan elastis;
- $[D^p]$: matriks kekakuan plastis;
- $[C^{th}]$: matriks kekakuan termal;
- $[M]$: fungsi bentuk temperatur;
- $\{p\}$: vektor traksi atau gaya pada permukaan;
- $\{f\}$: *the vector of body force*;
- i : analisis langkah yang sedang dilakukan.

Vektor pada *displacement nodal* pada analisis selanjutnya, $^{i+1}\{U\}$ didapatkan melalui persamaan berikut (Syahroni & Purbawanto Hidayat, 2012).

$$^{i+1}\{U\} = {}^i\{U\} + \{\Delta U\} \quad (2.28)$$

Lalu, kondisi tegangan pada strutur las didapatkan melalui hubungan tegangan-regangan sebagai berikut (Syahroni & Purbawanto Hidayat, 2012).

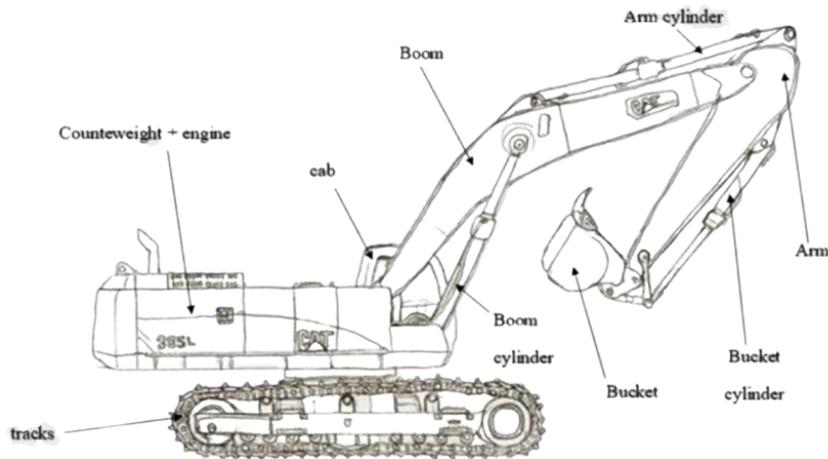
$$^{i+1}\{\sigma\} = {}^i\{\sigma\} + \{\Delta\sigma\} \quad (2.29)$$

$$\{\Delta\sigma\} = [D^{ep}] [B] \{\Delta U\} + [C^{th}] [M] \{\Delta T\} \quad (2.30)$$

2.10 Ekskavator

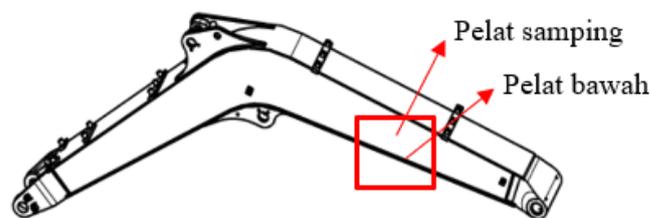
Ekskavator merupakan sebuah alat berat yang memiliki fungsi untuk melakukan pekerjaan seperti menggali batu/tanah, memindahkan material, membuat kemiringan atau *sloping* pada material, dan pekerjaan berat lainnya. Ekskavator terdiri dari beberapa bagian seperti bahu atau *boom*, lengan (*arm*), *bucket* (alat keruk) yang dioperasikan menggunakan tenaga hidrolik. Pertumbuhan pesat pertambangan, konstruksi dan industri didukung oleh kinerja tinggi dari mesin ekskavator hidrolik. Mobilitas dari mesin ini menggunakan sistem roda rantai seperti pada **Gambar 2.16** (Mohamed Malo et al., 2019).

Karena kondisi kerja yang sangat berat dan parah, komponen ekskavator terbiasa menerima beban yang tinggi. Ekskavator harus bisa bekerja dengan andal di kondisi kerja yang tidak bisa diprediksi. Sifat kekuatan yang buruk dari bagian ekskavator seperti *boom*, *arm*, dan *bucket* membatasi masa pakai ekskavator. Oleh karena itu, bagian ekskavator harus cukup kuat untuk mengatasi kondisi kerja ekskavator yang berat (P. Patel & Prajapati, 2011).



Gambar 2.16 Bagian pada ekskavator (Mohamed Malo et al., 2019)

Boom ekskavator adalah sebuah kotak struktur penampang berbentuk persegi panjang. Struktur *boom* terbuat dari pelat baja tipis yang dilas membentuk geometri kompleks. *Boom excavator* terdiri dari empat pelat utama yaitu, pelat penutup, pelat penutup bawah, pelat kiri dan pelat kanan. Selain itu, terdapat pelat pendukung seperti pelat *fork* depan, pelat penguat, pelat penghubung silinder *boom*, pelat penghubung silinder lengan. *Stiffeners* dan pelat penguat dilas di dalam untuk meningkatkan kekuatan dan mencegah deformasi berlebihan yang menyebabkan kegagalan pada *boom*. Silinder *boom* mengontrol gerakan pengangkatan pada *boom*. Kinerja *boom* dalam pekerjaan penggalian, menentukan kinerja keseluruhan, keamanan, dan keandalan ekskavator (Raj et al., 2015).



Gambar 2.17 Excavator boom PCXX

Gambar 2.17 merupakan ilustrasi bagian *boom* ekskavator PCXX. Pengelasan dilakukan dengan menyambung empat pelat SS400 menjadi rangka *boom*. Sambungan yang dianalisis adalah sambungan T antara pelat samping dan bawah yang merupakan pengelasan pertama atau *first welding* dari proses *assembly boom* ekskavator.

2.11 Penelitian Sebelumnya

Penelitian mengenai pengelasan sudah banyak dilakukan sebelumnya dengan menganalisis berbagai parameter dengan variabel beragam. Metode elemen hingga juga banyak digunakan karena penelitian menjadi lebih efektif dan efisien. Berikut merupakan beberapa penelitian yang sudah dilakukan mengenai urutan pengelasan.

Penelitian yang dilakukan oleh Jafarpur pada tahun 2011 menyebutkan bahwa pada variasi urutan pengelasan *single-pass*, urutan pengelasan simetri dan mundur menghasilkan tegangan sisa longitudinal yang lebih rendah dibandingkan urutan pengelasan progresif (Jafarpur & Nami, 2011).

Pada tahun 2012, Syahroni dan Hidayat menjelaskan pengaruh pengaruh *welding sequence* terhadap tegangan sisa dan distorsi menggunakan metode elemen hingga. Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah fillet sambungan T SAE 1020. Metode pengelasan yang digunakan adalah GTAW dengan arus 260 A, voltase 20 V, dan kecepatan pengelasan 5 mm/s serta koefisien konveksi sebesar $15 \text{ W/m}^2\text{K}$. Variasi *welding sequence* yang digunakan dalam penelitian ini yaitu pengelasan satu arah, pengelasan berlawanan arah, pengelasan dari bagian tengah setiap sisi dan pengelasan bagian tengah dari dua sisi berbeda. Berdasarkan penelitian tersebut tegangan sisa transversal dan longitudinal terkecil didapat pada pengelasan berlawanan arah dan distorsi terkecil didapat pada pengelasan bagian tengah dari dua sisi berbeda (Syahroni & Purbawanto Hidayat, 2012).

Guangming Fu pada tahun 2016 melakukan studi mengenai analisis elemen hingga terkait efek dari urutan pengelasan terhadap tegangan sisa dan distorsi pada pengelasan sambungan-T. Parameter ellipsoidal ganda Goldak digunakan untuk model sumber panas. Simulasi terlebih dulu divalidasi dengan uji eksperimen. Penelitian menggunakan sambungan T dengan jenis material DH36 dengan delapan variasi urutan pengelasan, yaitu empat variasi pengelasan progresif atau menerus dan empat variasi pengelasan blok. Pada variasi urutan pengelasan progresif terdapat dua jenis, yaitu satu sisi atau bergantian dan dua sisi atau serentak untuk kedua sisi. Begitu juga untuk variasi urutan las blok, terdapat jenis satu sisi dan dua sisi. Hasil menunjukkan bahwa urutan pengelasan memiliki efek yang signifikan pada besaran dan distribusi tegangan sisa dan distorsi (G. Fu et al., 2016).

Pada tahun 2020, Khoshroyan melakukan penelitian terkait efek parameter las dan urutan pengelasan terhadap tegangan sisa dan distorsi pada pengelasan sambungan-T. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan pengelasan menurunkan vertical defleksi di pelat, penyusutan melintang dan distorsi sudut pelat dan defleksi lateral pengaku, tetapi meningkatkan tegangan tarik longitudinal maksimum pada pelat dan pengaku. Selanjutnya, peningkatan kecepatan pengelasan menurunkan vertical defleksi di pelat, penyusutan melintang dan distorsi sudut pelat, dan perubahan urutan pengelasan mengubah distribusi distorsi di pelat dan pengaku tanpa perubahan signifikan dalam distribusi tegangan sisa memanjang (Khoshroyan & Darvazi, 2020).

Tabel 2.5 Penelitian sebelumnya

Nama Penulis	Kesimpulan
(Gannon et al., 2010) dengan judul “ <i>Effect of welding sequence on residual stress and distortion in flat-bar stiffened plates</i> ”	Penelitian mengenai analisis pengaruh <i>welding sequence</i> terhadap distorsi dan tegangan sisa pada <i>flat bar stiffened plate</i> SM400A dengan metode elemen hingga. Dalam penelitian tersebut didapatkan bahwa urutan pengelasan berpengaruh pada nilai puncak tegangan sisa. Tegangan sisa pada urutan searah (A) dan searah silang (C) lebih tinggi dibanding ke tengah silang (B) dan ke luar silang (D). Untuk distorsi yang terjadi, urutan (B) menghasilkan deformasi terbesar, namun urutan (C) dan (D) menghasilkan distorsi terkecil.
(Enstein, 2010) dengan judul “Pengaruh Ketebalan Pelat Terhadap Tegangan Sisa dan Distorsi Angular pada Pelat Baja JIS G 3101 SS400 Dilas dengan Menggunakan Proses FCAW Semi-Otomatis”	Penelitian mengenai pengaruh ketebalan pelat terhadap tegangan sisa dan distorsi angular pada pelat baja JIS G3101 SS400. Tebal pelat yang digunakan adalah salah satunya 10 mm. Dimana hasil yang didapatkan adalah pada bagian <i>weld bead</i> nilai tegangan sisa sebesar 499,76 MPa berupa tegangan tekan. Sedangkan pada HAZ sebesar 49,45 MPa berupa tegangan tarik.

<p>(Choobi et al., 2012) dengan judul “<i>Effect of welding sequence and direction on angular distortions in butt-welded plates</i>”</p>	<p>Penelitian mengenai efek urutan pengelasan terhadap distorsi angular pada sambungan tumpul. Hasil yang didapatkan adalah urutan las simetri dari tengah ke tepi menghasilkan distorsi angular dan tegangan lebih rendah dibandingkan pengelasan konvensional (progresif) serta merupakan cara yang efisien untuk mengontrol distorsi dan tegangan sisa.</p>
<p>(Jafarpur & Nami, 2011) dengan judul “<i>Analysis of welding conditions based on induced thermal irreversibilities in welded structures: Cases of welding sequences and preheating treatment</i>”</p>	<p>Model numerik 3D digunakan untuk mempelajari perilaku dari tegangan sisa dan entropi yang terbentuk karena variasi suhu <i>preheat</i> yang berbeda dan tiga jenis urutan pengelasan. Analisis dilakukan pada <i>steel plate</i> SAE 1020 dengan dimensi 300 x 200 x 5 mm. Tiga jenis urutan pengelasan yang digunakan adalah progresif atau searah menerus, <i>backstep</i> atau mundur, dan simetri yaitu dari tengah ke tepi. Hasil yang didapatkan adalah semakin tinggi temperature <i>preheat</i> maka tegangan sisa semakin rendah. Lalu, urutan pengelasan simetri menghasilkan nilai tegangan sisa paling rendah pada tegangan sisa longitudinal.</p>
<p>(Syahroni & Purbawanto Hidayat, 2012) dengan judul “<i>3D Finite Element Simulation of T-joint Fillet</i>”</p>	<p>Penelitian mengenai pengaruh <i>welding sequence</i> terhadap tegangan sisa dan distorsi menggunakan metode elemen hingga. Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah fillet sambungan T SAE 1020. Metode pengelasan yang digunakan adalah GTAW dengan arus 260 A, voltase 20 V, dan kecepatan pengelasan 5 mm/s serta koefisien konveksi sebesar 15 W/m²K. Variasi <i>welding sequence</i> yang digunakan dalam penelitian ini yaitu pengelasan satu arah, pengelasan berlawanan arah, pengelasan dari bagian tengah setiap sisi dan pengelasan dari bagian tengah dari dua sisi berbeda. Berdasarkan penelitian tersebut tegangan sisa transversal dan longitudinal terkecil didapat pada pengelasan berlawanan arah dan distorsi terkecil didapat pada pengelasan dari tengah ke tepi.</p>
<p>(D. F. Fu et al., 2014) dengan judul “<i>Effect of welding sequence on residual stress in thin-walled octagonal pipe-plate structure</i>”</p>	<p>Penelitian mengenai efek urutan pengelasan terhadap tegangan sisa pada struktur pelat-pipa octagonal. Hasilnya adalah pengelasan mundur menghasilkan tegangan sisa longitudinal terendah pada daerah las dan sekitarnya karena memiliki efek <i>preheating</i> dan <i>post-heating</i>. Lalu, urutan simetri juga menghasilkan tegangan sisa yang rendah dibandingkan urutan lainnya.</p>
<p>(G. Fu et al., 2016) dengan judul “<i>Influence of the welding sequence on residual stress and distortion of fillet welded structures</i>”</p>	<p>Studi mengenai analisis elemen hingga terkait efek dari urutan pengelasan terhadap tegangan sisa dan distorsi pada pengelasan sambungan-T. Simulasi terlebih dulu divalidasi dengan uji eksperimen. Penelitian menggunakan sambungan T dengan jenis material DH36 dengan delapan variasi urutan pengelasan, yaitu empat variasi pengelasan progresif atau menerus dan empat variasi pengelasan blok. Pada variasi urutan pengelasan</p>

	<p>progresif terdapat dua jenis, yaitu satu sisi atau bergantian dan dua sisi atau serentak untuk kedua sisi. Begitu juga untuk variasi urutan las blok, terdapat jenis satu sisi dan dua sisi. Hasil menunjukkan bahwa urutan pengelasan memiliki efek yang signifikan pada besaran dan distribusi tegangan sisa dan distorsi.</p>
<p>(Dhinakaran et al., 2017) dengan judul “<i>Experimental investigation and numerical simulation of weld bead geometry and temperature distribution during plasma arc welding of thin Ti-6Al-4V sheets</i>”</p>	<p>Penelitian mengenai analisis numerik pada <i>weld bead geometry</i> dan distribusi temperature dengan plasma arc welding menggunakan material Ti-6Al-4V. Distribusi temperatur diukur menggunakan <i>infrared thermometer</i> pada tiga titik di pelat dengan jarak masing-masing 7, 14, dan 21 mm dari garis tengah las. Hasil dari penelitian ini diketahui bahwa FEM dapat memprediksi profil dari <i>weld bead</i> untuk penetrasi penuh dan juga penetrasi secara parsial. Hasil juga menunjukkan bahwa gradien temperature menjadi tidak cukup selama pengelasan dengan <i>heat input</i> yang kecil yang dimana memiliki peran besar untuk membuat dan menstabilisasikan <i>keyhole</i>. Kondisi stabil dan juga juga penetrasi penuh didapatkan pada parameter arus menggunakan 60 A.</p>
<p>(Panji et al., 2019) dengan judul “<i>Effect of Welding Current and Welding Speed on Weld Geometry and Distortion in TIG Welding of A36 Mild Steel Pipe with V-Groove Joint</i>”</p>	<p>Dalam studi ini, pengaruh arus pengelasan dan kecepatan pengelasan pada geometri las dan distorsi pada proses pengelasan TIG diselidiki. Material yang digunakan dalam percobaan ini adalah pipa baja ringan A36. Dimensi benda uji adalah diameter luar 114,3 mm dan tebal 6 mm. Kawat pengumpan yang digunakan adalah ER70-S 6 dengan sambungan V-groove sebagai jenis sambungan las. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan arus pengelasan dapat memperlebar manik las dan meningkatkan distorsi.</p>
<p>(Khoshroyan & Darvazi, 2020) dengan judul “<i>Effects of welding parameters and welding sequence on residual stress and distortion in Al6061-T6 aluminum alloy for T-shaped welded joint</i>”</p>	<p>Penelitian terkait efek parameter las dan urutan pengelasan terhadap tegangan sisa dan distorsi pada pengelasan sambungan-T. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan pengelasan menurunkan distorsi sudut dan penyusutan transversal, tetapi meningkatkan tegangan tarik longitudinal maksimum. Selanjutnya, peningkatan arus meningkatkan tegangan sisa dan deformasi, dan perubahan urutan pengelasan mengubah distribusi distorsi di pelat dan pengaku tanpa perubahan signifikan dalam distribusi tegangan sisa longitudinal.</p>
<p>(Asadi et al., 2020) dengan judul “<i>Numerical investigation on the effect of welding speed and heat input on the residual stress of multi-pass TIG welded stainless steel pipe</i>”</p>	<p>Penelitian mempelajari tegangan sisa dalam pengelasan TIG multi-pass SUS304. Model elemen hingga menggunakan ABAQUS untuk desain las melingkar di sekitar pipa. Efek dari nomor lintasan las, kecepatan gerak elektroda, dan <i>heat input</i> pada tegangan sisa diselidiki. Hasilnya adalah meningkatnya kecepatan pengelasan, tegangan tarik aksial pada permukaan pipa berkurang.</p>

Berdasarkan penelitian yang sebelumnya dilakukan, dianalisis penggunaan *heat input* dan efeknya terhadap kualitas hasil pengelasan. Berikut referensi mengenai penentuan *heat input* optimal untuk pengelasan tebal pelat 9 mm.

Tabel 2.6 Referensi penggunaan *heat input* penelitian sebelumnya

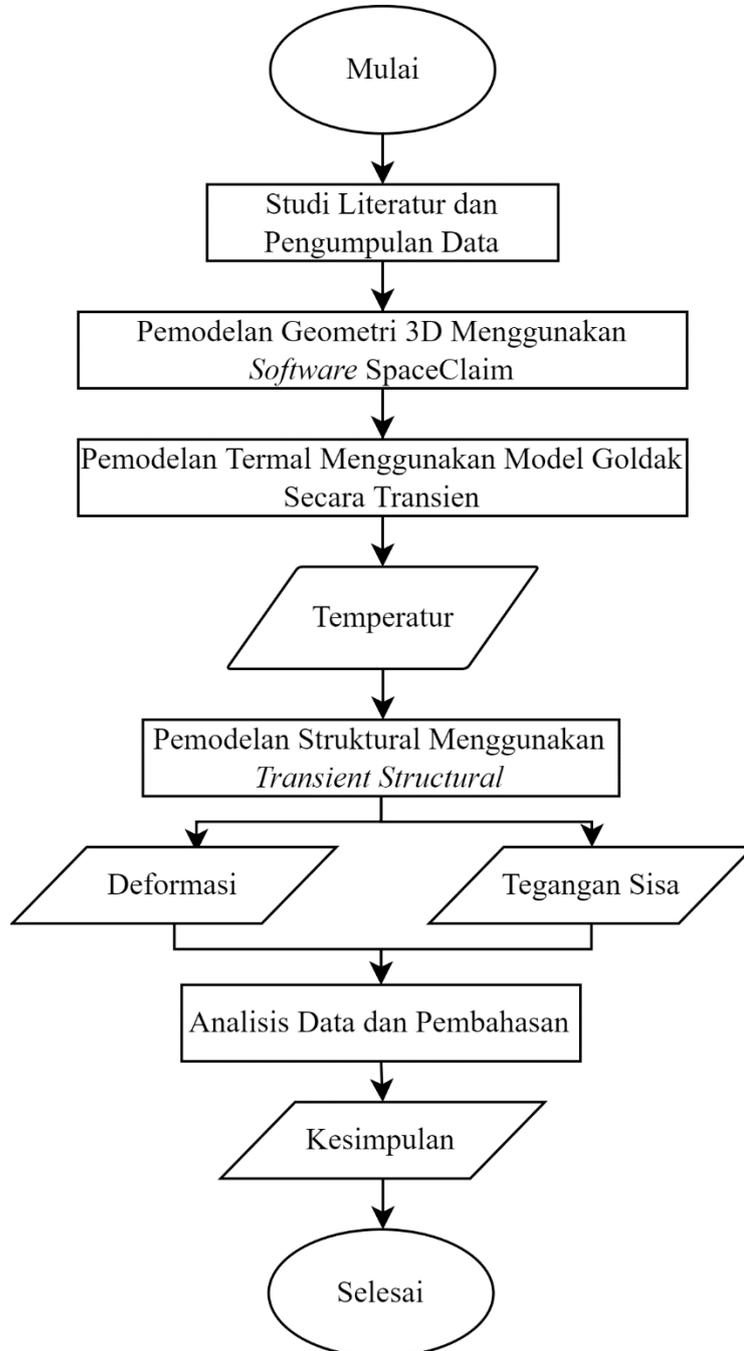
Penulis dan Judul	Tebal Plat (mm)	Jenis Material dan Tipe Las	Heat Input (J/mm)
Anis & Winarto, 2011 dengan judul " <i>Effect of Plate Thickness and Weld Position on Distortion and Residual Stress of Welded Structural Steel</i> "	10	SS400, GMAW	1268,4
Abidin, dkk. 2017 dengan judul " <i>Fatigue Life Assessment of 9mm Thickness Low Carbon Steel with Multi-Objective Optimized Welding Process</i> "	9	Low Carbon Steel, GMAW	288
Anggigi, dkk. 2019 dengan judul " <i>Analisa Pengaruh Temperatur Normalizing Pada Sambungan Las SMAW (Shielded Metal Arc Welding) Terhadap Kekuatan Tarik, Tekuk dan Mikrografi Baja Karbon Rendah</i> "	10	SS400, SMAW	1000
Pratikno, dkk. 2021 dengan judul " <i>Comparative Analysis of FCAW, and GMAW Welding With Heat Input Variations on A36 Steel Against Vickers Hardness Test and Macrostructure</i> "	10	SS400, GMAW	1500
Alwan, dkk. 2018 dengan judul " <i>Study the Effect of Welding Heat Input on the Microstructure, Hardness, and Impact Toughness of AISI 1015 Steel</i> "	10	AISI 1015 Steel, GMAW	1271,9
	10	AISI 1015 Steel, GMAW	1454,61
Rata-rata heat input (J/mm)			1130,485

Didapatkan rata-rata nilai *heat input* yang digunakan adalah 1130,485 J/mm dengan hasil yang optimum dari masing-masing penelitian sebelumnya.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

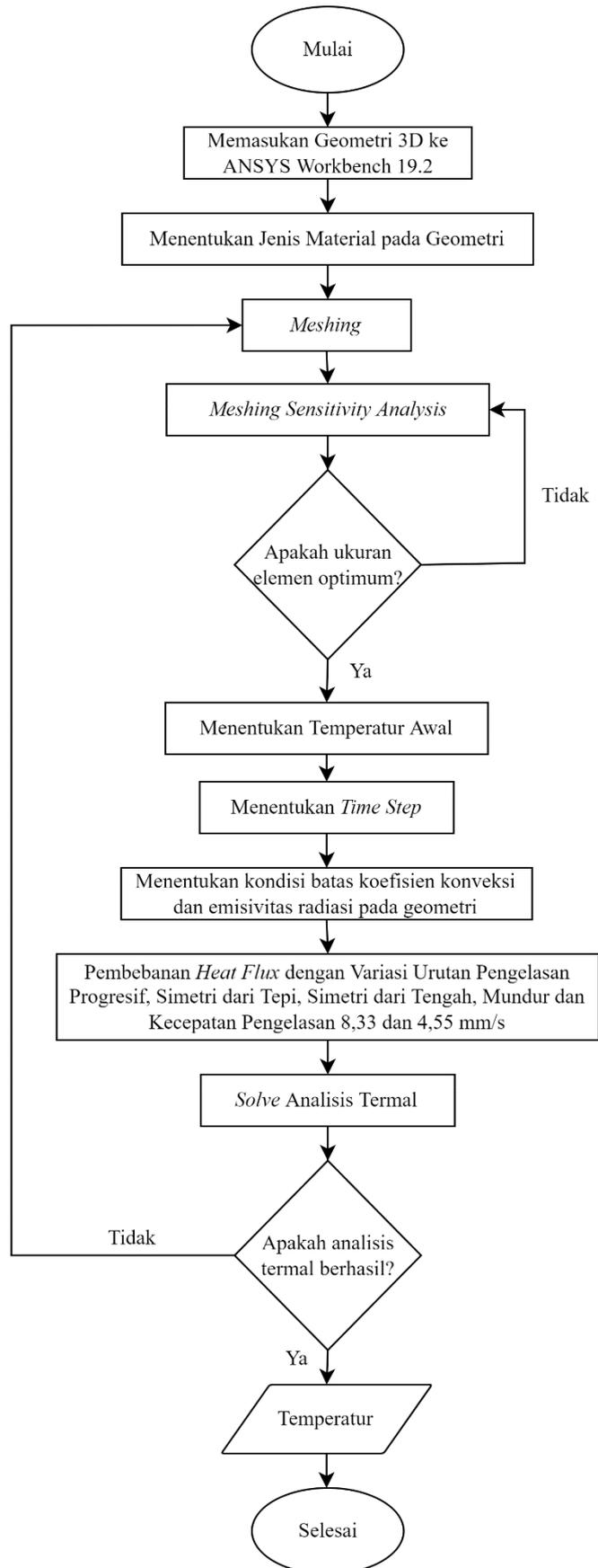
3.1 Diagram Alir

Alur metodologi dari penelitian dapat digambarkan melalui diagram **Gambar 3.1** berikut.



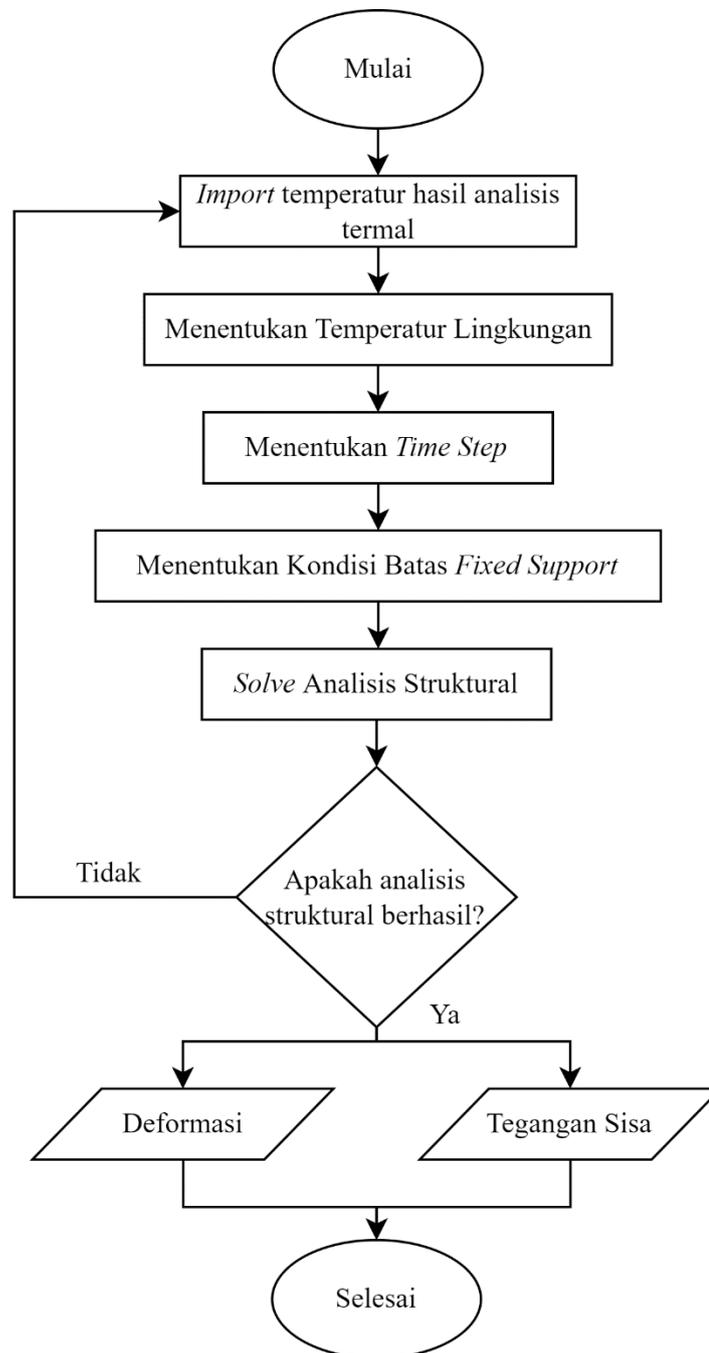
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

Diagram alir pemodelan termal untuk melakukan simulasi pengelasan dapat dilihat pada **Gambar 3.2** berikut.



Gambar 3.2 Diagram alir pemodelan termal

Diagram alir pemodelan struktural untuk mendapatkan hasil deformasi dan tegangan sisa dari simulasi pengelasan dapat dilihat pada **Gambar 3.3** berikut.



Gambar 3.3 Diagram alir pemodelan struktural

3.2 Alat Penelitian

Adapun alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. SpaceClaim, merupakan *software* yang digunakan untuk membuat model 3D sambungan T boom ekskavator.
2. ANSYS Workbench 19.2, merupakan *software* yang digunakan untuk mensimulasikan proses pengelasan dengan metode elemen hingga.

3.3 Material dan Parameter Pengelasan

Untuk melakukan analisis deformasi dan tegangan sisa menggunakan metode elemen hingga, diperlukan sifat mekanik dan juga termal dari material yang digunakan. Material yang digunakan adalah sambungan *first welding* pelat samping dan bawah pada bagian boom ekskavator untuk tipe PCXX. Jenis material yang digunakan adalah JIS G3101 - SS400. Data sifat material dimasukkan pada fitur *engineering data* di aplikasi ANSYS Workbench 19.2.

Geometri sambungan yang digunakan pada penelitian ini merupakan tahap awal pengembangan riset simulasi pengelasan sebelum akhirnya diimplementasikan menggunakan geometri asli dari boom ekskavator.

3.3.1 JIS G3101-SS400

Jenis material pada pelat boom ekskavator adalah JIS G3101-SS400 yang termasuk ke dalam kategori *low carbon structural steel*. Sifat termal dan mekanik dari material SS400 dapat dilihat pada **Tabel 3.1**, **Tabel 3.2**.

Tabel 3.1 Sifat termal material SS400 (Jeyakumar & Christopher, 2013)

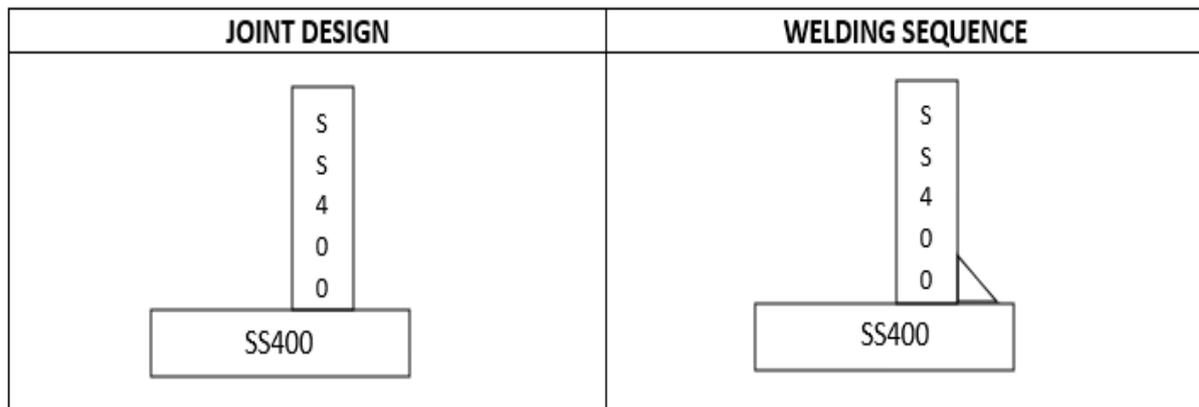
Temp (°C)	Specific Heat (J/(kg. °C))	Konduktivitas Termal W/(m°C)	Densitas (kg/m ³)	Koef. Ekspansi Termal (10 ⁻⁵ °C ⁻¹)	Entalpi (Mj/m ³)
0	480	60	7880	1,10	0
100	500	50	7880	1,15	360
200	520	45	7800	1,20	720
400	650	38	7760	1,30	1500
600	750	30	7600	1,42	2500
800	1000	25	7520	1,45	3700
1000	1200	26	7390	1,45	5000
1200	1400	28	7300	1,45	5000
1400	1600	37	7250	1,45	5000
1550	1700	37	7180	1,45	5000

Tabel 3.2 Sifat mekanik material SS400 (Jeyakumar & Christopher, 2013)

Temperatur (°C)	Modulus Elastisitas (GPa)	Poisson's ratio
0	210	0,280
100	200	0,285
200	200	0,290
400	170	0,310
600	80	0,330
800	35	0,330
1000	20	0,340
1200	15	0,360
1400	10	0,380
1550	10	0,390

3.3.2 Parameter Pengelasan

Proses pengelasan yang digunakan menggunakan metode *Gas Metal Arc Welding* (GMAW). Prosedur dan parameter pengelasan yang dilakukan dapat dilihat pada **Gambar 3.4** dan **Tabel 3.4**



Gambar 3.4 Desain sambungan las

Tabel 3.3 Prosedur dan Parameter Pengelasan

Proses Pengelasan	<i>Metal Active Gas (MAG)</i>
Tipe Sambungan	<i>Fillet Joint (Without Groove)</i>
Gap Sambungan	-
Desain Sambungan Material	SS400 to SS400
Tebal Material	9 mm
Posisi Pengelasan	2F
Jumlah Layer Pengelasan	<i>Single Pass</i>
Diameter Elektroda	12 mm
Polaritas	DCEP
Kecepatan Pengelasan	8,33 mm/s
Filler Material	Kiswel KC26
Gas Shielding	CO ₂ 100 %
Preheat Temperature	-
Post Weld Heat Treatment or Aging	-
Informasi Tambahan	Membersihkan material sebelum dilakukan pengelasan
Torch Angle	45 ^o

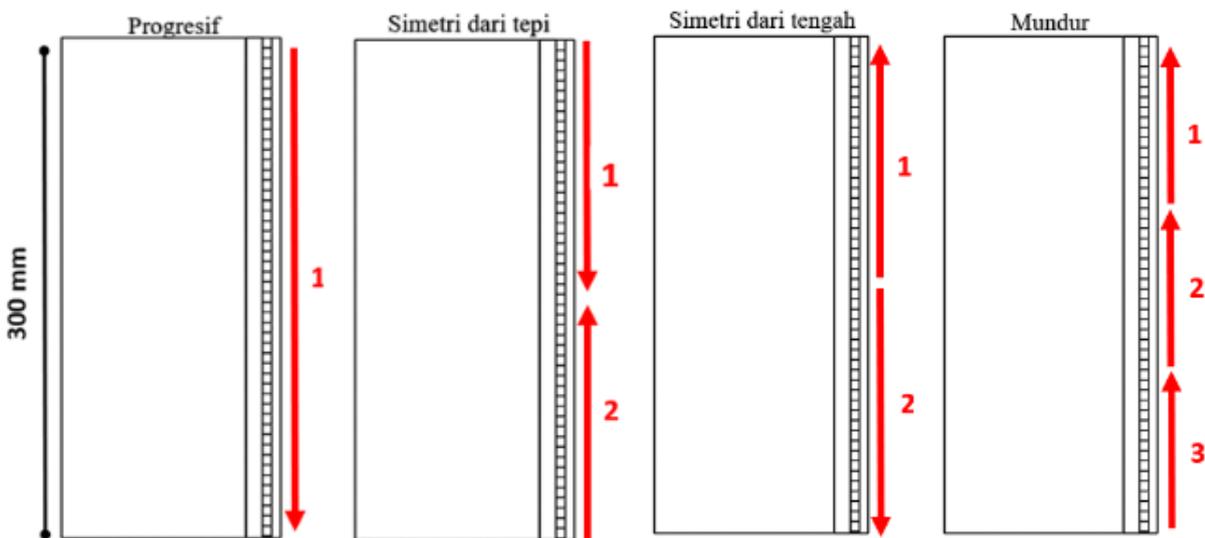
3.3.3 Variabel Penelitian

Pada penelitian ini, digunakan variasi kecepatan dan urutan pengelasan yang mengacu pada berbagai sumber berdasarkan penelitian terdahulu seperti pada **Tabel 3.4**. Masukan panas yang dipengaruhi oleh kecepatan pengelasan, serta perubahan arah dan titik mulai dari urutan pengelasan berpengaruh terhadap perbedaan temperatur yang terjadi pada setiap tahap dari urutan pengelasan tersebut. Perbedaan temperatur dan arah dari urutan pengelasan mempengaruhi nilai deformasi dan tegangan sisa pada pengelasan (Masubuchi, 1982).

Tabel 3.4 Variabel penelitian

Kode Pengelasan	Urutan Pengelasan	Kecepatan Pengelasan (mm/s)
WV1	Progresif	8,33
WV2	Progresif	4,55
WV3	Simetri dari tepi	8,33
WV4	Simetri dari tepi	4,55
WV5	Simetri dari tengah	8,33
WV6	Simetri dari tengah	4,55
WV7	Mundur Bertahap	8,33
WV8	Mundur Bertahap	4,55

Terdapat empat urutan pengelasan yang digunakan, pengelasan progresif, simetri dari tepi, simetri dari tengah, dan mundur dapat dilihat pada ilustrasi **Gambar 3.5**.



Gambar 3.5 Variabel urutan pengelasan

3.4 Metode Penelitian

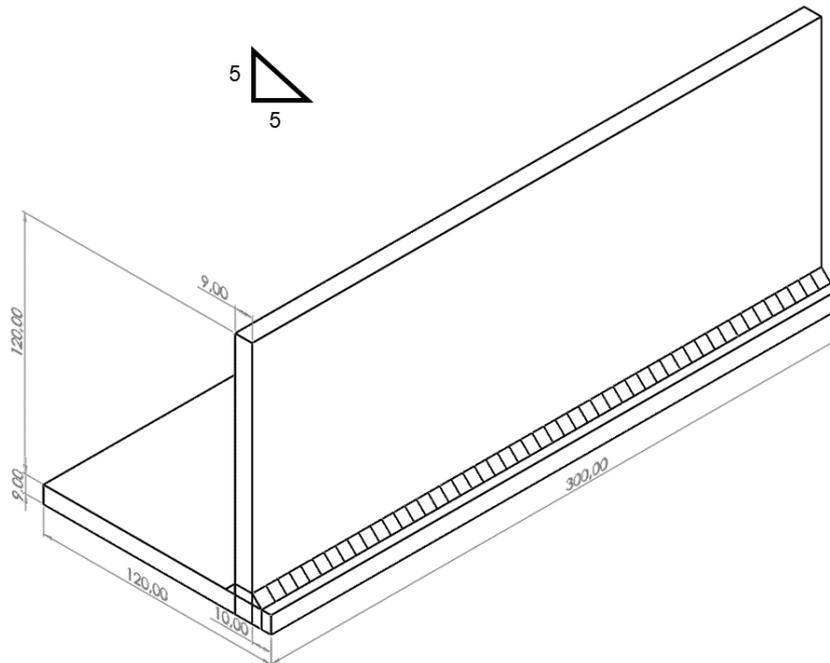
Dalam pelaksanaan penelitian ini, dilakukan analisis elemen hingga dengan variasi kecepatan dan urutan pengelasan terhadap distribusi temperatur, deformasi, dan tegangan sisa. Terdapat beberapa tahapan yang dilakukan seperti berikut.

3.4.1 Pemodelan 3D Material

Pada penelitian ini, pemodelan spesimen 3D dilakukan menggunakan *software* SpaceClaim dengan bentuk seperti pada **Gambar 3.6**. Ukuran dari geometri spesimen adalah 300 x 120 x 120 mm untuk panjang, lebar, dan tinggi serta ketebalan 9 mm dapat dilihat pada **Tabel 3.5**.

Tabel 3.5 Dimensi material

Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tinggi (mm)	Tebal (mm)
300	120	120	9



Gambar 3.6 Geometri 3D material

3.4.2 Memasukkan Data Material

Data sifat material SS400 pada **Tabel 3.1** dan **Tabel 3.2** dimasukkan menggunakan “engineering data” pada *software* ANSYS Workbench 19.2.

3.4.3 Meshing

Meshing adalah proses diskritisasi atau membagi bentuk model menjadi elemen-elemen kecil yang terdiri dari kumpulan titik atau nodal. Analisis atau penyelesaian masalah dilakukan pada setiap elemen secara bertahap hingga keseluruhan elemen model.

3.4.4 Meshing Sensitivity Analysis

Meshing sensitivity analysis adalah analisis untuk mendapatkan titik konvergen pada penggunaan jumlah elemen pada *mesh* untuk melakukan simulasi yang menandakan bahwa hasil data yang ditinjau sudah sesuai dengan keadaan sebenarnya. Variasi ukuran elemen yang digunakan adalah 6 mm, 5 mm, 4 mm, dan 3,5 mm dengan jenis elemen heksahedral.

3.4.5 Analisis Termal

Setup, pada tahap ini dilakukan penentuan kondisi atau *boundary condition* dari proses pengelasan. Pemilihan jenis elemen dilakukan secara otomatis oleh ANSYS Workbench 19.2. Temperatur awal yang digunakan adalah 31°C. Lalu, *step* yang digunakan ada dua, pertama untuk proses pengelasan dan kedua untuk proses pendinginan. Selain itu, ditentukan nilai koefisien konveksi dan emisivitas radiasi pada seluruh permukaan material, koefisien konveksi sebesar 25 W/m²K dan emisivitas radiasi sebesar 0,9.

Load, Setelah itu dilakukan pembebanan *heat flux* pada area pengelasan menggunakan Goldak ACT. Parameter Goldak yang digunakan seperti pada **Tabel 3.6** berikut.

Tabel 3.6 Parameter geometri elipsoidal ganda Goldak

b (mm)	c (mm)	A_f (mm)	A_r (mm)
5,2	6,2	4,9	14,4

Result, untuk mendapatkan hasil temperatur, pilih “*temperature*” setelah itu pilih “*solve*”.

3.4.6 Analisis Struktural

Setup, hasil dari analisis termal di-*import* ke “*Transient Structural*” untuk analisis struktural. *Boundary condition* yang digunakan adalah *support* sebagai penahan atau *restraint* ketika proses pengelasan dilakukan.

Result, untuk mendapatkan hasil deformasi dan tegangan sisa, pilih “EPPLZ”, “EPPLX”, dan “*Directional Deformation*”, kemudian “*solve*” untuk mendapatkan hasil berupa regangan plastik longitudinal, regangan plastik transversal, dan deformasi angular. Hasil yang didapat selanjutnya dianalisis untuk mengetahui besar tegangan sisa longitudinal, tegangan sisa transversal dan deformasi angular yang terjadi pada pelat.

3.5 Rancangan Penelitian

Pada penelitian ini, rancangan penelitian yang digunakan seperti pada **Tabel 3.7** berikut.

Tabel 3.7 Rancangan penelitian

Material	Arus (A)	Tegangan (V)	Kode Pengelasan	Distribusi Temperatur	Deformasi	Tegangan Sisa
SS400	250	25	WV1	✓	✓	✓
			WV2	✓	✓	✓
			WV3	✓	✓	✓
			WV4	✓	✓	✓
			WV5	✓	✓	✓
			WV6	✓	✓	✓
			WV7	✓	✓	✓
			WV8	✓	✓	✓

3.6 Jadwal Penelitian

Adapun jadwal yang ditentukan untuk penelitian ini seperti pada **Tabel 3.8** berikut.

Tabel 3.8 Jadwal penelitian

Kegiatan	Bulan															
	Februari				Maret				April				Mei			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Studi Literatur																
Bimbingan Tugas Akhir																
Observasi Lapangan dan Pengumpulan Data																
Simulasi Permodelan																
Analisis Data dan Pembahasan																
Penyusunan Laporan Akhir																

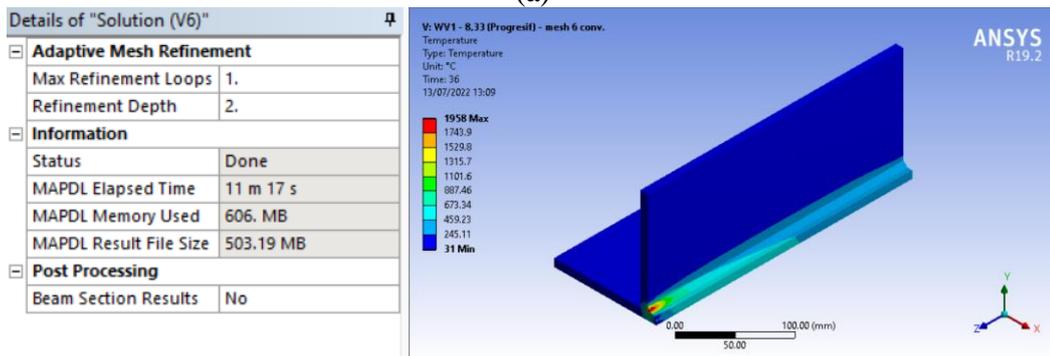
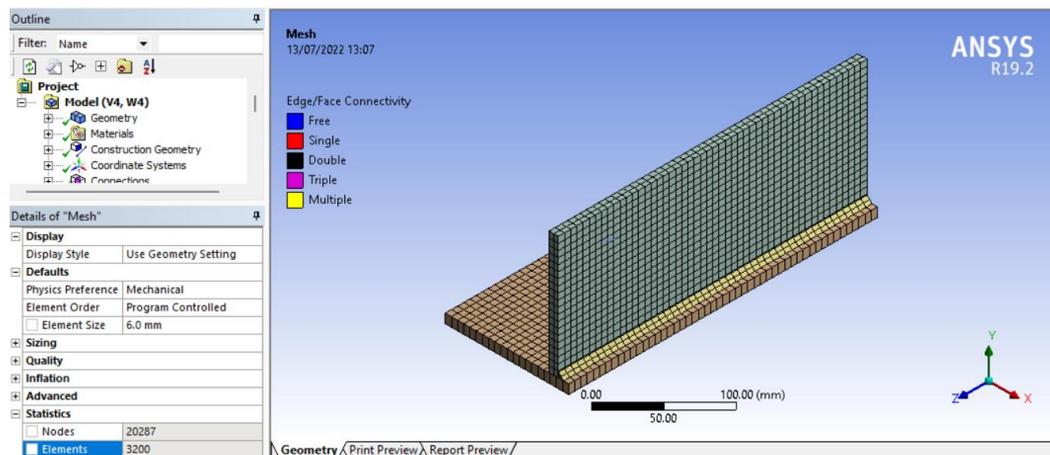
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Meshing Sensitivity Analysis

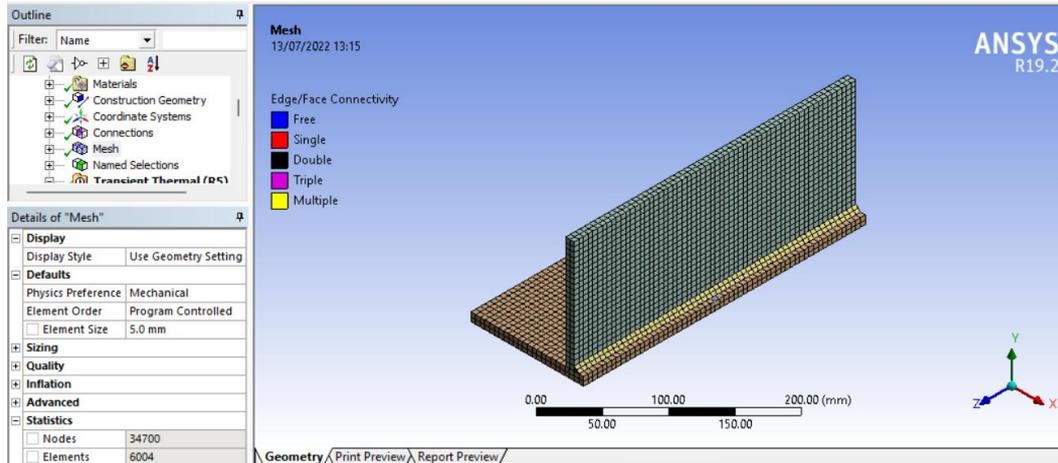
Meshing sensitivity analysis adalah analisis yang menggunakan variasi beberapa jumlah elemen yang digunakan untuk *meshing*. *Meshing* merupakan pembagian suatu model menjadi elemen-elemen kecil yang ukuran maupun jumlahnya bisa diatur sesuai kebutuhan. Dari variasi tersebut didapatkan beberapa data yang kemudian digambarkan dalam sebuah grafik. Dari grafik tersebut dicari dimana titik konvergensinya, yaitu titik yang mulai berbentuk garis lurus atau stabil, yang menandakan bahwa pada *meshing* tersebut hasil data yang ditinjau sudah sesuai dengan keadaan sebenarnya.

Pada umumnya, semakin kecil ukuran suatu *meshing* tersebut, semakin besar pula kemungkinan konvergensinya. Tetapi semakin kecil ukuran suatu *meshing* pada model, maka semakin banyak pula elemen yang dihasilkan. Menyebabkan semakin lama proses *running* dan hasil yang didapatkan lebih memakan kapasitas memori komputer.

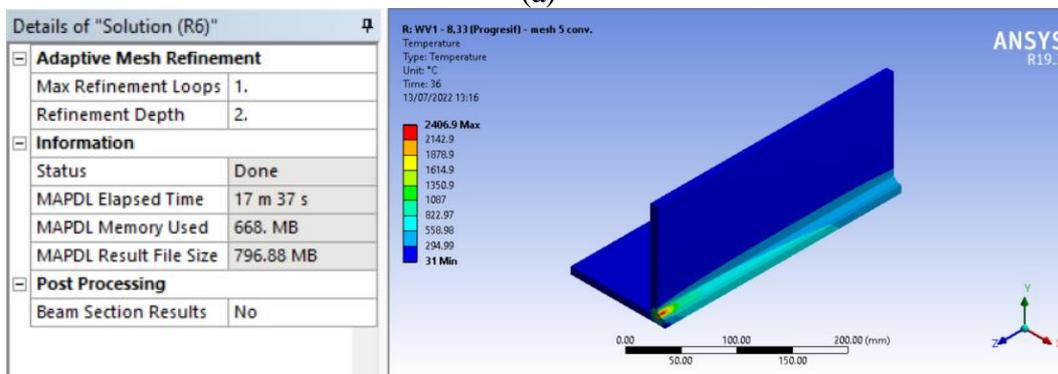
Pada penelitian ini, analisis sensitivitas *meshing* dilakukan dengan membandingkan temperatur puncak pada tiap variasi elemen yang dihasilkan dari analisis termal. Variasi *meshing* yang dilakukan tampak seperti pada **Gambar 4.1-4.4** di bawah ini.



Gambar 4.1 Meshing 1, (a) jumlah total elemen 3200, (b) hasil temperatur puncak dan *solve time*



(a)

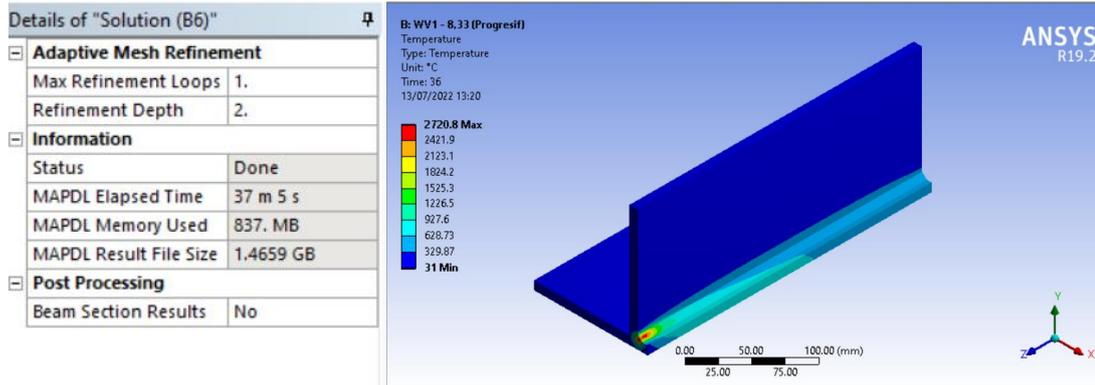


(b)

Gambar 4.2 Meshing 2, (a) jumlah total elemen 6004, (b) hasil temperatur puncak dan *solve time*

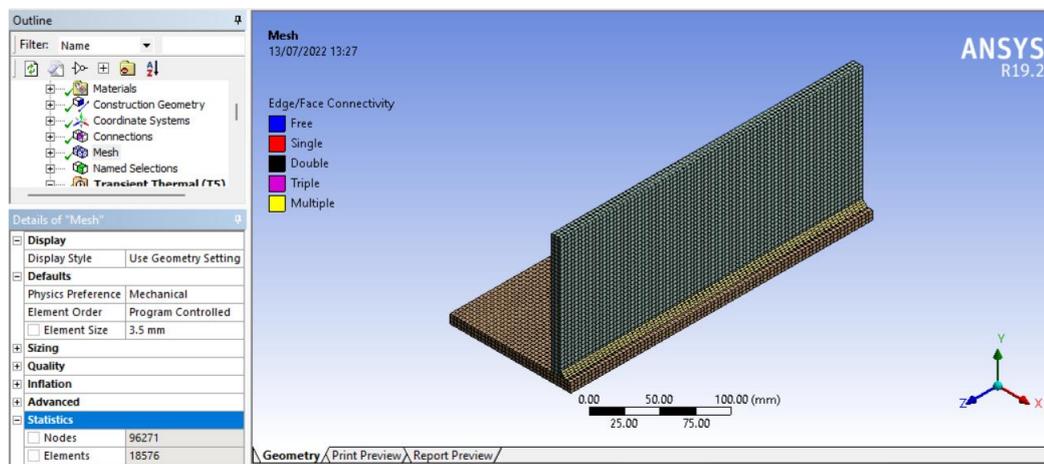


(a)

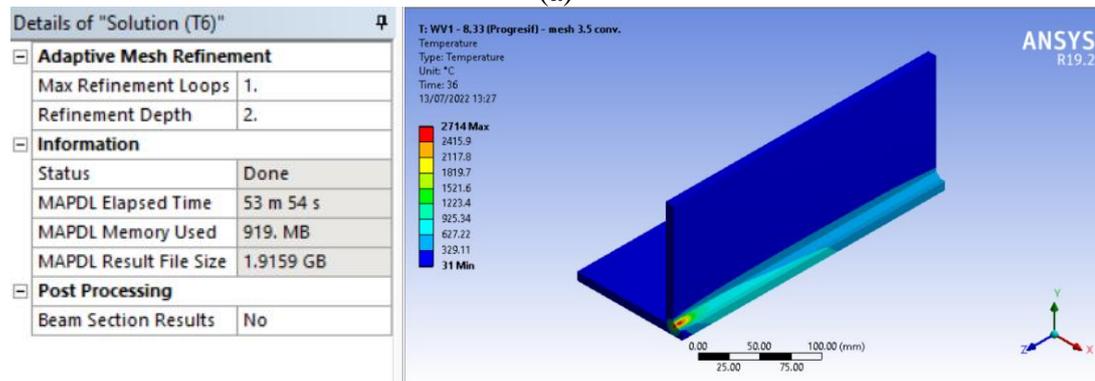


(b)

Gambar 4.3 Meshing 3, (a) jumlah total elemen 14040, (b) hasil temperatur puncak dan solve time



(a)



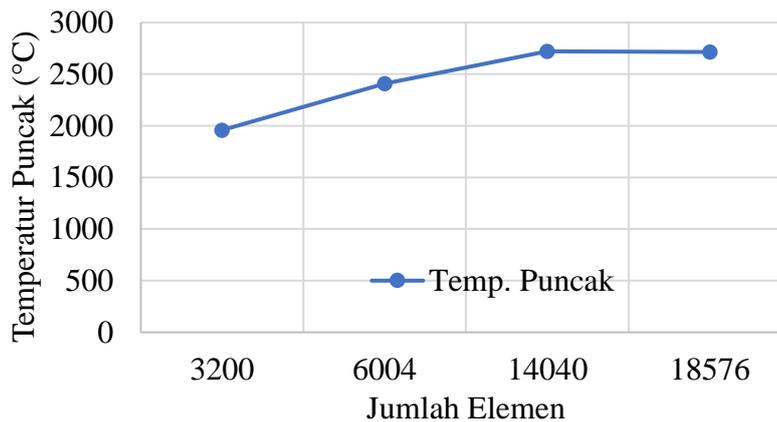
(b)

Gambar 4.4 Meshing 4, (a) jumlah total elemen 18576, (b) hasil temperatur puncak dan solve time

Variasi ukuran *meshing* yang digunakan adalah variasi ukuran dari *meshing* elemen heksahedral, dimana pada setiap variasinya besar elemen terdiri dari ukuran 6 mm, 5 mm, 4 mm, dan 3,5 mm. Dari data hasil pemodelan variasi *meshing* tersebut, didapatkan besar temperatur puncak sesuai dengan variasi *meshing* seperti pada **Tabel 4.1** di bawah ini.

Tabel 4.1 Hasil *meshing sensitivity analysis*

Kode <i>Meshing</i>	Ukuran Elemen	Jumlah Elemen	Temperatur Puncak	<i>Solve Time</i>
1	6 mm	3200	1958 °C	11 menit
2	5 mm	6004	2407 °C	18 menit
3	4 mm	14040	2721 °C	37 menit
4	3,5 mm	18576	2714 °C	54 menit



Gambar 4.5 Temperatur puncak pada variasi jumlah elemen

Pada **Gambar 4.5** diatas dapat dilihat grafik hasil pemodelan menggunakan *software* ANSYS Workbench 19.2 yang menghasilkan temperatur puncak berbanding dengan jumlah elemen yang digunakan pada saat analisis sensitivitas *meshing*. Grafik menunjukkan semakin banyak elemen *meshing* pada model, semakin konstan pula nilai temperatur yang didapat. Grafik seperti inilah yang dinyatakan telah konvergen. Maka *meshing* jumlah elemen yang digunakan adalah *meshing* 3 dengan jumlah elemen yang digunakan adalah 14040 elemen, dengan rincian *meshing* yang digunakan adalah heksahedral berukuran 4 mm. *Solve time* pada **Tabel 4.1** merupakan waktu untuk simulasi termal saja bukan keseluruhan meliputi struktural. Untuk *solve time* keseluruhan simulasi untuk tiap variasi ukuran elemen adalah 1 jam, 2 jam, 4 jam, dan 7 jam berurutan dari variasi ukuran terbesar hingga paling kecil.

4.2 Simulasi Pembebanan Termal

Sebelum melakukan pembebanan termal, geometri dari benda kerja dilakukan *meshing* terlebih dahulu. *Meshing* dilakukan untuk membagi geometri menjadi bagian-bagian kecil berupa elemen yang terhubung nodal sehingga dapat dilakukan perhitungan oleh *software* ANSYS. Pada penelitian yang dilakukan kali ini, elemen yang digunakan pada analisis termal adalah SOLID90. Elemen ini digunakan karena dapat mengukur distribusi temperatur berdasarkan perpindahan panas yang terjadi pada proses pengelasan, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Setelah dilakukan analisis termal, elemen SOLID90 melakukan *switch* elemen menjadi SOLID186 untuk melakukan analisis struktural.

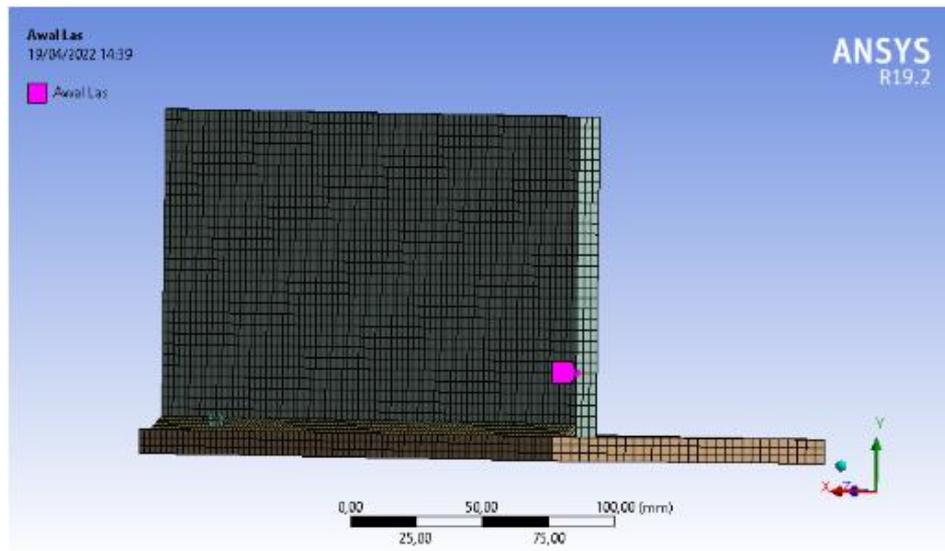
Masukan panas yang terjadi secara konduksi diberikan menggunakan *heat flux* berdasarkan persamaan Goldak elipsoidal ganda yang bersifat volumetrik, seperti pada persamaan (2.2) dan (2.3). Dan juga, menggunakan sistem koordinat untuk sambungan T dengan kemiringan 45° yang merepresentasikan kemiringan sumber panas dihasilkan oleh *weld gun*. *Heat flux* yang diberikan berasal dari busur las yang didekatkan pada logam las. Sedangkan untuk perpindahan panas secara konveksi dan radiasi terjadi pada seluruh permukaan material yang mengenai udara sekitar.

Variasi yang dilakukan pada penelitian kali ini meliputi variasi urutan dan kecepatan pengelasan, dimana mempengaruhi besar masukan panas yang diterima material. Variabel tersebut juga berpengaruh pada perhitungan *heat flux* yang menjadi nilai beban pada *software* ANSYS. Beban *heat flux* dikenakan pada setiap elemen dan berjalan seiring kecepatan waktu pengelasan.

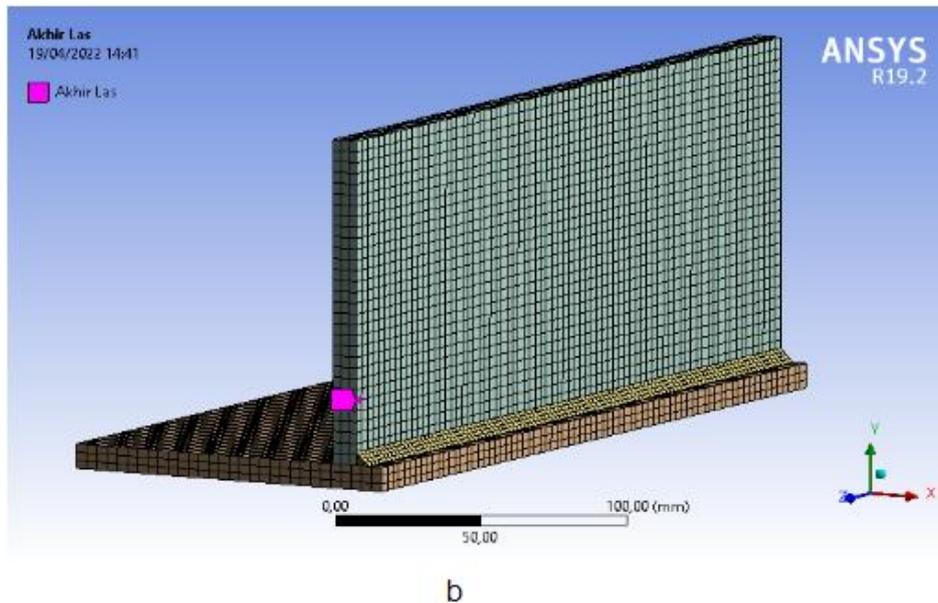
Beban *heat flux* ini diaplikasikan pada tiap elemen secara transien. Selain *heat flux*, terdapat kondisi batas lain yang harus dimasukkan pada pembebanan model yaitu *film coefficient convection* sebesar $25 \text{ W/m}^2\text{C}$, emisivitas radiasi sebesar 0,9 dan *bulk temperature* sebesar 31°C . Setelah pemberian beban *heat flux* dilakukan, terjadi pendinginan hingga detik ke-7500 agar spesimen yang digunakan mencapai suhu ruangan yaitu 31°C .

4.2.1 Hasil Temperatur

Pada proses pengelasan, temperatur yang dimiliki material yang dikenakan beban terus meningkat dan terdistribusi di area sekitar beban tersebut. Pada detik ke-0 hingga waktu akhir pembebanan *heat flux*, arah pengelasan dilakukan sesuai dengan yang ada pada **Gambar 3.5**. Proses verifikasi temperatur dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan data *best practice* menggunakan pengelasan WV1. Verifikasi temperatur dilakukan di 2 titik yang berjarak 20 mm dari *weld bead* pada ujung awal pengelasan (nodal 1) dan juga ujung akhir pengelasan (nodal 2) ditandai dengan titik berwarna ungu seperti pada **Gambar 4.6** berikut. Posisi pengukuran ini mengikuti posisi pengukuran data *best practice*, namun distribusi temperatur yang dihasilkan tidak mewakili untuk seluruh posisi pada material saat pengelasan.



a



Gambar 4.6 (a) Nodal 1 ujung awal pengelasan, (b) nodal 2 ujung akhir pengelasan

Berikut merupakan hasil verifikasi temperatur puncak yang dilakukan antara simulasi dengan data *best practice* lapangan pada titik nodal 1 dan nodal 2.

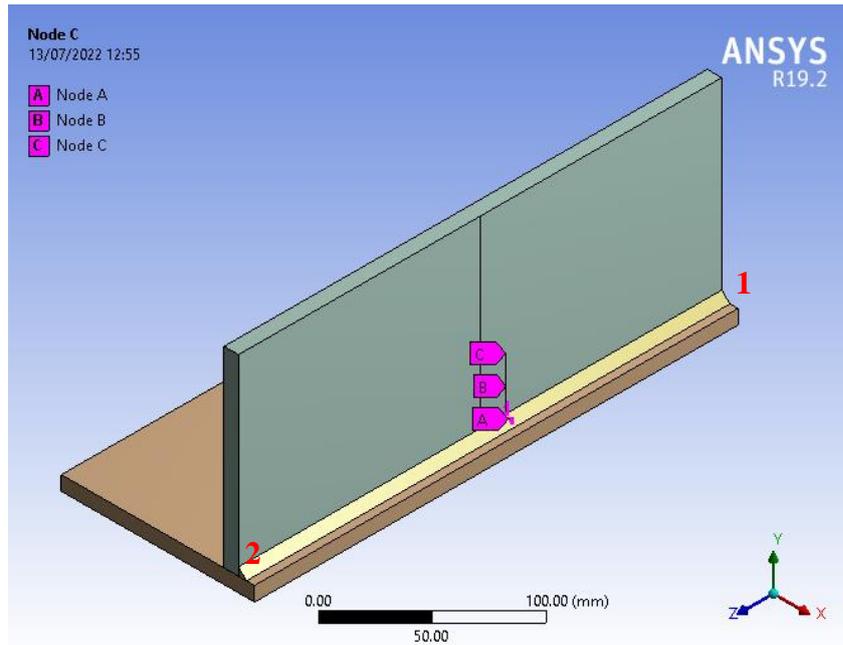
Tabel 4.2 Verifikasi temperatur puncak data *best practice* dengan simulasi

Hasil	Temperatur Puncak (°C)	
	Nodal 1	Nodal 2
Data <i>best practice</i>	206	186
Data simulasi	214	187

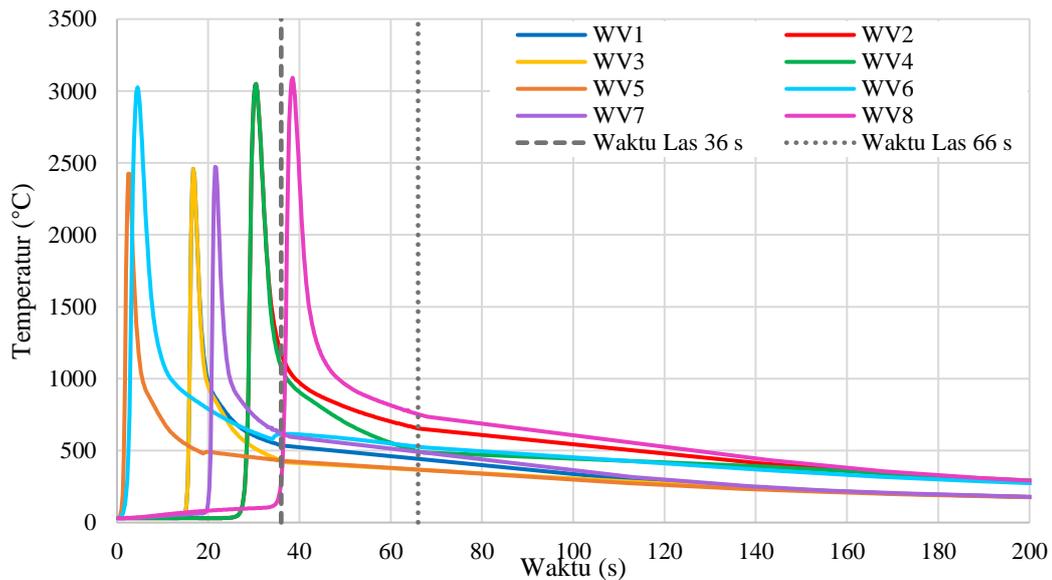
Pada **Tabel 4.2** dapat diketahui bahwa nilai maksimum antara simulasi dengan data *best practice* tidak jauh berbeda dengan nilai rata-rata error 2,25 %. Dengan menggunakan urutan pengelasan progresif, diketahui bahwa pada nodal 1 suhu meningkat pada awal pengelasan. Kemudian suhu perlahan turun ketika busur las sudah bergerak mengikuti lintasan pengelasan. Sedangkan pada nodal 2, suhu pengelasan baru mengalami kenaikan ketika busur las sudah berada di ujung akhir lintasan las, dan terus meningkat ketika pengelasan sudah selesai dikarenakan panas yang diberikan merambat mendekati nodal.

Setelah dilakukan verifikasi temperatur menggunakan kode pengelasan WV1, dilakukan analisis temperatur yang dihasilkan oleh variasi las WV1, WV2, WV3, WV4, WV5, WV6, WV7, dan WV8. Nilai arus dan tegangan sama untuk semua variasi, namun ada perbedaan pada nilai kecepatan las dan urutan pengelasan. Perbedaan pada nilai kecepatan las menghasilkan besar *heat input* yang berbeda. Perbedaan ini mempengaruhi besar dan distribusi temperatur yang terjadi pada proses pengelasan.

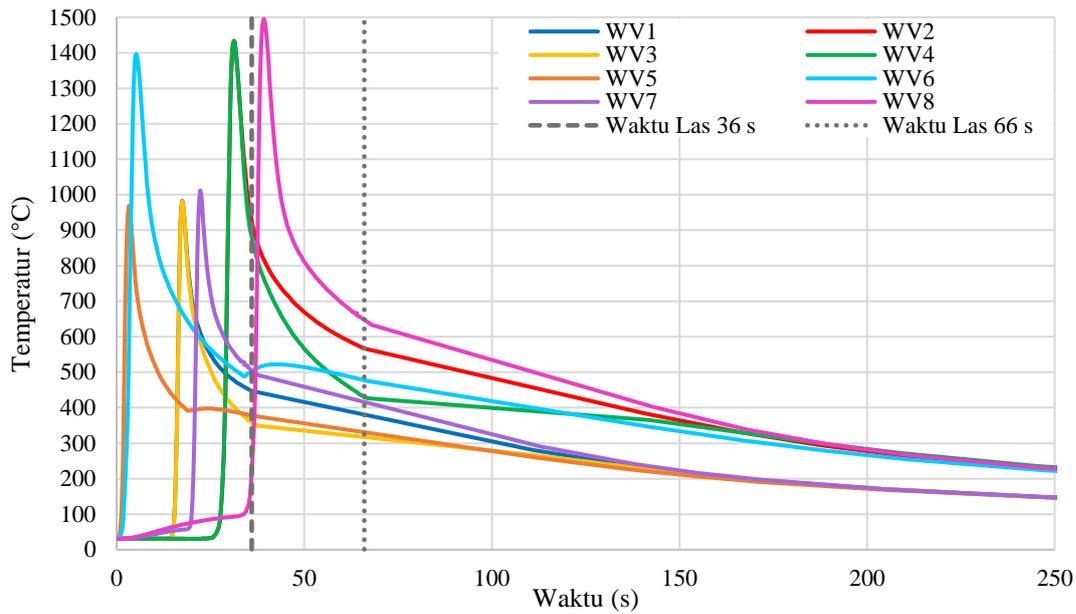
Pola siklus termal yang terjadi pada pengelasan dapat dilihat pada **Gambar 4.8** sampai **Gambar 4.10**. Grafik pada gambar tersebut didapat dari nodal-nodal yang ditentukan seperti pada **Gambar 4.7** di area lasan, sehingga dapat dianalisis siklus termal ketika pengelasan berlangsung. Lokasi nodal berada di jarak 136 mm searah sumbu-z dari tepi kanan pelat (notasi angka 1), dimana nodal A berada di tengah *weld metal*, nodal B berada di jarak 1 mm dari *weld metal*, dan nodal C berada di jarak 5 mm dari *weld metal*.



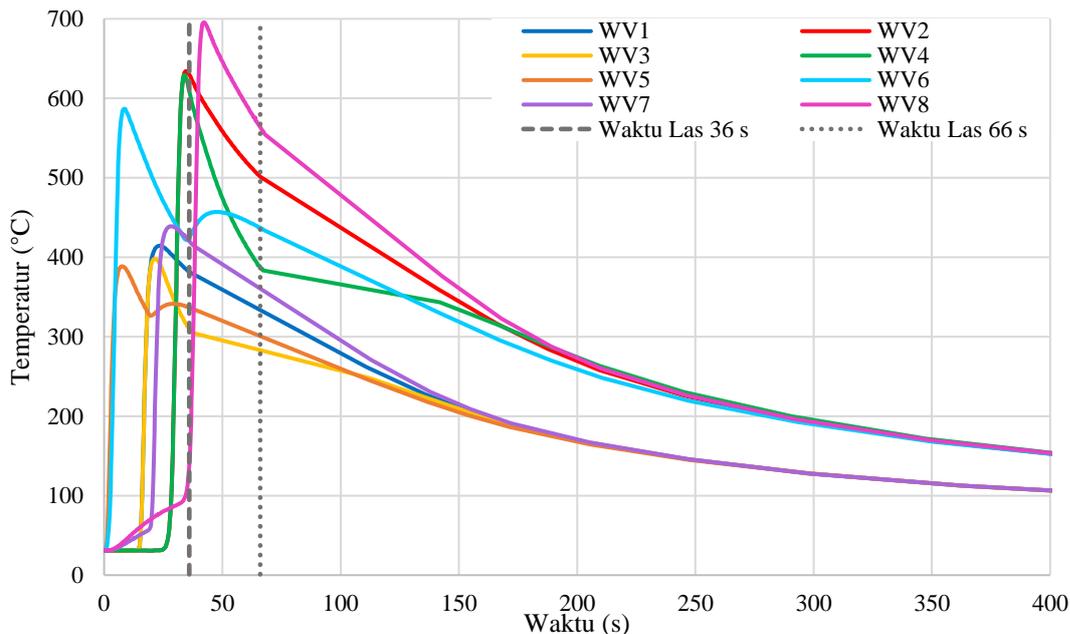
Gambar 4.7 Lokasi nodal uji temperatur



Gambar 4.8 Siklus termal pengelasan pada nodal A



Gambar 4.9 Siklus termal pengelasan pada nodal B



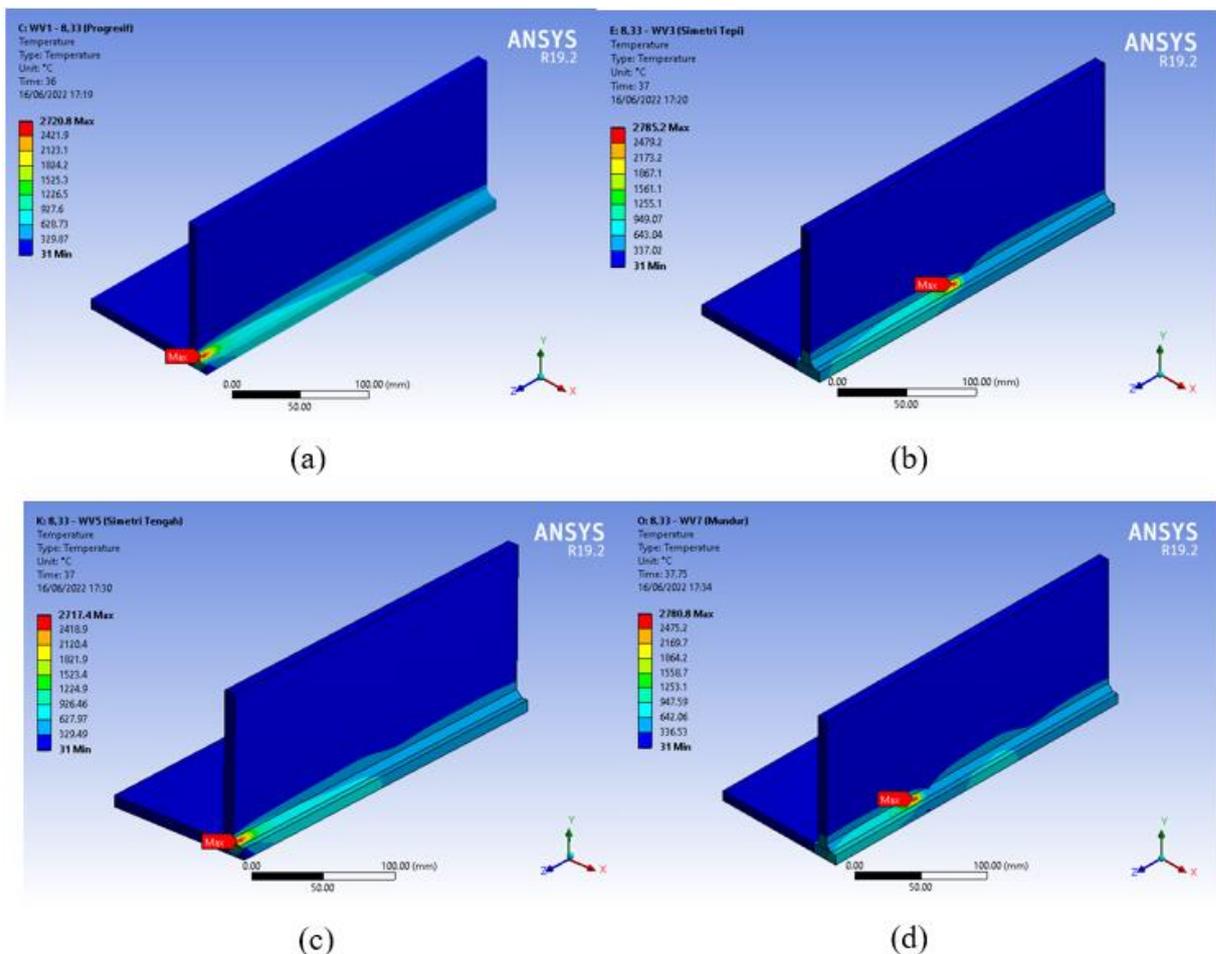
Gambar 4.10 Siklus termal pengelasan pada nodal C

Pada penelitian ini, didapatkan juga nilai temperatur puncak selama pengelasan dimana untuk setiap urutan dan kecepatan las memiliki nilai yang berbeda. Nilai temperatur puncak untuk setiap kecepatan dan urutan ditunjukkan pada **Tabel 4.3** berikut. Dan juga, untuk ilustrasi dari temperatur puncak pada material dapat dilihat pada **Gambar 4.11** dan **Gambar 4.12**.

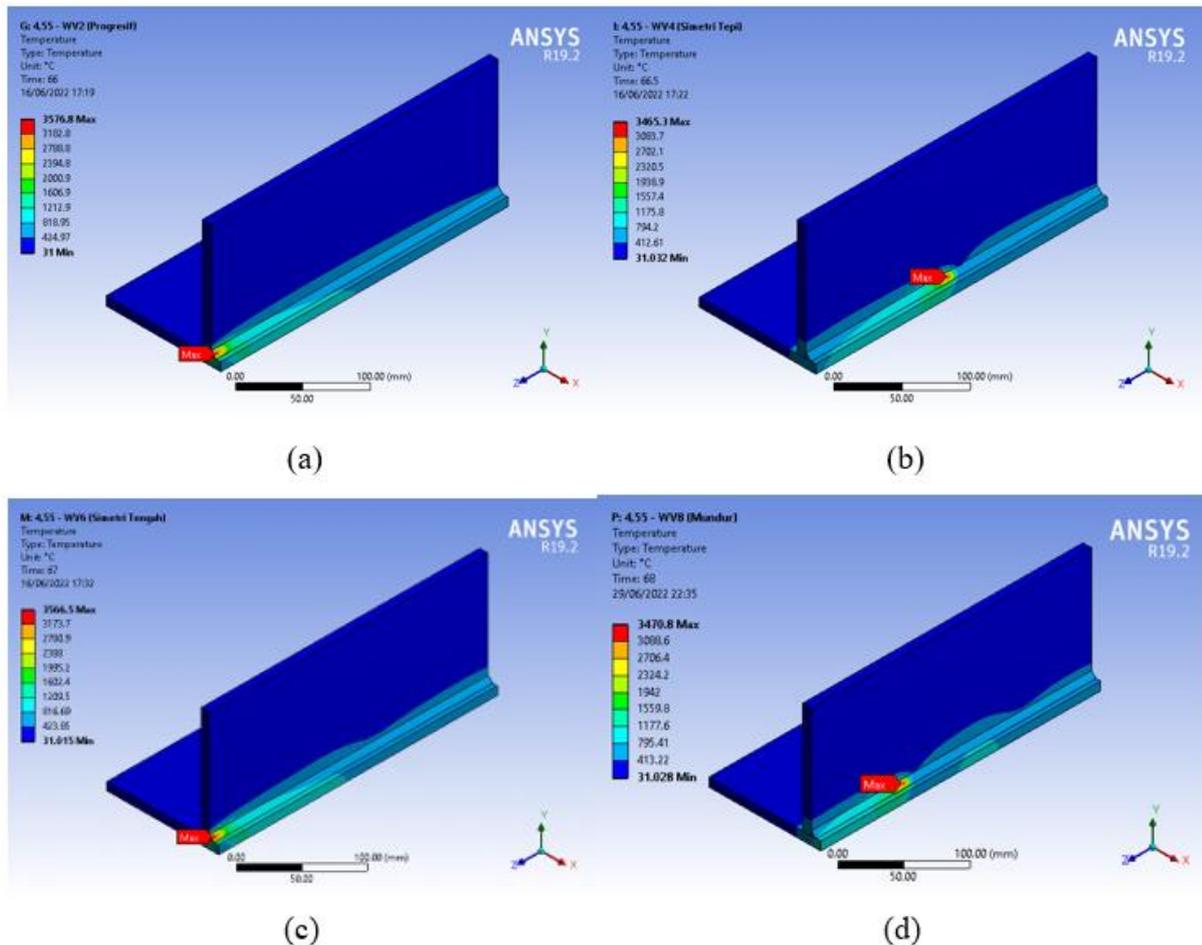
Tabel 4.3 Temperatur puncak variasi pengelasan

Kode Pengelasan	Heat Input (J/mm)	Peak Temp. (°C)	Waktu (s)
WV1	600	2720,8	36
WV2	1100	3576,8	66
WV3	600	2785,2	37
WV4	1100	3465,3	66,5
WV5	600	2717,4	37
WV6	1100	3566,5	67
WV7	600	2780,8	37,75
WV8	1100	3470,8	68

Berikut merupakan ilustrasi hasil temperatur puncak dari simulasi pembebanan termal untuk tiap variasi pengelasan. Titik merah pada gambar menandakan posisi temperatur puncak pada *weld metal*. Ilustrasi dapat dilihat pada **Gambar 4.11** dan **Gambar 4.12**.



Gambar 4.11 Temperatur puncak pengelasan kecepatan 8,33 mm/s, (a)WV1, (b)WV3, (c)WV5, dan (d)WV7



Gambar 4.12 Temperatur puncak pengelasan kecepatan 4,55 mm/s, (a)WV2, (b)WV4, (c)WV6, dan (d)WV8

Berdasarkan **Tabel 4.3** didapatkan bahwa temperatur puncak untuk kecepatan pengelasan 4,55 mm/s lebih tinggi dibandingkan kecepatan pengelasan 8,33 mm/s. Hal ini terjadi karena masukan panas yang dihasilkan oleh kecepatan lambat lebih besar daripada kecepatan cepat, dimana nilai *heat input* kecepatan 4,55 mm/s adalah 1100 W/mm dan kecepatan 8,33 adalah 600 W/mm. Oleh karena itu, temperatur yang dihasilkan oleh kecepatan lambat lebih tinggi.

Pada **Gambar 4.11** dan **Gambar 4.12** temperatur puncak tertinggi dihasilkan oleh pengelasan WV2 dengan urutan pengelasan progresif sebesar 3576,8°C dan temperatur puncak terendah dihasilkan oleh pengelasan WV5 dengan urutan pengelasan simetri dari tengah sebesar 2717,4°C. Berdasarkan kecepatan, untuk 8,33 mm/s temperatur puncak tertinggi dihasilkan oleh pengelasan WV3 dengan urutan pengelasan simetri dari tepi sebesar 2785,2°C dan yang terendah adalah pengelasan WV5 dengan urutan pengelasan simetri dari tengah sebesar 2717,4 °C. Lalu, untuk kecepatan 4,55 mm/s temperatur puncak tertinggi dihasilkan oleh pengelasan WV2 dengan urutan pengelasan progresif sebesar 3576,8°C dan yang terendah adalah pengelasan WV4 dengan urutan pengelasan simetri dari tepi sebesar 3465,3°C.

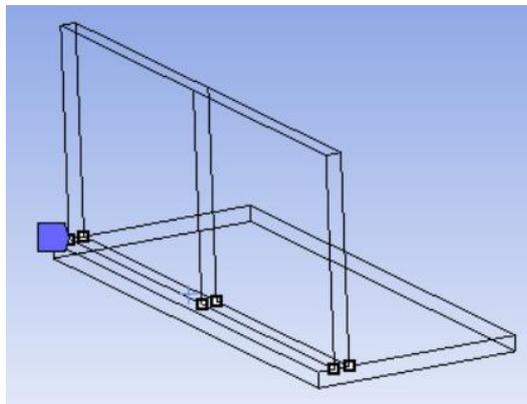
4.3 Simulasi Pembebanan Struktural

Setelah dilakukan analisis pembebanan termal dan mengetahui hasil temperatur, dilakukan analisis pembebanan struktur untuk mendapatkan nilai tegangan sisa dan deformasi yang terjadi pada benda setelah proses pengelasan berlangsung. Pada analisis struktural tipe elemen yang

digunakan yaitu elemen SOLID186. Elemen ini dipilih karena memiliki kemampuan untuk membaca data temperatur dari simulasi sebelumnya dan digunakan untuk mendapatkan hasil analisis struktural berupa tegangan sisa dan deformasi.

Hasil pembebanan termal selanjutnya di-*input* ke simulasi pembebanan struktur agar didapatkan hasil berupa distribusi tegangan, regangan plastis setelah pendinginan, dan juga deformasi. Nilai dari regangan plastis kemudian diinterpolasi terhadap grafik *true plastic stress-strain* untuk didapatkan nilai tegangan sisa.

Input yang diberikan pada analisis struktural ini selain data dari analisis termal adalah berupa pemberian *support* pada benda kerja agar simulasi struktural dapat dilakukan. Pada penelitian ini *support* yang diberikan bertipe *fixed support* dengan lokasi pada 4 titik ujung sambungan T dan 2 titik di tengah lintasan las yang mewakili pengelasan *tack* seperti pada **Gambar 4.13**.

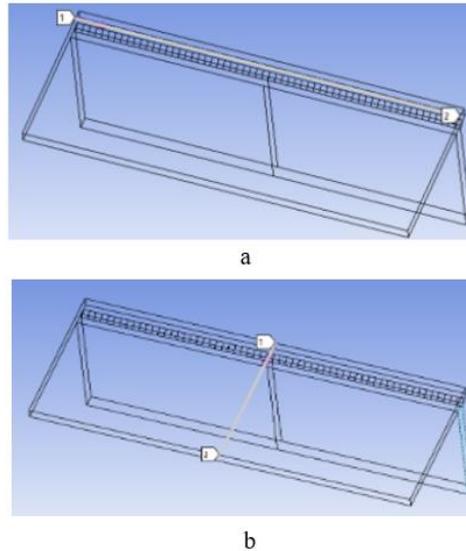


Gambar 4.13 Posisi *fixed support* pada analisis struktur

Simulasi struktural ini dibagi menjadi 2 *load step* dimana *load step* 1 untuk proses pengelasan dan *load step* 2 untuk pendinginan. *Load step* pertama untuk proses pengelasan yang waktunya mengikuti masing-masing kecepatan las dan dilanjutkan pendinginan pada *load step* kedua hingga detik ke-7500 yaitu ketika temperatur benda kerja sudah mencapai 31°C.

4.3.1 Hasil Tegangan Sisa

Tegangan yang dianalisis pada penelitian kali ini adalah tegangan sisa longitudinal dan tegangan sisa transversal. Tegangan sisa longitudinal adalah tegangan yang memiliki arah sejajar dengan logam lasan, sedangkan tegangan sisa transversal adalah tegangan yang memiliki arah tegak lurus dengan logam lasan. Untuk verifikasi, dilakukan perbandingan dari hasil simulasi dengan data *best practice* PT.X. Verifikasi menggunakan pengelasan WV1 dengan arus 250 A, tegangan 25 V, kecepatan 8,33 mm/s dan urutan pengelasan progresif. Posisi pengukuran tegangan sisa longitudinal dan transversal dapat dilihat pada **Gambar 4.14** berikut, dimana posisi tersebut sama dengan posisi pengukuran dari data *best practice*. Posisi tersebut berada di bagian bawah dari pelat horizontal.



Gambar 4.14 (a) Pengukuran tegangan sisa longitudinal, (b) pengukuran tegangan sisa transversal

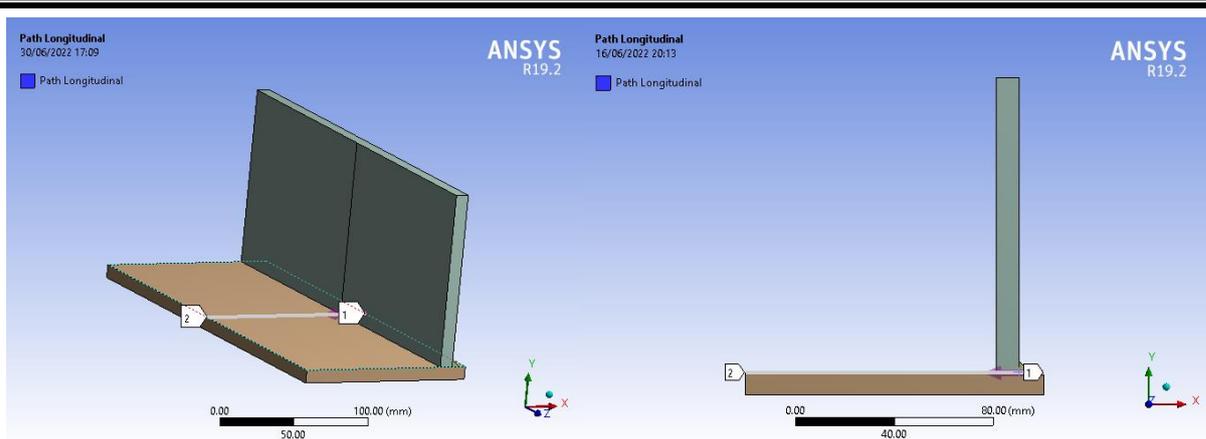
Berikut merupakan perbandingan dari nilai tegangan sisa maksimum pada **Tabel 4.4**

Tabel 4.4 Verifikasi data tegangan antara data *best practice* dengan simulasi

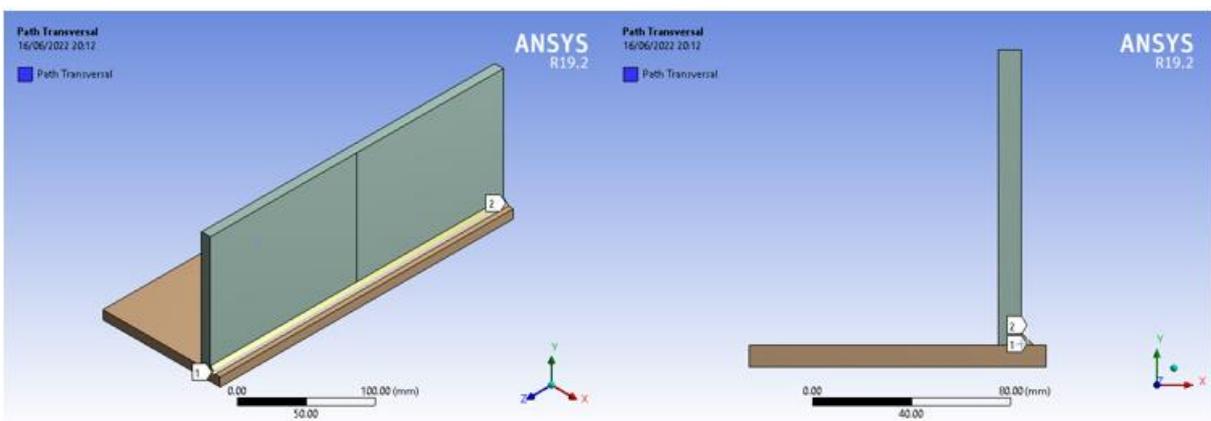
Hasil	Tegangan Sisa Maksimum (MPa)	
	Longitudinal	Transversal
Data <i>best practice</i>	296	260
Data simulasi	275	273

Pada **Tabel 4.4** dapat dilihat bahwa nilai maksimum untuk tegangan sisa transversal dan longitudinal antara data *best practice* dengan hasil simulasi memiliki nilai yang tidak terlalu jauh dengan rata-rata error adalah 6%. Data tegangan pada simulasi didapatkan dengan menginterpolasi hasil regangan plastis yang didapatkan pada ANSYS kepada grafik *true stress-plastic strain*.

Distribusi tegangan pada penelitian kali ini diobservasi pada bagian tengah geometri yang melintang logam lasan untuk tegangan transversal dan sepanjang *weld metal* untuk tegangan longitudinal seperti pada **Gambar 4.15** dan **Gambar 4.16**. Pada **Gambar 4.15**, daerah sekitar *weld metal* ditandai dengan notasi angka 1, lalu untuk bagian tepi yang menjauhi *weld metal* dengan notasi angka 2. Pada **Gambar 4.16**, daerah tepi kiri *weld metal* ditandai dengan notasi angka 1 dan daerah tepi kanan *weld metal* ditandai dengan notasi angka 2.

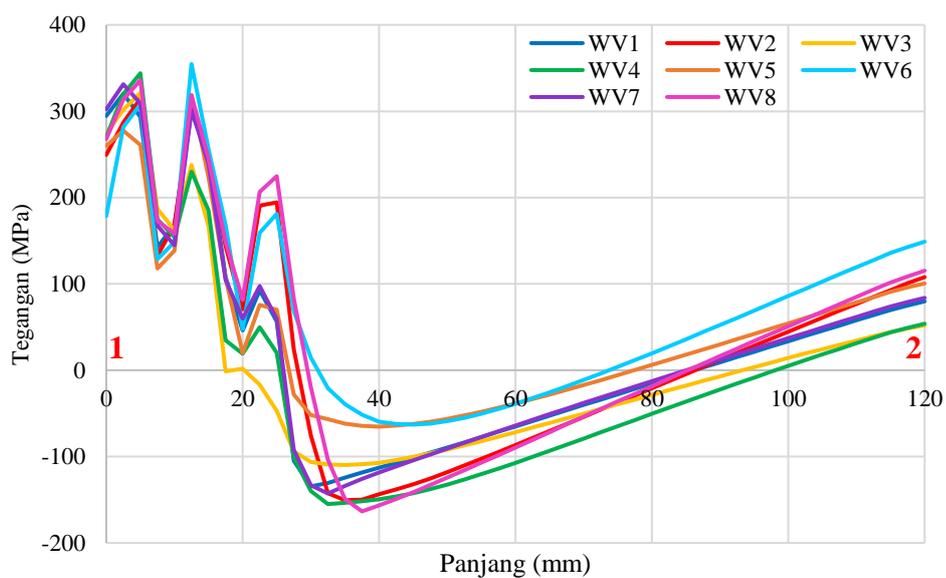


Gambar 4.15 Posisi pengukuran tegangan transversal

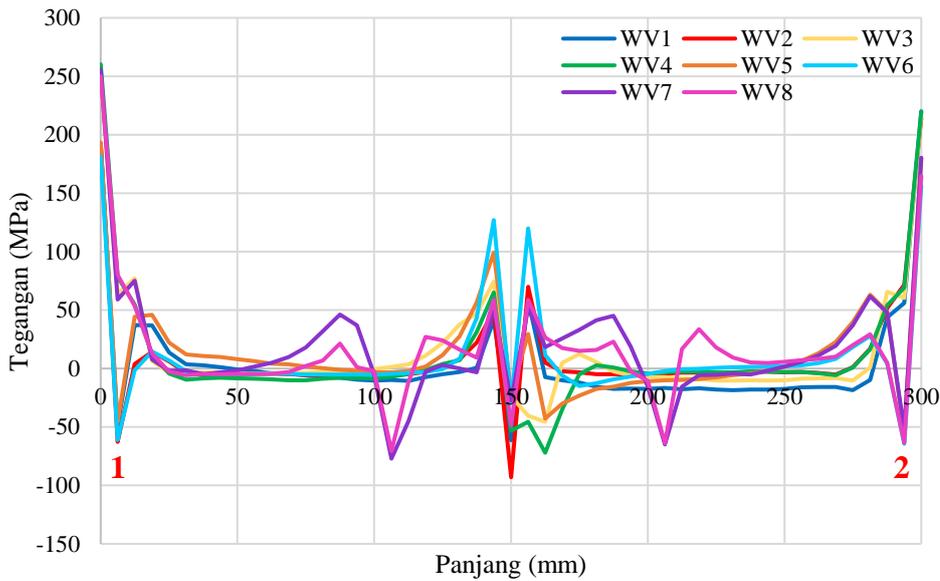


Gambar 4.16 Posisi pengukuran tegangan longitudinal

Hasil dari distribusi tegangan dapat dilihat pada **Gambar 4.17** untuk distribusi tegangan transversal dan **Gambar 4.18** untuk distribusi tegangan longitudinal.

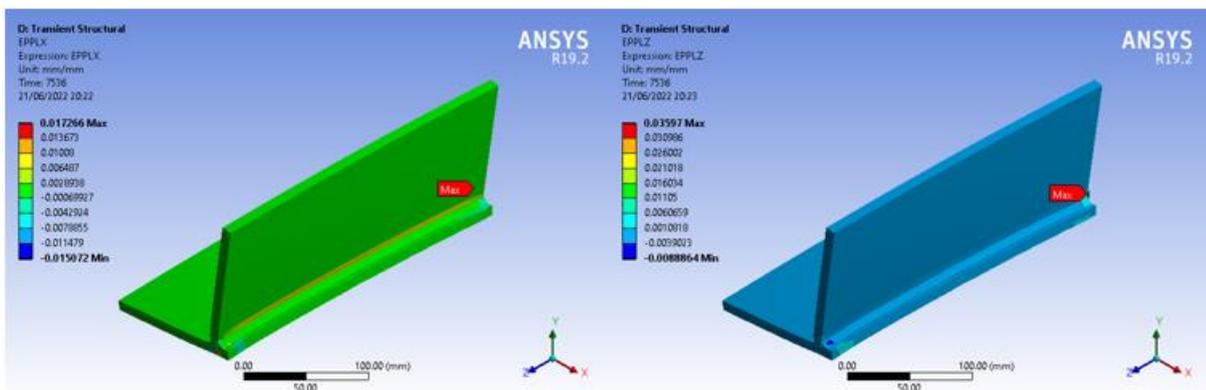


Gambar 4.17 Distribusi tegangan transversal

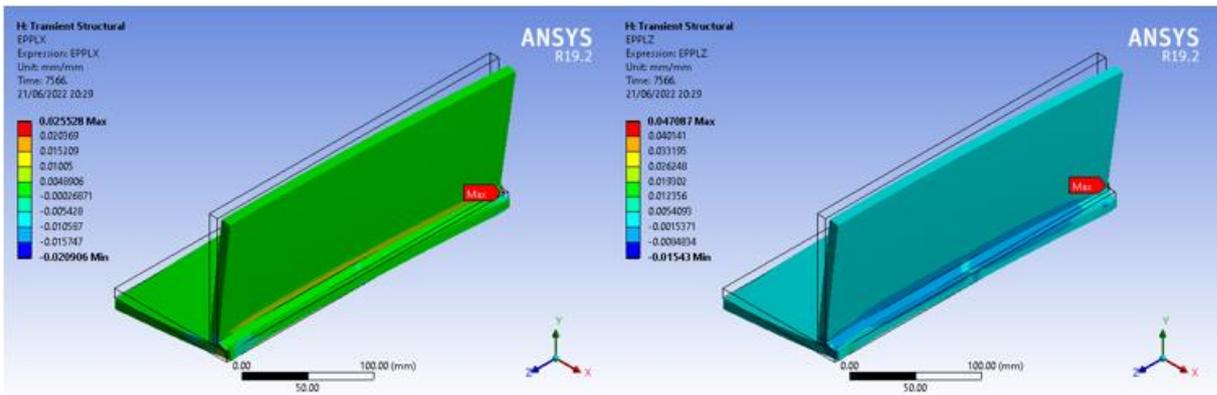


Gambar 4.18 Distribusi tegangan longitudinal

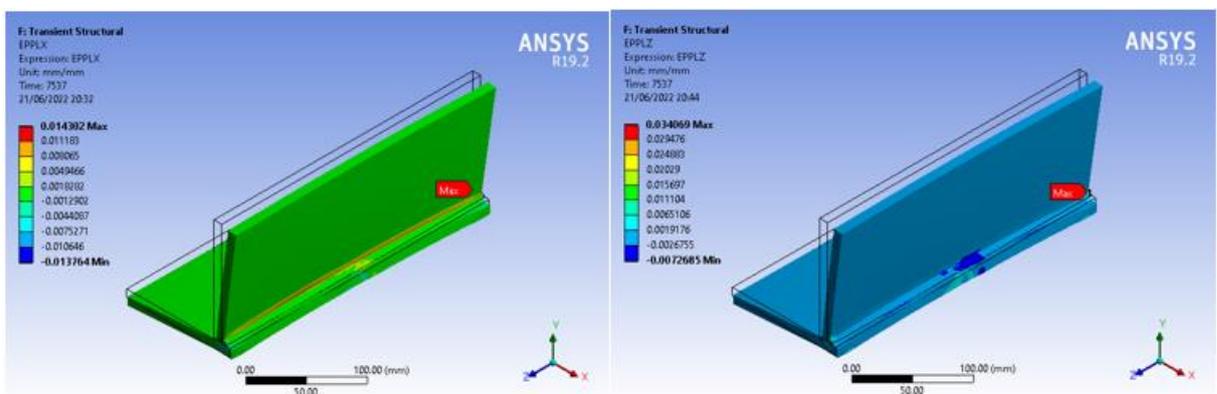
Setelah dilakukan simulasi pembebanan struktur, didapatkan hasil berupa nilai regangan plastis menggunakan *user defined result* “EPPLX” untuk nilai regangan plastis arah sumbu-x atau transversal dan menggunakan *user defined result* “EPPLZ” untuk nilai regangan plastis arah sumbu-z atau longitudinal. Nilai dari regangan plastis yang didapatkan untuk seluruh variasi kemudian diinterpolasikan kepada grafik *true stress-plastic strain* yang digunakan untuk material SS400. Grafik ini dimasukkan pada fitur *engineering data* ANSYS. **Gambar 4.19** hingga **Gambar 4.26** menunjukkan nilai regangan plastis untuk masing-masing variasi las yang digunakan. Pada gambar-gambar tersebut, daerah dengan nilai regangan plastis maksimum pada material ditandai oleh titik berwarna merah.



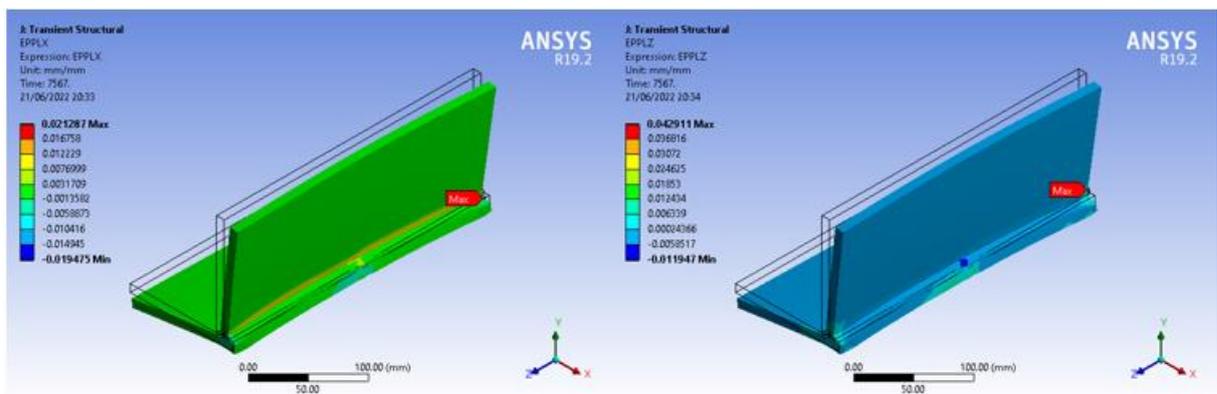
Gambar 4.19 Nilai regangan plastis pada pengelasan WV1



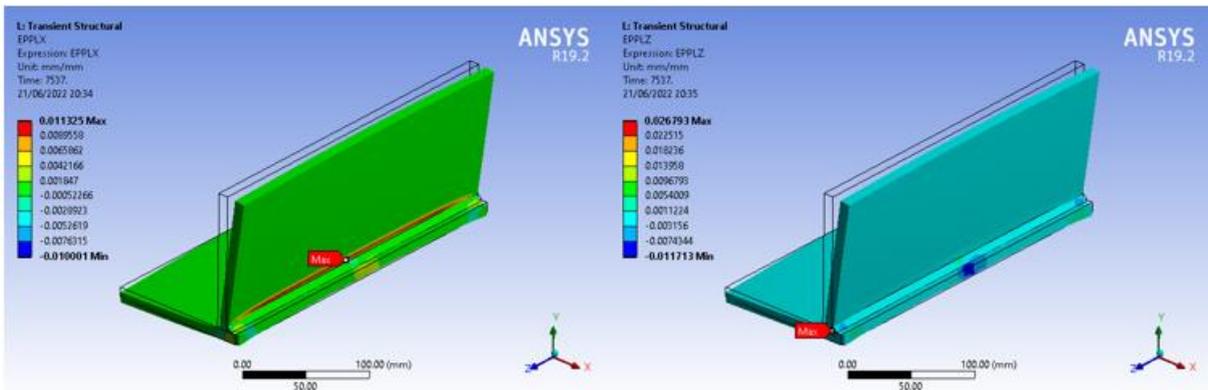
Gambar 4.20 Nilai regangan plastis pada pengelasan WV2



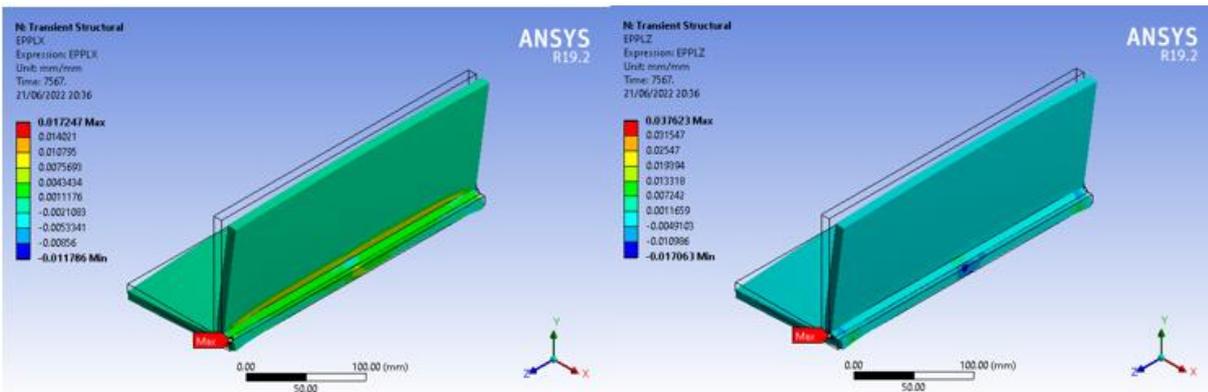
Gambar 4.21 Nilai regangan plastis pada pengelasan WV3



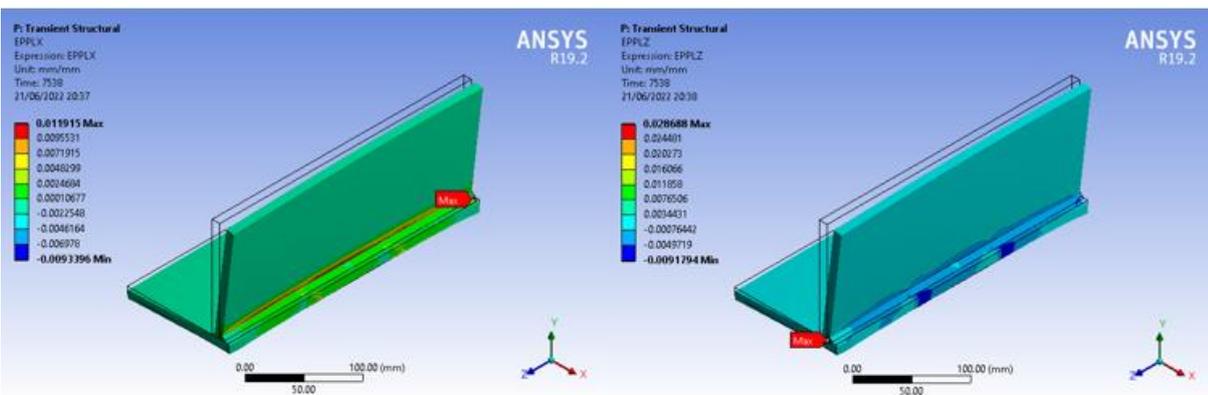
Gambar 4.22 Nilai regangan plastis pengelasan WV4



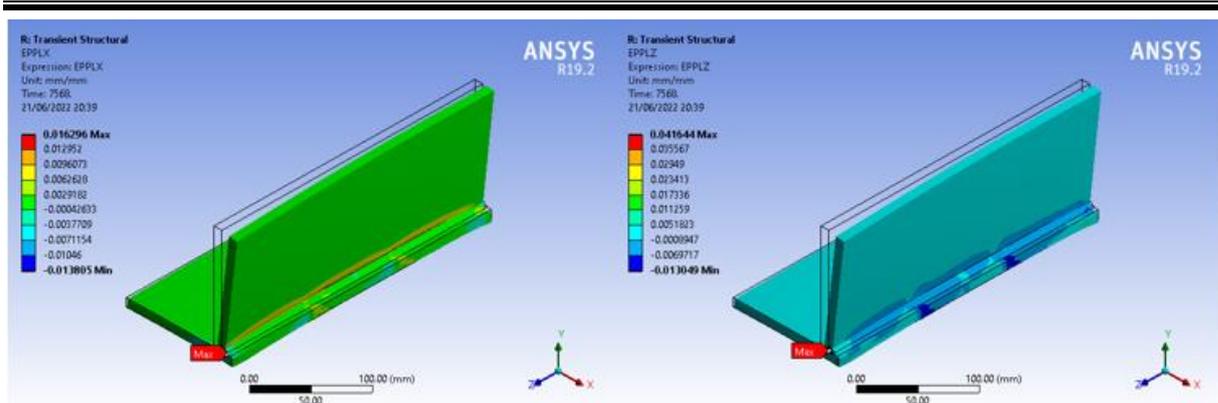
Gambar 4.23 Nilai regangan plastis pengelasan WW5



Gambar 4.24 Nilai regangan plastis pengelasan WW6



Gambar 4.25 Nilai regangan plastis pengelasan WW7



Gambar 4.26 Nilai regangan plastis pengelasan WV8

Berikut merupakan rentang nilai regangan plastis dan tegangan sisa longitudinal dan transversal yang didapat dari hasil interpolasi pada **Tabel 4.5** dan **Tabel 4.6** berikut.

Tabel 4.5 Rentang nilai tegangan sisa transversal

Kode Las	Heat Input (J/mm)	Rentang Regangan Plastis Transversal (mm/mm)	Rentang Tegangan Sisa Transversal (MPa)
WV1	600	-0,00889 – 0,03597	-276,55 – 352,13
WV2	1100	-0,01543 – 0,04709	-289,13 – 385,42
WV3	600	-0,00727 – 0,03407	-274,69 – 346,01
WV4	1100	-0,01195 – 0,04291	-281,54 – 373,54
WV5	600	-0,01171 – 0,02679	-281,10 – 322,32
WV6	1100	-0,01706 – 0,03762	-293,25 – 357,38
WV7	600	-0,00918 – 0,02869	-276,95 – 328,46
WV8	1100	-0,01305 – 0,04164	-283,75 – 369,77

Tabel 4.6 Rentang nilai tegangan sisa longitudinal

Kode Las	Heat Input (J/mm)	Rentang Regangan Plastis Longitudinal (mm/mm)	Rentang Tegangan Sisa Longitudinal (MPa)
WV1	600	-0,01507 – 0,01727	-288,27 – 293,78
WV2	1100	-0,02091 – 0,02552	-303,99 – 318,26
WV3	600	-0,01376 – 0,01430	-285,28 – 286,48
WV4	1100	-0,01948 – 0,02129	-299,84 – 305,12
WV5	600	-0,01 – 0,01133	-278,16 – 280,39
WV6	1100	-0,01179 – 0,01725	-281,23 – 293,73
WV7	600	-0,00934 – 0,01192	-277,18 – 281,48
WV8	1100	-0,01381 – 0,01630	-285,37 – 291,27

Pada **Tabel 4.5** dan **Tabel 4.6** menunjukkan rentang nilai regangan plastis longitudinal, regangan plastis transversal, tegangan sisa longitudinal, dan tegangan sisa transversal untuk setiap pengelasan. Nilai regangan plastis negatif menandakan bahwa material mengalami penyusutan pada posisi nilai tersebut, sedangkan nilai regangan plastis positif menandakan material mengalami penambahan panjang pada posisi untuk nilai tersebut. Tegangan sisa negatif menunjukkan tegangan sisa tekan dan positif menunjukkan tegangan sisa tarik. Secara keseluruhan, tegangan sisa transversal maksimum tertinggi dihasilkan oleh pengelasan WV2

dengan kecepatan 4,55 mm/s dan urutan progresif sebesar 385,42 MPa dan yang terendah oleh pengelasan WV5 dengan kecepatan 8,33 mm/s dan urutan simetri dari tengah sebesar 322,32 MPa. Lalu, untuk tegangan sisa longitudinal maksimum tertinggi dihasilkan oleh pengelasan WV2 sebesar 318,26 MPa dan yang terendah oleh pengelasan WV5 sebesar 280,39 MPa.

Apabila dikelompokkan sesuai kecepatan, untuk kecepatan 8,33 mm/s tegangan sisa transversal maksimum tertinggi dihasilkan oleh pengelasan WV1 sebesar 352,13 MPa dan terendah oleh pengelasan WV5 sebesar 322,32 MPa. Lalu, untuk tegangan sisa longitudinal maksimum tertinggi oleh pengelasan WV1 sebesar 293,78 MPa dan terendah oleh pengelasan WV5 sebesar 280,39 MPa. Sedangkan untuk kecepatan 4,55 mm/s tegangan sisa transversal maksimum tertinggi dihasilkan oleh pengelasan WV2 sebesar 385,42 MPa dan terendah oleh pengelasan WV6 dengan urutan simetri dari tengah sebesar 357,38 MPa. Lalu, untuk tegangan sisa longitudinal maksimum tertinggi oleh pengelasan WV2 sebesar 318,26 dan terendah oleh pengelasan WV8 dengan urutan mundur sebesar 291,27 MPa.

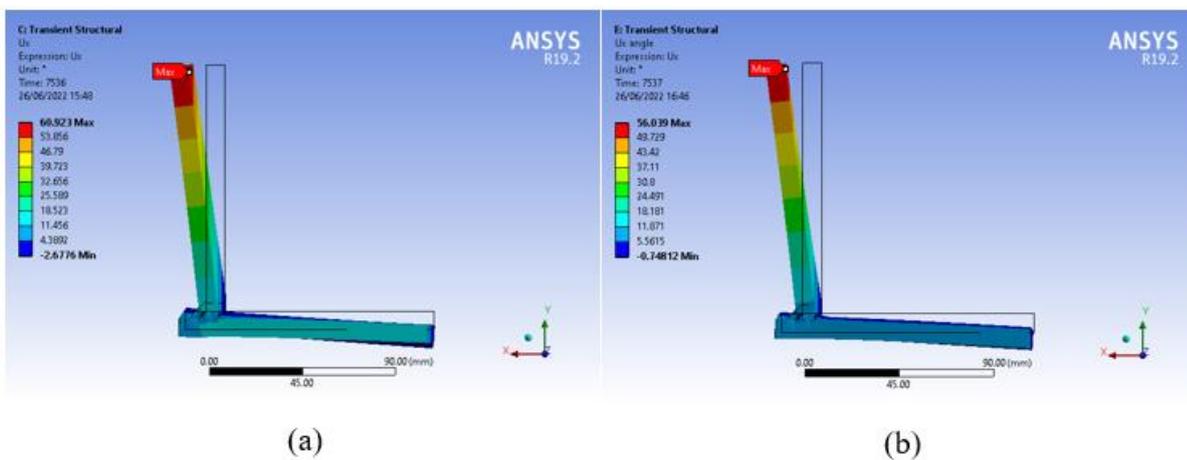
4.3.2 Hasil Deformasi

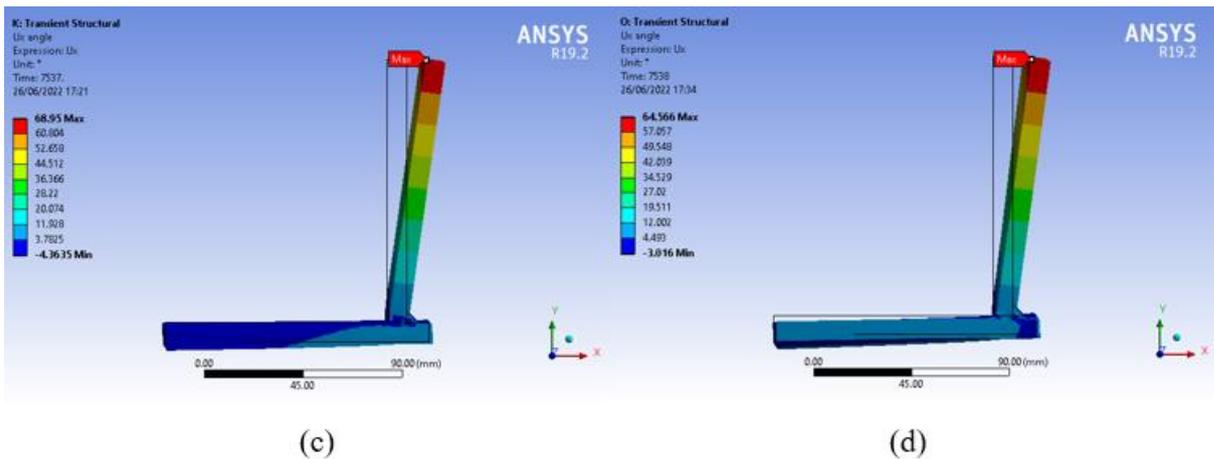
Pada analisis struktural ini juga didapatkan data deformasi yang terjadi pada material setelah proses pengelasan dan pendinginan. Jenis deformasi yang terjadi adalah deformasi sudut atau angular. Deformasi terjadi ke satu sisi yaitu sisi material yang dilas. Proses verifikasi deformasi dilakukan dengan membandingkan data *best practice* yang menggunakan parameter pengelasan WV1 dengan hasil simulasi. Deformasi diukur pada bagian tengah dari material pengelasan. Berikut merupakan perbandingan data verifikasi.

Tabel 4.7 Verifikasi data deformasi pada hasil *best practice* dengan simulasi

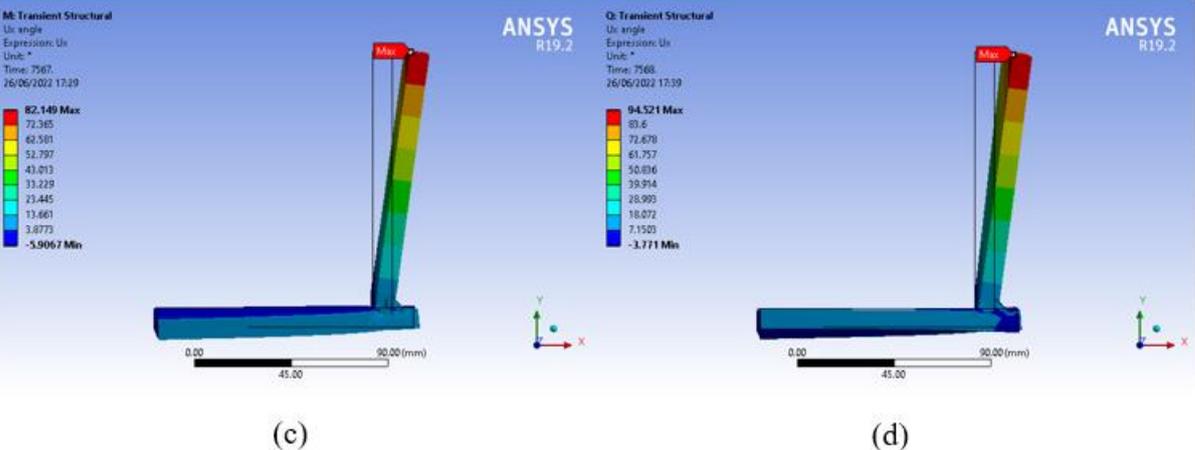
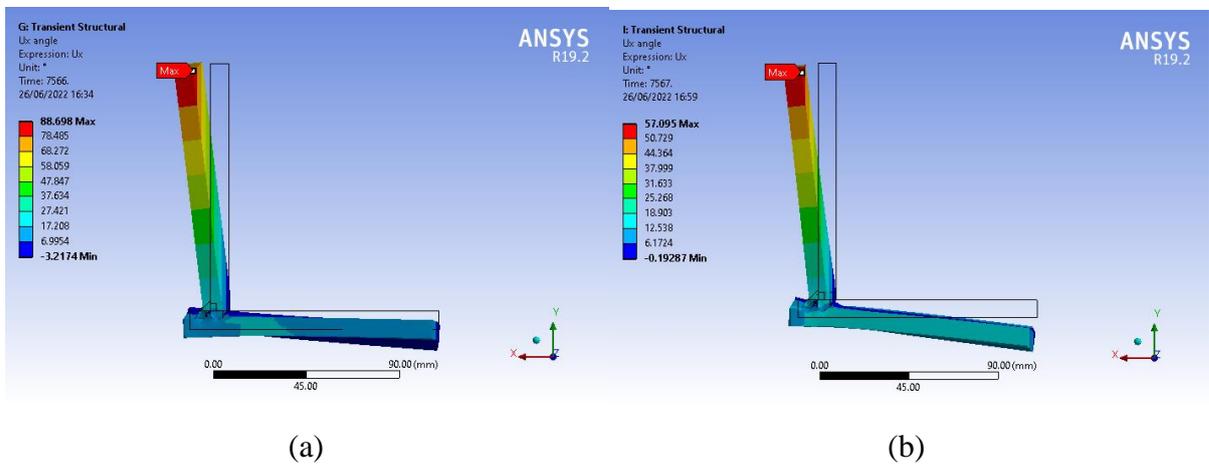
	Data Best Practice	Hasil Simulasi	Error
Deformasi (mm)	1,1	0,9	18%

Pada **Tabel 4.7** dapat dilihat bahwa hasil dari data *best practice* dengan simulasi memiliki nilai yang tidak jauh berbeda, dimana nilai error didapatkan sebesar 18%. Hasil deformasi untuk tiap pengelasan dapat dilihat pada **Gambar 4.27** untuk pengelasan dengan kecepatan 8,33 mm/s dan **Gambar 4.28** untuk pengelasan dengan kecepatan 4,55 mm/s.





Gambar 4.27 Deformasi pada pengelasan dengan kecepatan 8,33 mm/s (a)WV1, (b)WV3, (c)WV5, (d)WV7

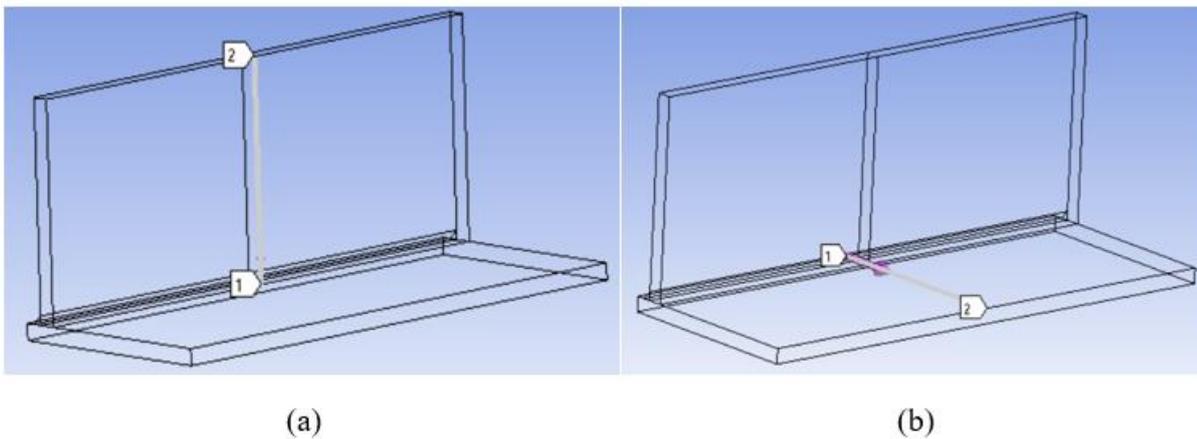


Gambar 4.28 Deformasi pada pengelasan dengan kecepatan 4,55 mm/s (a)WV2, (b)WV4, (c)WV6, (d)WV8

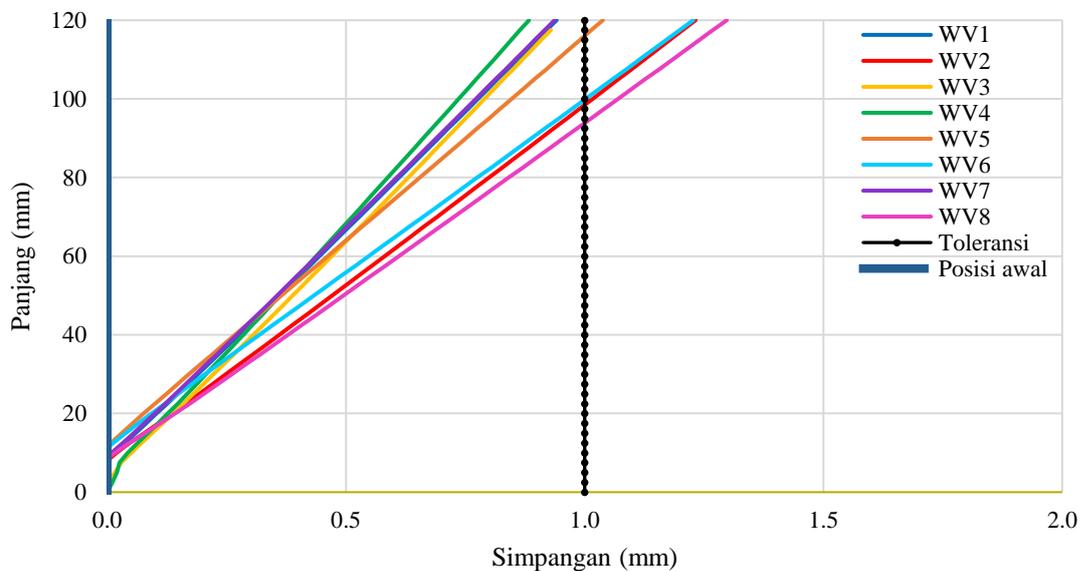
Dari **Gambar 4.27** dan **Gambar 4.28** dapat diketahui bahwa perbedaan urutan pengelasan menghasilkan deformasi maksimum di posisi yang berbeda. Untuk pengelasan WV1, WV2, WV3, dan WV4 dengan urutan pengelasan progresif dan simetri dari tepi menghasilkan deformasi maksimum pada ujung kanan atas pelat. Sedangkan pada pengelasan WV5, WV6,

WV7, dan WV8 dengan urutan pengelasan simetri dari tengah dan mundur menghasilkan deformasi maksimum pada ujung kiri atas pelat. Hal ini menunjukkan arah pengelasan berpengaruh terhadap terjadinya deformasi pada material.

Berikut merupakan hasil perbandingan deformasi untuk tiap variasi dengan posisi pengukuran yang sama yaitu pada bagian tengah pelat vertikal dan horizontal seperti pada **Gambar 4.29**. Lalu, untuk hasil pengukuran pada pelat vertikal dapat dilihat pada grafik di **Gambar 4.30** dan **Tabel 4.8**.



Gambar 4.29 Pengukuran deformasi pada bagian tengah (a) pelat vertikal, (b) pelat horizontal



Gambar 4.30 Simpangan pada posisi tengah pelat vertikal

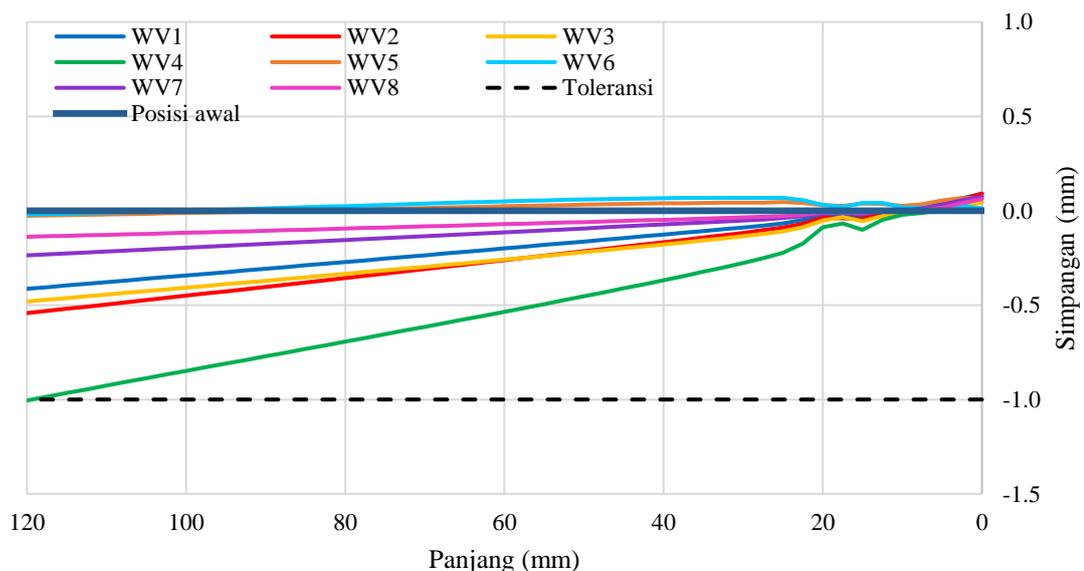
Tabel 4.8 Simpangan maksimum pada pelat vertikal hasil pengelasan

Kode Pengelasan	Heat Input (J/mm)	Simpangan Maksimum (mm)	Derajat Simpangan Maksimum
WV1	600	0,941	53,93°
WV2	1100	1,232	70,60°
WV3	600	0,949	54,38°
WV4	1100	0,883	50,61°
WV5	600	1,038	59,48°
WV6	1100	1,227	70,32°
WV7	600	0,937	53,68°
WV8	1100	1,298	74,35°

Dari data diatas didapat bahwa simpangan maksimum terbesar dihasilkan oleh pengelasan WV8 dengan kecepatan 4,55 mm/s dan urutan pengelasan mundur/*backstep* sebesar 1,298 mm dengan kemiringan 74,35°. Namun, hal yang menarik adalah untuk pengelasan WV4 dengan kecepatan 4,55 mm/s dan urutan pengelasan simetri dari tepi memiliki simpangan maksimum pada bagian tengah terkecil sebesar 0,883 mm dengan kemiringan 50,61°.

Apabila dibandingkan berdasarkan masing-masing kecepatan, untuk kecepatan las 8,33 mm/s didapatkan simpangan maksimum terbesar oleh pengelasan WV5 dengan urutan pengelasan simetri dari tengah sebesar 1,038 mm dengan kemiringan 59,48° dan yang terkecil adalah pengelasan WV7 dengan urutan pengelasan mundur sebesar 0,937 mm dengan kemiringan 53,68°. Lalu, untuk kecepatan 4,55 mm/s didapatkan simpangan maksimum terbesar oleh pengelasan WV8 dengan urutan mundur sebesar 1,298 mm dengan kemiringan 74,35° dan yang terkecil adalah pengelasan WV4 dengan urutan pengelasan simetri dari tepi sebesar 0,883 mm dengan kemiringan 50,61°. Dari data diatas dapat dilihat bahwa pengelasan WV2 merupakan parameter terbaik untuk mengurangi besar deformasi pada pelat vertikal.

Selanjutnya, berikut merupakan hasil pengukuran simpangan pada pelat horizontal hasil pengelasan pada grafik di **Gambar 4.31** dan **Tabel 4.9**.



Gambar 4.31 Simpangan pada posisi tengah pelat horizontal

Tabel 4.9 Simpangan maksimum pada pelat horizontal hasil pengelasan

Kode Pengelasan	Heat Input (J/mm)	Simpangan Maksimum (mm)	Derajat Simpangan Maksimum
WV1	600	-0,413	-23,68°
WV2	1100	-0,542	-31,06°
WV3	600	-0,481	-27,55°
WV4	1100	-1,005	-57,57°
WV5	600	-0,027	-1,53°
WV6	1100	-0,021	-1,19°
WV7	600	-0,236	-13,54°
WV8	1100	-0,138	-7,90°

Dari data di atas dapat dilihat bahwa, secara keseluruhan simpangan maksimum terbesar pada bagian tengah pelat horizontal dihasilkan oleh pengelasan WV4 dengan urutan simetri dari tepi sebesar -1,005 mm dengan kemiringan -57,57° dan yang terkecil oleh pengelasan WV6 dengan urutan simetri dari tengah sebesar -0,021 mm dengan kemiringan -1,19°.

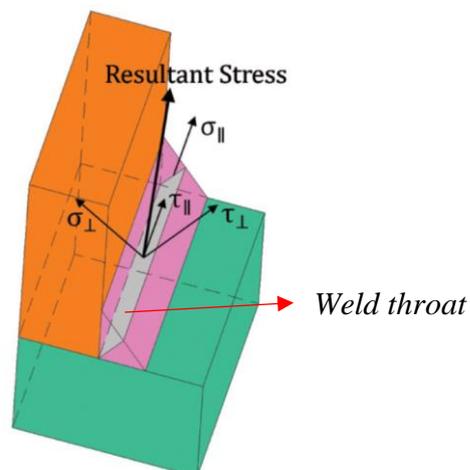
Berdasarkan masing-masing kecepatan, untuk kecepatan las 8,33 mm/s simpangan maksimum terbesar dihasilkan oleh pengelasan WV3 dengan urutan simetri dari tepi sebesar -0,481 mm dengan kemiringan -27,55° dan yang terkecil oleh pengelasan WV5 dengan urutan simetri dari tepi sebesar -0,027 mm dengan kemiringan -1,53°. Lalu, untuk kecepatan las 4,55 mm/s deformasi maksimum terbesar dihasilkan oleh pengelasan WV4 dan yang terkecil oleh pengelasan WV6. Pengelasan WV6 merupakan parameter terbaik untuk mengurangi deformasi pada pelat horizontal.

4.4 Pembahasan

Berikut merupakan hasil analisis untuk tiap hasil simulasi yang didapatkan mulai dari analisis temperatur, tegangan sisa, deformasi, pengaruh kecepatan, dan pengaruh urutan pengelasan.

4.4.1 Analisis Temperatur

Ketika panas diberikan kepada material, akan terjadi distribusi gaya pada daerah lasan yang terjadi ke berbagai arah seperti pada **Gambar 4.32** berikut.



Gambar 4.32 Distribusi gaya pada daerah lasan

Distribusi yang dihasilkan terjadi pada seluruh daerah lasan. σ_{\perp} adalah gaya normal yang tegak lurus dengan *weld throat*, τ_{\perp} merupakan tegangan geser pada bidang *weld throat* yang tegak lurus dengan sumbu las, dan τ_{\parallel} merupakan gaya geser pada bidang *weld throat* yang sejajar dengan sumbu las. Ketiga gaya ini akan menghasilkan tegangan resultan (Packer et al., 2016).

Pada hasil dari simulasi pembebanan termal, dapat dianalisis bahwa temperatur tertinggi untuk seluruh variasi pengelasan terdapat pada akhir proses pengelasan atau detik terakhir pada pembebanan *heat flux*. Hal ini dikarenakan pada waktu akhir pembebanan *heat flux*, terdapat akumulasi panas yang terkumpul dari proses pembebanan termal sebelumnya. Pada hasil dari pembebanan termal, dapat dilihat juga bahwa nodal A, B, dan C memiliki temperatur maksimum yang berbeda untuk masing-masing variasi pengelasan.

Temperatur puncak yang didapatkan pada nodal A seperti pada **Gambar 4.8** memiliki nilai di atas temperatur leleh, hal ini dikarenakan posisi nodal yang terletak pada *weld bead*. Sedangkan untuk nodal B yang berjarak 1 mm dari *weld bead* seperti pada **Gambar 4.9** mencapai suhu puncak di bawah temperatur leleh, namun di atas temperatur kritis dari austenit. Hal ini menunjukkan bahwa nodal B berada pada wilayah *Heat Affected Zone (HAZ)*. HAZ mengalami perubahan mikrostruktur dan juga mengalami pendinginan yang tidak equilibrium atau sangat cepat. Pendinginan ini mengakibatkan wilayah HAZ merupakan bagian terlemah dikarenakan dapat menghasilkan mikrostruktur martensit. Pada nodal C seperti pada **Gambar 4.10** yang berjarak 5 mm dari *weld bead* memiliki temperatur puncak di bawah temperatur kritis dari austenit. Hal ini menunjukkan bahwa nodal C berada pada wilayah *unaffected base metal* dimana tidak terjadi perubahan mikrostruktur. Dapat dianalisis bahwa semakin jauh titik dari sumber panas, menghasilkan temperatur yang semakin rendah.

Setelah selesai dilakukan pemanasan, temperatur dari tiga nodal kemudian turun ketika beban *heat flux* sudah menjauh dari nodal. Pada saat pendinginan, panas terdistribusi ke seluruh permukaan melalui proses konduksi dan terjadi *heat loss* melalui proses konveksi dan radiasi. Pengelasan merupakan las satu sisi sehingga hanya terdapat dua sisi pengelasan yang memiliki *Heat Affected Zone (HAZ)*, yaitu sisi yang tersambung pada pelat vertikal dan sisi yang tersambung pada pelat horizontal. Untuk sisi yang berada di pelat horizontal memiliki luas yang kecil, dikarenakan dimensi ujung *base metal* yang hanya berjarak 5 mm dari *weld bead*.

4.4.2 Analisis Tegangan Sisa

Pada hasil pembebanan struktur tegangan sisa dapat dilihat pada **Gambar 4.17** yang menunjukkan distribusi tegangan transversal menunjukkan bahwa selama proses pendinginan dapat dilihat bahwa pada daerah dekat lasan cenderung lebih cepat dingin dibanding daerah sekitarnya. Sehingga, pada daerah lasan mengalami tegangan tarik setelah mengalami pendinginan, namun ketika beban panas diberikan daerah tersebut mengalami tegangan tekan. Sedangkan daerah yang semakin jauh dengan daerah las mengalami tegangan tekan setelah mengalami pendinginan untuk menyeimbangkan tegangan yang terjadi pada daerah dekat lasan.

Pada **Gambar 4.18** yang menunjukkan distribusi tegangan longitudinal, terlihat bahwa pada daerah lasan sebelah kiri dan kanan terjadi tegangan tarik. Hal ini dikarenakan adanya *support* menyebabkan tegangan sudah ada sebelum pengelasan dilakukan pada daerah tersebut, sehingga setelah pengelasan dan pendinginan terjadi menghasilkan tegangan tarik yang sangat besar. Pada daerah tengah las disebabkan adanya *support* yang digunakan untuk menjaga deformasi dari material, maka tegangan yang terbentuk menyeimbangkan tegangan yang terbentuk pada daerah tepi (tegangan tarik) oleh karena itu terbentuk tegangan tekan untuk mencapai kondisi setimbang. Pada daerah tengah las, panas yang didapatkan juga lebih stabil dibandingkan dengan yang berada diujung las, dikarenakan posisinya yang masih berada pada daerah lintasan las.

Ketika penyusutan saat proses solidifikasi terjadi, *molten metal* menarik *base metal* dan daerah di sekitar *fusion zone* yang memiliki tegangan tekan dengan alasan adanya ekuilibrium untuk menyeimbangkan tegangan akibat *molten metal* yang mengalami penyusutan, tegangan tekan yang terjadi membuat adanya regangan pada daerah tersebut. Ketika *weld bead* berada pada kondisi likuid atau cair, maka *weld bead* tidak memiliki tegangan, sementara *base metal* disekitar *fusion zone* mengalami tegangan tekan akibat ekspansi termal dari *base metal* yang tidak mencair. Ketika busur las menjauhi material tersebut, maka metal yang berada pada kondisi likuid atau cair mengalami solidifikasi dan mengalami penyusutan, sehingga mengakibatkan adanya tegangan tarik. Seiring berjalannya waktu, *base metal* mengalami tarikan oleh daerah las yang mengalami solidifikasi. Hal ini menyebabkan tegangan tekan di daerah *fusion zone* semakin tinggi. Solidifikasi tersebut mengakibatkan diskontinuitas pada daerah fusi. Ketika pengelasan selesai, daerah las mengalami pendinginan dan solidifikasi dari sebelumnya berada pada temperatur leleh material. Pendinginan tersebut mengakibatkan adanya penyusutan volume di seluruh bagian dari material. Tegangan yang dihasilkan bertolak belakang dengan tegangan tekan yang ada pada *fusion zone*. Sehingga HAZ atau daerah yang terkena efek panas pada pengelasan di sekitar *fusion zone* menghasilkan tegangan tarik yang relatif kecil dibanding *fusion zone* dan *tempered zone*. Setelah itu tegangan bersifat permanen hingga temperatur mencapai temperatur ruangan. Dari sini dapat terlihat bahwa tegangan tekan di daerah fusi menyebabkan diskontinuitas atau adanya tegangan sisa yang tinggi.

Tegangan sisa tarik dapat mempercepat terjadinya *crack*, sedangkan tegangan sisa tekan dapat menghambat terjadinya *crack*. Jarak antar kisi menjauh ketika terjadi tegangan sisa tarik, sedangkan pada tegangan tekan, terjadi jarak antar kisi yang semakin rapat (Radaj, 1990).

4.4.3 Analisis Deformasi

Pada **Gambar 4.27** dan **Gambar 4.28**, deformasi angular terjadi di pelat yang tersambung secara vertikal dan horizontal. Simpangan terjauh untuk seluruh variasi berada pada posisi ujung atas pelat. Bagian yang terkena panas mengalami ekspansi akibat pembebanan termal. Ketika busur sudah menjauhi, maka terjadi proses solidifikasi pada *weld metal* dan mengakibatkan daerah *weld metal* mengalami tegangan tarik. Ketika *weld metal* mengalami solidifikasi, terdapat perbedaan temperatur antara daerah *weld metal* dengan *base metal*, hal ini menyebabkan daerah *base metal* vertikal mengalami tegangan kompresi mendekati daerah *weld metal*. Distribusi temperatur yang tidak merata pada seluruh permukaan material, mengakibatkan pemuaihan dan penyusutan yang tidak merata, khususnya pada daerah yang menjauhi dari daerah *weld metal*. Hal ini mengakibatkan terjadinya perubahan bentuk secara permanen akibat pengelasan.

4.4.4 Pengaruh Kecepatan Pengelasan

Kecepatan pengelasan berpengaruh terhadap besar masukan panas yang diterima oleh material las. Semakin lambat proses pengelasan maka pemanasan terjadi semakin lama sehingga panas yang diterima oleh material semakin tinggi. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian oleh (Chavan et al., 2012), dimana kecepatan yang tinggi menyebabkan waktu pemanasan pada pengelasan menjadi sedikit sehingga panas yang diserap oleh material semakin sedikit. Pada **Tabel 4.3** temperatur puncak tertinggi dihasilkan oleh pengelasan dengan kecepatan 4,55 mm/s, yaitu pengelasan WV2. Sedangkan temperatur puncak terendah dihasilkan oleh pengelasan dengan kecepatan 8,33 mm/s, yaitu pengelasan WV5.

Untuk hasil tegangan sisa, berdasarkan **Tabel 4.5** dan **Tabel 4.6** dapat dianalisis bahwa kecepatan cepat menghasilkan tegangan sisa longitudinal dan transversal yang kecil karena memiliki *heat input* yang rendah, sehingga besar ekspansi dan penyusutan pada material kecil dan ketika terhambat oleh logam induk yang tidak mengalami pemuaihan, maka besar tegangan

yang terbentuk menjadi kecil. Pengelasan WV5 dengan kecepatan 8,33 mm/s dan *heat input* 600 J/mm menghasilkan tegangan sisa longitudinal dan transversal yang kecil.

Untuk hasil deformasi, berdasarkan **Tabel 4.8** dan **Tabel 4.9** dapat dianalisis bahwa Kecepatan cepat menghasilkan simpangan deformasi yang kecil pada pelat vertikal dan horizontal karena memiliki *heat input* yang rendah, sehingga besar ekspansi dan penyusutan pada material menjadi kecil menyebabkan perubahan bentuk yang terjadi atau deformasi kecil juga. Pengelasan WV7 dengan kecepatan 8,33 mm/s dan *heat input* 600 J/mm menghasilkan simpangan deformasi yang kecil.

Lalu, berdasarkan referensi *heat input* untuk mendapatkan kualitas las yang baik didapatkan oleh *heat input* sebesar 1100 J/mm, dimana nilai tersebut diperoleh oleh pengelasan dengan kecepatan 4,55 mm/s. Kecepatan lambat menyebabkan *weld deposisi* yang tinggi sehingga *weld bead* yang terbentuk teratur, lebar dan menghasilkan penetrasi yang lebih dalam. Dikarenakan pada data *best practice* PT.X menggunakan kecepatan pengelasan 8,33 mm/s maka dapat diubah kecepatan menjadi lebih lambat agar menghasilkan kualitas las yang diharapkan.

Namun, apabila tetap ingin menggunakan kecepatan cepat untuk mencapai produktivitas yang tinggi maka dapat menaikkan arus pengelasan agar masukan pas menjadi besar juga sehingga kualitas las yang diharapkan pun tercapai juga.

4.4.5 Pengaruh Urutan Pengelasan

Urutan pengelasan berpengaruh terhadap posisi temperatur puncak pengelasan karena dipengaruhi oleh arah pengelasan. Dimana posisi akhir merupakan posisi temperatur puncak pengelasan. Lalu, apabila *step* pengelasan lebih dari satu maka *step* akhir menghasilkan temperature puncak. Berdasarkan **Gambar 4.11** dan **Gambar 4.12** dapat dianalisis bahwa untuk urutan progresif menghasilkan temperature puncak pada posisi kiri lasan, urutan simetri dari tepi menghasilkan temperatur puncak pada daerah tengah lasan, urutan simetri dari tengah menghasilkan temperatur puncak pada daerah tepi, dan urutan mundur menghasilkan temperatur puncak pada detik akhir *step* ketiga pengelasan.

Urutan pengelasan mempengaruhi besar tegangan sisa akibat dari perbedaan arah pemuaihan dan penyusutan akibat perbedaan arah pengelasan. Berdasarkan **Tabel 4.5** dan **Tabel 4.6** urutan simetri dari tengah oleh pengelasan WV5 menghasilkan tegangan sisa yang rendah karena memiliki dua langkah pengelasan yang dimulai dari bagian tengah dan arah pengelasan keluar. Arah pengelasan keluar menyebabkan arah pemuaihan dan penyusutan ke arah luar sehingga tegangan terkonsentrasi pada bagian tepi dan kemampuan geometri untuk menahan atau *restrain* lebih kecil. Sehingga besar hambatan yang diberikan geometri menjadi kecil dan tegangan sisa pun kecil.

Selain itu, urutan pengelasan berpengaruh terhadap besar deformasi juga. Berdasarkan **Gambar 4.30**, **Gambar 4.31**, **Tabel 4.8**, dan **Tabel 4.9** dapat dianalisis bahwa urutan mundur bertahap oleh pengelasan WV7 menghasilkan deformasi yang kecil akibat dari adanya beberapa langkah pengelasan dan arah pengelasan yang mundur, maka ketika langkah pertama sudah dilakukan dan terjadi pemuaihan dan penyusutan, saat langkah kedua berlangsung pemuaihan dari pengelasan langkah kedua menekan/mengurangi penyusutan langkah pertama dan begitu juga untuk langkah selanjutnya. Oleh karena itu, deformasi secara keseluruhan menjadi kecil. Menurut penelitian oleh (D. F. Fu et al., 2014), Urutan pengelasan mundur bertahap memberikan efek *preheat* dan *post-weld heat treatment*.

Berdasarkan analisis yang dilakukan, urutan pengelasan mundur bertahap merupakan urutan yang dapat menghasilkan nilai tegangan sisa dan deformasi yang kecil secara keseluruhan dibandingkan dengan urutan pengelasan lainnya.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian mengenai analisis numerik mengenai pengaruh kecepatan dan urutan las pada pengelasan SS400 yang telah dilakukan, didapatkan hasil berupa temperatur, tegangan sisa, dan deformasi yang terjadi. Sehingga kesimpulan dari penelitian kali ini sebagai berikut:

1. Pada pengelasan sambungan T SS400, temperatur puncak paling tinggi didapat pada pengelasan WV2 dengan kecepatan 4,55 mm/s dan urutan pengelasan progresif sebesar 3576,8°C. Lalu, temperatur puncak paling rendah didapat pada pengelasan WV5 dengan kecepatan 8,33 mm/s dan urutan pengelasan simetri dari tengah sebesar 2717,4°C. Semakin cepat kecepatan maka temperatur yang dihasilkan semakin rendah. Sedangkan urutan pengelasan berpengaruh terhadap besar dan distribusi temperatur puncak.
2. Pada pengelasan sambungan T SS400, tegangan sisa transversal paling kecil didapat pada pengelasan WV5 sebesar 322,32 MPa. Untuk nilai tegangan sisa transversal paling besar didapat pada pengelasan WV2 sebesar 385,42 MPa. Sedangkan untuk nilai tegangan sisa longitudinal paling kecil didapat pada pengelasan WV5 sebesar 280,39 MPa dan tegangan sisa longitudinal paling besar didapat pada pengelasan WV2 sebesar 318,26 MPa. Semakin cepat kecepatan las maka menghasilkan nilai tegangan sisa yang semakin kecil. Urutan pengelasan simetri dari tengah dan mundur menghasilkan besar tegangan sisa yang kecil.
3. Pada pengelasan sambungan T SS400, deformasi angular terbesar pelat vertikal dihasilkan oleh pengelasan WV8 dengan kecepatan 4,55 mm/s dan urutan pengelasan mundur sebesar 1,298 mm dengan kemiringan 74,35°. Lalu deformasi terkecil oleh pengelasan WV4 dengan kecepatan 4,55 mm/s dan urutan pengelasan simetri dari tepi sebesar 0,883 mm dengan kemiringan 50,61°. Pada pelat horizontal, deformasi terbesar dihasilkan oleh pengelasan WV4 sebesar -1,005 mm dengan kemiringan -57,57° dan yang terkecil oleh pengelasan WV6 dengan urutan simetri dari tengah sebesar -0,021 mm dengan kemiringan -1,19°. Pengelasan dengan kecepatan cepat cenderung menghasilkan deformasi lebih kecil dibandingkan pengelasan dengan kecepatan lambat. Perbedaan urutan pengelasan berpengaruh terhadap besar deformasi akibat dari perbedaan titik awal, titik akhir, dan arah pengelasan. Urutan pengelasan mundur menghasilkan besar deformasi yang kecil baik pada pelat vertikal maupun horizontal.

Dari kesimpulan dan analisis yang dilakukan, pengelasan WV7 dan WV8 merupakan parameter pengelasan yang disarankan untuk menghasilkan hasil pengelasan yang baik. Dimana pengelasan WV7 dengan urutan mundur bertahap dan kecepatan 8,33 mm/s menghasilkan besar deformasi dan tegangan sisa yang rendah secara keseluruhan. Lalu, untuk pengelasan WV8 dengan urutan mundur bertahap dan kecepatan 4,55 mm/s memiliki *heat input* 1100 J/mm yang sesuai untuk menghasilkan kualitas lasan yang baik dan jika dibandingkan dengan pengelasan yang memiliki kecepatan sama, pengelasan WV8 menghasilkan besar tegangan sisa dan deformasi yang kecil. Namun, karena deformasi yang dihasilkan melebihi toleransi yaitu sebesar 1,298 mm, maka dapat diantisipasi dengan menyusun sambungan pelat secara miring dengan besaran simpangan terjauh yang sudah diprediksi.

5.2 Saran

Saran yang diberikan untuk penelitian selanjutnya dengan kualitas penelitian yang lebih baik adalah sebagai berikut:

1. Untuk meminimalisir deformasi agar dapat memenuhi standar toleransi dari PT.X, posisi pengelasan sebelum dilakukan dibuat miring dengan besaran deformasi yang sudah diprediksi.
2. Untuk meminimalisir tegangan sisa, dapat dilakukan *post weld heat treatment* (PWHT) dan *peening*.
3. Pada penelitian selanjutnya, dilakukan analisis struktur mikro dan makro untuk mengetahui parameter yang digunakan dalam simulasi sudah memenuhi target kualitas yang diharapkan.

DAFTAR PUSTAKA

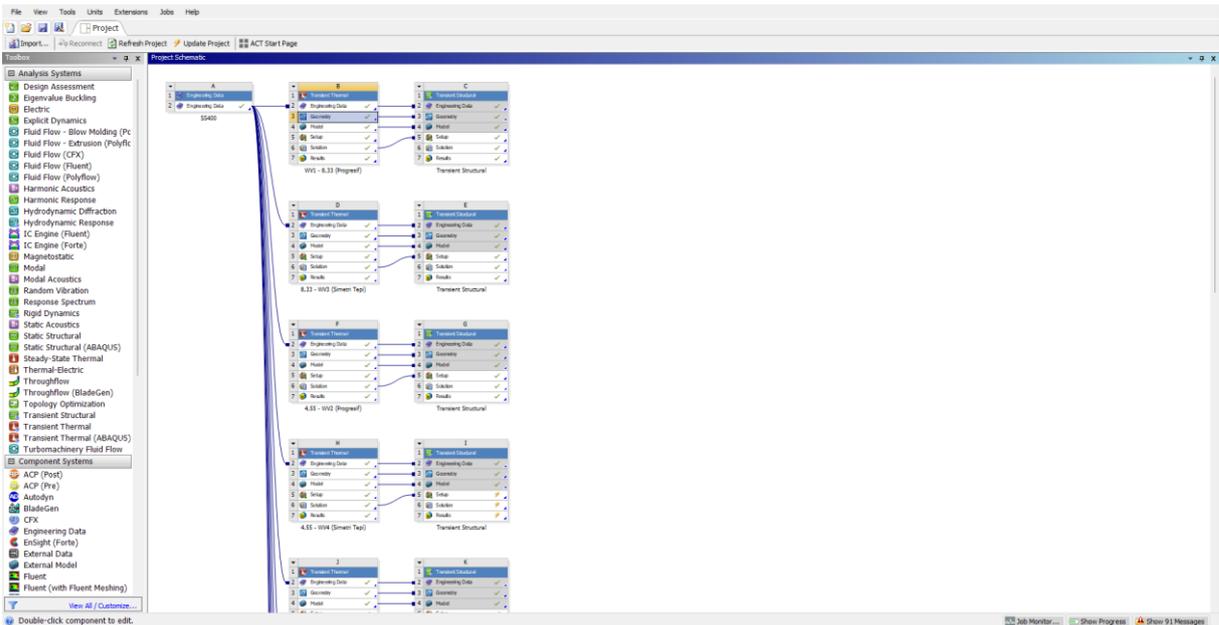
- American Welding Society. (2001). *Welding Handbook, Welding Science & Technology*. In *Welding Handbook* (Vol. 1).
- Anca, A., Cardona, A., Risso, J., & Fachinotti, V. D. (2011). Finite element modeling of welding processes. *Applied Mathematical Modelling*, 35(2), 688–707. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.07.026>
- Asadi, P., Alimohammadi, S., Kohantorabi, O., Soleymani, A., & Fazli, A. (2020). Numerical investigation on the effect of welding speed and heat input on the residual stress of multi-pass TIG welded stainless steel pipe. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 235, 1007–1021. <https://doi.org/10.1177/0954405420981335>
- Boumerzoug, Z. (2020). Heat Affected Zone in Welded Metallic Materials. *Modern Concepts in Material Science*, 3(4), 3–6. <https://doi.org/10.33552/mcms.2020.03.000566>
- Chang, P. H., & Teng, T. L. (2004). Numerical and experimental investigations on the residual stresses of the butt-welded joints. *Computational Materials Science*, 29(4), 511–522. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2003.12.005>
- Chavan, H. K., Shelake, G. D., & Kadam, M. S. (2012). *Effect of Heat Input and Speed of Welding on Distortion in MIG Welding*. 42–50.
- Choobi, M. S., Haghpanahi, M., & Sedighi, M. (2012). Effect of welding sequence and direction on angular distortions in butt-welded plates. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 47(1), 46–54. <https://doi.org/10.1177/0309324711425887>
- Deng, D. (2009). FEM prediction of welding residual stress and distortion in carbon steel considering phase transformation effects. *Materials and Design*, 30(2), 359–366. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.04.052>
- Dhinakaran, V., Shanmugam, N. S., & Sankaranarayananasamy, K. (2017). Experimental investigation and numerical simulation of weld bead geometry and temperature distribution during plasma arc welding of thin Ti-6Al-4V sheets. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 52(1), 30–44. <https://doi.org/10.1177/0309324716669612>
- Dimas Prasetyo, & Yulianto, T. (2012). Perbandingan Deformasi dan Tegangan Sisa Metode Elemen Hingga. *Jurnal Teknik ITS*, 1(1).
- DTWD. (2018). *Perform Gas Metal Arc Welding*.
- Dutta, J., & S, N. (2014). Estimation of Cooling Rate and Its Effect on Temperature Dependent Properties in GTA Welded High Carbon Steel Joints. *Review of Industrial Engineering Letters*, 1(2), 55–66. <https://doi.org/10.18488/journal.71/2014.1.2/71.2.55.66>
- Enstein, A. (2010). Pengaruh Ketebalan Pelat Terhadap Tegangan Sisa Dan Distorsi Angular Pada Pelat Baja Jis G 3101 Ss400 Dilas Dengan Menggunakan Proses Fcaw Semi-Otomatis. *Metalurgi Dan Material*, 81. <http://lib.ui.ac.id/file?file=pdf/abstrak-20249433.pdf>
- Fu, D. F., Zhou, C. Q., Li, C., Wang, G., & Li, L. X. (2014). Effect of welding sequence on residual stress in thin-walled octagonal pipe-plate structure. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 24(3), 657–664. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63108-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63108-3)
- Fu, G., Lourenço, M. I., Duan, M., & Estefen, S. F. (2016). Influence of the welding sequence on residual stress and distortion of fillet welded structures. *Marine Structures*, 46, 30–55. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2015.12.001>
- Gannon, L., Liu, Y., Pegg, N., & Smith, M. (2010). Effect of welding sequence on residual stress and distortion in flat-bar stiffened plates. *Marine Structures*, 23(3), 385–404.

- <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2010.05.002>
- Goldak, J. A., & Akhlaghi, M. (2005). Computational welding mechanics. In *Computational Welding Mechanics*. <https://doi.org/10.1007/b101137>
- Goldak, J., Chakravarati, A., & Bibby, M. (1984). A New Finite Element Model for Welding Heat Sources. *Scandinavian Journal of Urology*, 52(1), 1–7. <https://doi.org/10.1080/21681805.2017.1363816>
- Grong, O. (1997). Metallurgical Modelling of Welding. *Institute of Materials, 1 Carlton House Terrace, London, SW 1 Y 5 DB, UK, 1997*. 605, 620.
- Henderson, M. R. (2006). An Overview of GMAW Including Applications, Common Problems and Solutions. *American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP, 2006*, 1–4. <https://doi.org/10.1115/PVP2006-ICPVT-11-93706>
- Iguchi, M., & Ilegbusi, O. J. (2014). Basic transport phenomena in materials engineering. In *Basic Transport Phenomena in Materials Engineering* (Vol. 9784431540). https://doi.org/10.1007/978-4-431-54020-5_1
- International, A. (1993). ASM Handbook Volume 6 Welding, Brazing, and Soldering. *Engineering*, 6, 2873. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Welding,+brazing+and+soldering#0>
- Jafarpur, K., & Nami, M. R. (2011). Analysis of welding conditions based on induced thermal irreversibilities in welded structures: Cases of welding sequences and preheating treatment. *Scientia Iranica*, 18(3 B), 398–406. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2011.05.030>
- Jagota, V., Sethi, A. P. S., & Kumar, K. (2013). Finite element method: An overview. *Walailak Journal of Science and Technology*, 10(1), 1–8.
- Jeyakumar, M., & Christopher, T. (2013). Influence of residual stresses on failure pressure of cylindrical pressure vessels. *Chinese Journal of Aeronautics*, 26(6), 1415–1421. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2013.07.025>
- Khoshroyan, A., & Darvazi, A. R. (2020). Effects of welding parameters and welding sequence on residual stress and distortion in Al6061-T6 aluminum alloy for T-shaped welded joint. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 30(1), 76–89. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(19\)65181-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(19)65181-2)
- Kou, S. (2003). Welding Metallurgy. In *Indian Welding Journal* (Second, Vol. 4, Issue 3). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.22486/iwj.v4i3.150243>
- Kubo, A., & Sasaki, T. (n.d.). *Fast and versatile measurement of residual stress and hardness of gear and shaft materials*.
- Lin, J., Ma, N., Lei, Y., & Murakawa, H. (2017). Measurement of residual stress in arc welded lap joints by $\cos\alpha$ X-ray diffraction method. *Journal of Materials Processing Technology*, 243, 387–394. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.12.021>
- Mahfud. (2012). Analisa Pengaruh Variasi Tanggem Pada Pengelasan Pipa Carbon Steel Dengan Metode Deformasi dan Tegangan Sisa Menggunakan. *Jurnal Teknik ITS*, 1(1), 340–345.
- Masubuchi, K. (1982). Analysis of welded structures. In *Metallography* (Vol. 15, Issue 3). [https://doi.org/10.1016/0026-0800\(82\)90012-x](https://doi.org/10.1016/0026-0800(82)90012-x)
- Michaleris, P. (2011). Minimization of welding distortion and buckling: Modelling and implementation. In *Minimization of Welding Distortion and Buckling: Modelling and Implementation*. <https://doi.org/10.1533/9780857092908>
- Mohamed Malo, D., Uzal, E., Soulama, S., & Ganame, A.-S. (2019). Design and Finite Elements Analysis of a Hydraulic Excavator's Robot Arm System. *American Journal of*

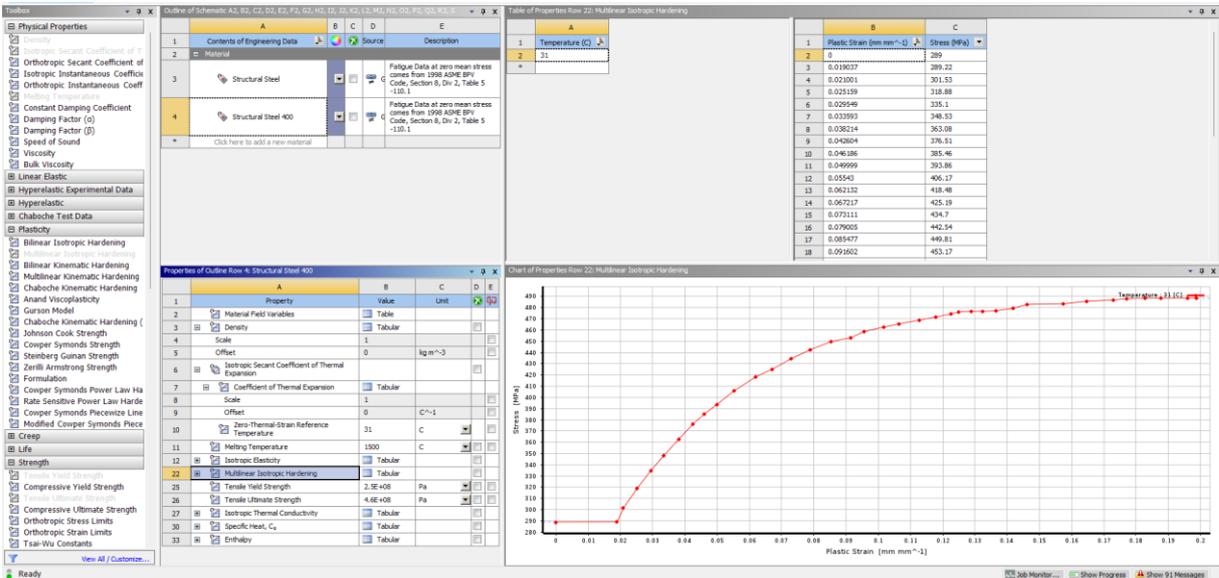
- Mechanics and Applications*, 7(3), 35. <https://doi.org/10.11648/j.ajma.20190703.11>
- Nguyen, V., & Lee, V. D. C. (2014). A nonlinear CDM model for ductile failure analysis of steel bridge columns under cyclic loading A nonlinear CDM model for ductile failure analysis of steel bridge. June. <https://doi.org/10.1007/s00466-013-0964-2>
- Novianto, A. (2018). *Teknik Pengelasan Gas Metal (MIG/MAG)* (Vol. 4, Issue 1).
- P. Patel, B., & Prajapati, J. M. (2011). A Review on FEA and Optimization of Backhoe Attachment in Hydraulic Excavator. *International Journal of Engineering and Technology*, 3(5), 505–511. <https://doi.org/10.7763/ijet.2011.v3.277>
- Packer, J. A., Sun, M., & Tousignant, K. (2016). Experimental Evaluation of Design Procedures for Fillet Welds to Hollow Structural Sections. *Journal of Structural Engineering*, 142(5), 1–12. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0001467](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0001467)
- Panji, M., Baskoro, A. S., & Widianto, A. (2019). Effect of Welding Current and Welding Speed on Weld Geometry and Distortion in TIG Welding of A36 Mild Steel Pipe with V-Groove Joint. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 694(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/694/1/012026>
- Prahastho, N. A. (2019). PENGARUH AMPERE DAN DIAMETER ELEKTRODA KAWAT ER70S-G KC26 PADA GAS METAL ARC WELDING (GMAW) TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO SAMBUNGAN LAS JIS G3101 SS400 SEBAGAI APLIKASI ARM EXCAVATOR DI PT. X. *DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember*.
- Primasatya, A. F. (2009). Pengukuran Besarnya Distorsi Angular dan Tegangan Sisa Pada Baja JIS G3101-SS400 dengan Menggunakan Proses Pengelasan FCAW. *Fakultas Teknik, Universitas Indonesia*.
- Primo, J. (2014). Gas Metal Arc Welding – GMAW Best Practices. *ME Mechanical*, 514.
- Radaj, D. (1990). Fracture mechanics approach for assessment of fatigue strength of seam welded joints. *Design and Analysis of Fatigue Resistant Welded Structures*, 277–298. <https://doi.org/10.1533/9781845698751.277>
- Raj, J., Saxena, G., Kumar, R., & Kaushik, K. (2015). Study on the Analysis of Excavator Boom: A Review. *International Journal of Mechanical Engineering*, 2(7), 31–39. <https://doi.org/10.14445/23488360/ijme-v2i7p107>
- Salloomi, K. N., & Al-Sumaidae, S. (2017). Numerical validation of temperature distribution in friction stir welded aluminum 7075-T651 plates using pseudo heat transfer model. *Annales de Chimie: Science Des Materiaux*, 41(1–2), 29–38. <https://doi.org/10.3166/ACSM.41.29-38>
- Sulamet-Ariobimo, R. D., Soedarsono, J. W., Sukarnoto, T., Rustandi, A., Mujalis, Y., & Prayitno, D. (2016). Tensile properties analysis of AA1100 aluminium and SS400 steel using different JIS tensile standard specimen. *Journal of Applied Research and Technology*, 14(2), 148–153. <https://doi.org/10.1016/j.jart.2016.03.006>
- Syahroni, N., & Purbawanto Hidayat, M. I. (2012). 3D Finite Element Simulation of T-Joint Fillet Weld: Effect of Various Welding Sequences on the Residual Stresses and Distortions. *Numerical Simulation - From Theory to Industry*, 2001. <https://doi.org/10.5772/50015>
- Tanaka, K. (2019). The cosa method for X-ray residual stress measurement using two-dimensional detector. *Mechanical Engineering Reviews*, 6(1), 18-00378-18-00378. <https://doi.org/10.1299/mer.18-00378>
- Thompson, M. K., & Thompson, J. M. (2017). ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis. In *Elsevier*. Joe Hayton.
- Trupiano, S., Belardi, V. G., Fanelli, P., Gaetani, L., & Vivio, F. (2022). A semi-analytical method for the calculation of double-ellipsoidal heat source parameters in welding

- simulation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1214(1), 012023. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1214/1/012023>
- Van der Aa, E. M. (2007). Local cooling during welding: Prediction and control of residual stresses and buckling distortion. *Delft University of Technology*, 1–232. http://www.library.tudelft.nl/ws/search/publications/search/metadata/index.htm?docname=374090%5Cnfile:///X:/My Documents/publicaties/Thesis EllenvdAa June2007/PDF files/Thesis_vanderAa_June2007.pdf
- Wang, B., Li, K., & Lu, P. (2018). Research on Welding Structure with Transition Changing Faces at Cylinder Block on Boom of Medium Excavator by Means of Hot Spot Stress Approach. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 18(5), 1127–1132. <https://doi.org/10.1007/s11668-018-0500-y>
- Wiryosumarto, H., & Okumura, T. (2000). Teknologi Pengelasan Logam. In *PT Pradnya Paramita* (Vol. 8).
- Zhou, J., & Tsai, H. L. (2005). Welding heat transfer. In *Processes and Mechanisms of Welding Residual Stress and Distortion*. Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1533/9781845690939.1.32>

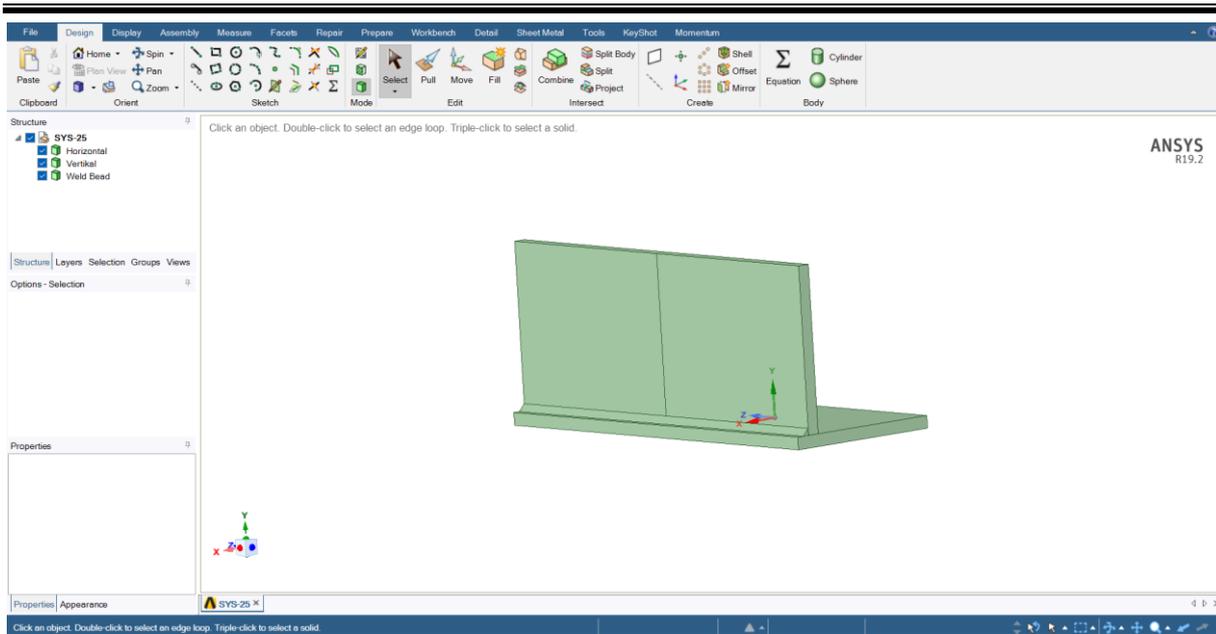
LAMPIRAN A TAHAP SIMULASI PADA *SOFTWARE* ANSYS WORKBENCH 19.2



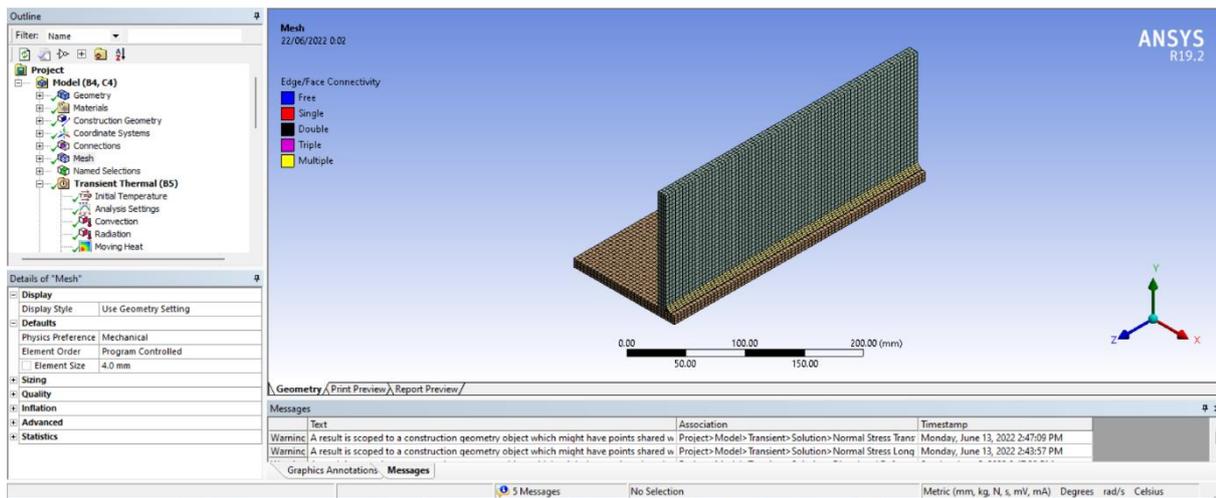
Gambar A.1 Penyusunan cabang pada ANSYS Workbench 19.2



Gambar A.2 Data sifat material pada bagian *engineering data*

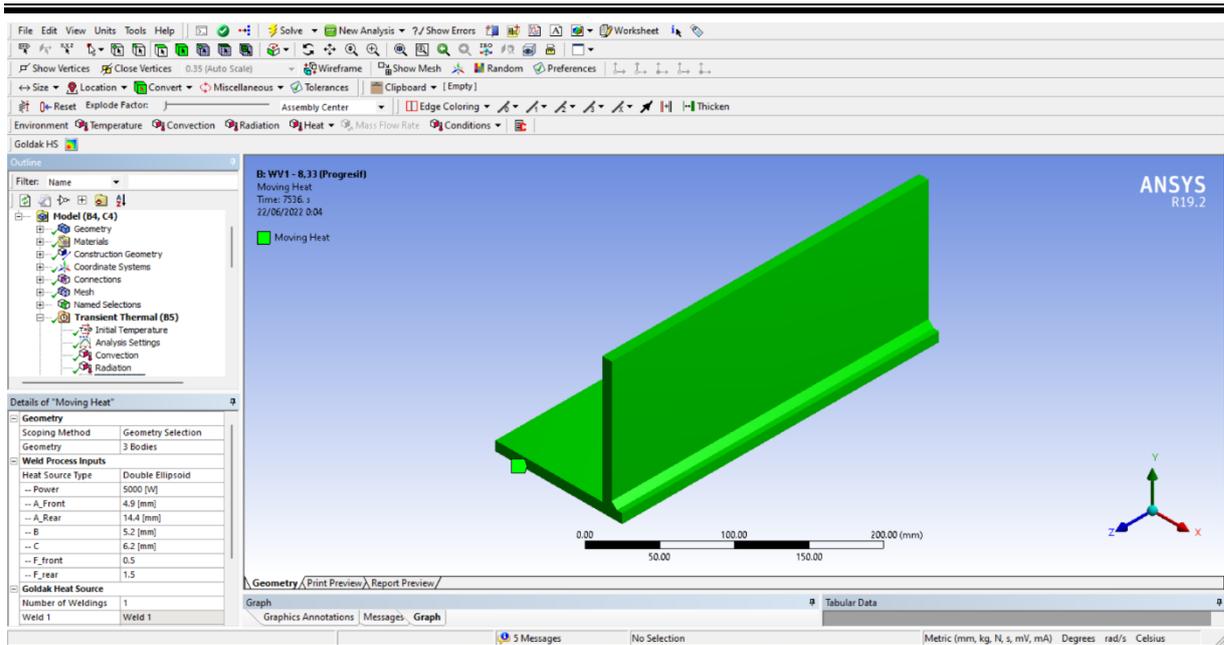


Gambar A.3 Pembuatan geometri sambungan-T pada SpaceClaim

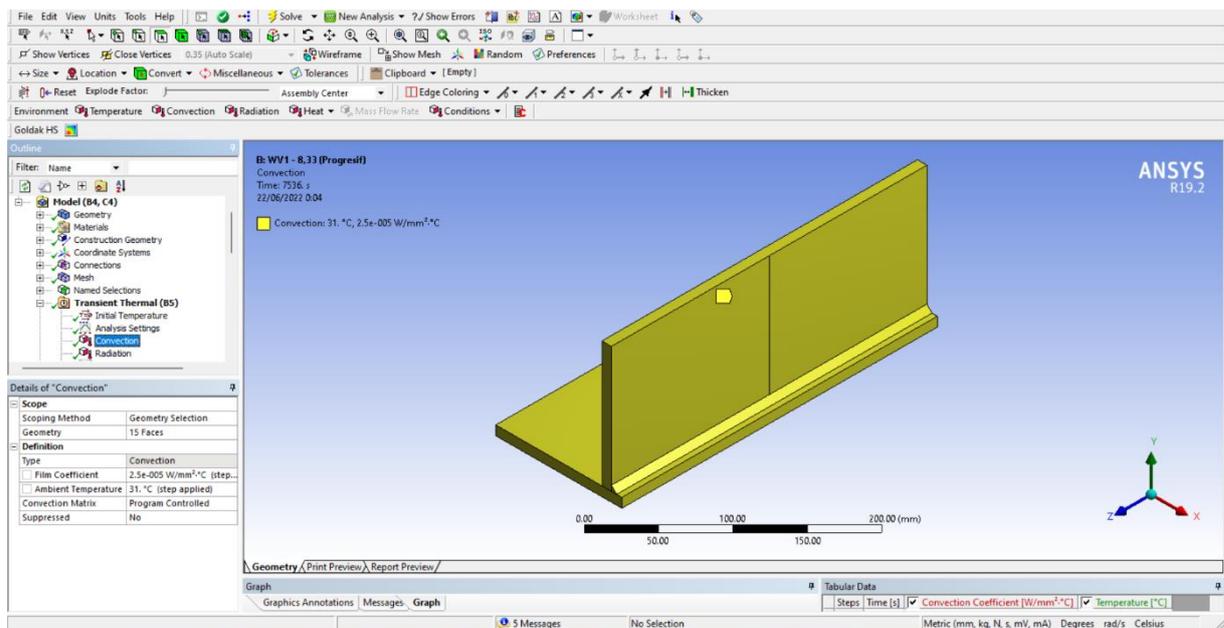


Gambar A.4 Pembuatan *mesh* pada geometri pengelasan

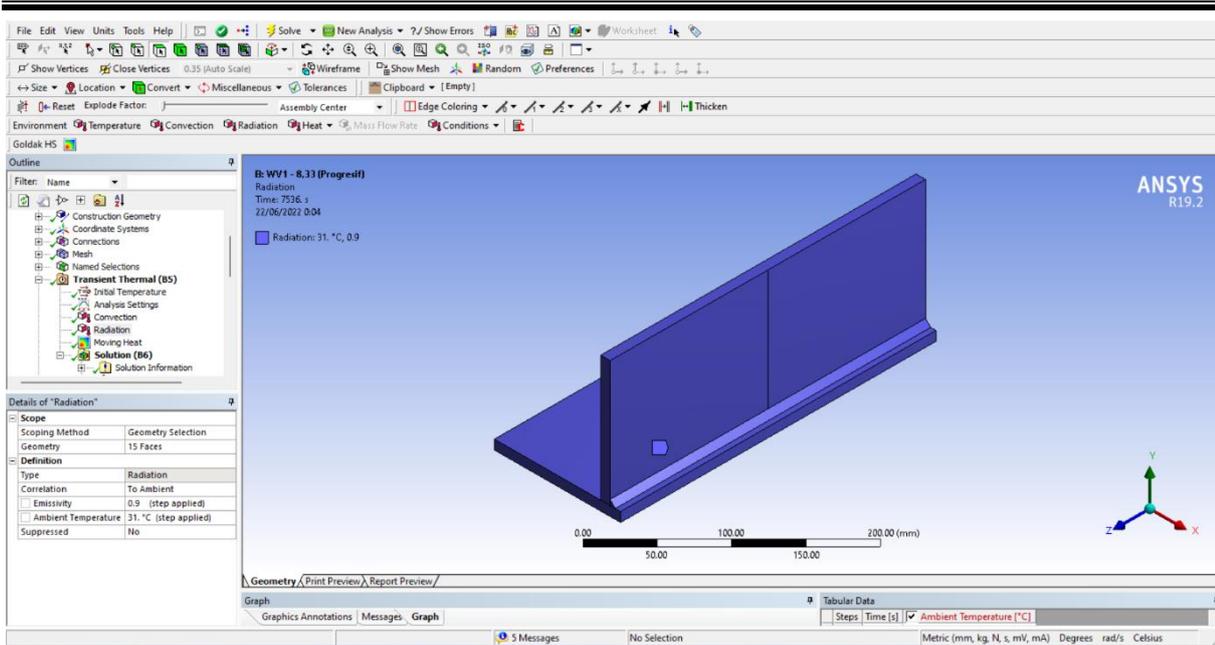
LAPORAN TUGAS AKHIR TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI



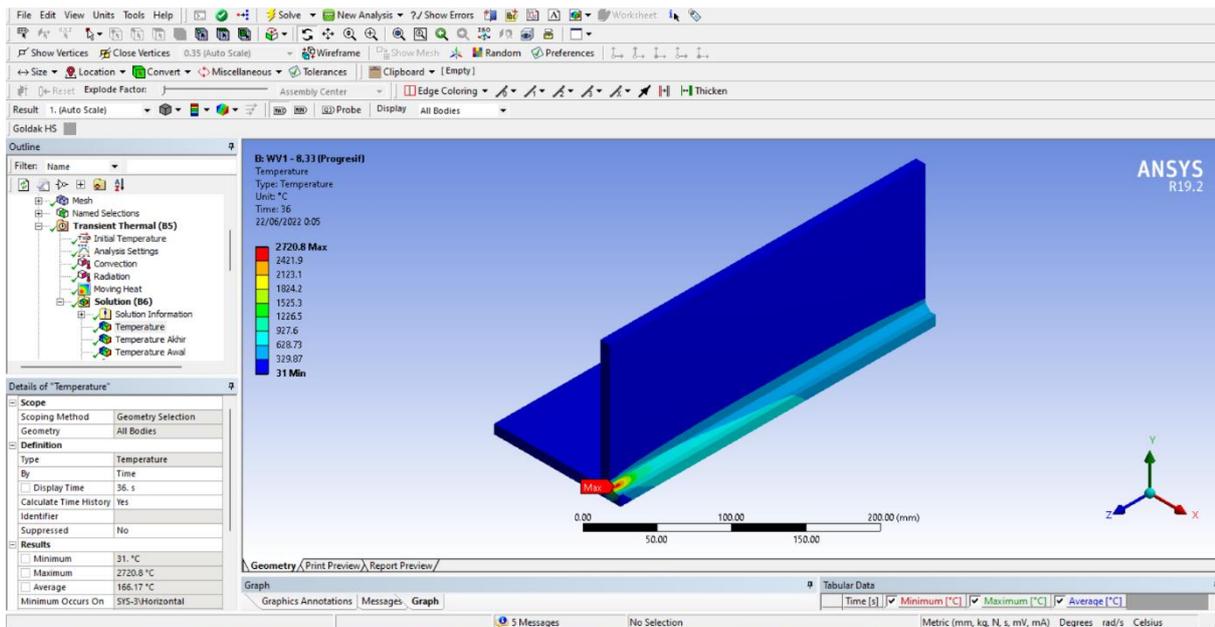
Gambar A.5 Pemberian beban *moving heat flux* menggunakan Goldak ACT



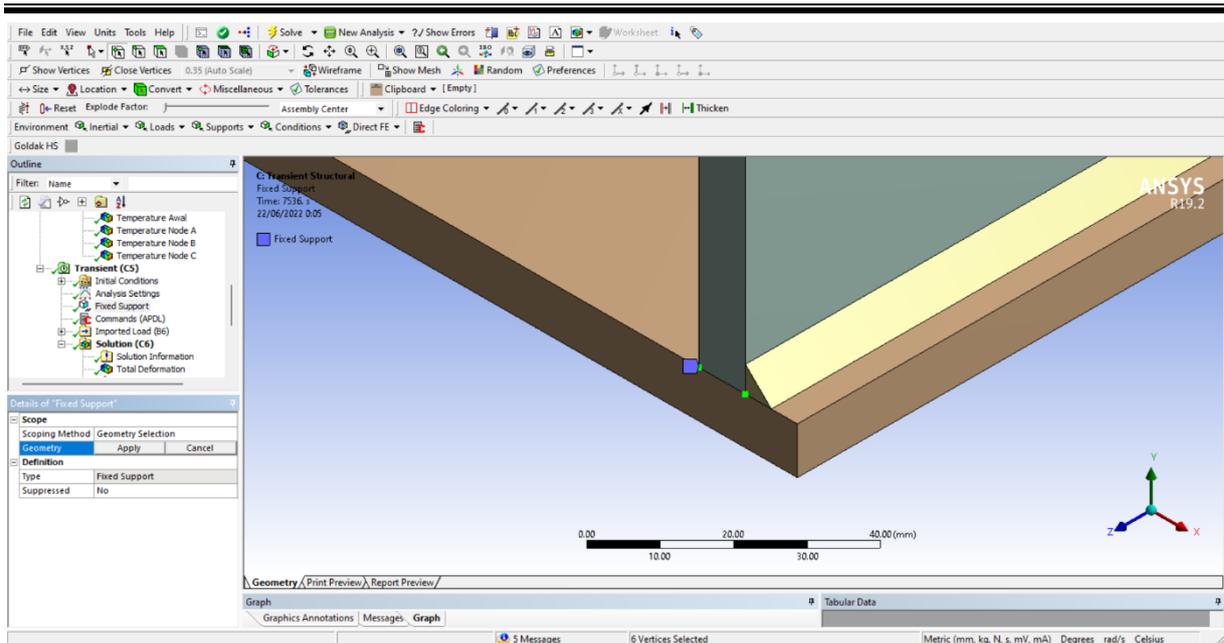
Gambar A.6 Pemberian kondisi batas konveksi pada permukaan geometri



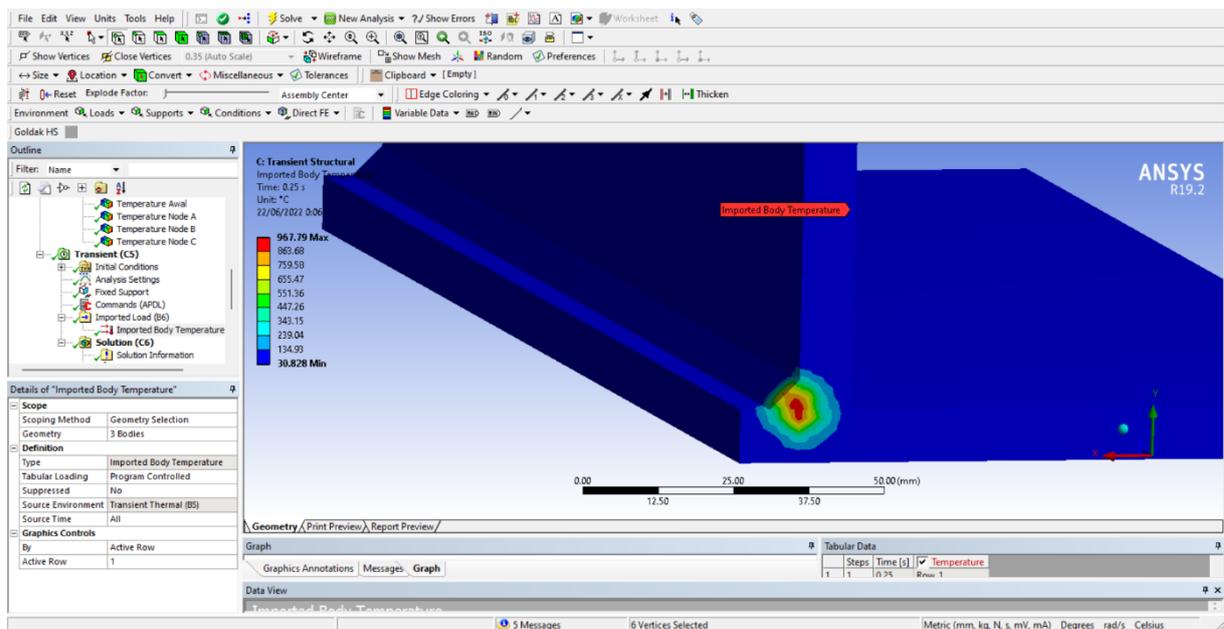
Gambar A.7 Pemberian kondisi batas radiasi pada permukaan geometri



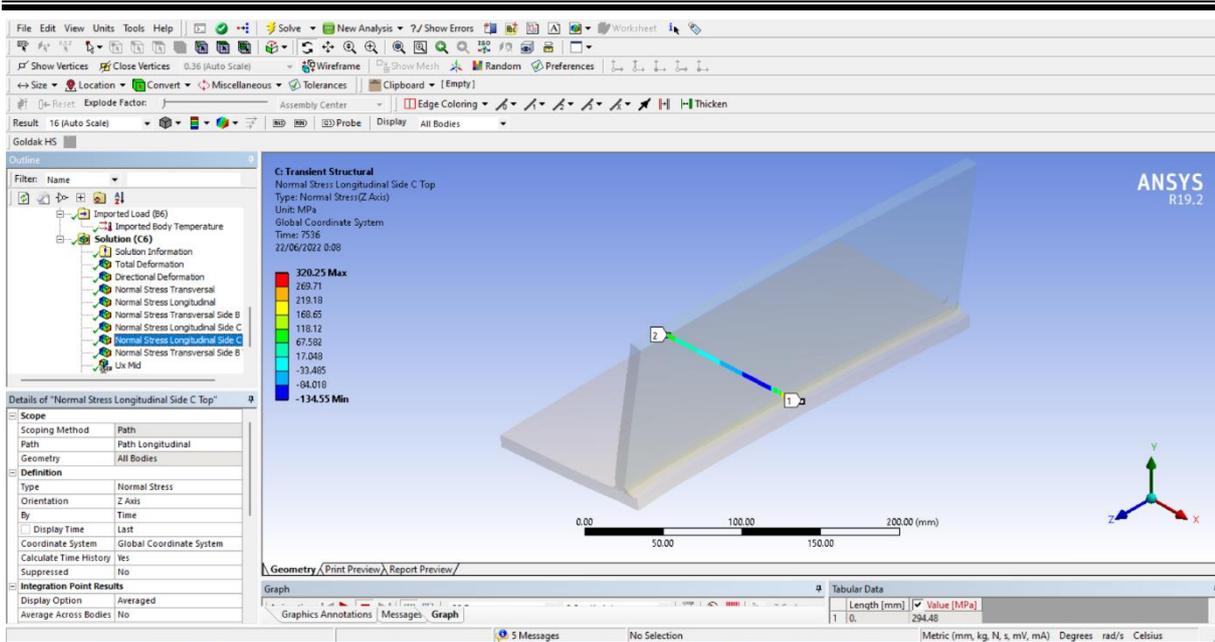
Gambar A.8 Hasil simulasi termal berupa *temperature*



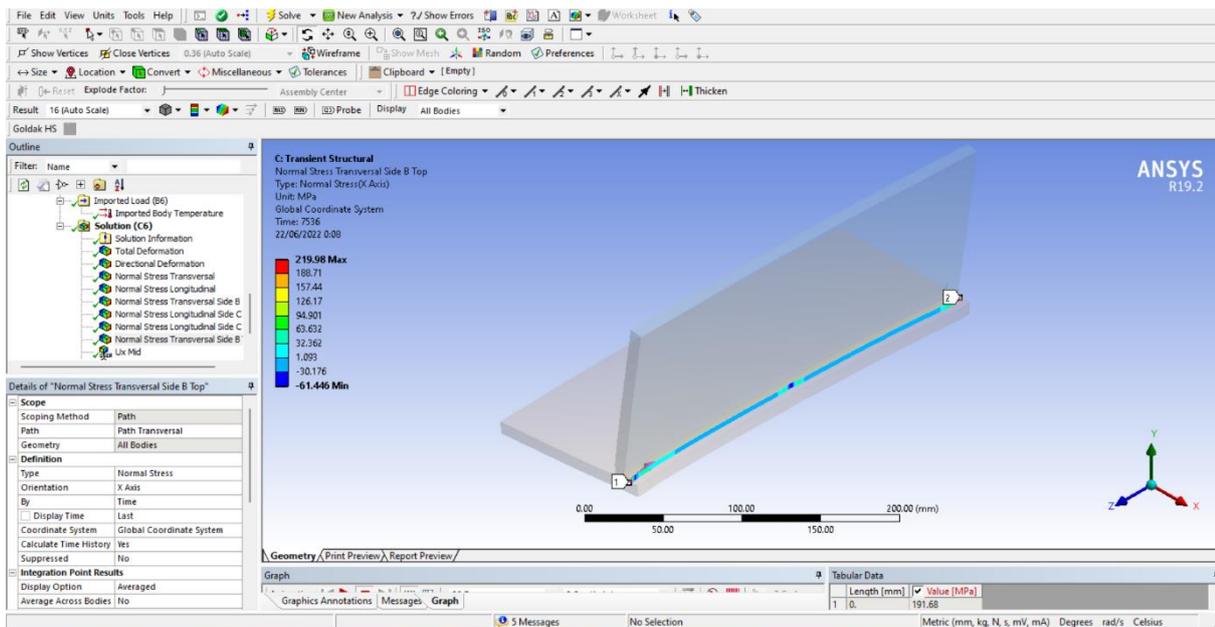
Gambar A.9 Kondisi batas *fixed support* untuk simulasi structural



Gambar A.10 Memasukkan beban termal pada simulasi struktural

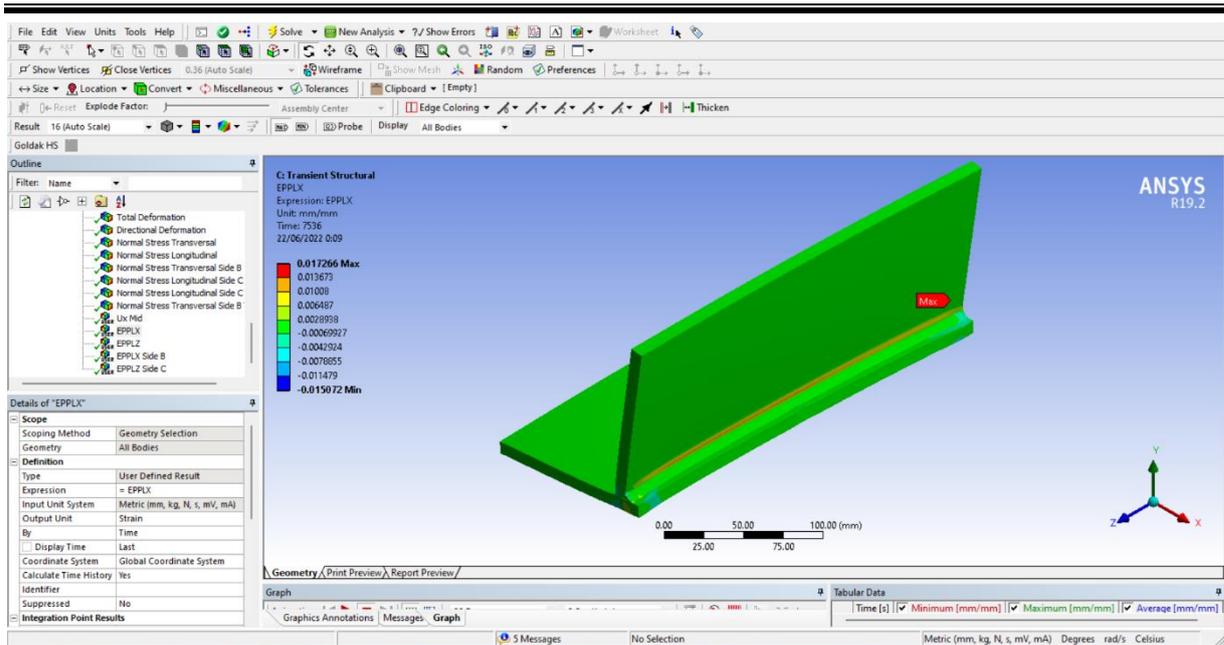


Gambar A.11 Distribusi tegangan longitudinal menggunakan *normal stress* pada *path* searah sumbu-z

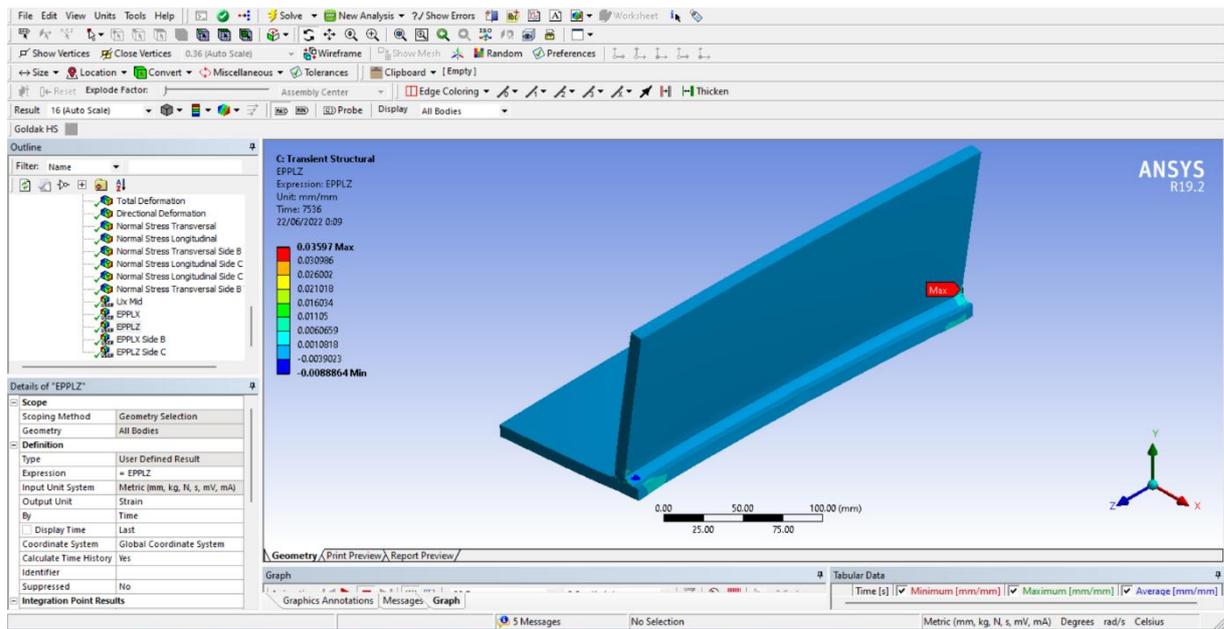


Gambar A.12 Distribusi tegangan transversal menggunakan *normal stress* pada *path* searah sumbu-x

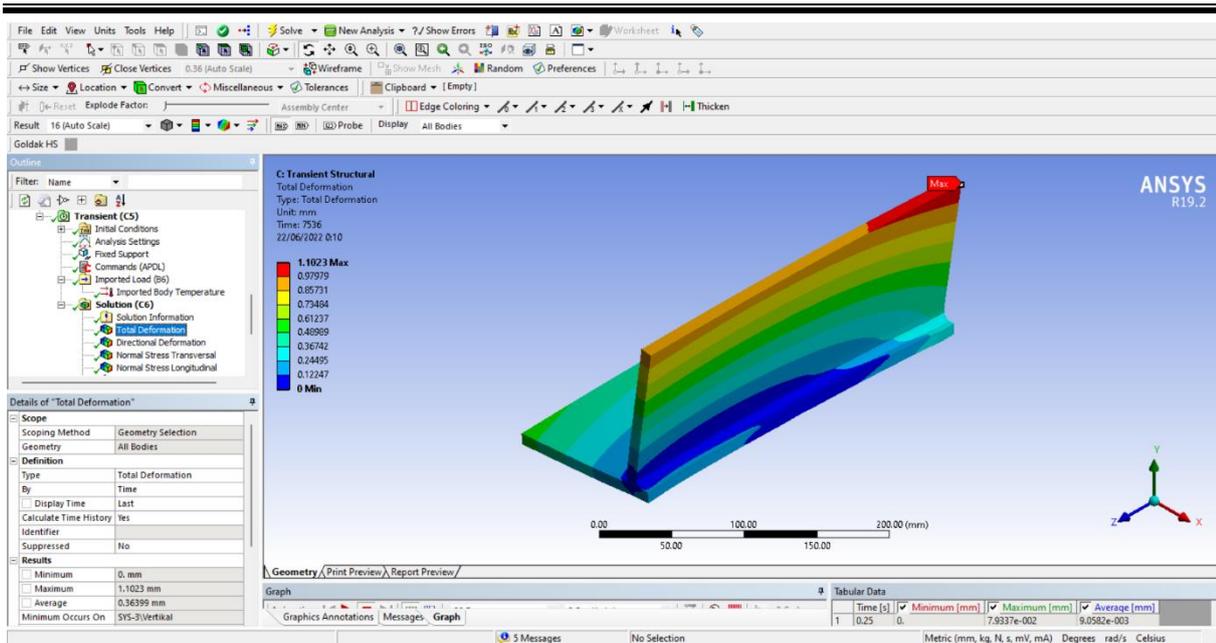
LAPORAN TUGAS AKHIR TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI



Gambar A.13 Regangan plastis transversal menggunakan *user defined result* EPPLX



Gambar A.14 Regangan plastis longitudinal menggunakan *user defined result* EPPLZ



Gambar A.15 Hasil deformasi menggunakan *total deformation*

LAMPIRAN B
DOKUMENTASI PENGELASAN EKSPERIMENTAL



Gambar B.1 Proses pengelasan sambungan T



Gambar B.2 Hasil deformasi pada pengelasan eksperimen

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN C

PERBANDINGAN METODE SIMULASI MENGGUNAKAN BEBAN *HEAT FLUX* DAN GOLDAK *EQUATION*

Dalam melakukan simulasi pengelasan terdapat dua metode yang dapat digunakan, yaitu menggunakan pembebanan *heat flux* pada *weld bead* dan menggunakan pembebanan *heat flux* dengan metode Goldak *equation*. Kedua metode ini memiliki perumusan nilai *heat flux* yang berbeda. Untuk Goldak *equation* menggunakan persamaan seperti pada persamaan (2.2) – (2.6). Sedangkan untuk metode pembebanan *heat flux* menggunakan persamaan sebagai berikut. Untuk *heat flux* yang dihasilkan elektroda (q_e) didapatkan melalui perhitungan berikut.

$$q_e = \frac{H_{net}}{A_e} = \frac{\eta \cdot E \cdot I}{\pi \cdot r_e^2}$$

Dimana,

- η : efisiensi busur las;
- E : potensial listrik, volt;
- I : arus listrik, ampere;
- A_e : luas permukaan ujung elektroda, mm²;
- r_e : jari-jari elektroda, mm.

Lalu, untuk nilai luas *flux* yang dihasilkan elektroda (A_f) didapatkan dari rumusan berikut.

$$A_f = b \cdot v \cdot t$$

Dimana,

- b : panjang kaki las, mm;
- v : kecepatan pengelasan, mm/s;
- t : waktu yang diperlukan untuk satu elemen, s.

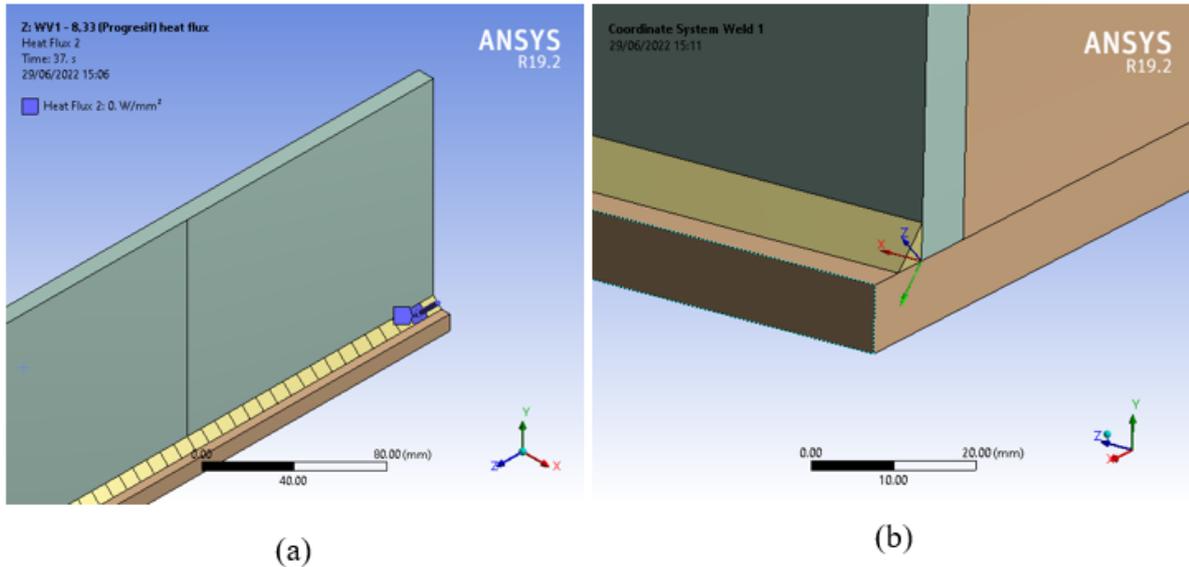
Dan berikut adalah rumus untuk mendapatkan nilai *heat flux* sebagai beban thermal ketika simulasi pengelasan dilakukan.

$$q_1 = q_e \frac{A_1}{A_f}$$

Dimana,

- q_1 : *heat flux* pada elemen, W/mm²;
- q_e : *heat flux* yang dihasilkan electrode, W/mm²;
- A_1 : luas permukaan elemen, mm²;
- A_f : luas *flux* yang dihasilkan elektroda, mm².

Nilai q_1 digunakan sebagai beban *heat flux* pada ANSYS Workbench. Perbedaan dari metode *heat flux* dengan Goldak adalah metode *heat flux* menggunakan pembebanan pada permukaan *weld bead*, sedangkan pada Goldak pembebanan menggunakan sistem koordinat yang sudah ditentukan sesuai posisi awal pengelasan yang memiliki kemiringan 45° dan bersifat volumetrik sehingga panas yang diterima oleh material terdistribusi ke arah sumbu x, y, dan z. Perbedaan pembebanan kedua metode dapat dilihat pada **Gambar C.1** berikut.



Gambar C.1 Pembebanan termal dengan metode (a) *heat flux* dan (b) Goldak

Berikut merupakan perbandingan dari hasil data *best practice* dengan data simulasi *heat flux* dan Goldak. Data temperatur puncak pada *node 1* dan *node 2* atau pada pelat posisi awal las dan akhir las, lalu deformasi simpangan maksimum pada bagian tengah pelat vertikal, serta nilai tegangan sisa longitudinal dan transversal maksimum dibandingkan dengan data *best practice* seperti pada **Tabel C.1**, **Tabel C.2**, dan **Tabel C.3**.

Tabel C.1 Perbandingan hasil simulasi Goldak dengan *heat flux* terhadap nilai temperatur

Titik	Temperatur Puncak (°C)			Error (%)	
	<i>Best Practice</i>	Simulasi Goldak	Simulasi <i>heat flux</i>	Goldak	<i>Heat Flux</i>
Nodal 1	206	214	182	4%	11,6%
Nodal 2	186	186	154	0%	17%

Tabel C.2 Perbandingan hasil simulasi Goldak dengan *heat flux* terhadap besar simpangan maksimum

Bagian	Simpangan Maksimum (mm)			Error (%)	
	<i>Best Practice</i>	Simulasi Goldak	Simulasi <i>heat flux</i>	Goldak	<i>Heat Flux</i>
Tengah Pelat Vertikal	1,1	0,9	1,79	17%	63%

Tabel C.3 Perbandingan hasil simulasi Goldak dengan *heat flux* terhadap besar tegangan sisa maksimum

Hasil	Tegangan Maksimum (MPa)		Error (%)
	Longitudinal	Transversal	
<i>Best Practice</i>	296	260	-
Simulasi Goldak	275	273	6%
Simulasi <i>heat flux</i>	275	273	6%

Dapat dilihat pada **Tabel C.1** dan **Tabel C.2** hasil dari simulasi dengan pembebanan *heat flux* memiliki error yang lebih besar jika dibandingkan dengan hasil dari data *best practice*, namun untuk nilai tegangan sisa memiliki error yang sama. Dapat disimpulkan bahwa simulasi dengan metode pembebanan Goldak *equation* lebih tepat untuk digunakan karena memiliki error yang kecil dengan data *best practice*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN D
DATA TRUE STRESS-PLASTIC STRAIN SS400

Data *true stress-plastic strain* didapat dari grafik berdasarkan penelitian oleh (Nguyen & Lee, 2014) mengenai sifat plastisitas material SS400 akibat beban siklik untuk mendapatkan nilai *true stress* dan *plastic strain*. Data tersebut digunakan untuk mendapatkan nilai tegangan sisa pada ANSYS dengan cara menginterpolasi nilai regangan plastis pada ANSYS ke data *true stress-plastic strain*. Rumus menggunakan interpolasi nonlinear dengan standar deviasi sebesar 0,998 sebagai berikut.

$$y = 275 + -1207x + 183.185x^2 + -3,35E+06x^3 + 2,71E+07x^4 + -1,04E+08x^5 + 1,55E+08x^6$$

Dimana, x merupakan nilai regangan plastis dari ANSYS dan y merupakan nilai tegangan sisa yang didapatkan. Data *true stress-plastic strain* yang digunakan seperti pada **Tabel D.1** berikut.

Tabel D.1 Data 1 *true stress-plastic strain*

<i>True Stress (MPa)</i>	<i>Plastic Strain (mm/mm)</i>
289	0
289	0,005037
289	0,01037
289	0,017037
289	0,018037
289,22	0,019037
301,53	0,021001
318,88	0,025159
335,1	0,029549
348,53	0,033593
363,08	0,038214
376,51	0,042604
385,46	0,046186
393,86	0,049999
406,17	0,05543
418,48	0,062132
425,19	0,067217
434,7	0,073111
442,54	0,079005
449,81	0,085477
453,17	0,091602
458,76	0,095647
462,68	0,101888
465,48	0,106511
468,84	0,112868
471,63	0,117954
474,43	0,122693
476,11	0,125004
476,67	0,128934
476,67	0,132402
477,23	0,136563
479,47	0,141995

Tabel D.2 Data 2 *true stress-plastic strain*

<i>True Stress (MPa)</i>	<i>Plastic Strain (mm/mm)</i>
482,82	0,146271
482,27	0,152745
483,38	0,157483
485,62	0,164765
486,74	0,172972
487,86	0,177133
488,42	0,182912
488,42	0,187767
487,86	0,192506
488,42	0,195974
488,42	0,198864

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan dukungan dari berbagai pihak maka, Laporan Tugas Akhir ini tidak dapat terselesaikan dengan baik dan tepat waktu. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada orang-orang yang telah berperan penting dan membantu dalam proses ini. Diantaranya adalah:

1. Bapak Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing pertama yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu kepada penulis dalam pengerjaan penelitian Tugas Akhir.
2. Bapak Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing kedua yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu kepada penulis dalam pengerjaan penelitian Tugas Akhir.
3. Kedua orangtua penulis Bapak Ferdy Fristyansjah dan Ibu Nancy Yuliana Lantu, kakak penulis Priscilla Febriana Yasmin, adik penulis Shayna Almaghira serta keluarga besar yang telah memberikan doa, motivasi, dan dukungan kepada penulis selama pengerjaan Tugas Akhir hingga dapat terselesaikan.
4. Mas Rino Ivanka dan Mas Arsyad yang banyak membantu, memberikan nasihat dan dukungan selama pengerjaan laporan ini.
5. Bapak Nadhif Rahmawan selaku pembimbing lapangan yang banyak membantu, memberikan nasihat dan dukungan selama pengerjaan penelitian ini.
6. Seluruh member *Manufacturing Engineering* PT.X yang banyak membantu, memberikan nasihat dan dukungan selama pengerjaan laporan ini.
7. Ario Bhismo Nugroho sebagai partner pengerjaan Tugas Akhir penulis.
8. Teman-teman angkatan 2018 (MT 20) yang selalu memberikan dukungan kepada penulis.
9. Semua pihak yang telah berkontribusi dalam Tugas Akhir yang tidak bisa penulis sebutkan satu per satu.

Akhir kata, semoga seluruh kebaikan yang telah diberikan semua pihak yang telah penulis sebutkan mendapatkan balasan yang berlimpah dari Allah SWT. Penulis berharap Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi penulis dan semua pihak.

Surabaya, 5 Juli 2022
Penulis

Sulthan Naufal Atharif

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis memiliki nama lengkap Sulthan Naufal Atharif dilahirkan di Jakarta pada 30 Juni 2000 dari orang tua bernama bapak Ferdy Fristyansjah dan ibu Nancy Yuliana Lantu. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara. Pendidikan formal penulis ditempuh mulai dari SDN 06 Pejaten Barat, SMPN 19 Jakarta, SMAN 28 Jakarta dan terakhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTIRS – ITS.

Penulis pernah mengikuti kegiatan kerja praktik di Divisi Engineering PT. Astra Honda Motor. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif di beberapa kegiatan intra dan ekstra kampus. Penulis pernah menjabat sebagai Kepala Biro Hubungan Industri di Himpunan Mahasiswa Teknik Material & Metalurgi (HMMT) FTIRS-ITS dan staf Human Resource Development National Association of Corrosion Engineer (NACE) ITS. Dalam kegiatan *event*, penulis pernah menjadi bagian dalam event ITS OPEN 2019 sebagai staf logistik dan sebagai Lead Organizer & Licensee dalam TEDxITS 2021.

Beragam kegiatan penulis ikuti selama menjadi mahasiswa senantiasa memberikan sumbangsih yang besar dalam mengasah kemampuan *hardskill*, *softskill* dan jejaring yang dibutuhkan dalam kehidupan.

Pertanyaan, kritikan, dan masukan terhadap penelitian Tugas Akhir penulis dapat dilayangkan melalui alamat yang tertera. Terima kasih.

Nomor HP : 081291158627
E-mail : naufalatharif@gmail.com