

TUGAS AKHIR - TL 184834

ANALISIS NUMERIK PENGARUH ARUS DAN KECEPATAN LAS TERHADAP DEFORMASI DAN TEGANGAN SISA SAMBUNGAN T SS400 DI APLIKASI *BOOM* ESKKAVATOR

ARIO BHISMO NUGROHO
NRP. 02511840000124

Dosen Pembimbing
Mas Irfan P. Hidayat, S.T.,M.Sc.,Ph.D.
NIP. 197610272004121001
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-TL 184834

ANALISIS NUMERIK PENGARUH ARUS DAN KECEPATAN LAS TERHADAP DEFORMASI DAN TEGANGAN SISA SAMBUNGAN T SS400 DI APLIKASI BOOM EKSRAVATOR

ARIO BHISMO NUGROHO
NRP. 02511840000124

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-TL 184834

NUMERICAL ANALYSIS THE EFFECT OF CURRENT AND WELDING SPEED ON DEFORMATION AND RESIDUAL STRESS T-JOINT SS400 IN EXCAVATOR BOOM APPLICATIONS

ARIO BHISMO NUGROHO
NRP. 02511840000124

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 left blank)

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS NUMERIK PENGARUH ARUS DAN KECEPATAN LAS TERHADAP DEFORMASI DAN TEGANGAN SISA 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 : **ARIO BHISMO NUGROHO**
NRP. 02511840000124

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 CURRENT, AND WELDING SPEED
ON DEFORMATION AND RESIDUAL STRESS T-JOINT SS400 IN EXCAVATOR
BOOM APPLICATIONS**

FINAL PROJECT

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

By : **ARIO BHISMO NUGROHO**
NRP. 02511840000124

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

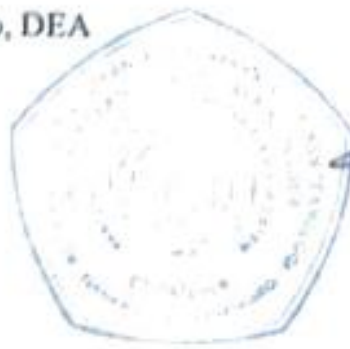


Examiner

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 : Ario Bhismo Nugroho/0251184000124
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 Arus, dan Kecepatan Las Terhadap Deformasi dan Tegangan Sisa 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


(Ario Bhismo Nugroho)
NRP. 0251184000124

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:


Name of student/NRP : Ario Bhisno Nugroho/0251184000124
Departement : Materials 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 Current and Welding Speed on Deformation and Residual Stress T-Joint SS400 in Excavator Boom Applications" 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, 5th July 2022

Acknowledged
Advisor



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

Student



(Ario Bhisno Nugroho)
NRP.0251184000124

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

ANALISIS NUMERIK PENGARUH ARUS DAN KECEPATAN LAS TERHADAP DEFORMASI DAN TEGANGAN SISA SAMBUNGAN T SS400 DI APLIKASI BOOM EKSKAVATOR

Nama Mahasiswa/NRP : Ario Bhisno Nugroho/02511840000124

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

Pengelasan merupakan proses yang digunakan untuk membuat ekskavator bagian boom. Deformasi dan tegangan sisa merupakan peristiwa yang terjadi akibat adanya pengelasan. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisa pengaruh arus dan kecepatan las pada deformasi dan tegangan sisa menggunakan metode elemen hingga. Semakin besar heat input, menghasilkan beban yang besar pada logam dasar. Dilakukan variasi parameter pengelasan dengan menggunakan 8 variasi heat input dengan memvariasikan nilai arus sebesar 23 A, 24 A, 25 A, dan 27 A dan juga kecepatan las sebesar 8,33 mm/s dan 5 mm/s. Dianalisa parameter mana yang menghasilkan deformasi dan tegangan sisa paling kecil. 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 variasi dengan nilai heat input sebesar 1080 J/mm dengan nilai 3438,3°C, dan nilai temperatur puncak terendah dimiliki oleh variasi dengan nilai heat input sebesar 552 J/mm dengan nilai 2504,7°C. Untuk nilai tegangan sisa transversal terbesar dimiliki oleh variasi heat input 1080 J/mm dengan nilai 372,169 MPa dan nilai tegangan transversal terkecil dimiliki oleh variasi heat input 552 J/mm dengan nilai 343,044 MPa. Untuk nilai tegangan sisa longitudinal terbesar dimiliki oleh variasi heat input 1080 J/mm dengan nilai 316,93 MPa, dan nilai tegangan sisa longitudinal terkecil dimiliki oleh variasi heat input 552 J/mm dengan nilai 284,93 MPa. Deformasi secara angular pada plat vertikal terkecil didapat pada variasi HI 1 dengan nilai heat input 552 J/mm sebesar 0,8 mm dan derajat simpangan sebesar 52,92°. Untuk deformasi angular terbesar pada plat vertikal didapat pada pengelasan dengan variasi HI 8 dengan nilai heat input 1080 J/mm sebesar 1,34 mm dan derajat simpangan sebesar 93,96°. Selanjutnya untuk deformasi secara angular pada plat horizontal terkecil didapat pada variasi HI 1 dengan nilai heat input 552 J/mm sebesar -0,55 mm dan derajat simpangan sebesar -31,36°. Untuk deformasi angular tertinggi pada plat horizontal didapat pada pengelasan dengan variasi HI 8 dengan nilai heat input 1080 J/mm sebesar -0,39 mm dan derajat simpangan sebesar -22,24°. Diketahui bahwa semakin besar arus, maka menghasilkan deformasi dan tegangan sisa yang juga semakin besar. Sedangkan semakin cepat kecepatan las, maka deformasi dan tegangan sisa yang dihasilkan semakin kecil. Parameter optimum dengan deformasi dan tegangan sisa terkecil pada kecepatan 8,33 mm/s adalah HI 1, dan HI 5 pada kecepatan 5 mm/s.

Kata Kunci : Ekskavator, Metode Elemen Hingga, Tegangan Sisa, Deformasi, Arus, Kecepatan las

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

NUMERICAL ANALYSIS THE EFFECT OF CURRENT, AND WELDING SPEED ON DEFORMATION AND RESIDUAL STRESS T-JOINT SS400 IN EXCAVATOR BOOM APPLICATIONS

Student Name/NRP : Ario Bhismo Nugroho/02511840000124
Departement : Material and Metallurgical Engineering ITS
Advisor : Mas Irfan P. Hidayat, S.T.,M.Sc.,Ph.D.
Co-Advisor : Budi Agung Kurniawan S.T., M.Sc.

ABSTRACT

Excavators are heavy equipment that is widely used for various activities such as mining and construction. Welding is a process used to make excavator boom parts. Deformation and residual stress are events that occur due to welding. This research was conducted to analyze the effect of current and welding speed on deformation and residual stress using the finite element method. The greater the heat input, the greater the load on the base metal. Prior to the experimental variation using the ANSYS application, a model verification was carried out on the research results from PT.X. variation of heat input by varying the current value of 23 A, 24 A, 25 A, and 27 A and also welding speed of 8.33 mm/s and 5 mm/s. Then analyzed which parameters produce the smallest deformation and residual stress. 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 variations with a heat input value of 1080 J/mm with a value of 3438.3°C, and the lowest peak temperature value was owned by variations with a heat input value of 552 J/mm with a value of 2504.7°C. For the largest transversal residual stress value is the heat input variation of 1080 J/mm with a value of 372.1691 MPa and the smallest transversal stress value is owned by the heat input variation of 552 J/mm with a value of 343.044 MPa. The largest longitudinal residual stress value is the heat input variation of 1080 J/mm with a value of 316.93 MPa, and the smallest longitudinal residual stress value is owned by the heat input variation of 552 J/mm with a value of 284.93 MPa. The smallest angular deformation of the vertical plate is obtained in the variation of HI 1 with a heat input value of 552 J/mm of 0.8 mm and a degree of deformation of 52.92° for the highest angular deformation of the vertical plate, it was obtained in welding with variations of HI 8 with a heat input value of 1080 J/mm of 1.34 mm and a degree of deformation of 93.96°. Furthermore, for the smallest angular deformation of the horizontal plate, the variation of HI 1 is obtained with a heat input value of 552 J/mm of -0.55 mm and a degree of deformation of -31.36°. For the highest angular deformation on the horizontal plate obtained in welding with variations HI 8 with a heat input value of 1080 J/mm of -0.39 mm and a degree of deformation of -22.24°. The higher the current, the greater the heat input and the larger the deformation and residual stress. Meanwhile, the faster the welding speed, the smaller the deformation and the smaller the residual stress. Optimum parameter with lowest deformation and residual stress for 8,33 mm/s welding speed is HI 1, and HI 5 for 5 mm/s welding speed.

Keyword: Excavator, Finite Element Method, Residual Stress, Current, Welding Speed

(This page is intentionally left blank)

KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nyasehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian tugas akhir yang berjudul “**Analisis Numerik Pengaruh Arus dan Kecepatan Las 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., P. hD selaku Kepala Departemen Teknik Material dan Metalurgi, FTIRS, ITS.
2. Bapak Mas Irfan P. Hidayat, 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 selaku dosen wali kelas yang telah membimbing dan memberikan banyak saran terkait perkuliahan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember
5. Bapak Nadhif Rahmawan. selaku dosen 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 2021
Penulis

Ario Bhisno Nugroho

(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 Tujuan	1
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Manfaat Penelitian	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Pengelasan	3
2.2 Pengelasan GMAW	3
2.3 Parameter Pengelasan	5
2.4.1 Arus Pengelasan	5
2.4.2 Voltase.....	6
2.4.3 <i>Travel Speed</i> (Kecepatan Las).....	6
2.4 <i>Heat Input</i>	7
2.5 Perpindahan Panas	8
2.5.1 Konduksi	8
2.5.2 Konveksi.....	10
2.5.3 Radiasi	10
2.6 Siklus Termal Pengelasan.....	11
2.7.1 Logam Lasan	11
2.7.2 <i>Heat-Affected Zone (HAZ)</i>	11
2.7.3 Logam Induk	12
2.7 Deformasi Pengelasan	13
2.8 Tegangan Sisa Pada Pengelasan	15
2.9 Ekskavator	18
2.10 Metode Elemen Hingga	19
2.11 Penelitian Sebelumnya.....	20
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	27
3.1. Diagram Alir.....	27
3.2. Alat Penelitian	29
3.3. Material Pengelasan dan Parameter Pengelasan.....	30
3.3.1. JIS G3101-SS400	30
3.3.2. Prosedur dan Parameter Pengelasan.....	31
3.4. Metode Penelitian	32
3.4.1. Pemodelan Spesimen 3D.....	32
3.4.2. Memasukkan Data Material	33
3.4.3. <i>Meshing</i>	33
3.4.4. <i>Meshing Sensitivity Analysis</i>	34
3.4.5. Melakukan Pemodelan Analisis Termal.....	34
3.4.6. Melakukan Pemodelan Analisis Struktural	34
3.4.7. Variasi Simulasi	34
3.5. Rancangan Penelitian.....	34
3.6. Jadwal Penelitian	35

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	37
4.1 <i>Meshing Sensitivity Analysis</i>	37
4.2 Simulasi Pembebanan Termal	39
4.1.1 Hasil Distribusi Temperatur	40
4.3 Simulasi Pembebanan Struktur.....	46
4.2.1 Hasil Tegangan Sisa	47
4.2.2 Hasil Deformasi.....	54
4.4 Pembahasan	58
4.4.1. Analisa Temperatur.....	58
4.4.2. Analisa Tegangan Sisa	59
4.4.3. Analisa Deformasi.....	60
4.4.4. Pengaruh Arus dan Kecepatan Las	60
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	63
5.1 Kesimpulan	63
5.2 Saran	64
DAFTAR PUSTAKA	xxv
LAMPIRAN A	xxix
LAMPIRAN B	xxxvii
LAMPIRAN C	xxxix
LAMPIRAN D	xliii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	xliv
BIODATA PENULIS	xlvii

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Skema proses pengelasan GMAW. (Naidu,2003)	3
Gambar 2. 2 Skema Penyusunan Alat GMAW. (Naidu, 2003)	4
Gambar 2. 3 Tipe busur berdasarkan kondisi heat input.(Weman, n.d.)	4
Gambar 2. 4 Pengaruh Arus terhadap tegangan sisa pada stainless steel dan carbon steel.(Ranjbarnodeh et al., 2011).....	6
Gambar 2. 5 Sumber panas Goldak double ellipsoidal. (Kiran, 2022).....	7
Gambar 2. 6 Skema perpindahan panas pada las busur (Ghosh,2012).....	9
Gambar 2. 7 Arah Pengelasan.....	9
Gambar 2. 8 Pendinginan Fluida oleh Konveksi.(Pentenrieder, 2005)	10
Gambar 2. 9 Siklus Termal Las (Subeki, 2009).	11
Gambar 2. 10 Daerah bagian sambungan las.(Siswanto, 2018)	11
Gambar 2. 11 Daerah pada lasan dengan baja komposisi karbon 1.5%.(Cross & Kohn, 2018) .	12
Gambar 2. 12 Tipe Deformasi (Lundback, 2003).....	14
Gambar 2. 13 Proses terjadinya tegangan sisa.....	15
Gambar 2. 14 Skema X-Ray Cos untuk Residual Stress. (Lin et al., 2017)	17
Gambar 2. 15 Grafik tegangan sisa pada pelat 10 mm SS400.....	18
Gambar 2. 16 Komponen pada ekskavator hidrolik	18
Gambar 2. 17 Boom PCXX	19
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian.....	27
Gambar 3. 2 Diagram Alir Pembebanan Termal	28
Gambar 3. 3 Diagram Alir Pembebanan Struktural.....	29
Gambar 3. 4 Desain Sambungan Pengelasan.....	31
Gambar 3. 5 Dimensi spesimen boom ekskavator.....	33
Gambar 4. 1 Hasil dari meshing 5 mm.....	37
Gambar 4. 2 Hasil dari meshing 4 mm	38
Gambar 4. 3 Hasil dari meshing 3,5 mm	38
Gambar 4. 4 Grafik Mesh Konvergensi terhadap temperatur global maksimum.....	39
Gambar 4. 5 (a) nodal 1 ujung awal pengelasan, (b) nodal 2 ujung akhir pengelasan	41
Gambar 4. 6 Nodal siklus termal yang berjarak 150 mm dari tepi.	42
Gambar 4. 7 Siklus termal pengelasan pada titik nodal A.....	42
Gambar 4. 8 Siklus termal pengelasan pada titik nodal B.	42
Gambar 4. 9 Siklus termal pengelasan pada titik nodal C	43
Gambar 4. 10 Temperatur tertinggi pada pengelasan HI 1 didapat pada detik ke-36.	43
Gambar 4. 11 Temperatur tertinggi pada pengelasan HI 2 didapat pada detik ke-36	44
Gambar 4. 12 Temperatur tertinggi pada pengelasan HI 3 didapat pada detik ke-36.	44
Gambar 4. 13 Temperatur tertinggi pada pengelasan HI 4 didapat pada detik ke-36.	44
Gambar 4. 14 Temperatur tertinggi pada pengelasan HI 5 didapat pada detik ke-60	45
Gambar 4. 15 Temperatur tertinggi pada pengelasan HI 6 didapat pada detik ke-60	45
Gambar 4. 16 Temperatur tertinggi pada pengelasan HI 7 didapat pada detik ke-60	45
Gambar 4. 17 Temperatur tertinggi pada pengelasan HI 8 didapat pada detik ke-60	46
Gambar 4. 18 Posisi fixed support pada analisis struktur.....	47
Gambar 4. 19 (a) Pengukuran tegangan longitudinal, (b) tegangan transversal untuk verifikasi model.....	48
Gambar 4. 20 (a) Pengukuran tegangan transversal, (b) tegangan longitudinal.....	49
Gambar 4. 21 Distribusi tegangan transversal arah sumbu-z.	49
Gambar 4. 22 Distribusi tegangan longitudinal arah sumbu-x.	50

Gambar 4. 23 Nilai regangan plastis setelah proses pengelasan pada variasi HI 1	50
Gambar 4. 24 Nilai regangan plastis setelah proses pengelasan pada variasi HI 2	51
Gambar 4. 25 Nilai regangan plastis setelah proses pengelasan pada variasi HI 3	51
Gambar 4. 26 Nilai regangan plastis setelah proses pengelasan pada variasi HI 4	51
Gambar 4. 27 Nilai regangan plastis setelah proses pengelasan pada variasi HI 5	52
Gambar 4. 28 Nilai regangan plastis setelah proses pengelasan pada variasi HI 6	52
Gambar 4. 29 Nilai regangan plastis setelah proses pengelasan pada variasi HI 7	52
Gambar 4. 30 Nilai regangan plastis setelah proses pengelasan pada variasi HI 8	53
Gambar 4. 31 Deformasi pada variasi pengelasan (a) HI 1, (b) HI 2, (c) HI 3, (d) HI 4, (e) HI 5, (f) HI 6, (g) HI 7, (h) HI 8	55
Gambar 4. 32 Path pengukuran deformasi.....	56
Gambar 4. 33 Grafik deformasi pengelasan pada plat vertikal.....	56
Gambar 4. 34 Grafik deformasi pengelasan pada plat horizontal.....	57
Gambar 4. 35 Distribusi gaya pada saat pengelasan T-Joint	58

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Ketentuan Umum penyetelan besaran arus dan tegangan berdasarkan diameter elektroda(NOVIANTO, 2018)	5
Tabel 2. 2 Nilai Koefisien Las berdasarkan proses pengelasan.(Grong, 1997).....	8
Tabel 2. 3 Komposisi Kimia SS400. (Certificate, 2008).....	13
Tabel 2. 4 Steel Grade (Prahastho, 2019).....	13
Tabel 2. 5 Sifat Mekanik SS400.(Prahastho, 2019).....	13
Tabel 2.6 Referensi Penelitian Sebelumnya	21
Tabel 2. 7 Referensi Penggunaan heat input penelitian sebelumnya.....	24
Tabel 3. 1 Data Sifat Termal menurut referensi temperatur dari SS400 (Jeyakumar & Christopher, 2013).....	30
Tabel 3. 2 Data Sifat Mekanik menurut referensi temperatur dari SS400 (Jeyakumar & Christopher, 2013)	30
Tabel 3. 3 Data Entalpi menurut referensi temperatur (Mondal et al., 2018).....	31
Tabel 3. 4 Parameter Pengelasan	32
Tabel 3. 5 Variasi Parameter Arus dan Kecepatan Las	32
Tabel 3. 6 Dimensi spesimen <i>boom</i> ekskavator.....	33
Tabel 3. 7 Rancangan Penelitian	35
Tabel 3. 8 Jadwal Penelitian	35
Tabel 4. 1 Temperatur Global Maksimum yang terjadi pada setiap jumlah elemen.....	39
Tabel 4. 2 Verifikasi maksimum temperatur pada nodal 1 dan nodal 2.	41
Tabel 4. 3 Temperatur puncak pada masing-masing variasi pengelasan.....	46
Tabel 4. 4 Verifikasi model simulasi dengan data trial PT. X.....	48
Tabel 4. 5 Rentang nilai tegangan sisa transversal	53
Tabel 4. 6 Rentang nilai tegangan sisa longitudinal	53
Tabel 4. 7 Perbandingan Hasil Deformasi	54
Tabel 4. 8 Nilai simpangan terjauh plat vertikal.....	57
Tabel 4. 9 Nilai simpangan terjauh plat horizontal.....	57

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembangunan Infrastruktur di Indonesia semakin meningkat setiap tahunnya. Hal ini mengakibatkan tingginya permintaan pasar untuk Alat Berat di Indonesia. Tercatat PT. X Indonesia mengalami kenaikan produksi lebih dari 100 persen pada periode 2020-2021. Ekskavator merupakan salah satu jenis alat berat yang sering digunakan. Terdapat proses pengelasan pada proses pembuatan ekskavator. Salah satu bagian ekskavator yang diberikan proses pengelasan adalah *Boom* dengan menggunakan pengelasan GMAW. Material yang digunakan pada ekskavator *Boom* adalah Structured Steel 400 (SS 400) yang termasuk ke dalam kategori baja karbon rendah.

Deformasi merupakan pergeseran bentuk atau bentuk dari benda lasan akibat dari penyusutan. Penyusutan akibat pengelasan tidak dapat dihindari pada benda atau logam yang disambung dengan las sebab proses pengelasan memerlukan pemanasan dengan temperatur yang cukup tinggi, sehingga pada saat pendinginan terjadi penyusutan yang mengakibatkan perubahan ukuran sambungan las. Deformasi dapat dicegah dengan memberikan parameter pengelasan yang tepat. Deformasi merupakan masalah yang terjadi pada pengelasan *Boom* Ekskavator di PT X sehingga mengakibatkan *part* yang sudah jadi tidak sesuai dengan desain yang diharapkan. Terhitung berdasarkan data yang dikeluarkan oleh PT X, telah ditemukan besaran deformasi diluar dari standar toleransi PT X yaitu 6 mm untuk *trial* ekskavator model PCXX selama kurun waktu 1 bulan. Dengan besarnya deformasi, maka hal ini dapat menghambat untuk melanjutkan ke tahapan produksi masal.

Terdapat beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya untuk menghitung deformasi dan juga tegangan sisa yang dihasilkan akibat pengelasan. Lakshiminarayana pada tahun 2016 (P.Lakshminarayana, 2016) telah melakukan analisa tegangan sisa pada sambungan las dengan adanya pengaruh vibrasi mekanik menggunakan metode elemen hingga. Panji pada tahun 2019 (Panji et al., 2019) juga telah melakukan penelitian terhadap pengaruh arus dan juga kecepatan pengelasan pada pengelasan TIG V-joint terhadap deformasi. Yang terbaru, Vemanaboina pada tahun 2021 (Vemanaboina et al., 2021) melakukan penelitian terhadap pengaruh *heat input* kepada deformasi pengelasan material SS 314L. Dapat diketahui bahwa parameter pengelasan dapat mempengaruhi adanya deformasi dan juga tegangan sisa. Selain melakukan eksperimen pada di lapangan, nilai tegangan sisa dan juga deformasi dapat diambil melalui metode elemen hingga.

Metode elemen hingga dapat membantu perusahaan untuk meminimalisir adanya produksi *reject* dikarenakan waktunya yang lebih cepat dan efisien. Waktu yang cepat sangat penting bagi perusahaan manufaktur untuk meningkatkan kapasitas dan kualitas produksi. Oleh karena itu, penelitian ini dibutuhkan untuk menganalisa deformasi dan juga tegangan sisa pada pengelasan alat berat di PT. X menggunakan metode elemen hingga

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh variasi arus dan kecepatan las terhadap distribusi temperatur pada sambungan las SS400 di aplikasi *boom* ekskavator menggunakan metode elemen hingga?
2. Bagaimana pengaruh variasi arus dan kecepatan las terhadap tegangan sisa pada sambungan las SS400 di aplikasi *boom* ekskavator menggunakan metode elemen hingga?
3. Bagaimana pengaruh variasi arus dan kecepatan las terhadap deformasi sambungan las SS400 di aplikasi *boom* ekskavator menggunakan metode elemen hingga?

1.3 Tujuan

1. Menganalisis pengaruh variasi arus dan kecepatan las terhadap distribusi temperatur pada hasil pengelasan *boom* ekskavator menggunakan metode elemen hingga.

2. Menganalisis pengaruh variasi arus dan kecepatan las terhadap tegangan sisa pada hasil pengelasan *boom* ekskavator menggunakan metode elemen hingga.
3. Menganalisis pengaruh variasi arus dan kecepatan las terhadap deformasi sisa pada hasil pengelasan *boom* ekskavator menggunakan metode elemen hingga.

1.4 Batasan Masalah

1. Jenis material *weld bead* dianggap sama dengan logam induk.
2. Kecepatan pengelasan dianggap konstan.
3. Pengelasan menggunakan sambungan jenis T dengan las satu sisi.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang bisa didapatkan dalam tugas akhir ini diharapkan dapat didapatkan data pengaruh arus dan kecepatan las pada pengelasan SS400 terhadap deformasi dan tegangan sisa yang nantinya dapat diaplikasikan di dunia industri dan menjadi referensi untuk penelitian selanjutnya.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengelasan

Pengelasan adalah proses penggabungan dua buah logam atau lebih sehingga terjadinya ikatan pada lapisan permukaan. Ketika dua bagian akan disambungkan bersama, panas atau tekanan atau keduanya diterapkan dengan atau tanpa logam tambahan untuk membentuk ikatan logam (Prahastho, 2019).

Proses pengelasan dalam proses konstruksi mencakup berbagai macam industri diantaranya adalah Perkapalan, Jembatan, Rangka Baja, Pipa, dan manufaktur alat berat. Proses pengelasan dapat diklasifikasikan berdasarkan beberapa kriteria berikut:

- a. Pengelasan dengan atau tanpa *filler*.

Pengelasan yang fusinya dapat dicapai dengan atau tanpa material *filler* adalah proses pengelasan berbasis gas. Proses pengelasan tanpa *filler* disebut “pengelasan *autogenous*”.

- b. Sumber Energi Pengelasan.

Pengelasan dapat bersumber dari berbagai macam seperti listrik, kimia, mekanik. Namun, seluruh energi bersumber dari listrik kecuali energi kimia.

- c. Pengelasan busur (*arc*) dan non-busur.

Pengelasan jenis ini adalah pengelasan yang paling umum. Panas yang terkonsentrasi dari busur listrik mengalir ke logam dengan berfusi dari logam induk menuju sambungan menggunakan elektroda. Contoh pengelasan jenis busur adalah MIG atau GMAW.

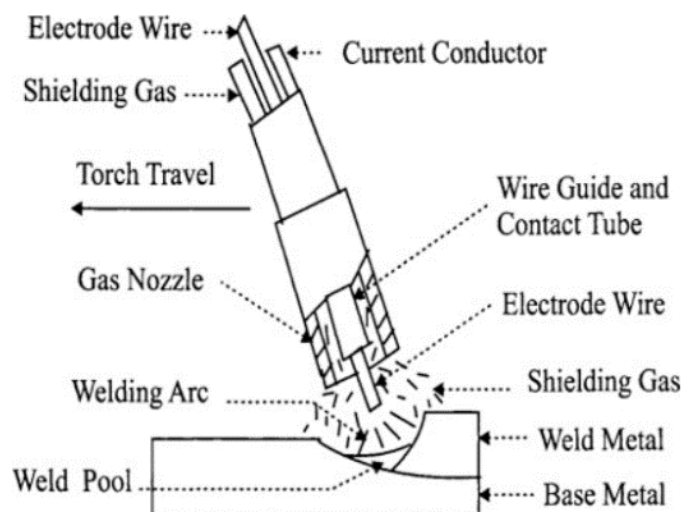
- d. Pengelasan Fusi (*Fusion*) dan Pengelasan tekanan (*pressure*)

Dalam pengelasan fusi, logam cair membeku secara bebas sementara dalam pengelasan tekanan, logam cair yang ada dipertahankan dalam ruang tertutup di bawah tekanan membeku di bawah tekanan atau pendinginan logam semi padat di bawah tekanan. (Prahastho, 2019)

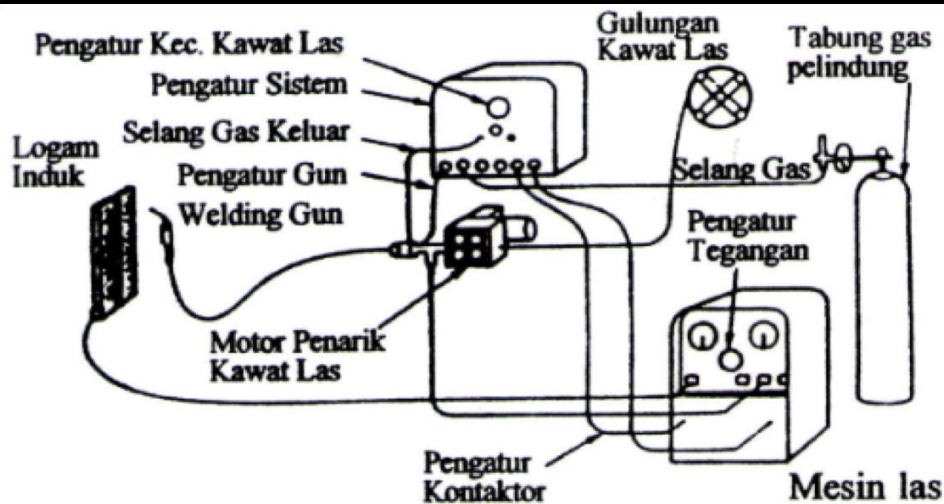
2.2 Pengelasan GMAW

Gas Metal Arc Welding (GMAW) adalah proses pengelasan jenis busur. Panas dihasilkan oleh busur listrik yang menggabungkan elektroda konsumsi kontinu yang dilindungi oleh gas yang dipasok dari luar. Proses pengelasan GMAW dapat dilihat pada gambar berikut: (Naidu, 2003)

Dapat dilihat pada **Gambar 2.1** skema proses pengelasan menggunakan metode GMAW. Sedangkan untuk **Gambar 2.2** merupakan skema penyusunan alat pada pengelasan GMAW (Naidu, 2003).



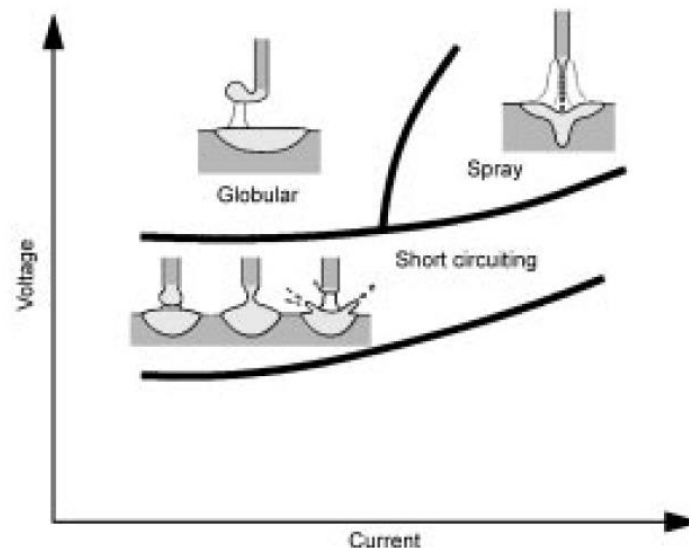
Gambar 2.1 Skema proses pengelasan GMAW. (Naidu,2003)



Gambar 2. 2 Skema Penyusunan Alat GMAW. (Naidu, 2003)

Pada pengelasan GMAW, terdapat beberapa jenis mode transfer metal tergantung dari parameter yang digunakan. Parameter yang berpengaruh pada mode transfer metal adalah arus, voltase, gas pelindung, dan diameter elektroda yang digunakan (Weman, n.d,2003).

Berikut merupakan gambar pengaruh arus dan voltase pada mode transfer metal:



Gambar 2. 3 Tipe busur berdasarkan kondisi *heat input*.(Weman, n.d.)

Short Circuit, jenis transfer metal yang pertama biasanya digunakan dalam kisaran arus yang lebih rendah untuk lembaran logam di semua posisi. *Heat input* dari pengelasan busur pendek rendah, yang membuat proses ini cocok untuk pengelasan bahan yang lebih tipis. (Weman, n.d, 2003)

Spray arc, jenis transfer ini hanya dapat digunakan pada arus tinggi, di atas arus transisi, dan tegangan tinggi. Stabilitas busur sangat baik dan logam ditransfer dalam aliran tetesan kecil. Input panas dan laju deposisi tinggi menghasilkan pengelasan terbatas pada posisi horizontal dan material dengan ketebalan lebih dari 5mm (Weman, n.d, 2003).

Globular Transfer, mode transfer jenis ini terdapat pada arus yang lebih rendah dari yang dibutuhkan untuk *spray transfer* dengan tegangan di atas *short-circuit*, ada daerah campuran yang ditandai dengan tetesan yang lebih besar dari diameter elektroda dan seringkali dengan bentuk

yang tidak beraturan. Tetesan cair tumbuh sampai terlepas oleh hubungan arus pendek atau gravitasi (Weman, n.d, 2003).

Gas pelindung utama yang digunakan untuk proses GMAW adalah oksigen, argon, karbon dioksida, dan helium atau kombinasi dari keempat gas tersebut. Gas-gas yang digunakan dalam sistem gas pelindung dapat diklasifikasikan sebagai gas inert, yaitu gas-gas yang subkulit elektron terluarnya terisi penuh dan stabil; dan gas yang reaktif secara kimia, seperti karbon dioksida; dan oksigen, yang tidak memiliki kulit elektron terluarnya yang terisi, sehingga memungkinkan elektron telanjang untuk bergabung dengan elemen lain di zona pengelasan untuk menciptakan kotoran (Wahab, 2014).

2.3 Parameter Pengelasan

Besarnya arus dan tegangan pengelasan adalah tergantung pada tebal bahan dan diameter kawat elektroda serta posisi pengelasan atau berdasarkan *WPS (Welding Procedure Specification)* pekerjaan tersebut. Arus las adalah arus listrik yang digunakan untuk melakukan proses pengelasan. Dalam proses pengelasan MIG/MAG, arus las secara langsung berhubungan dengan kecepatan *wirefeed*. Jika arus las dinaikkan maka kecepatan wirefeed juga seharusnya naik. Hubungan ini biasanya disebut karakteristik “*burn-off*”(NOVIANTO, 2018).

Berikut merupakan ketentuan untuk memilih parameter berdasarkan diameter elektroda dan tebal pelat (NOVIANTO, 2018).

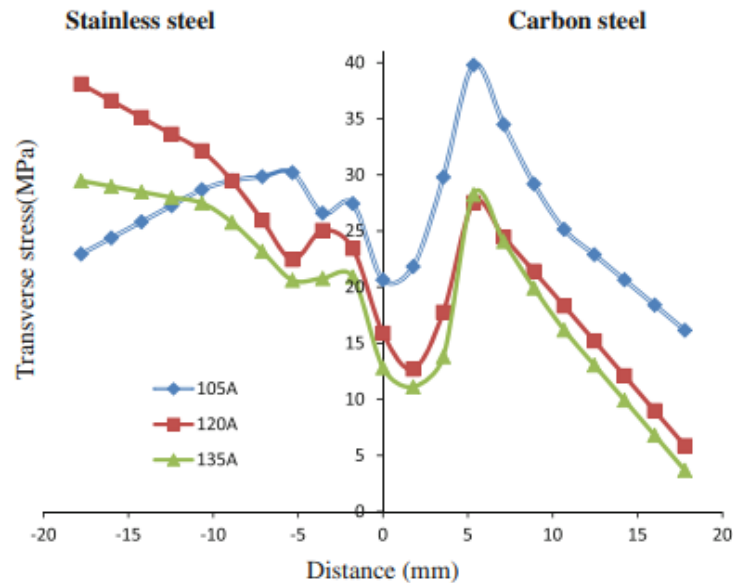
Tabel 2. 1 Ketentuan Umum penyetelan besaran arus dan tegangan berdasarkan diameter elektroda(NOVIANTO, 2018)

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

2.4. 1 Arus Pengelasan

Arus pengelasan adalah salah satu parameter produktivitas pengelasan utama, yang dapat mempengaruhi kualitas pengelasan dan biasanya ditentukan berdasarkan ketebalan pelat dan *Travel Speed*. Ditemukan bahwa hubungannya dengan laju umpan kawat linier untuk nilai rendah, dan non-linier untuk nilai arus yang lebih tinggi, ketika semua parameter lainnya tetap konstan (Drosos & Kotsakis, 2014).

Arus las yang terlalu rendah mengakibatkan logam las menumpuk pada permukaan faying dalam bentuk manik-manik yang menembus benda kerja. Kondisi ini meningkatkan penguatan manik las tanpa penetrasi yang cukup. Pemanasan yang berlebihan pada benda kerja karena arus pengelasan yang terlalu tinggi menyebabkan *weld slag*. Arus optimal memberikan penetrasi dan lebar manik las yang optimal (Kumar & Gandhinathan, 2020).



Gambar 2.4 Pengaruh Arus terhadap tegangan sisa pada stainless steel dan carbon steel. (Ranjarnodeh et al., 2011)

Kokabi, dkk pada tahun 2011 telah menganalisa terkait pengaruh arus terhadap tegangan sisa pada plat *stainless steel* dan *carbon steel*. Dapat dilihat pada **Gambar 2.4** pengaruh arus terhadap tegangan sisa (Ranjarnodeh et al., 2011).

2.4.2 Voltase

Tegangan menentukan mode transfer logam selama pengelasan GMAW. Pada tegangan busur rendah, hambatan di seluruh busur menyebabkan pemadaman busur, yang menghasilkan *transfer dip*. Tegangan busur yang lebih tinggi cukup untuk mempertahankan busur dengan mengatasi hambatan listrik. Ketika tegangan busur meningkat, panjang busur meningkat. Hal ini memungkinkan lebih banyak kawat untuk dicairkan tanpa dimatikan, seperti yang kadang terjadi ketika kecepatan pengumpanan kawat tinggi dan tegangan busur rendah digunakan. Peningkatan panjang busur juga meningkatkan lebar manik las (DTWD, 2018).

2.4.3 Travel Speed (Kecepatan Las)

Travel Speed adalah tingkat di mana busur berjalan sepanjang benda kerja. *Travel Speed* dikendalikan oleh tukang las dalam pengelasan semi otomatis dan oleh mesin dalam pengelasan otomatis. Efek dari *Travel Speed* hampir mirip dengan efek tegangan busur. Untuk arus tertentu yang konstan, *Travel Speed* yang lebih lambat secara proporsional memberikan manik-manik yang lebih besar dan *heat input* yang lebih tinggi ke logam dasar karena waktu pemanasan yang lebih lama. *Heat input* yang tinggi meningkatkan penetrasi las dan deposit logam las per satuan panjang dan akibatnya menghasilkan kontur manik yang lebih lebar. Jika *Travel Speed* terlalu cepat, pembentukan las tidak bisa terjadi, yang menyebabkan fusi yang buruk, penetrasi yang lebih rendah, porositas, inklusi terak, dan butiran kasar yang tidak rata. Meningkatkan *Travel Speed* menunjukkan efek yang berlawanan: Lebih sedikit logam las yang diendapkan dengan *heat input* yang lebih rendah yang menghasilkan manik yang lebih sempit dengan penetrasi yang lebih

sedikit. Kecepatan yang terlalu tinggi menyebabkan percikan dan pemotongan yang tinggi dan manik-manik menunjukkan bentuk yang tidak teratur karena deposit logam las yang sangat sedikit per satuan panjang lasan. *Travel Speed*, yang merupakan variabel penting dalam MIG, seperti kecepatan kawat (arus) dan tegangan busur, dipilih oleh operator sesuai dengan ketebalan logam yang dilas, desain sambungan, pemasangan sambungan, dan posisi pengelasan (Primo, 2014).

2.4 Heat Input

Pada proses pengelasan terjadi pencairan logam induk dan logam pengisi karena adanya perpindahan energi panas. *Heat input* itu sendiri dapat diartikan sebagai perpindahan energi panas per satuan panjang dalam proses pengelasan. Energi panas yang terjadi disebabkan oleh tiga parameter yaitu arus pengelasan, tegangan pengelasan, dan kecepatan pengelasan (No et al., 2021).

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

Dimana,

H_{net} : energi input bersih, J/mm;

E : tegangan, V;

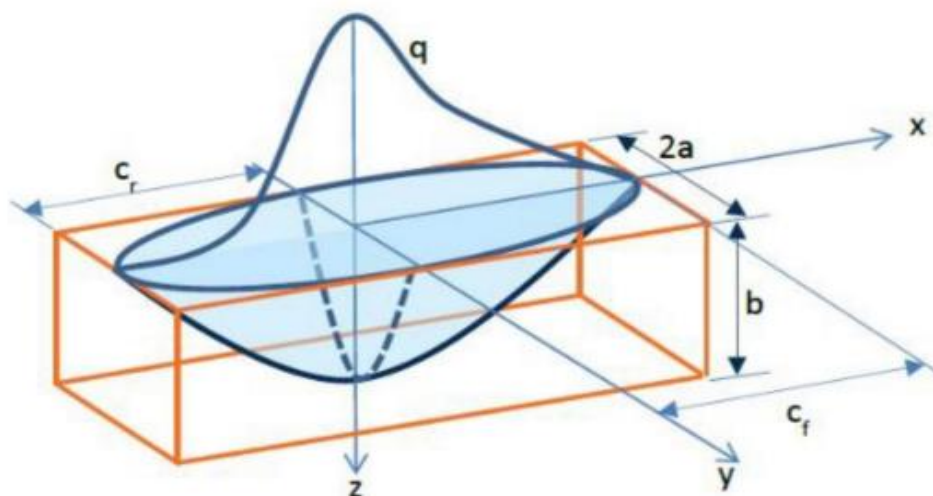
I : arus, A;

η : koefisien efisiensi;

v : kecepatan pengelasan, mm/s.

Persamaan diatas merupakan rumus mencari energi input. Pencairan logam induk dan logam pengisi memerlukan energi yang cukup. Energi yang dihasilkan dalam operasi pengelasan dihasilkan dari bermacam-macam sumber tergantung pada proses pengelasannya. Pada pengelasan busur listrik, sumber energi berasal dari listrik yang diubah menjadi energi panas.

Heat flux panas di *weld bead* disimulasikan menggunakan model sumber panas Goldak. Model sumber panas ini mendefinisikan panas yang dihasilkan per satuan volume di wilayah *weld bead*. Model sumber panas ellipsoidal ganda ditampilkan pada **Gambar 2.5**. Model panas Goldak sudah banyak digunakan untuk aplikasi dari simulasi pengelasan busur. Pergerakan sumber panas selama pengendapan material menghasilkan distribusi energi yang tidak konsisten. Model ini memperhitungkan distribusi energi panas yang tidak merata. Energi panas didistribusikan, sesuai definisi model ke node elemen, dalam bentuk kerapatan *heat flux* (Kiran, 2022).



Gambar 2.5 Sumber panas Goldak double ellipsoidal. (Kiran, 2022)

Distribusi kerapatan panas diberikan menggunakan persamaan berikut:

$$q_{f/r} = \frac{6\sqrt{3} f_{f/r}}{abc\pi\sqrt{\pi}} Q e^{\left(-\frac{3x^3}{c_{f/r}^2}\right)} e^{\left(-\frac{3y^2}{a^2}\right)} e^{\left(-\frac{3z^3}{b^2}\right)} \quad (2.2)$$

Dimana a, b, cf, cr didefinisikan sebagai sumbu sumber panas ellipsoidal. Q adalah kekuatan sumber panas. f f/r mendefinisikan intensitas aliran energi, dan f mewakili bagian depan wilayah kolam lelehan dan r mewakili wilayah bagian belakang kolam lelehan dari asal sumbu seperti yang digambarkan pada **Gambar 2.5** (Kiran, 2022).

$$f_f + f_r = 2 \quad (2.3)$$

Permodelan panas Goldak merupakan pengembangan dari model panas sebelumnya. Kelebihan yang dimiliki pada model panas ini adalah sifatnya yang berupa ellipsoidal ganda dan volumetrik. Selain itu, hasil yang didapatkan lebih mendekati dengan hasil eksperimen yang dilakukan (Goldak & Akhlaghi, 2005).

Efisiensi pengelasan dinilai berdasarkan material, metode las, dan juga gas pelindung yang digunakan. Berikut merupakan nilai koefisien las untuk jenis pengelasan tertentu:

Tabel 2. 2 Nilai Koefisien Las berdasarkan proses pengelasan.(Grong, 1997)

Jenis Pengelasan	η
SAW, baja	0,91 – 0,99
SMAW, baja	0,66 – 0,85
GMAW, CO2-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

Berdasarkan **Tabel 2.2**, diketahui untuk penggunaan pengelasan GMAW pada baja menggunakan gas pelindung CO2 rata-rata nilai koefisien lasnya adalah 0,8.(Grong, 1997)

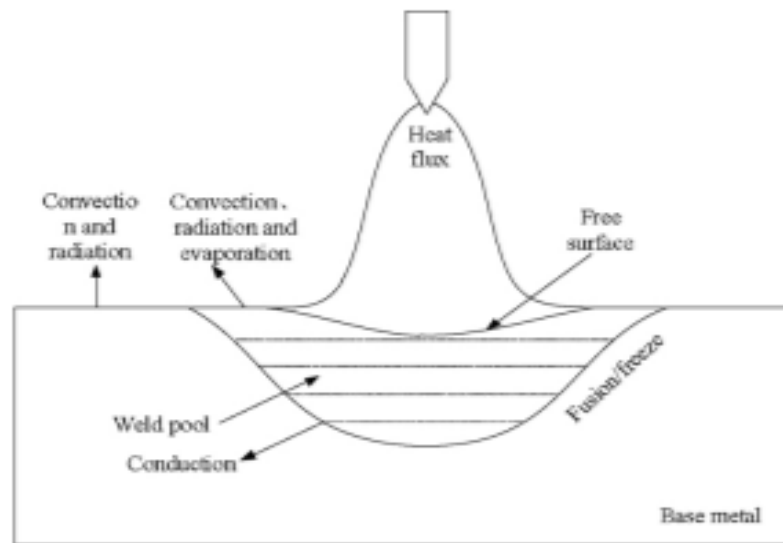
2.5 Perpindahan Panas

Dalam pengelasan busur, panas di busur las diberikan melalui: konveksi, konduksi dan radiasi. Solusi dari persamaan aliran panas dengan mempertimbangkan perpindahan panas secara konduksi dan konveksi adalah hal yang cukup kompleks untuk dipecahkan menggunakan *finite element method* (Zhou & Tsai, 2005).

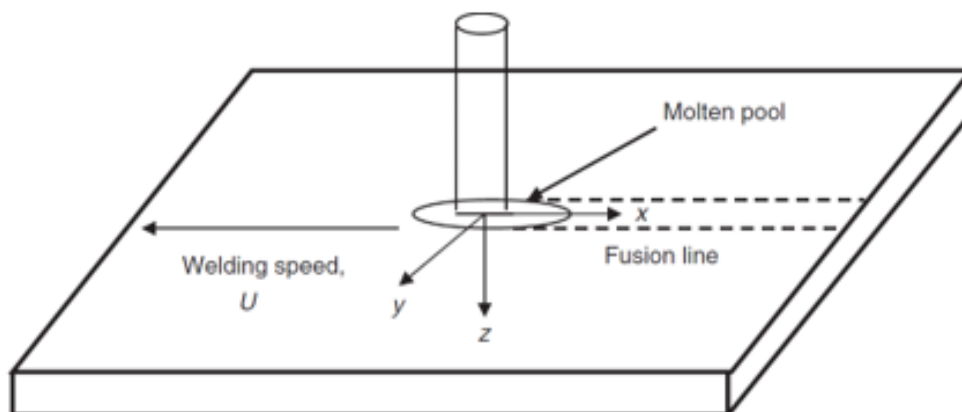
2.5.1 Konduksi

Konduksi panas adalah transportasi difusi energi panas. Dalam cairan dan gas, itu disebabkan oleh interaksi atom dan molekul yang bergerak, dalam zat padat oleh osilasi kisi, dan dalam bahan elektrokonduktif ditambah dengan elektron yang tidak terikat. (Pentenrieder, 2005)

Energi panas pada saat pengelasan hilang terutama melalui konduksi sepanjang logam dasar. Selama proses ini, area yang berdampingan dengan logam las dipanaskan hingga suhu yang cukup tinggi (Ghosh, 2012).



Gambar 2. 6 Skema perpindahan panas pada las busur (Ghosh,2012).



Gambar 2. 7 Arah Pengelasan.

Solusi analitik dapat diperoleh untuk persamaan konduksi panas dalam banyak situasi. Seperti diilustrasikan pada **Gambar 2.7**, benda kerja diam dan titik asal sistem koordinat bergerak dengan sumber panas dengan kecepatan konstan U dalam arah x negatif. Perpindahan panas dalam pengelasan diatur terutama oleh konduksi panas yang bergantung pada waktu, yang dinyatakan oleh persamaan berikut (Zhou & Tsai, 2005).

$$T - T_0 = \frac{Q}{2\pi k(x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}} \exp\left(\frac{-U((x^2 + y^2 + z^2)^{1/2} - x)}{2\alpha}\right) \quad (2.4)$$

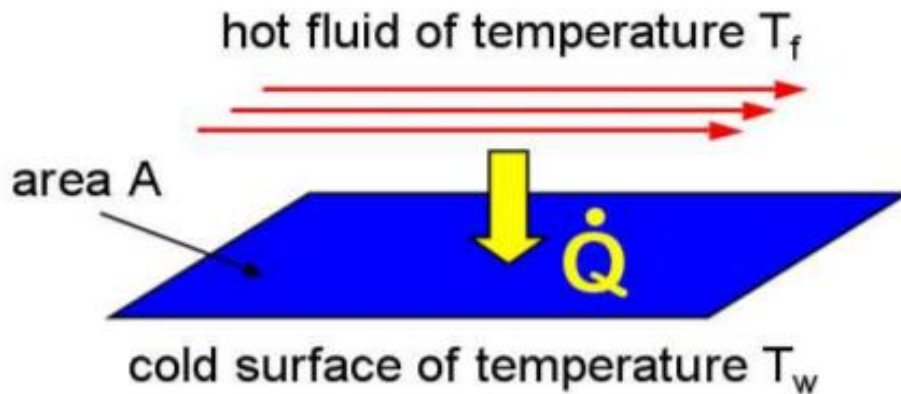
Dimana,

- 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.

2.5.2 Konveksi

Pertukaran panas antara cairan yang bergerak (gas atau cairan) dan dinding yang berdekatan disebut konveksi. Tergantung pada kondisi suhu, panas dikirim ke dinding ($T_f > T_w$) atau diambil darinya ($T_f < T_w$). Jika arus fluida ditahan oleh pompa atau blower, para insinyur menunjukkan bahwa itu adalah konveksi paksa. Namun, apabila tanpa adanya paksaan udara bergerak, aliran dapat muncul karena perbedaan densitas dalam fluida, yang ditimbulkan oleh suhu atau gradien konsentrasi (konveksi bebas) (Pentenrieder, 2005).



Gambar 2. 8 Pendinginan Fluida oleh Konveksi.(Pentenrieder, 2005)

$$Q = \alpha A(T_f - T_w) \quad (2.5)$$

2.5.3 Radiasi

Semua benda memancarkan radiasi termal. Menurut hukum Stefan-Boltzmann, kerapatan emisi panas q'_{rad} suatu benda pada suhu T dengan emisivitas (0,1) dihitung dengan: (Pentenrieder, 2005).

$$q'_{rad} = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2.6)$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$$

Lalu, pada permodelan menggunakan metode elemen hingga, perhitungan untuk perpindahan panas secara radiasi dapat diselesaikan dengan formula berikut (Ida Bagus Putra Anandya, 2016)

$$-k\nabla = \alpha q''_r - \varepsilon \sigma T^4_{(x,y,z,t)} \quad (2.7)$$

Dimana,

α = Absorptivitas permukaan

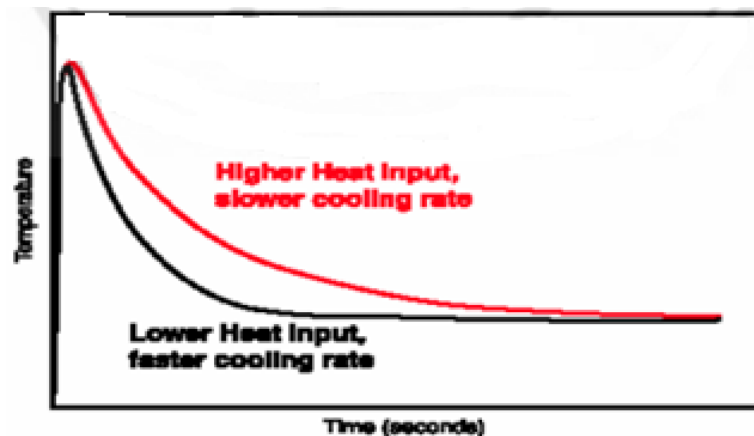
q''_r = *incident radiant heat flux*

σ = Konstanta Stefan-Boltzman

ε = Emisivitas Permukaan

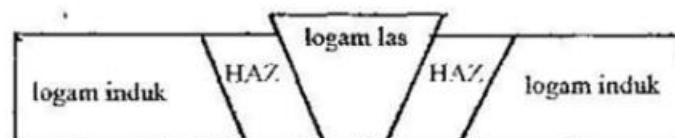
2.6 Siklus Termal Pengelasan

Dareah lasan terdiri dari 3 bagian yaitu logam lasan, daerah pengaruh panas (*Heat Affected Zone*). Selama proses pengelasan berlangsung, logam las dan HAZ akan mengalami serangkaian siklus thermal yang berupa pemanasan sampai mencapai suhu maksimum dan diikuti dengan pendinginan. Pada pengelasan baja, kandungan C pada logam las biasanya dibuat rendah yaitu 0,1 % massa, dengan tujuan untuk mempertahankan sifat mampu las atau weldability. Sebagai akibatnya, jika kondisi kesetimbangan (equilibrium) tercapai maka logam las akan mengalami serangkaian transformasi fasa selama proses pendinginan, yaitu dari logam las cair berubah menjadi ferit- δ kemudian γ (austenit) dan akhirnya menjadi α (ferrit). Pada umumnya laju pendinginan pada proses pengelasan cukup tinggi sehingga kondisi kesetimbangan tidak terjadi dan akibatnya struktur mikro yang terbentuk tidak selalu mengikuti diagram fasa (Subeki, 2009).



Gambar 2. 9 Siklus Termal Las (Subeki, 2009).

Berikut merupakan gambar yang ada pada daerah pengelasan:



Gambar 2. 10 Daerah bagian sambungan las.(Siswanto, 2018)

2.7.1 Logam Lasan

Daerah endapan las (*weld deposit*) dari logam yang pada waktu pengelasan mencair dan kemudian membeku. Endapan las (*weld deposit*) berasal dari logam pengisi (*filler metal*) (Siswanto, 2018).

2.7.2 Heat-Affected Zone (HAZ)

Daerah pengaruh panas atau daerah dimana logam dasar yang bersebelahan dengan logam las yang selama pengelasan mengalami siklus termal atau pemanasan dan pendinginan dengan cepat. Penyebaran panas pada logam induk dipengaruhi oleh temperatur panas dari logam cair dan

kecepatan dari pengelasan. Pada batas HAZ dan logam cair temperatur naik sangat cepat sampai batas pencairan logam dan temperatur turun sangat cepat juga setelah proses pengelasan selesai. Hal ini dapat disebut juga sebagai efek *quenching*. Transformasi struktur mikro yang terjadi akibat perubahan temperatur menyebabkan daerah HAZ sangat berpotensi terjadinya retak (*crack*) dan hal ini sangat penting untuk diperhatikan untuk mendapatkan hasil lasan yang baik. Berikut merupakan estimasi untuk mengukur lebar dari HAZ (Siswanto, 2018).

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{\sqrt{2\pi e \rho C h Y}}{H_{net}} + \frac{1}{T_m - T_0} \quad (2.8)$$

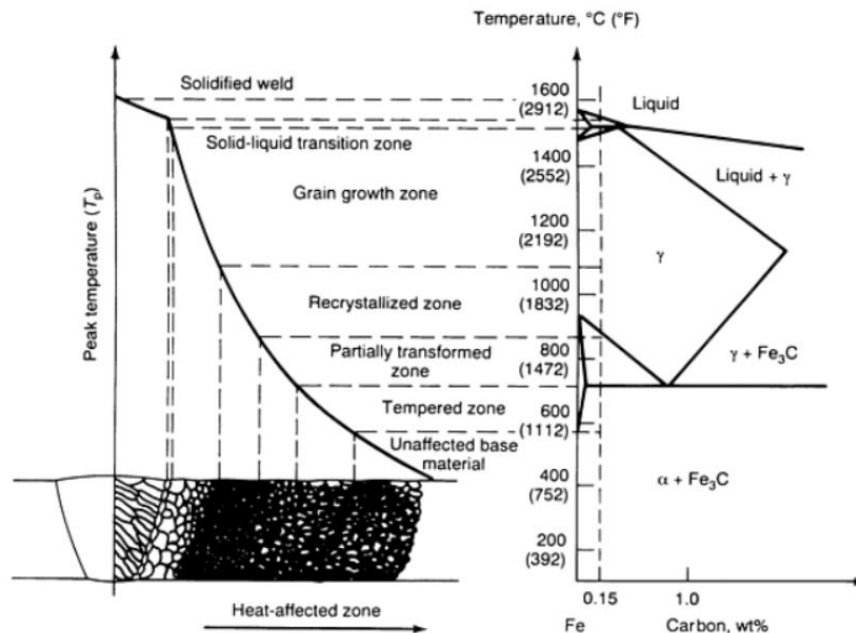
Dimana,

- 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 *heat input*, cal/cm.
- T_m = Temperatur leleh/liquidus dari logam yang dilas, °C.

2.7.3 Logam Induk

Bagian logam yang tidak terpengaruh oleh pemanasan karena proses pengelasan dan temperatur yang disebabkan selama proses pengelasan tidak menyebabkan terjadinya perubahan struktur dan sifat-sifat dari logam induk. Hal ini disebabkan karena temperatur atau suhu yang terjadi di logam induk belum mencapai temperatur kritis (Siswanto, 2018).

Siklus termal yang berbeda juga menghasilkan daerah yang berbeda seperti yang ada pada **Gambar 2.11**



Gambar 2.11 Daerah pada lasan dengan baja komposisi karbon 1.5%. (Cross & Kohn, 2018)

Baja SS400 termasuk jenis baja karbon rendah, baja jenis karbon rendah memiliki sifat ulet dan tangguh sehingga sering digunakan untuk bahan konstruksi bangunan maupun konstruksi kapal (Julian et al., 2017).

Kelas pelat baja ini memiliki kualitas permukaan khusus untuk mencegah masalah dari pemotongan laser seperti: pemblokiran nosel atau pemfokusan yang salah, dan memberikan kualitas pemotongan yang baik (Prahastho, 2019).

Berikut merupakan komposisi kimia dari baja SS400 yang disuplai melalui PT. X.

Tabel 2. 3 Komposisi Kimia SS400. (Certificate, 2008)

C	Si	Mn	P	S
0.19398	0.1388	0.297	0.01222	0.00928

Pada **Tabel 2.4** dapat dilihat ekivalensi standard SS400 JIS3101 dengan standard yang lain.

Tabel 2. 4 Steel Grade (Prahastho, 2019).

SS400 JIS3101	Ekivalensi <i>Steel Grade</i> dengan standar tertentu	
	BS 4360	40(A)B
	CSAG40-21	230 G
	IS	IS 226
	JIS 3201	SS400
	ISO 630	Fe 360 B
	ASTM	A 36/A 283 C

Berikut merupakan sifat mekanik yang dimiliki oleh baja SS400 yang termasuk kedalam kategori baja karbon rendah (Prahastho, 2019).

Tabel 2. 5 Sifat Mekanik SS400.(Prahastho, 2019)

Grade	Yield Strength min (Mpa)		Tensile Strength (Mpa)	Elongation min. %			Impact Resistance min (J) 25°C
	Thickness < 16 mm	Thickness > 16 mm		Thickness < 5 mm	Thickness 5-16 mm	Thickness > 16 mm	
SS400	245	235	400-510	21	17	21	117,7

Dibandingkan dengan standar baja lainnya, SS400 memiliki kekuatan tarik dan ketangguhan yang bagus, plastisitas yang baik, mudah untuk di las (*weldability*), dan mudah untuk di *machining* (Sulamet-Ariobimo et al., 2016).

2.7 Deformasi Pengelasan

Pemuaian dan penyusutan akibat pemanasan dan pendinginan pada pengelasan tidak dapat dihindari pada logam yang disambung dengan las. Pemuaian dan penyusutan yang tidak merata menyebabkan deformasi tidak merata dan tegangan sisa. Sehingga perlu cara untuk meminimalkan dampak deformasi dari pengelasan tersebut (Sriwijaya et al., 2016).

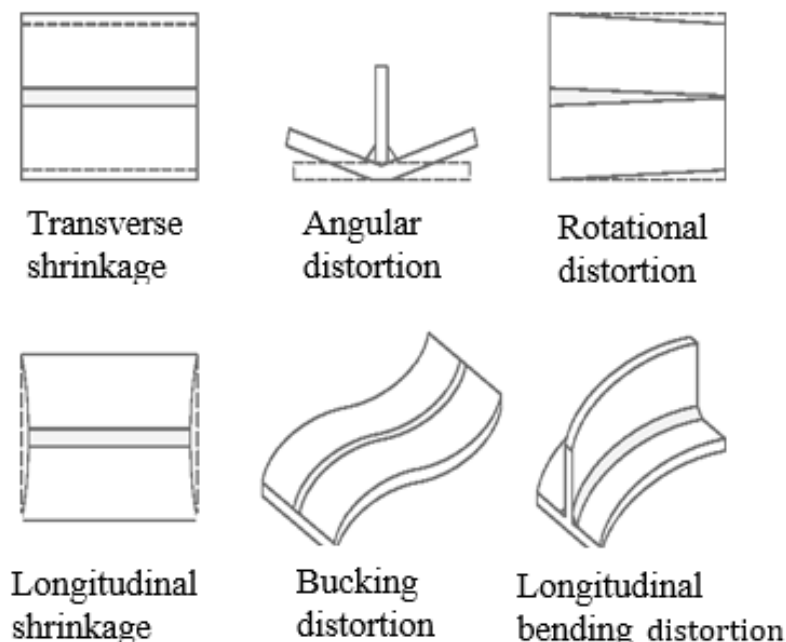
Deformasi pengelasan tidak hanya menurunkan kinerja tetapi juga meningkatkan biaya pembangunan struktur. Hal ini juga menjadi kendala untuk mewujudkan otomatisasi dan robotisasi. Untuk mengatasi masalah ini, perlu untuk memprediksi dan mengontrol deformasi pengelasan secara kuantitatif (Wei, 2005).

Pada prinsipnya ada empat jenis dasar deformasi, yaitu *Transverse Shrinkage*, *Angular Deformation* dan deformasi sudut dua arah dan berbagai bentuk deformasi lain yang dihasilkan sebagai kombinasinya. Keempat jenis deformasi ini dapat dianggap sebagai komponen mendasar dari deformasi yang melekat akibat pengelasan (Wei, 2005).

Berikut merupakan perubahan bentuk yang ada pada pengelasan: (Pilipenko, 2001).

- *Longitudinal shrinkage*, yaitu penyusutan material yang searah atau sejajar dengan garis las.
- *Rotational distortion*, merupakan deformasi sudut dalam bidang pelat yang berkaitan dengan perluasan bidang panas.
- *Transverse shrinkage*, yaitu penyusutan tegak lurus terhadap garis las.
- *Buckling distortion*, merupakan fenomena yang berkaitan dengan kompresi yang berkenaan dengan panas dan menyebabkan ketidakstabilan ketika pelatnya tipis.
- *Angular change/Angular shrinkage*, yaitu karena adanya distribusi panas yang tidak merata pada kedalaman material sehingga menyebabkan terjadinya deformasi (perubahan sudut).
- *Longitudinal bending distortion*, yaitu deformasi dalam bidang yang melalui garis las dan tegak lurus terhadap pelat.

Gambar 2.11 menunjukkan tipe deformasi yang terjadi pada proses pengelasan.



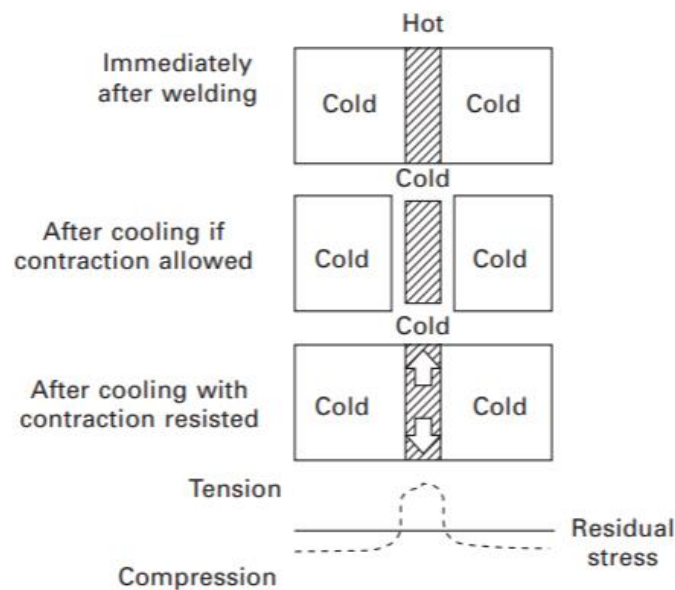
Gambar 2. 12 Tipe Deformasi (Lundback, 2003).

Deformasi akibat pengelasan didorong oleh ekspansi termal (sementara) dan tegangan sisa (permanen). Tegangan dan deformasi sebagian besar bertentangan. Tingkat geometris yang tinggi dalam pengelasan menghasilkan tegangan tinggi dan deformasi kecil sementara las tak terkendali menghasilkan tegangan yang lebih rendah tetapi deformasi yang lebih besar. Akibatnya, keandalan

desain pengelasan dinilai terutama berdasarkan analisis tegangan sisa pengelasan, sedangkan kelayakan pengelasan di bidang manufaktur dinilai terutama berdasarkan analisis deformasi pengelasan (Lundbäck, 2003).

2.8 Tegangan Sisa Pada Pengelasan

Tegangan sisa pengelasan disebabkan oleh ekspansi termal diferensial dan kontraksi logam las dan bahan induk. Hal ini diilustrasikan pada **Gambar 2.13** untuk tegangan sisa longitudinal (tegangan sisa transversal juga diinduksi, meskipun umumnya memiliki zona tekan dan tarik di dalam lasan). Tingkat tegangan sisa di dalam dan di dekat lasan bisa sangat tinggi, hingga besarnya kekuatan luluh material dalam situasi yang sangat terbatas, yang merupakan kasus di sebagian besar struktur (Maddox, 2011).



Gambar 2. 13 Proses terjadinya tegangan sisa

Sebagian besar tegangan sisa yang terdapat pada komponen las adalah tegangan tarik yang berbahaya yang memberikan efek negatif pada komponen las. Namun, beberapa peneliti menemukan bahwa tegangan sisa tekan dapat membawa manfaat bagi komponen pengelasan. Tegangan sisa tarik dapat menyebabkan inisiasi retak pada komponen pengelasan, sedangkan tegangan sisa tekan dapat meningkatkan kualitas komponen. Sumber utama tegangan sisa pengelasan adalah penyusutan, pendinginan, dan transformasi fasa. Tegangan sisa tarik terjadi karena penyusutan (Nasir et al., 2016).

Prosedur pemodelan tegangan sisa pada metode elemen hingga pengelasan dimulai dengan analisis termal transien aliran panas pengelasan. Penambahan material las cair baru dimodelkan menggunakan teknik element-include (elemen tidak aktif). Jika perlu, teknik elemen yang tenang (jaring deformasi dengan kekakuan rendah) dapat digunakan untuk mencapai deformasi yang baik dan adaptasi mesh elemen untuk manik-manik yang tidak ditambahkan. Analisa termal transien memberikan masukan untuk analisis termo-plastik tambahan berikutnya. Mirip dengan prosedur sebelumnya, sifat material termal yang digunakan bergantung pada suhu. Kondisi batas perpindahan panas diterapkan pada semua permukaan bebas komponen. Batas bebas diubah dalam ruang saat lintasan las baru ditambahkan.

Berikutini merupakan perumusan regangan yang disebabkan oleh panas:

$$\varepsilon_t = \alpha \cdot (\Delta T) \quad (2.9)$$

Dimana α koefisien muai panjang, dalam sSI, α ini dinyatakan dalam satuan *per degree celcius*. Pada saat pelat bebas dipanaskan secara seragam, maka yang timbul adalah regangan normal, bukan merupakan tegangan yang ditimbulkan oleh panas. Tetapi, bila pelat tersebut tidak lagi bebas atau telah diberikannya kondisi batas yang sebenarnya, atau material tersebut menampakkan anisotropik bahkan pada saat pemanasan yang uniform, tegangan yang diakibatkan oleh panas akan muncul (Ugural, 1999).

Berikut merupakan rumus regangan dan tegangan yang diakibatkan oleh panas:

$$\sigma_x = \frac{E}{(1-u^2)} [\epsilon_x + u\epsilon_y - (1+u)\alpha(\Delta T)] \quad (2.10)$$

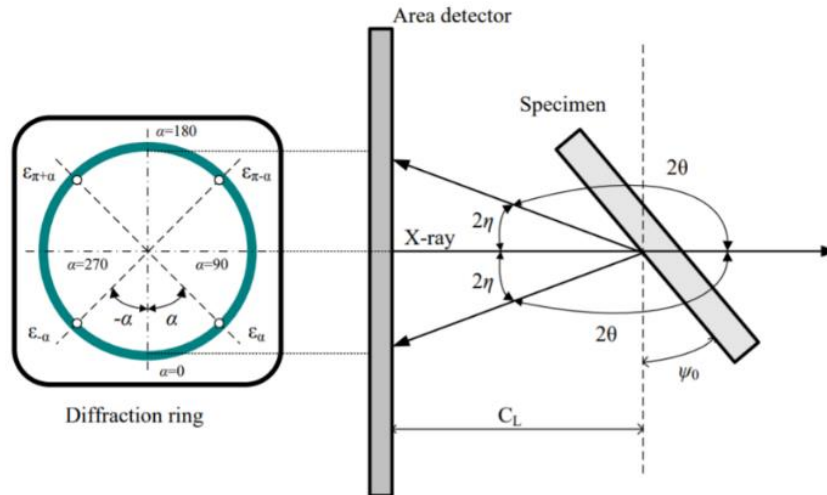
$$\sigma_y = \frac{E}{(1-u^2)} [\epsilon_y + u\epsilon_x - (1+u)\alpha(\Delta T)] \quad (2.11)$$

Dimana,

- σ_x : tegangan tegak lurus;
- σ_y : tegangan searah lurus
- ϵ_x : regangan tegak lurus
- ϵ_y : regangan searah garis las;
- u : *poisson's ratio*.

Pada saat proses pendinginan terjadi sesudah pengelasan, temperatur material akan perlahan turun hingga sama dengan temperatur ruangan, sehingga proses pemuaihan terhenti. Dengan tidak adanya perbedaan temperatur ($\Delta T = 0$), maka tegangan yang dihasilkan inilah disebut dengan tegangan sisa (Dimas Prasetyo & Yulianto, 2012).

Tegangan sisa pada eksperimen dapat dihitung menggunakan XRD menggunakan metoda $\cos\alpha$. Metode $\cos\alpha$ adalah metode untuk pengukuran tegangan sisa. Seperti disebutkan di atas, jika tidak ada tegangan sisa dalam material, tidak akan ada regangan yang ada pada kristal. Oleh karena itu, jarak kisi kristal difraksi dengan orientasi berbeda adalah sama, demikian pula sudut difraksi. Cincin difraksi (cincin Debye) adalah cincin siklus, di mana jari-jari pada setiap sudut adalah sama. Jika ada tegangan sisa dalam material, jarak kisi kristal dengan orientasi yang berbeda (ϕ) tidak akan sama. Sudut difraksi belum sama. Hal ini akan menyebabkan deformasi cincin Debye, di mana jari-jari pada sudut yang berbeda tidak sama, ditunjukkan pada **Gambar 2.14** dalam metode $\cos\alpha$, sinyal cincin Debye dideteksi oleh detektor area. Kemudian, regangan dimana $=0$ 360° pada cincin Debye dapat digunakan secara efektif untuk memperkirakan tegangan sisa pada spesimen (Lin et al., 2017).



Gambar 2. 14 Skema X-Ray Cos untuk Residual Stress. (Lin et al., 2017)

4 regangan yang berada pada cincin *Debye* di Analisa. Regangan pada sudut pusat dilambangkan sebagai ϵ , demikian pula regangan pada $-\alpha$, $(\pi+\alpha)$, $(\pi-\alpha)$ masing-masing dilambangkan sebagai $\epsilon_{-\alpha}$, $\epsilon_{\pi+\alpha}$, $\epsilon_{\pi-\alpha}$. Kemudian parameter berikut a_1 dan a_2 didapatkan: (Kubo & Sasaki, n.d.).

$$a_1(\phi_0) \equiv \frac{1}{2} [(\epsilon_{\alpha} - \epsilon_{\pi+\alpha}) + (\epsilon_{-\alpha} - \epsilon_{\pi-\alpha})] \quad (2.12)$$

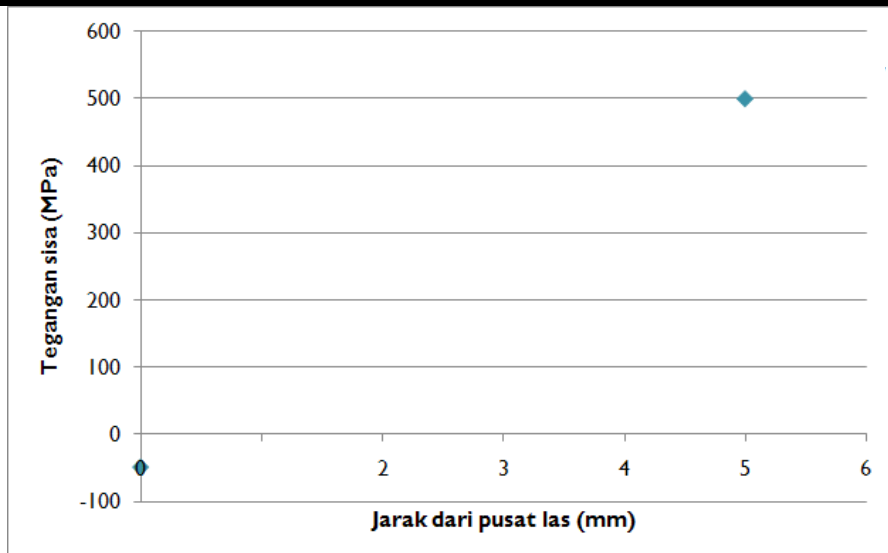
$$a_2(\phi_0) \equiv \frac{1}{2} [(\epsilon_{\alpha} - \epsilon_{\pi+\alpha}) - (\epsilon_{-\alpha} - \epsilon_{\pi-\alpha})] \quad (2.13)$$

Dan untuk tegangan Tarik dan tegangan geser dihitung dengan cara berikut:

$$\sigma_x = -\frac{E}{1+\nu} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\sin 2\psi_0} \left(\frac{\partial a_1(0)}{\partial \cos \alpha} \right) \quad (2.14)$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\sin \psi_0} \left(\frac{\partial a_2(0)}{\partial \sin \alpha} \right) \quad (2.15)$$

Telah dilakukan penelitian untuk menganalisa tegangan sisa setelah pengelasan FCAW oleh Einstein pada tahun 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 (Enstein, 2010).



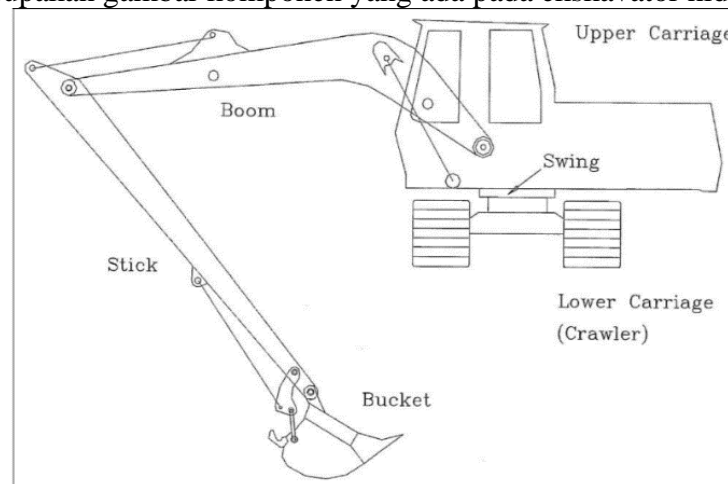
Gambar 2. 15 Grafik tegangan sisa pada pelat 10 mm SS400.

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).

2.9 Ekskavator

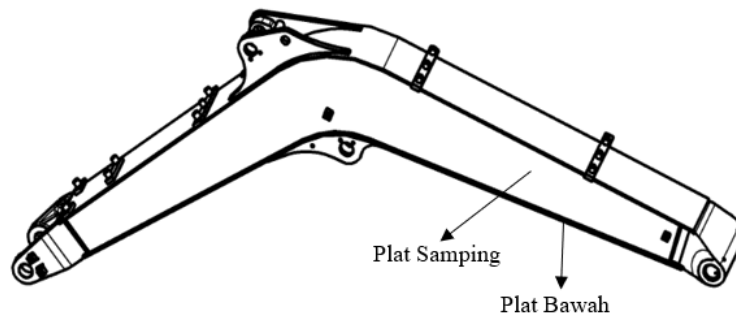
Ekskavator merupakan salah satu jenis peralatan mesin rekayasa yang penting dan tersebar luas. Karakteristik utama ekskavator adalah memiliki fungsionalitas yang luas, efisiensi dan keandalan kerja yang sangat baik. Ini membuatnya dapat memenuhi persyaratan teknik yang berbeda dan banyak digunakan dalam konstruksi infrastruktur, pertambangan, pertanian, transportasi dll (Yu et al., 2021).

Berikut merupakan gambar komponen yang ada pada ekskavator hidrolis.



Gambar 2. 16 Komponen pada ekskavator hidrolis

Berikut merupakan gambar dari bagian *boom* ekskavator yang dimiliki oleh PT. X Indonesia



Gambar 2. 17 Boom PCXX

Pada proses pengelasan PCXX terdapat proses penggabungan 4 plat SS400 menggunakan metode pengelasan. Terdapat 4 tahap pengelasan untuk melakukan perakitan ke empat pelat tersebut. Proses yang mengalami deformasi merupakan *first welding* yaitu menggabungkan pelat samping dan pelat bawah.

Telah dilakukan analisa pada ekskavator menggunakan FEM, Dhawale, dkk pada tahun 2014 (Dhawale, R. M.; Wagh et al., 2014) menganalisa pengaruh pembebanan pada ekskavator menggunakan *static force analysis*. Selanjutnya Dai, dkk pada tahun 2010 (Dai et al., 2010) juga menganalisa mengenai pengaruh beban pada bagian loader boom untuk mengatasi kerusakan pada balok. Namun, masih sangat sedikit yang menganalisa mengenai proses pengelasan pada ekskavator, khususnya pada bagian Boom.

Khususnya dalam hal beberapa komponen las besar, cara mengontrol kualitas pengelasan sangat minim pengalaman. Metode tradisional pembuatan prototipe fisik adalah cara yang efektif untuk mendapatkan pengalaman, tetapi biayanya sangat berat. Jadi, simulasi numerik telah diadopsi untuk mengurangi biaya. Namun, simulasi langsung tidak layak untuk komponen yang dilas besar karena jumlah yang dihitung sangat besar (Dai et al., 2010).

2.10 Metode Elemen Hingga

Finite Element Method merupakan metode untuk melakukan kontinum untuk didiskritisasi menjadi sejumlah bagian (atau elemen) yang terbatas dan menekankan bahwa karakteristik dari domain kontinu dapat diperkirakan dengan merakit sifat-sifat serupa dari elemen-elemen yang didiskritisasi per *node*. Akibatnya, FEM telah diterapkan secara ketat untuk memecahkan berbagai macam masalah dalam sains dan teknik terapan dan telah berkembang pesat selama bertahun-tahun (Govinda Rao et al., 2014).

Persamaan *finite element* yang digunakan untuk menghitung besar Analisa termal yang dilakukan adalah sebagai berikut (Ivanka et al., 2021).

$$[C]\{T\} + [K]\{T\} = \{FT\} \quad (2.16)$$

Dimana,

$$[C] = \int_V \rho C [N]^T [N] dV \quad (2.17)$$

$$[K] = \int_V k[B]^T [B] dV + \int_S hf [N]^T [N] dS \quad (2.18)$$

$$\{FT\} = \int_V Q [N]^T dV + \int_S hf T_{ref} [N]^T dS \quad (2.19)$$

ρ : densitas, kg/m³;

C : panas spesifik, J/kg.K;

k : konduktivitas, W/m.K;

hf : 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} : vektor temperatur noda.

Hasil dari distribusi temperature yang didapat dari persamaan:

$$[C]\{T\} + [K]\{T\} = \{FT\} \quad (2.20)$$

kemudian dimasukkan ke dalam pemodelan analisa struktur dalam bentuk pembebanan termal. Persamaan struktur *finite element* didapatkan sebagaimana berikut:

$${}^{i+1}[K1] \{\Delta U\} - {}^{i+1}[K2] \{\Delta T\} = {}^{i+1}\{R\} - {}^i\{R\}, \quad (2.21)$$

yang mana,

$$[K1] = \int_V [B]^T [D^{ep}] [B] dV \quad (2.22)$$

$$[K2] = \int_V [B]^T [C^{th}] [M] dV \quad (2.23)$$

$$\{R\} = \int_S [N]^T \{p\} dS + \int_V [N]^T \{f\} dV \quad (2.24)$$

$$[D^{ep}] = [D^e] + [D^p] \quad (2.25)$$

Dimana,

{ΔU} : peningkatan *nodal displacement*;

{ΔT} : peningkatan temperatur noda;

[B] : matriks dari *strain-displacement*;

[De] : matriks kekakuan elastis;

[Dp] : matriks kekakuan plastis;

[Cth] : 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:

$${}^{i+1}\{U\} = {}^i\{U\} + \{\Delta U\} \quad (2.26)$$

Selanjutnya, kondisi tegangan pada struktur las didapatkan melalui hubungan tegangan-regangan sebagai berikut:

$${}^{i+1}\{\sigma\} = {}^i\{\sigma\} + \{\Delta\sigma\}$$

$$\{\Delta\sigma\} = [D^{ep}] [B] \{\Delta U\} + [C^{th}] [M] \{\Delta T\} \quad (2.27)$$

2.11 Penelitian Sebelumnya

Riset dan penelitian pengelasan sudah banyak dilakukan sejak dahulu dengan berbagai macam tujuan. Diantaranya adalah mengurangi adanya cacat las, deformasi, tegangan sisa, dan juga pengaruhnya terhadap sifat material. Selain itu, metode riset menggunakan metode elemen hingga juga sudah banyak dilakukan oleh para peneliti. Variasi yang digunakan meliputi *heat input*, arus, arah pengelasan, urutan pengelasan, dan juga berbagai macam parameter lainnya. Berikut merupakan rangkuman dari beberapa penelitian pengelasan menggunakan metode elemen hingga.

Tabel 2.6 Referensi Penelitian Sebelumnya

No	Nama Penulis	Kesimpulan
1	Gannon dkk., 2010 dengan judul “ <i>Effect of welding sequence on residual stress and distortion in flat- bar stiffened plates</i> ”	Penelitian ini menganalisis pengaruh <i>welding sequence</i> terhadap deformasi dan tegangan sisa pada flat bar stiffened plate SM400A dengan pengelasan GMAW menggunakan ANSYS. Dalam penelitian tersebut digunakan parameter pengelasan 270 A, 29, V, dan ukuran pengelasan 6 mm. Ditemukan bahwa urutan pengelasan berpengaruh pada nilai puncak tegangan sisa tersebut. Tegangan sisa pada urutan searah (A) dan searah silang (C) lebih tinggi disbanding ke tengah silang (B) dan ke luar silang (D). Untuk deformasi yang terjadi, urutan B menghasilkan deformasi terbesar, namun urutan C dan D menghasilkan deformasi terkecil.
2	Hidayat, dkk. (2012) dengan judul “ <i>Finite Element Simulation of T-Joint Fillet Weld: Effect of Various Welding Sequences on the Residual Stresses and Distortions</i> ”	Penelitian mengenai pengaruh urutan pengelasan terhadap distribusi temperature, tegangan sisa, dan juga deformasi pada pengelasan T-Joint. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa suhu puncak terjadi sangat dipengaruhi oleh urutan pengelasan. Pengelasan dengan metode bolak balik di 2 sisi las menjadi penghasil tegangan sisa longitudinal dan transversal terkecil.
3	Chand, dkk. (2013) dengan judul “ <i>Numerical and experiment study of residual stress and strain in multi- pass GMA welding</i> ”	Penelitian ini mengenai Analisa numerik dan juga eksperimen pada tegangan dan regangan sisa pada pengelasan GMAW material SS400. Diketahui bahwa distribusi tegangan dan regangan sisa yang dihasilkan pada permukaan plat atas dan plat bawah berbeda dikarenakan beban distribusi panas yang juga berbeda pada plat. Adanya support juga berdampak pada hasil tegangan dan regangan sisa. Diketahui juga bahwa hasil simulasi dan eksperimen yang dilakukan memiliki hasil yang tidak terlalu berbeda.
4	Piekarska, dkk (2016) dengan judul “ <i>Numerical Analysis and Experimental Research on Deformation of Flat Made of TIG Welded 0H18N9 Steel</i> ”	Berdasarkan hasil simulasi dan juga eksperimen yang dilakukan pada penelitian ini, diketahui bahwa arah deformasi sama. Simulasi digunakan menggunakan <i>software ABAQUS</i> .

Lanjutan Tabel 2.6

No	Nama Penulis	Kesimpulan
5	Dhinakaran, dkk. (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> ”	Dhinakaran, dkk pada tahun 2017 juga telah melakukan eksperimen dan juga Analisa numerik pada <i>weld bead geometry</i> dan distribusi temperature dengan plasma arc welding menggunakan material Ti-6Al-4V. Dalam mengukur distribusi temperatur, penelitian ini menggunakan alat <i>infrared thermometer</i> . 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 heat input 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.
6	Abdullah, dkk. (2017) dengan judul “ <i>Study the Effect of Welding Parameters on the Residual Stresses Induced by Submerged Arc Welding process</i> ”	Dalam pekerjaan ini, empat faktor pengelasan (arus, tegangan busur, kecepatan perjalanan pengelasan dan sudut yang disertakan) digunakan untuk mengelas baja karbon rendah (ASTM A516 Grade 60). Data menunjukkan bahwa kecepatan perjalanan pengelasan dan tegangan busur memiliki pengaruh yang signifikan terhadap tegangan sisa. Ditemukan bahwa solusi optimum untuk tegangan sisa minimum adalah pada arus las 450 Amp, tegangan busur 34 volt, kecepatan las 38 cpm, dan sudut termasuk 60°. Dimana nilai tegangan sisa optimum adalah (-88,4 MPa).
7	Ismail, dkk. (2018) dengan judul “ <i>Thermal deformation of gas metal arc welding on aluminum alloy T-joints</i> ”	Makalah ini membahas tentang deformasi termal pada T-joint paduan aluminium AA6061 setelah terkena panas dengan proses gas metal arc welding (GMAW). Dalam penelitian ini, dua parameter utama; Kecepatan las dan tegangan las digunakan untuk mengevaluasi distorsi sudut, susut melintang dan susut longitudinal yang terjadi pada proses GMAW. Hasil penelitian menunjukkan bahwa distorsi sudut lebih besar dengan kecepatan pengelasan terendah. penyusutan melintang berkurang secara bertahap dengan meningkatnya kecepatan pengelasan dan penyusutan melintang juga meningkat secara linier dengan meningkatnya tegangan pengelasan.

Lanjutan Tabel 2.6

No	Nama Penulis	Kesimpulan
8	Peric, dkk (2018) dengan judul <i>“Numerical Analysis of Longitudinal Residual Stresses and Deflections in a T-joint Welded Structure Using a Local Preheating Technique”</i>	Penelitian ini dilakukan untuk menyelidiki pengaruh suhu pemanasan awal yang berbeda dan waktu interpass pada bidang tegangan sisa longitudinal dan defleksi struktur. Peningkatan suhu pemanasan awal meningkatkan medan tegangan sisa longitudinal di ujung pelat. Dapat disimpulkan bahwa dengan bertambahnya waktu interpass, defleksi pelat meningkat secara signifikan, sedangkan pengaruh waktu interpass pada bidang tegangan sisa longitudinal dapat diabaikan.
9	Ramos. Dkk (2018) dengan judul <i>“Numerical modelling of welded T-joint configurations using SYSWELD”</i>	Ramos pada tahun 2018 melakukan konfigurasi las T-joint dengan mempertimbangkan proses pengelasan busur dan pengelasan sinar laser dengan metode elemen hingga. Oleh karena itu, analisis sensitivitas mesh dilakukan untuk mengevaluasi ukuran elemen minimum yang diperlukan untuk hasil yang akurat. Hasil untuk T-joint antara tabung baja dan pelat baja menggunakan laser beam welding (LBW) dan las busur diperoleh. Lasan sinar laser menunjukkan pengurangan yang signifikan dari zona yang terkena panas dan, akibatnya, tegangan sisa tarik terbatas pada area yang lebih kecil.
10	Panji, dkk, (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>	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.
11	Khoshroyan dan 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>	Dilakukan penelitian terkait efek parameter las dan urutan pengelasan terhadap tegangan sisa dan distorsi pada pengelasan sambungan-T. Hasil penelitian didapatkan jika 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.

Lanjutan Tabel 2.6

No	Nama Penulis	Kesimpulan
12	Asadi, dkk (2021) 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> ”	Asadi pada tahun 2021 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 heat input pada tegangan sisa diselidiki. Hasilnya adalah meningkatnya kecepatan pengelasan, tegangan tarik aksial pada permukaan pipa berkurang.
13	Vemanaboina, dkk (2021) dengan judul “ <i>Effect of Heat Input on Distortions and Residual Stresses Induced by Gas Tungsten Arc Welding in SS 316L to INCONEL625 Multipass Dissimilar Welded Joints</i> ”	Dalam penelitian ini, distorsi dan tegangan sisa pada sambungan las multipass dianalisis sehubungan dengan <i>heat input</i> . Sambungan las diproduksi menggunakan proses las busur tungsten gas (GTAW) dengan pengisi ERNiCrMo-3 berbasis Ni yang berbeda. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa meningkatnya heat input maka akan meningkat juga residual stress dan deformasi pengelasan.

Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya, dilakukan analisa penggunaan heat input dan pengaruhnya terhadap hasil pengelasan. Berikut merupakan referensi *heat input* yang telah digunakan untuk pengelasan 9 mm pada penelitian sebelumnya:

Tabel 2. 7 Referensi Penggunaan *heat input* penelitian sebelumnya.

Penulis dan Judul	Tebal Plat (mm)	Jenis Material dan Tipe Las	<i>Heat Input (J/mm)</i>	Hasil
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	Pelat 10 mm menghasilkan distorsi terkecil menggunakan parameter yang digunakan.
	10	SS400, GMAW	1166.117	
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	Dengan parameter ini menghasilkan kekuatan tarik yang paling baik.

Lanjutan Tabel 2.7

Penulis dan Judul	Tebal Plat (mm)	Jenis Material dan Tipe Las	Heat Input (J/mm)	Hasil
Anggigi, dkk. 2019 dengan judul "Analisa Pengaruh Temperatur Normalizing Pada Sambungan Las SMAW (Shielded Metal Arc Welding) Terhadap Kekuatan Tarik, Tekuk dan Mikrografi Baja Karbon Rendah"	10	SS400, SMAW	1000	Dengan menggunakan parameter ini, menghasilkan kekuatan tarik 391 Mpa.
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	Parameter ini menghasilkan lebar HAZ yang diharapkan dan memiliki kekuatan tarik optimum.
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	Menghasilkan 61.74 Energi <i>Impact</i> .
	10	AISI 1015 Steel, GMAW	1454.61	Menghasilkan 54.4 energi <i>impact</i> .
Rata-Rata Heat Input (J/mm)			1130	

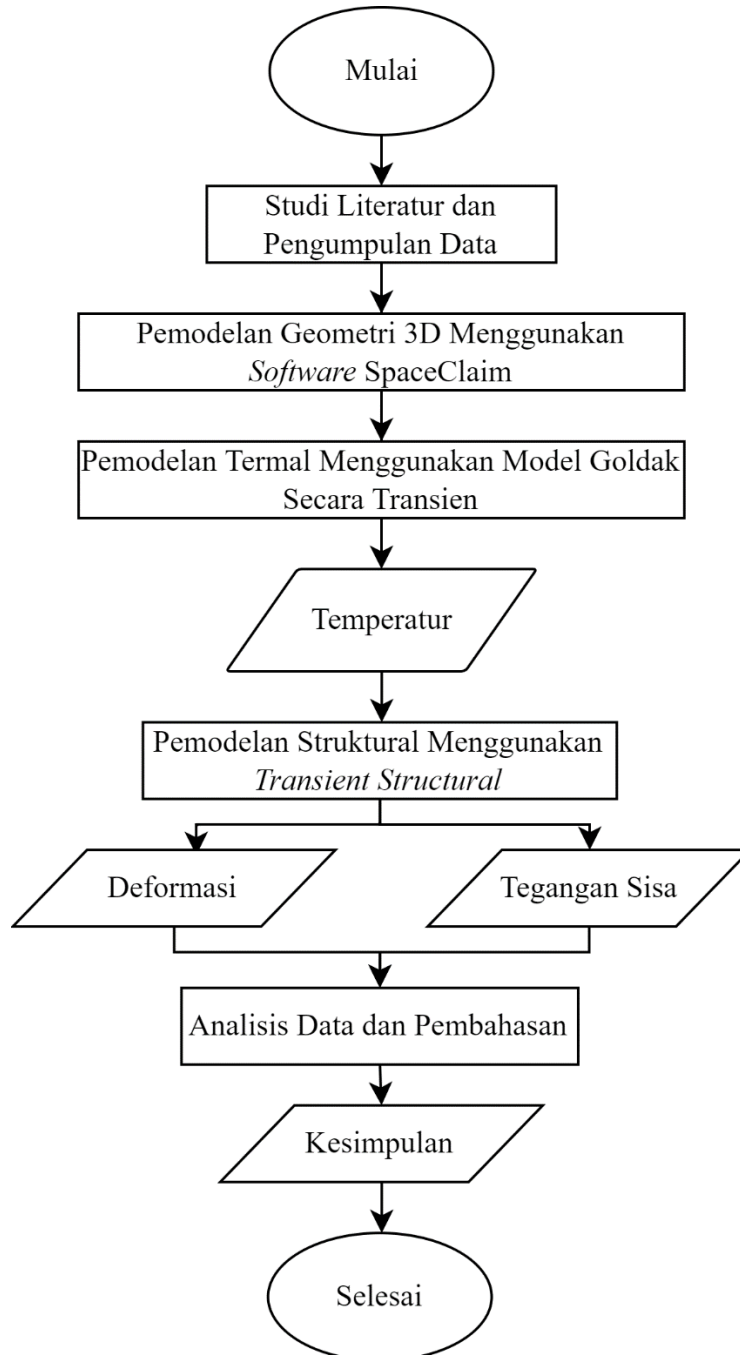
Ditemukan bahwa rata-rata nilai heat input yang digunakan adalah 1130 J/mm dengan hasil yang optimum dari masing-masing penelitian sebelumnya.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

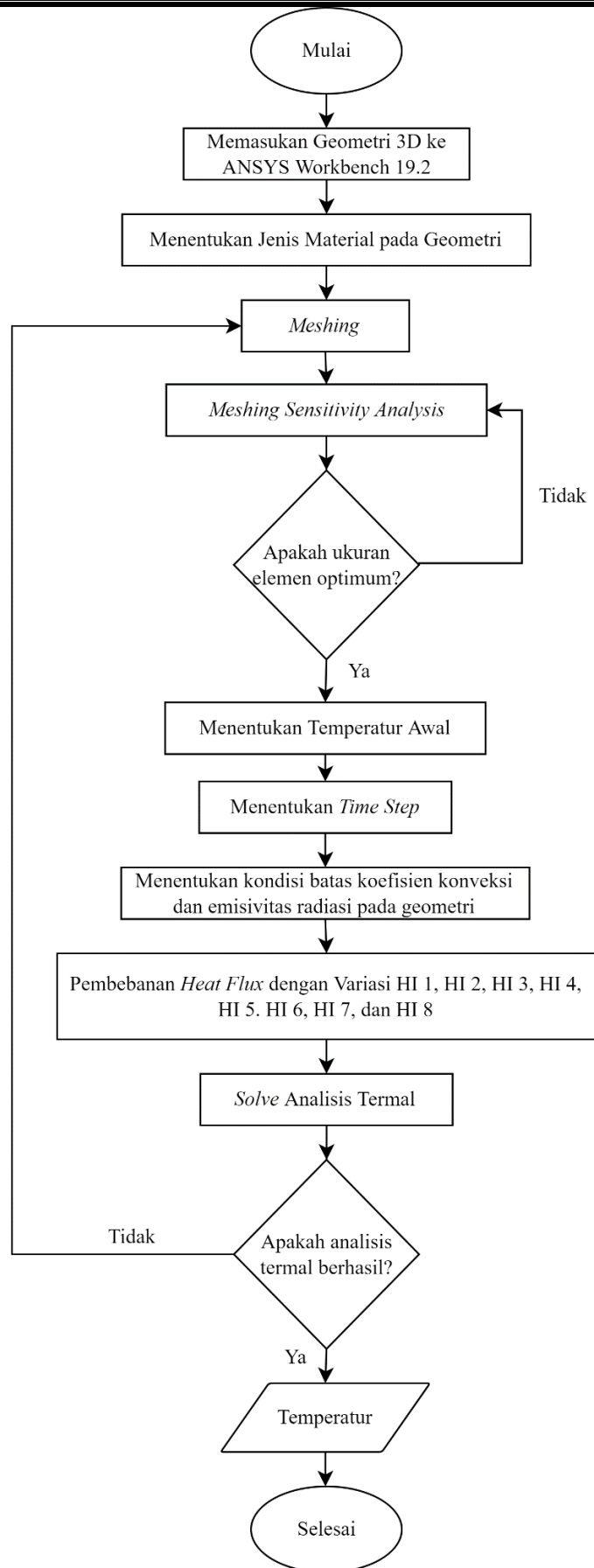
BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir

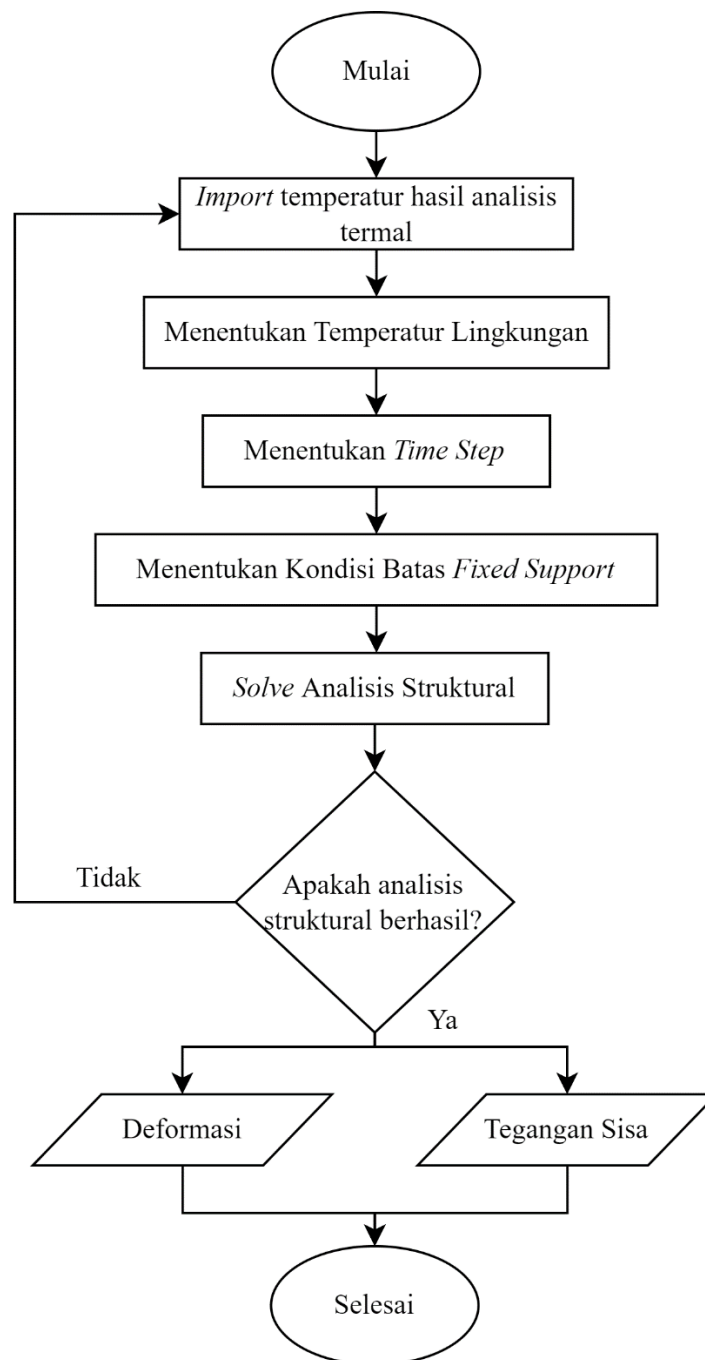
Berikut merupakan diagram alir yang dilakukan pada penelitian kali ini.



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 2 Diagram Alir Pembebanan Termal



Gambar 3. 3 Diagram Alir Pembebanan Struktural

3.2. Alat Penelitian

Adapun alat penelitian yang digunakan pada penelitian kali ini adalah sebagai berikut:

1. *Spaceclaim*, merupakan *software* yang digunakan untuk memproses *stamping part* gambar 2D dari PT.X menjadi model 3D.
2. ANSYS 21 R2, merupakan *software* yang digunakan untuk mensimulasikan *thermal analysis* dan *structural analysis* untuk mendapatkan deformasi dan tegangan sisa.

3.3. Material Pengelasan dan Parameter Pengelasan

Untuk melakukan analisis deformasi, distribusi temperatur dan tegangan sisa menggunakan metode elemen hingga, diperlukan sifat mekanik dan juga thermal dari material yang digunakan. Material yang digunakan mencakup Plate samping, bawah dan *weld bead* dari *Boom Ekskavator*. Material yang digunakan untuk Plate samping dan bawah adalah SS 400 yang masuk ke dalam kategori *structural low carbon steel*.

Data sifat material dimasukkan pada fitur *engineering data* di aplikasi ANSYS 21 R2.

3.3.1. JIS G3101-SS400

Berikut data sifat termal, sifat mekanik, dan entalpi pada SS400 mengikuti yang digunakan pada penelitian kali ini:

Tabel 3. 1 Data Sifat Termal menurut referensi temperatur dari SS400 (Jeyakumar & Christopher, 2013).

<i>Temperature (K)</i>	<i>Specific Heat (J/Kg.K)</i>	<i>Thermal Conductivity (W/Mk)</i>	<i>Density (Kg/m³)</i>	<i>Thermal Expantion Coefficient (10⁻⁶K⁻¹)</i>
273	480	60	7880	1.1
373	500	50	7880	1.15
473	520	45	7800	1.2
673	650	38	7760	1.3
873	750	30	7600	1.42
1073	1000	25	7520	1.45
1473	1400	28	7300	1.45
1573	1600	37	7250	1.45
1823	1700	37	7180	1.46

Tabel 3. 2 Data Sifat Mekanik menurut referensi temperatur dari SS400 (Jeyakumar & Christopher, 2013) .

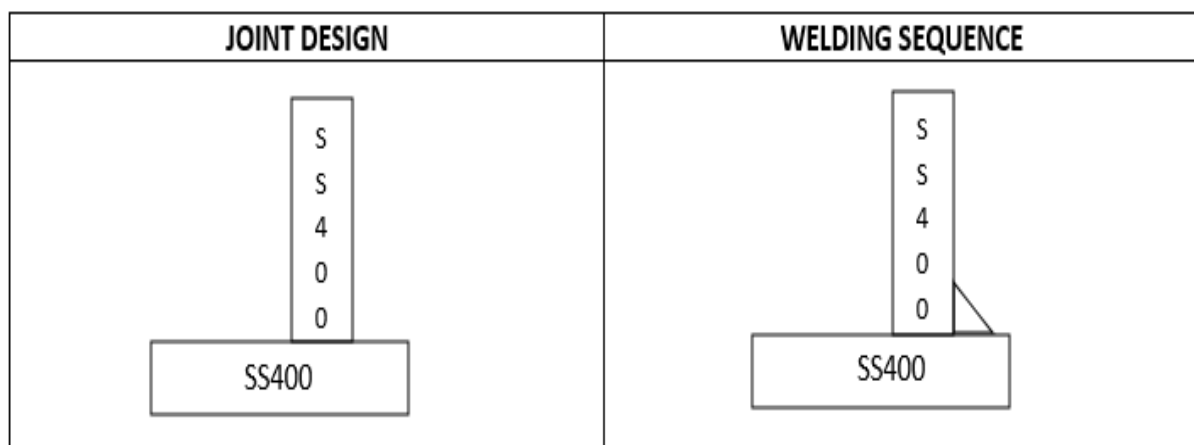
<i>Temperature (K)</i>	<i>Modulus Young (Gpa)</i>	<i>Poisson's Ratio</i>
273	210	0.28
373	200	0.285
473	200	0.29
673	170	0.31
873	80	0.33
1073	35	0.33
1473	15	0.36
1573	10	0.38
1823	10	0.39

Tabel 3. 3 Data Entalpi menurut referensi temperatur (Mondal et al., 2018).

<i>Temperature (°C)</i>	<i>Enthalpy (MJ/m³)</i>
100	360
200	720
300	1100
400	1500
500	2000
600	2600
700	3000
800	3700
900	4500
1000	5000
2500	9000

3.3.2. Prosedur dan 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** . Penelitian dilakukan dengan melakukan variasi arus dan kecepatan las seperti pada **Tabel 3.5**.



Gambar 3. 4 Desain Sambungan Pengelasan

Tabel 3. 4 Parameter Pengelasan

Proses Pengelasan	Metal Active Gas (MAG)
Tipe Sambungan	<i>Fillet Joint (Without Groove)</i>
Jarak 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

Berikut merupakan variasi arus dan kecepatan las yang digunakan pada penelitian kali ini dengan mengacu pada referensi sebelumnya;

Tabel 3. 5 Variasi Parameter Arus dan Kecepatan Las

Kode Pengelasan	Arus (A)	Voltase (V)	Kecepatan Pengelasan (mm/s)	Heat Input (J/mm)
HI1	230	25	8,33	552,220
HI2	240	25	8,33	576,230
HI3	250	25	8,33	600,240
HI4	270	25	8,33	648,259
HI5	230	25	5	920
HI6	240	25	5	960
HI7	250	25	5	1000
HI8	270	25	5	1080

3.4. Metode Penelitian

Dalam proses pelaksanaan penelitian simulasi ini dilakukan proses simulasi dengan membandingkan deformasi, distribusi temperatur, dan tegangan sisa. Pada penelitian ini dilakukan secara aktual dan simulasi menggunakan *software ANSYS Workbench 2021* dengan beberapa tahapan yaitu:

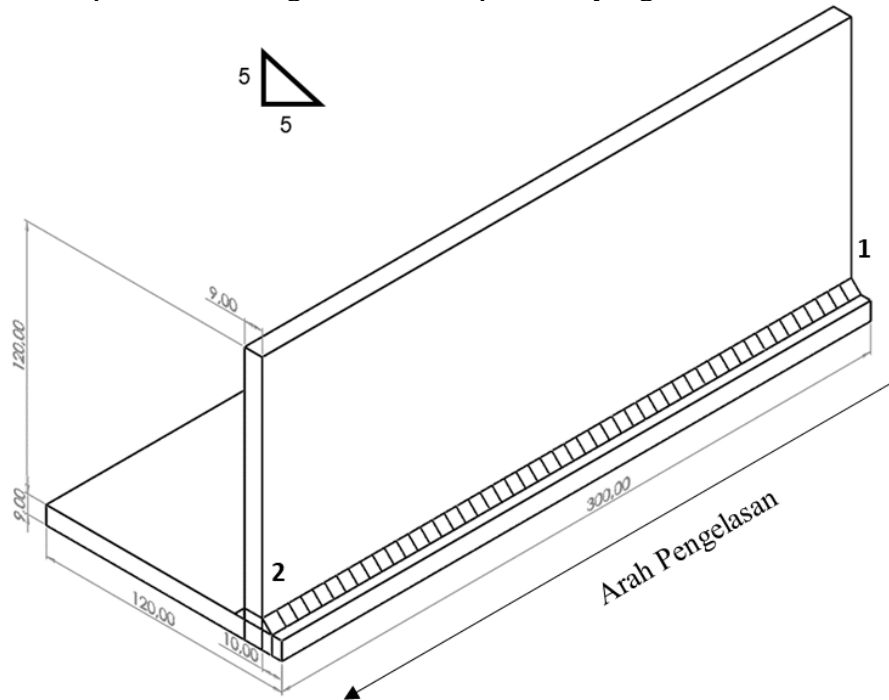
3.4.1. Pemodelan Spesimen 3D

Pada penelitian kali ini, geometri *boom ekskavator* didapatkan dari PT.X dalam bentuk 2D. *Boom* ekskavator yang digunakan adalah menggunakan model PCXX oleh PT. X yang mana digunakan untuk ekskavator dengan maksimum beban operasional 4,5 ton. Gambar 2D diberikan dalam bentuk pdf oleh PT. X.

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

Berdasarkan *2D Drawing* yang telah diberikan, Ddibuatkan model 3D spesimen menggunakan *software Spaceclaim* untuk masing-masing part yang dijadikan spesimen untuk penelitian.

Berikut merupakan dimensi geometri dari spesimen yang dilakukan analisa.



Gambar 3. 5 Dimensi spesimen boom ekskavator.

Tabel 3. 6 Dimensi spesimen *boom* ekskavator

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

Pada **Gambar 3.5** dapat dilihat bahwa spesimen menggunakan plat dengan tebal 9 mm dengan panjang 300 mm dan lebar 120 mm. Arah pengelasan dilakukan mulai dari titik 1 menuju titik 2 seperti pada gambar.

3.4.2. Memasukkan Data Material

Data sifat material SS400 pada **Tabel 3.1**, **Tabel 3.2**, dan **Tabel 3.3** dimasukkan menggunakan fitur “*engineering data*” pada *software* ANSYS Workbench R2 2021.

3.4.3. Meshing

Meshing dilakukan dengan membagi keseluruhan model menjadi elemen-elemen kecil yang sama agar analisa dapat dilakukan secara detail pada setiap titik/nodal keseluruhan model. Bentuk elemen yang digunakan adalah hexa (3D).

3.4.4. *Meshing Sensitivity Analysis*

Dilakukan analisa *mesh* konvergensi untuk menemukan parameter *mesh* yang paling optimum diantara ukuran *mesh* 5 mm, 4 mm, dan 3,5 mm. Analisa dilakukan dengan membandingkan nilai temperatur global maksimum. Lalu dicari nilai temperatur yang mulai konstan pada setiap ukuran *mesh* dengan waktu yang paling minimum.

3.4.5. Melakukan Pemodelan Analisis Termal

1. *Setup*

Setelah melakukan pembuatan geometri, maka geometri tersebut dianalisa secara termal menggunakan *Transient Thermal* pada ANSYS *Workbench* 2021. Pemilihan jenis elemen tersebut dilakukan secara otomatis oleh ANSYS. *Initial Temperature* yang digunakan adalah 31°C. Kemudian menentukan step pengelasan yaitu 2 step dimana step 1 dilakukan untuk proses pengelasan dan step 2 untuk proses pendinginan.

Metode *time stepping* yang digunakan yaitu *program controlled*. Lalu menentukan nilai koefisien konveksi sebesar 25 W/m²K. Emisivitas radiasi yang digunakan sebesar 0,9 di seluruh permukaan material.

2. *Load*

Dilakukan pembebanan *heat flux* pada setiap permukaan dari *weld bead*. Nilai *heat flux* didapatkan melalui input menggunakan ACT persamaan Goldak.

3. *Result*

Setelah itu pilih “*temperature*” dan “*solve*” untuk mendapatkan hasil analisa termal berupa distribusi temperatur padapengelasan.

3.4.6. Melakukan Pemodelan Analisis Struktural

1. *Setup*

Hasil analisa termal dari “*Transient Thermal*” selanjutnya di-*import* ke “*Transient Structural*” untuk analisis struktur dari material. Pada analisis struktur ini elemen yang digunakan adalah SOLID185. Selanjutnya tambahkan *fixed support* pada geometri material sebagai representasi dari pengelasan *tack*.

2. *Result*

Setelah itu pilih “*EPPLZ*”, “*EPPLX*”, dan “*Ux*”, kemudian “*solve*” untuk mendapatkan hasil analisis struktur 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.

3.4.7. Variasi Simulasi

Selanjutnya dilakukan variasi percobaan dengan memvariasikan arus dan kecepatan las seperti pada **Tabel 3.5**. Hasil deformasi, dan juga tegangan sisa kemudian dianalisis untuk mengetahui parameter mana yang menghasilkan deformasi dan tegangan sisa paling sedikit.

3.5. Rancangan Penelitian

Pada penelitian ini, rancangan penelitian yang digunakan adalah sebagai berikut:

Tabel 3. 7 Rancangan Penelitian

Material	Heat Input (J/mm)	Variasi Las	Distribusi Temperatur	Deformasi	Tegangan Sisa
SS400	552,220	HI1	✓	✓	✓
	576,230	HI2	✓	✓	✓
	600,240	HI3	✓	✓	✓
	648,259	HI4	✓	✓	✓
	920	HI5	✓	✓	✓
	960	HI6	✓	✓	✓
	1000	HI7	✓	✓	✓
	1080	HI8	✓	✓	✓

3.6. Jadwal Penelitian

Adapun jadwal yang telah ditentukan untuk penelitian ini adalah sebagai 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	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
Observasi Lapangan dan Pengumpulan Data	█	█	█	█												
Simulasi Permodelan					█	█	█	█	█	█	█	█				
Analisis Data dan Pembahasan													█	█	█	█
Penyusunan Laporan Akhir													█	█	█	█

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

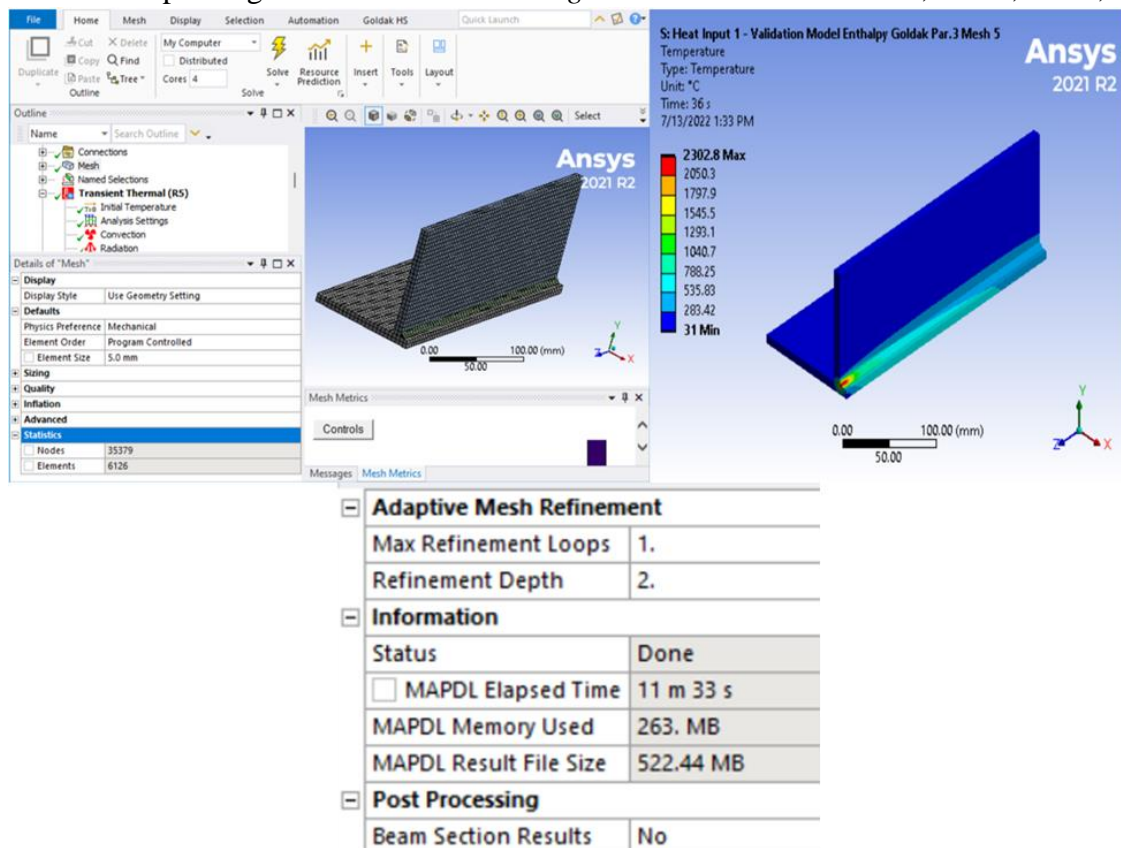
4.1 Meshing Sensitivity Analysis

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 lalu digambarkan dalam sebuah grafik. Maka dari grafik tersebut dicari dimana titik konvergensinya, yaitu titik-titik yang mulai berbentuk garis lurus atau stabil, yang menandakan bahwa pada *meshing* tersebut hasil data yang ditinjau sudah sesuai dengan keadaan sebenarnya.

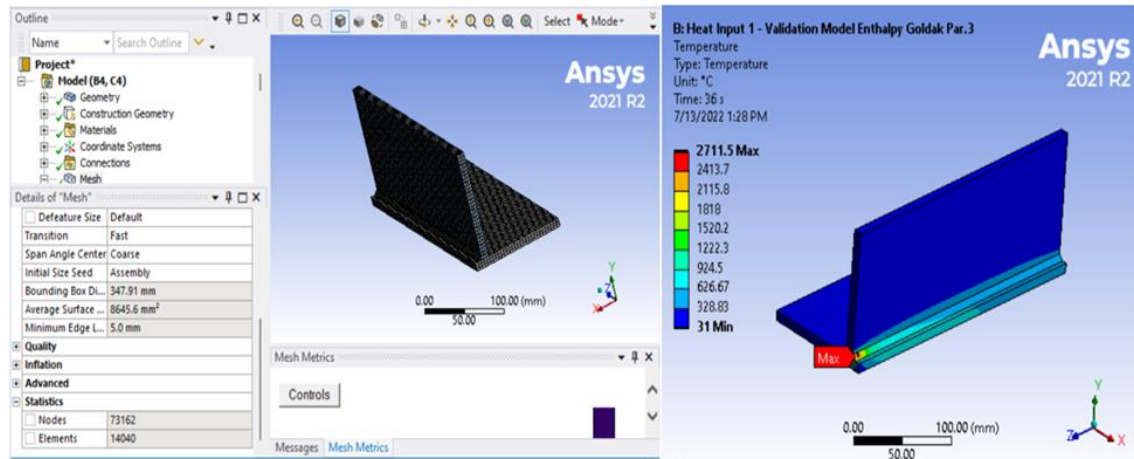
Dalam proses analisis sensitivitas *meshing* dilakukan dengan memvariasikan *meshing* pada model. Pada umumnya, semakin kecil ukuran suatu *meshing* tersebut, semakin besar pula kemungkinan konvergensinya. Tetapi semakin kecil ukuran suatu *meshing* pada model, maka semakin banyak pula elemen yang dihasilkan.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

Pada penelitian ini, analisis sensitivitas *meshing* dilakukan dengan membandingkan temperatur global maksimum yang dihasilkan dari analisis termal. *Meshing* yang digunakan menggunakan tipe *Multizone* pada seluruh geometri model. Variasi *mesh* yang digunakan adalah ukuran *mesh* dengan besaran 5 mm, 4 mm, dan 3,5 mm.

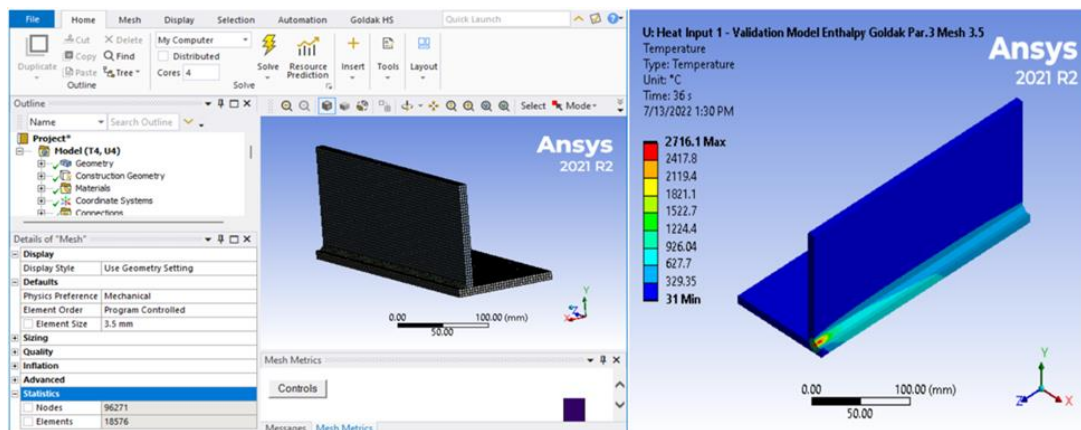
Berikut merupakan gambar dari hasil *meshing* dari ukuran elemen 5 mm, 4 mm, dan 3,5 mm.



Gambar 4. 1 Hasil dari *meshing* 5 mm



Gambar 4. 2 Hasil dari *meshing* 4 mm

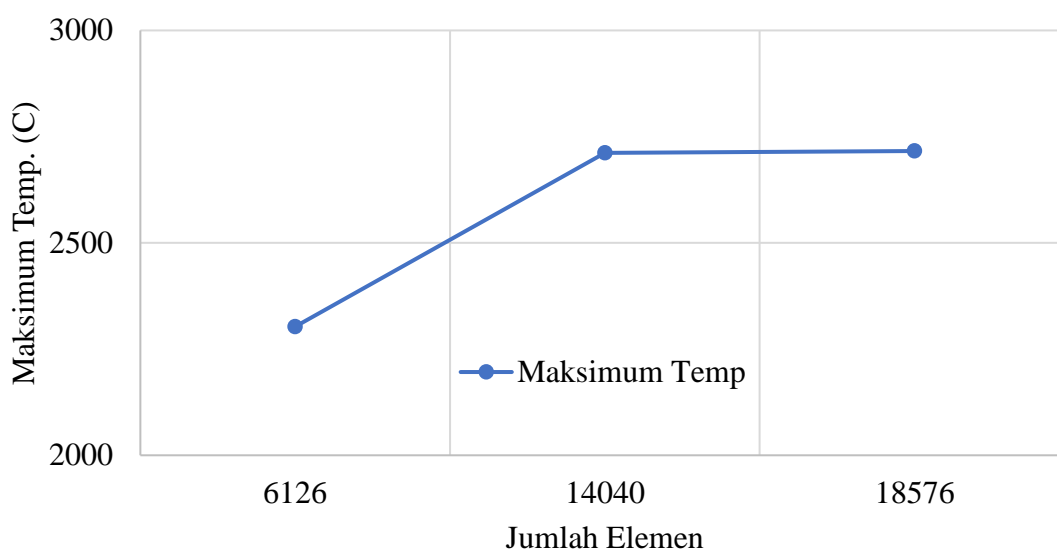


Gambar 4. 3 Hasil dari *meshing* 3,5 mm

Pada **Gambar 4.1** sampai **Gambar 4.3** didapatkan nilai jumlah elemen, waktu penyelesaian, dan nilai dari temperatur puncak pada pembebanan termal. Waktu yang digunakan adalah waktu untuk melakukan simulasi pembebanan termal. Nilai ini kemudian dianalisa untuk diketahui ukuran *mesh* yang paling optimum.

Tabel 4. 1 Temperatur Global Maksimum yang terjadi pada setiap jumlah elemen

Mesh	Jumlah Elemen	Maksimum Temperatur Global (C)	Waktu Penyelesaian (Jam)
5 mm	6126	2302.8	1,5 Jam
4 mm	14040	2711.5	3,5 Jam
3,5 mm	18576	2716.1	4,7 Jam



Gambar 4. 4 Grafik *Mesh* Konvergensi terhadap temperatur global maksimum

Pada **Gambar 4.4** diatas dapat dilihat grafik hasil pemodelan termal menggunakan *software* ANSYS Mechanical 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 tegangan yang didapatkan. Grafik seperti inilah yang dinyatakan telah konvergen. Maka *meshing* jumlah elemen yang digunakan adalah *meshing* dengan ukuran 4 mm dan jumlah elemen yang digunakan adalah 14040 elemen.

4.2 Simulasi Pembebanan Termal

Sebelum melakukan pembebanan termal, geometri dari benda kerja di-*meshing* terlebih dahulu. Hal ini dilakukan agar geometri benda kerja dapat dibagi menjadi bagian yang kecil sehingga analisis dapat dilakukan. *Meshing* tersebut membagi geometri menjadi elemen dan nodal. *Meshing* dilakukan agar analisa termal dan struktur dapat dilakukan secara detail pada geometri. Pada penelitian yang dilakukan kali ini, elemen yang digunakan pada analisa termal adalah SOLID 278. Elemen ini digunakan dikarenakan dapat digunakan untuk mengukur distribusi temperatur berdasarkan perpindahan panas yang terjadi pada proses pengelasan, yaitu konduksi, konveksi,

dan radiasi. Setelah dilakukan analisa termal, elemen SOLID278 melakukan *switch* elemen menjadi SOLID185 untuk melakukan analisa struktural.

Heat input yang terjadi secara konduksi diberikan menggunakan *heat flux* dengan memasukkan nilai *heat input* dan kecepatan las pada ACT untuk persamaan Goldak seperti pada persamaan (2.2). Posisi dari koordinat juga dipasang 45° menyesuaikan dengan posisi las yang dilakukan oleh PT. X.

Heat flux yang didapatkan dari persamaan Goldak 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.

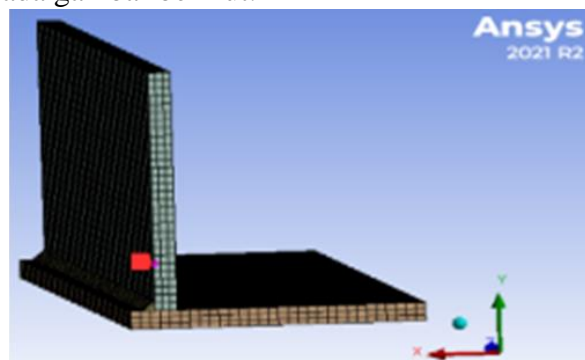
Variasi yang dilakukan pada penelitian kali ini meliputi variasi arus dan kecepatan las dimana nilai tersebut mempengaruhi nilai *heat input* yang digunakan. Variabel tersebut juga berpengaruh pada perhitungan persamaan goldak yang menjadi nilai beban pada aplikasi ANSYS.

Variasi arus dan kecepatan las yang diberikan mengikuti *best practice* yang dilakukan oleh PT X dengan kode variasi las HI 3 dan juga mengikuti referensi nilai *heat input* pada penelitian sebelumnya. Berdasarkan **Tabel 3.4**, diketahui bahwa nilai *heat input* terkecil adalah variasi kode las HI 1 senilai $552,220 \text{ J/mm}^2$ dengan nilai arus 230 A, voltase 25 V, dan kecepatan las 8,33 mm/s. Sedangkan untuk nilai *heat input* terbesar adalah HI 8 senilai 1080 J/mm^2 dengan nilai arus 270 A, nilai voltase 25 V, dan kecepatan las 5 mm/s. Waktu pengelasan yang dibutuhkan pada penelitian kali ini mengikuti 2 kecepatan las yaitu 36 detik untuk kecepatan 8,33 mm/s dan 60 detik untuk kecepatan 5 mm/s. Setelah pemberian beban termal dilakukan, dilakukan pendinginan hingga detik ke-7500 agar spesimen yang digunakan mencapai suhu ruangan yaitu 31°C .

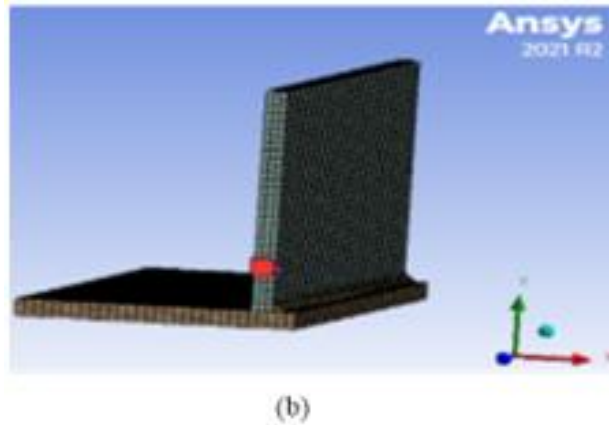
4.1.1 Hasil Distribusi Temperatur

Pada proses pengelasan, temperatur yang dimiliki oleh material yang dikenakan beban terus meningkat dan terus 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 3.4** yaitu dari ujung *base metal* kanan menuju ujung *base metal* kiri.

Proses verifikasi distribusi temperatur dilakukan dengan membandingkan dengan data trial oleh PT. X menggunakan parameter HI 3 dengan nilai arus 250 A, voltase 25 V, dan kecepatan las 8,33 mm/s. Parameter ini merupakan *best practice* yang dilakukan oleh PT X. Verifikasi dilakukan di 2 titik yang berjarak 25 mm dari *weld bead* pada ujung awal pengelasan (nodal 1) dan juga ujung akhir pengelasan (nodal 2). Titik merah menggambarkan posisi tempat nodal dilakukan pengukuran temperatur. Penentuan nodal mengikuti pengukuran temperatur yang dilakukan pada *trial* PT.X, namun tidak merepresentasikan siklus termal pada proses pengelasan. Kedua titik tersebut terletak seperti pada gambar berikut:



(a)



Gambar 4.5 (a) nodal 1 ujung awal pengelasan, (b) nodal 2 ujung akhir pengelasan

Berikut merupakan hasil verifikasi temperatur yang dilakukan antara simulasi dengan *trial* aktual pada titik nodal 1 dan nodal 2.

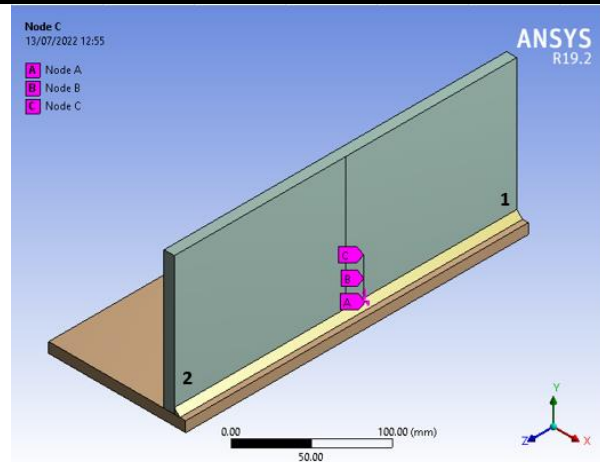
Tabel 4.2 Verifikasi maksimum temperatur pada nodal 1 dan nodal 2.

Titik	Maksimum Temperatur (°C)		Error (%)
	Data Trial PT.X	Simulasi	
Nodal 1	206	214	4
Nodal 2	186	186	0

Pada **Tabel 4.2** dapat diketahui bahwa nilai maksimum antara simulasi dengan data *trial* tidak jauh berbeda dengan nilai rata-rata error 2 %. Dengan menggunakan urutan pengelasan progresif, diketahui bahwa pada nodal 1 suhu meningkat pada awal pengelasan dikarenakan pada posisi terdekat dengan nodal. 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.

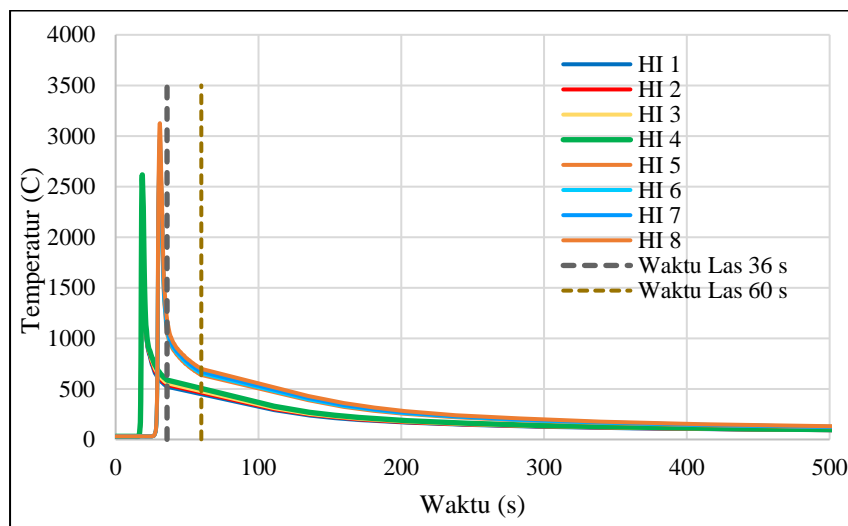
Setelah dilakukan verifikasi temperatur menggunakan pengelasan HI 3, dilakukan analisa siklus termal yang dimiliki oleh variasi las HI 1, HI 2, HI 3, HI 4, HI 6, HI 7, dan HI 8. Pada pengelasan HI 1, HI 2, HI 3, dan HI 4 memiliki nilai kecepatan las yang sama, begitu juga dengan pengelasan HI 5, HI 6, HI 7, dan HI 8. Sedangkan untuk tegangan yang digunakan untuk seluruh variasi adalah konstan yaitu 25 V. Perbedaan pada nilai *heat input* mempengaruhi temperatur yang terjadi pada proses pengelasan.

Pola siklus termal pengelasan untuk masing-masing diambil pada 3 nodal yang berada di tengah lintasan las atau berjarak 150 mm dari sumbu-z seperti pada gambar berikut

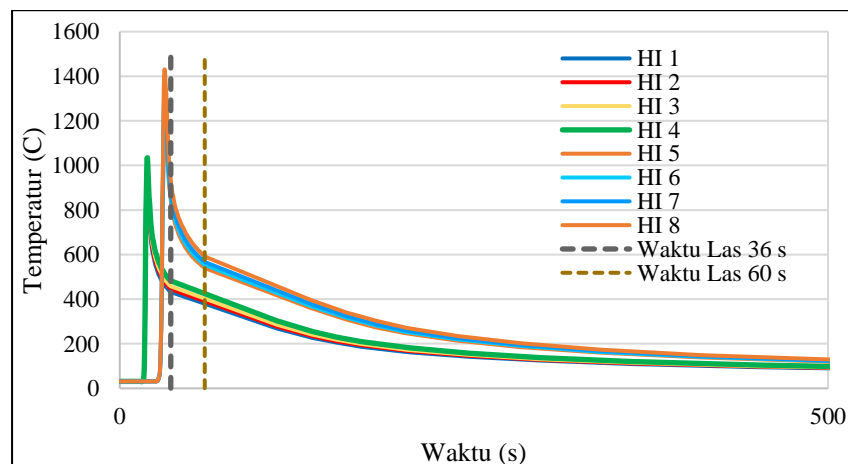


Gambar 4. 6 Nodal siklus termal yang berjarak 150 mm dari tepi.

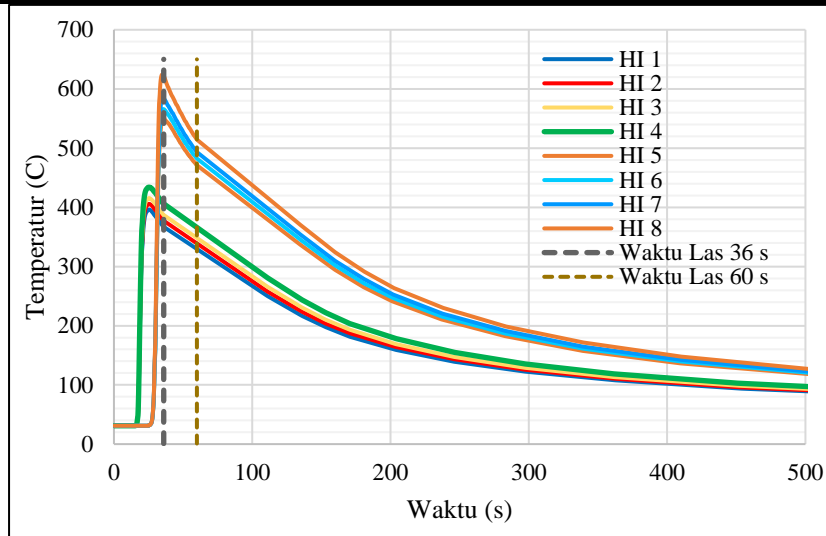
Pada **Gambar 4.6**, dapat dilihat bahwa posisi nodal A berada di tengah dari *weld bead*, nodal B berjarak 1 mm dari *weld bead*, dan nodal C berjarak 5 mm dari *weld bead*. Titik diatas diambil untuk mengetahui persebaran distribusi panas pada jarak tertentu pada proses pengelasan. Pada **Gambar 4.7**, **Gambar 4.8**, dan **Gambar 4.9** dapat dilihat hasil siklus termal di 3 nodal untuk masing-masing variasi pengelasan.



Gambar 4. 7 Siklus termal pengelasan pada titik nodal A.



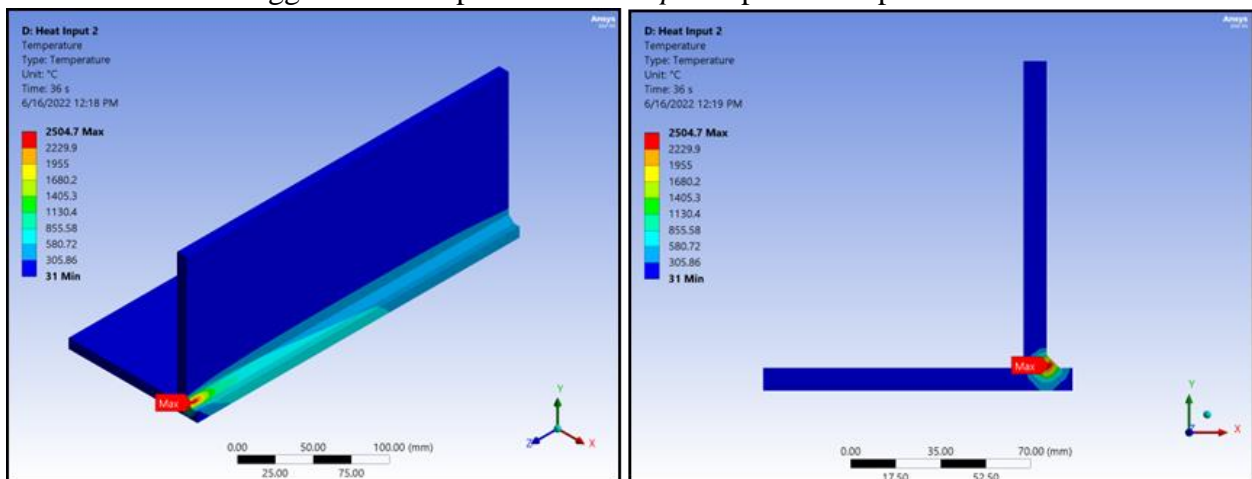
Gambar 4. 8 Siklus termal pengelasan pada titik nodal B.



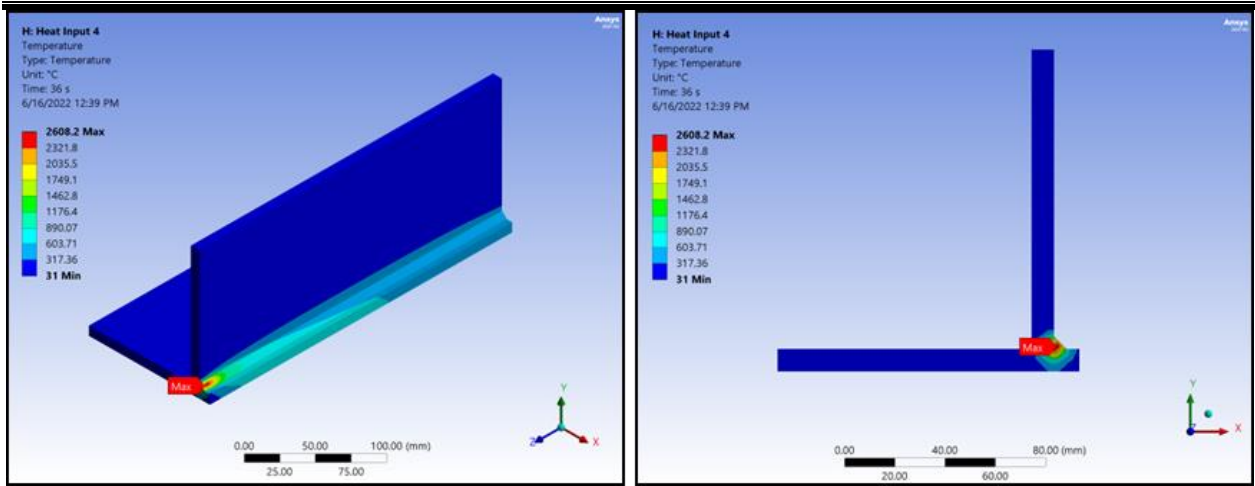
Gambar 4.9 Siklus termal pengelasan pada titik nodal C

Dapat dilihat bahwa pada titik nodal A, B, dan C, temperatur meningkat ketika beban *heat flux* sudah mengenai atau berada di posisi terdekat dengan nodal. Untuk nodal A, suhu dapat mencapai titik leleh. Pengelasan dengan kecepatan las 5 mm/s memiliki temperatur puncak lebih tinggi dibandingkan dengan variasi dengan kecepatan 8, 33 mm/s.

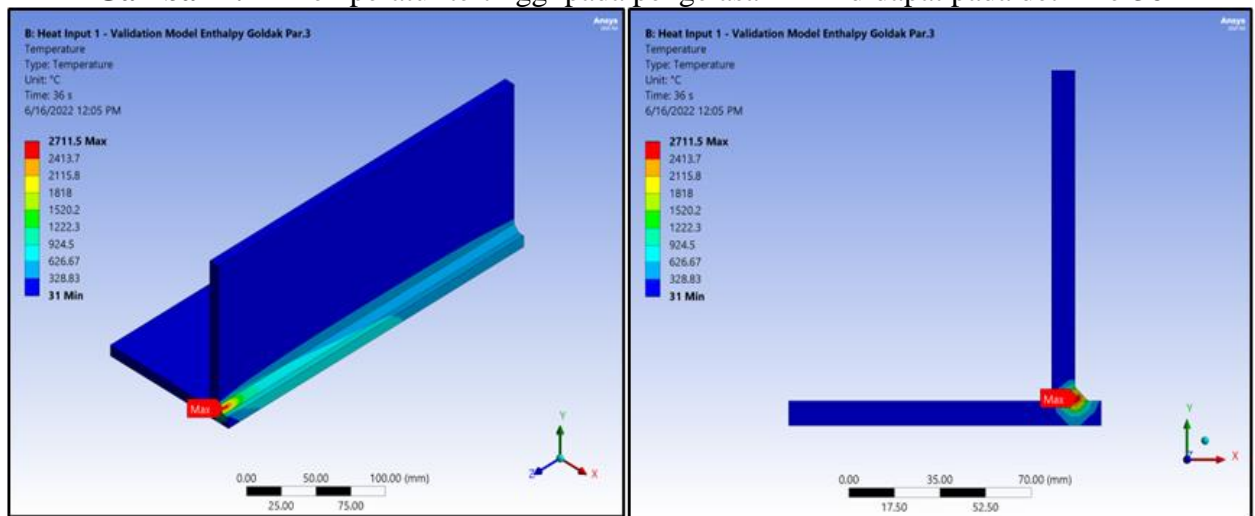
Distribusi tertinggi untuk setiap variasi *heat input* dapat dilihat pada Gambar 4.10 – 4.17.



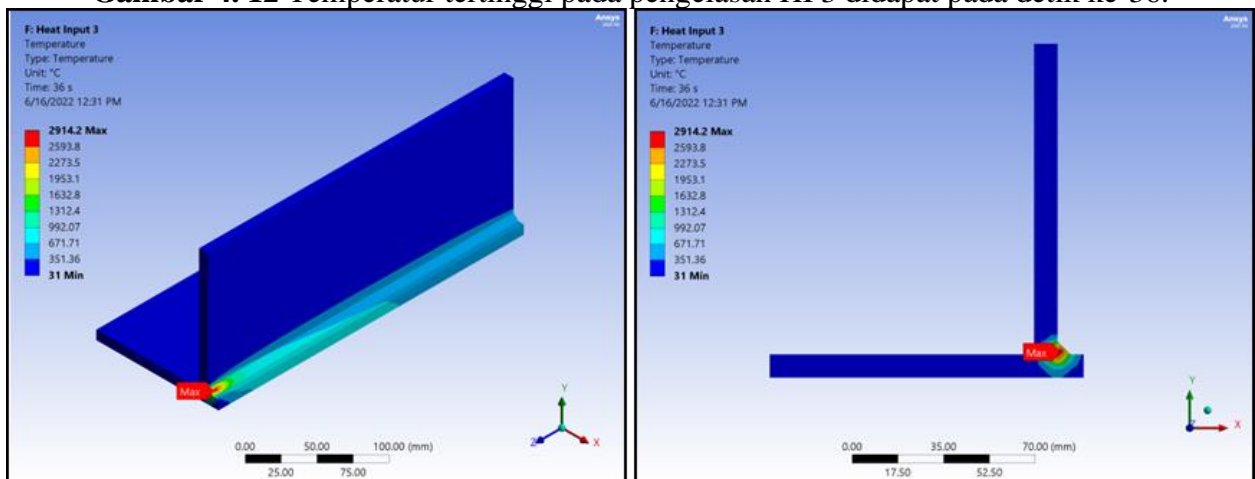
Gambar 4.10 Temperatur tertinggi pada pengelasan HI 1 didapat pada detik ke-36.



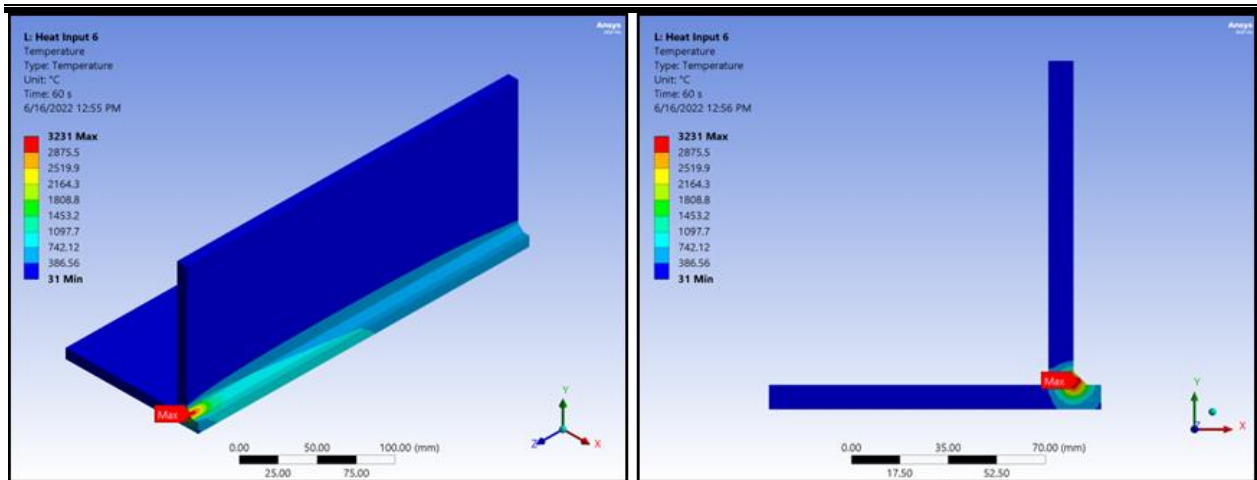
Gambar 4. 11 Temperatur tertinggi pada pengelasan HI 2 didapat pada detik ke-36



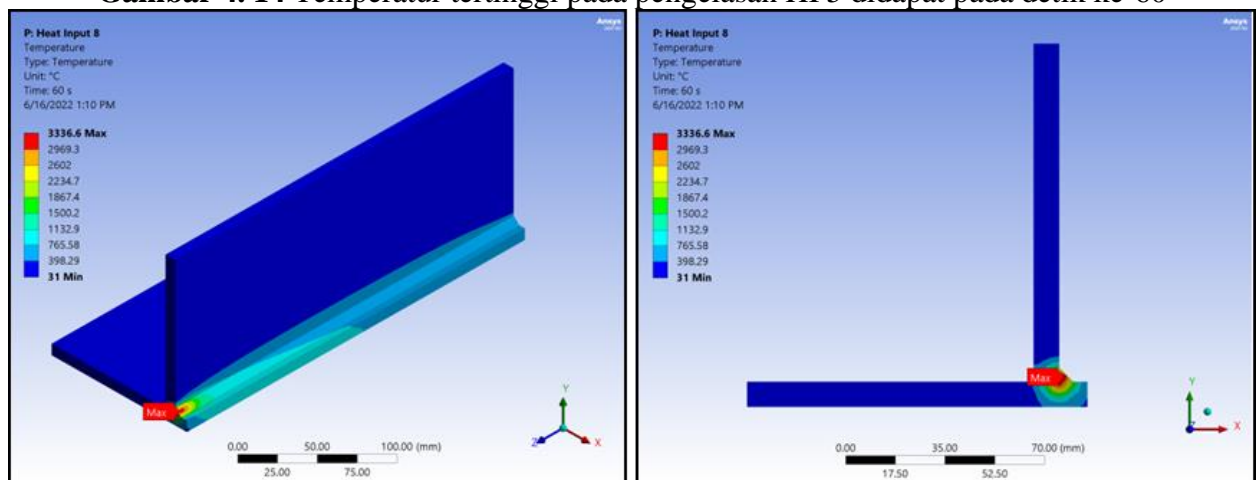
Gambar 4. 12 Temperatur tertinggi pada pengelasan HI 3 didapat pada detik ke-36.



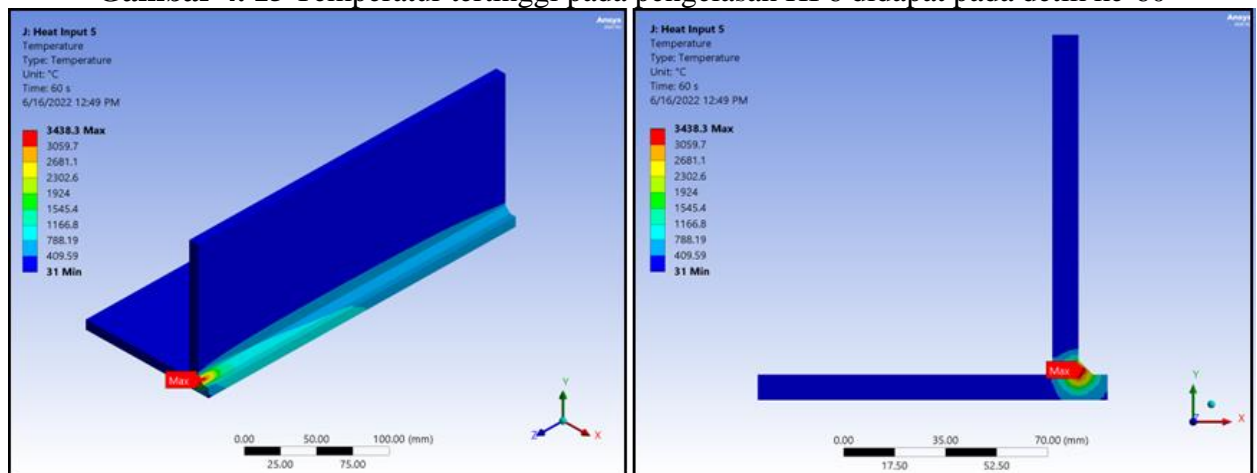
Gambar 4. 13 Temperatur tertinggi pada pengelasan HI 4 didapat pada detik ke-36.



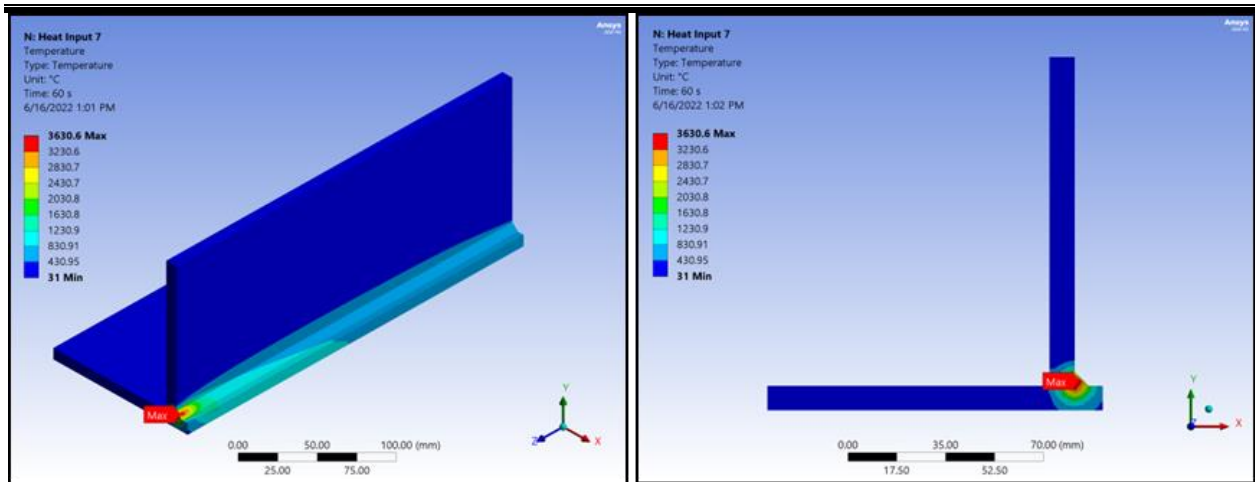
Gambar 4. 14 Temperatur tertinggi pada pengelasan HI 5 didapat pada detik ke-60



Gambar 4. 15 Temperatur tertinggi pada pengelasan HI 6 didapat pada detik ke-60



Gambar 4. 16 Temperatur tertinggi pada pengelasan HI 7 didapat pada detik ke-60



Gambar 4. 17 Temperatur tertinggi pada pengelasan HI 8 didapat pada detik ke-60

Titik merah yang ditunjukkan pada setiap gambar menunjukkan posisi temperatur maksimum pada masing-masing variasi pengelasan. Temperatur tertinggi dari masing-masing variasi pengelasan dapat dilihat pada **Tabel 4.3**

Tabel 4. 3 Temperatur puncak pada masing-masing variasi pengelasan

Variasi Las	Heat Input (J/mm)	Waktu (s)	Maksimum Temperatur (°C)
HI 1	552,220	36	2504,7
HI 2	576,230	36	2608,2
HI 3	600,240	36	2711,5
HI 4	648,259	36	2914,2
HI 5	920	60	3231
HI 6	960	60	3336,6
HI 7	1000	60	3438,3
HI 8	1080	60	3630,8

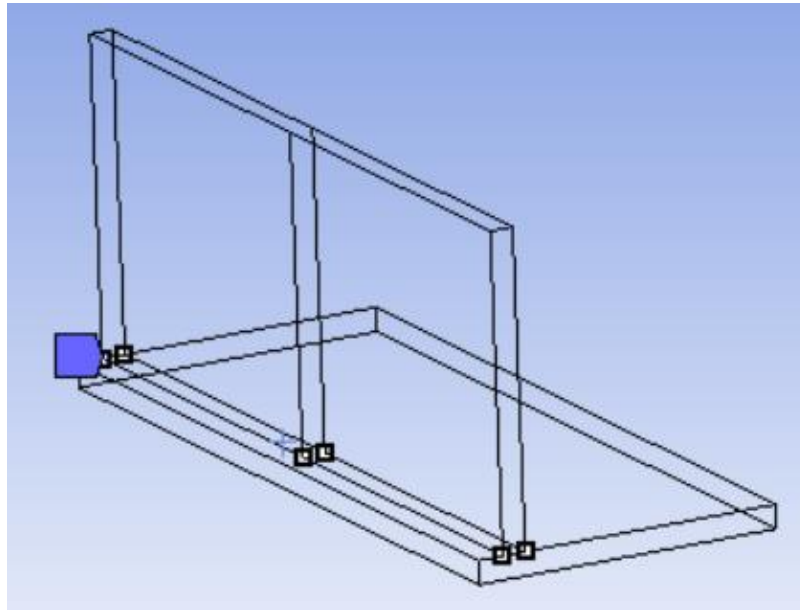
Dapat dilihat bahwa temperatur maksimum terdapat pada pengelasan HI 8 dengan besar arus 27 A, kecepatan las 5 mm/s dan nilai *heat input* 1080 J/mm menghasilkan temperatur puncak 3630,8 °C. Sedangkan untuk temperatur minimum terdapat pada pengelasan HI 1 dengan arus 23 A, kecepatan las 8, 33 mm/s dan nilai *heat input* 552,029 J/mm yang menghasilkan temperatur puncak sebesar 2504,7 °C.

4.3 Simulasi Pembebanan Struktur

Setelah dilakukan analisa pembebanan termal dan mengetahui hasil distribusi temperatur, dilakukan analisa pembebanan struktur untuk mendapatkan nilai tegangan sisa dan deformasi pada masing-masing variasi. 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 di interpolasi terhadap grafik *true plastic stress-strain* untuk didapatkan nilai tegangan sisa.

Geometri pada analisa pembebanan struktur kemudian diberikan *fixed support* pada simulasi sebagai representasi posisi pengelasan *tack* yang dilakukan pada trial PT. X. Titik yang diberikan

support dijaga untuk tidak dapat terdeformasi terhadap sumbu x , y , dan z . *Support* diberikan pada 4 titik di bagian ujung antara *base metal* dan *weld metal*, dan 2 titik di tengah lintasan las antara *base metal* dan *weld metal*.



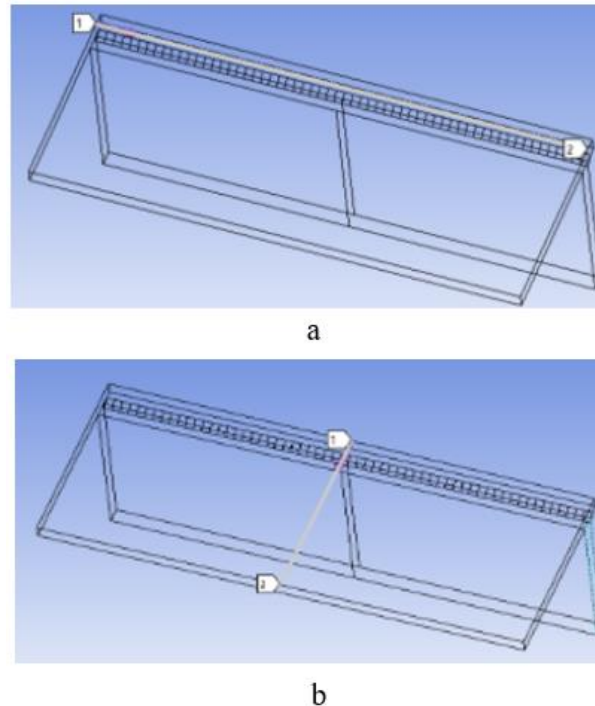
Gambar 4. 18 Posisi *fixed support* pada analisis struktur.

Proses pembebanan dilakukan dengan 2 *step*, *step* pertama digunakan untuk pemanasan selama pengelasan yang waktunya mengikuti masing-masing kecepatan las setiap variasi. Lalu dilanjutkan dengan *step-2* hingga detik ke-7500 untuk waktu pendinginan.

4.2.1 Hasil Tegangan Sisa

Proses verifikasi tegangan sisa dilakukan menggunakan simulasi arah yang sama dengan data riset oleh PT. X. Data yang didapatkan kemudian dibandingkan dengan hasil dari trial PT. X. Verifikasi tegangan dilakukan menggunakan variasi las HI 3 dengan arus 250 A, tegangan 25 Volt, dan kecepatan las 8,33 m/s.

Berikut merupakan posisi pengukuran tegangan transversal dan longitudinal dimana posisinya mengikuti dengan data riset PT. X. Kedua *path* yang digunakan berada pada permukaan bawah material. Pengukuran tegangan sisa dilakukan di area bawah material mengikuti kapabilitas dari alat XRD yang digunakan.



Gambar 4. 19 (a) Pengukuran tegangan longitudinal, (b) tegangan transversal untuk verifikasi model

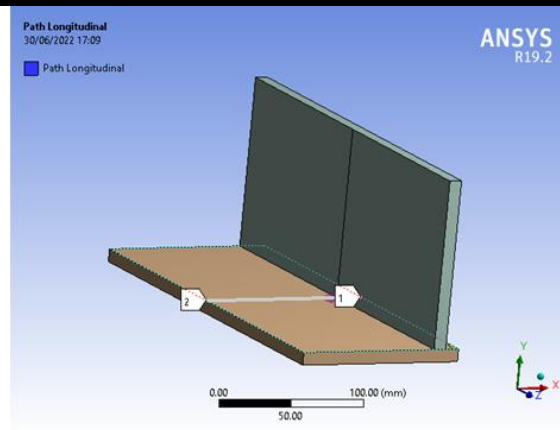
Pengukuran tegangan transversal dilakukan pada plat bawah yang garisnya sejajar dengan *weld bead* pada plat atas. Sedangkan untuk tegangan longitudinal menggunakan *path* yang tegak lurus dengan *path* pengukuran tegangan transversal. Posisi pengukuran pada plat bawah mengikuti kapabilitas dari alat XRD yang digunakan oleh PT X.

Tabel 4. 4 Verifikasi model simulasi dengan data trial PT. X

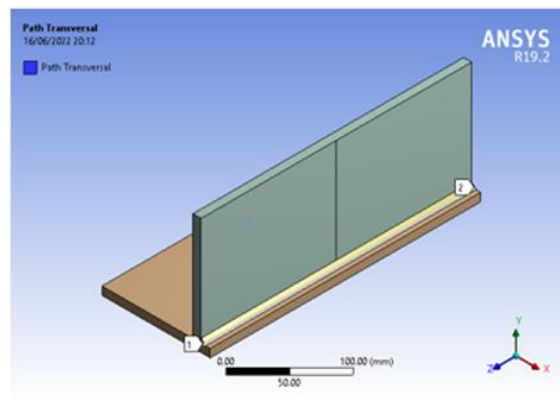
	Data Trial PT. X (MPa)	Simulasi (MPa)	Error (%)
Maksimum tegangan longitudinal	260	272	4,95
Maksimum tegangan transversal	296	275	7,11

Pada **Tabel 4.4** dapat dilihat bahwa nilai maksimum untuk tegangan transversal dan longitudinal antara data riset PT. X dengan nilai simulasi memiliki nilai yang tidak terlalu jauh dengan rata-rata error adalah 6,02 %. Data tegangan pada simulasi didapatkan dengan menginterpolasi hasil regangan plastis yang didapatkan pada ANSYS kepada grafik dari *True Stress vs. Plastic Strain*.

Distribusi tegangan yang terjadi pada masing-masing variasi setelah dilakukan proses pendinginan hingga detik ke-7500. Untuk *path* yang digunakan untuk mengukur distribusi dari tegangan transversal dan longitudinal dapat dilihat pada **Gambar 4.20**, dimana posisi dari *path* berada di atas permukaan dari material. Posisi pengelasan berada di atas permukaan material dikarenakan untuk mendapatkan nilai tegangan sisa pada *weld bead*. *Weld bead* merupakan daerah dengan tegangan sisa paling tinggi dikarenakan merupakan wilayah yang diberikan beban termal secara langsung.



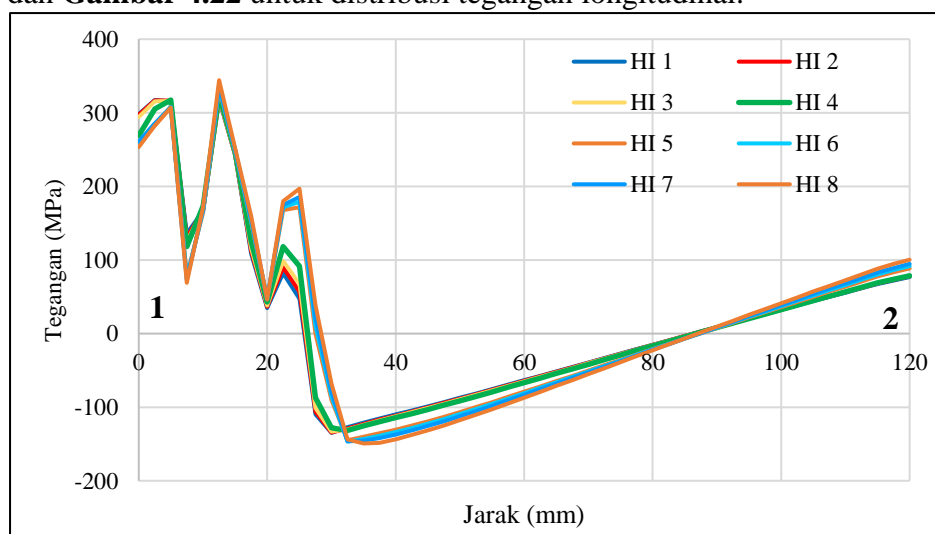
a



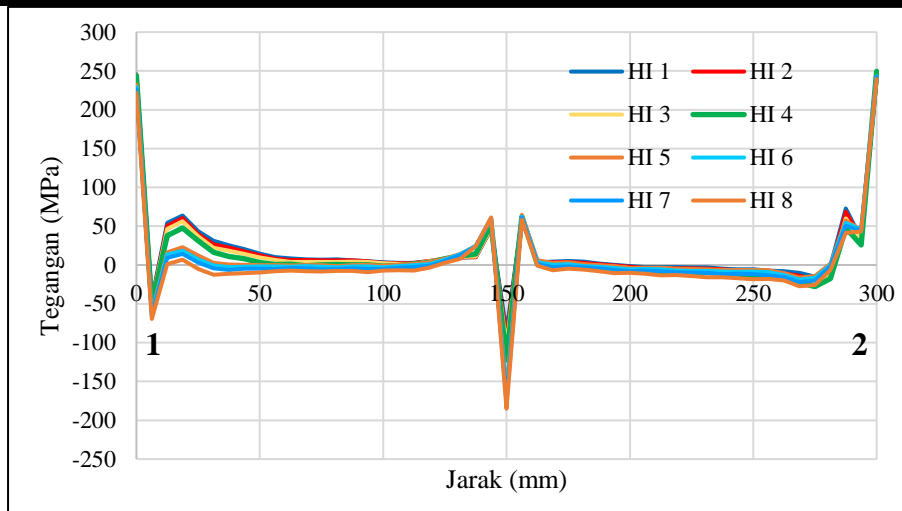
b

Gambar 4. 20 (a) Pengukuran tegangan transversal, (b) tegangan longitudinal

Hasil dari distribusi tegangan dapat dilihat pada **Gambar 4.21** untuk distribusi tegangan transversal dan **Gambar 4.22** untuk distribusi tegangan longitudinal.



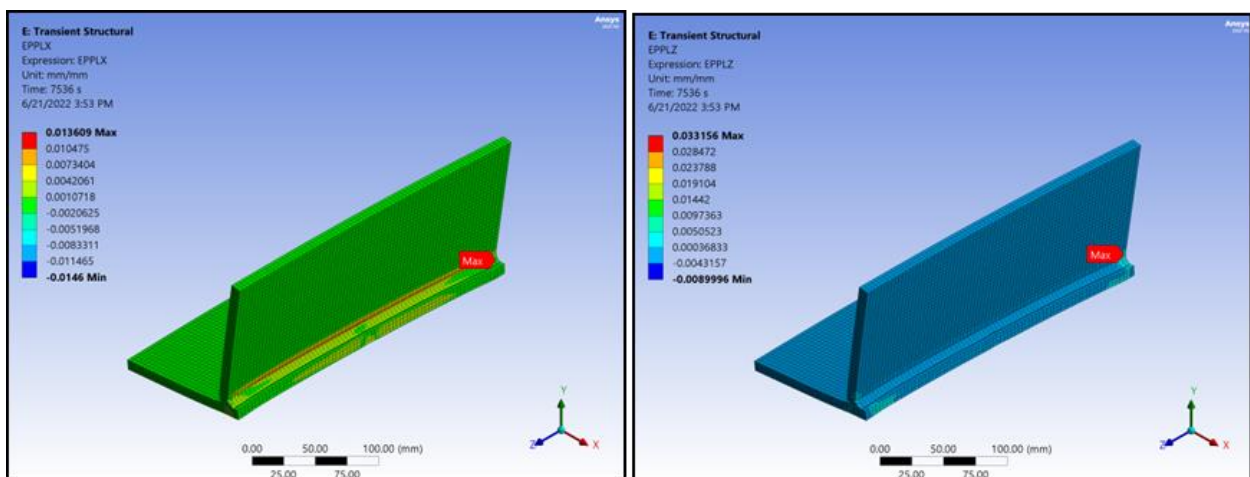
Gambar 4. 21 Distribusi tegangan transversal arah sumbu-z.



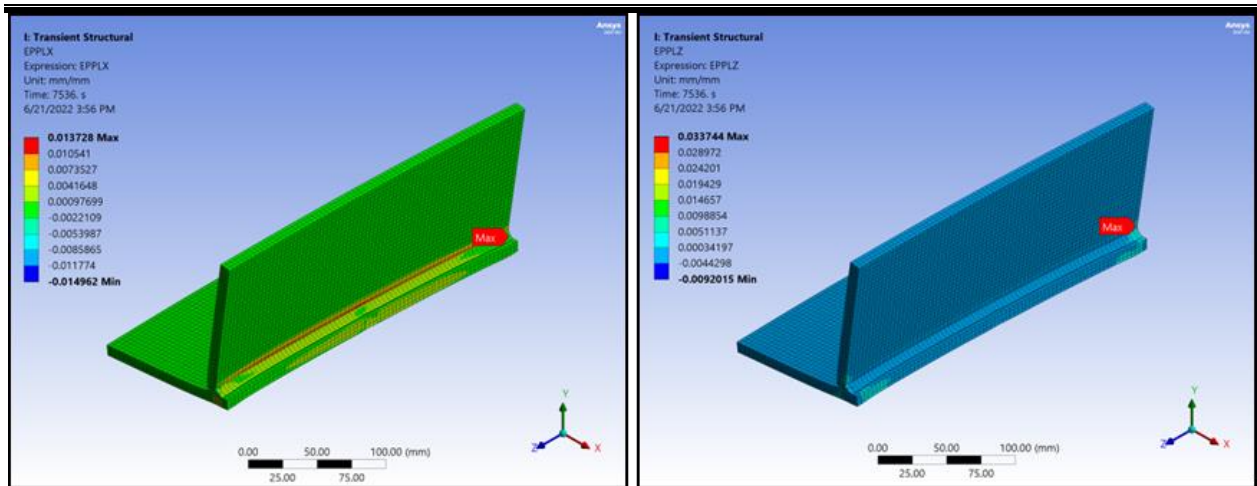
Gambar 4. 22 Distribusi tegangan longitudinal arah sumbu-x.

Pada **Gambar 4.21** dapat dilihat pada daerah las mengalami tegangan tarik dan daerah yang semakin jauh dengan daerah las mengalami tegangan kompresi. Sedangkan pada **Gambar 4.22** yang menunjukkan distribusi tegangan longitudinal, terlihat bahwa pada daerah las sebelah kiri dan kanan terjadi tegangan tarik. Pada daerah tengah las, terdapat tegangan kompresi.

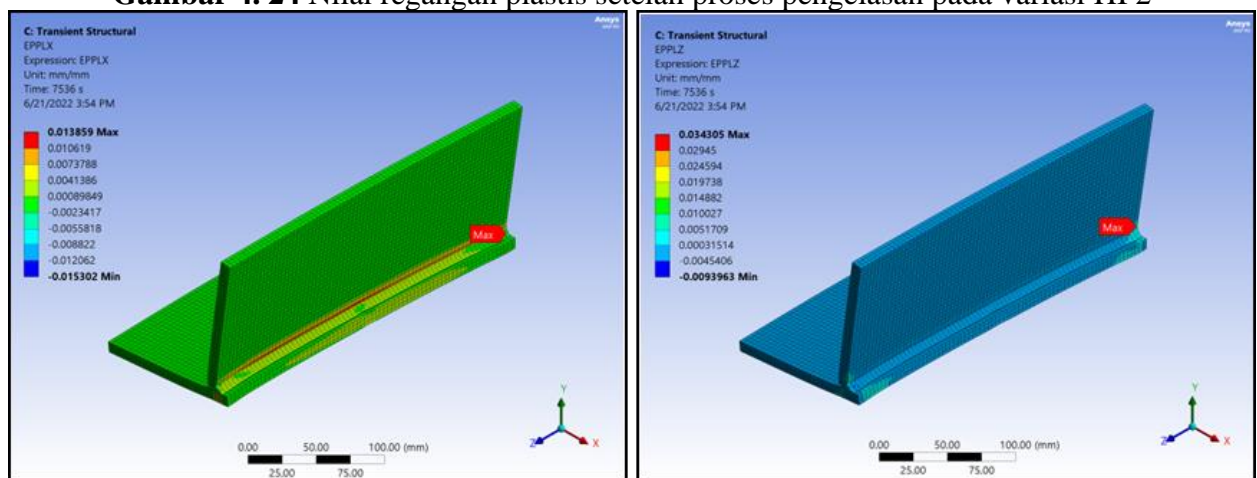
Setelah dilakukan simulasi pembebanan struktur, didapatkan hasil berupa nilai regangan plastis menggunakan *User Defined Result* “EPPLX” untuk nilai regangan plastis arah sumbu x atau secara transversal dan menggunakan *User Defined Result* “EPPLZ” untuk nilai regangan plastis arah sumbu z. Nilai dari regangan plastis yang didapatkan untuk seluruh variasi kemudian diinterpolasikan kepada grafik *True Stress vs Plastic Strain* yang digunakan untuk material SS 400. Grafik ini dimasukkan pada fitur *engineering data* dari ANSYS. **Gambar 4.23** hingga **Gambar 4.30** menunjukkan nilai regangan plastis untuk masing-masing variasi las yang digunakan.



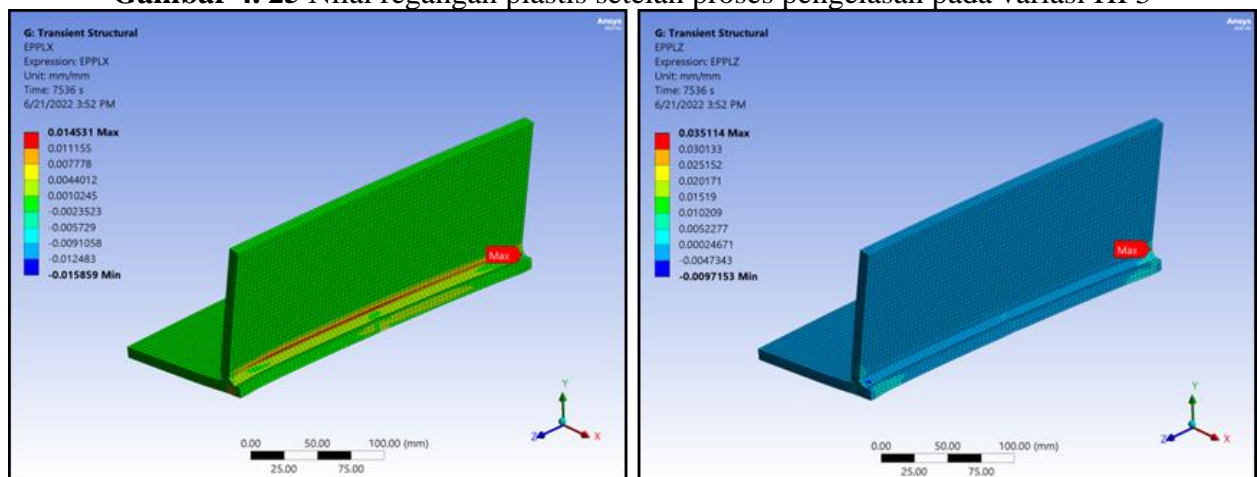
Gambar 4. 23 Nilai regangan plastis setelah proses pengelasan pada variasi HI 1



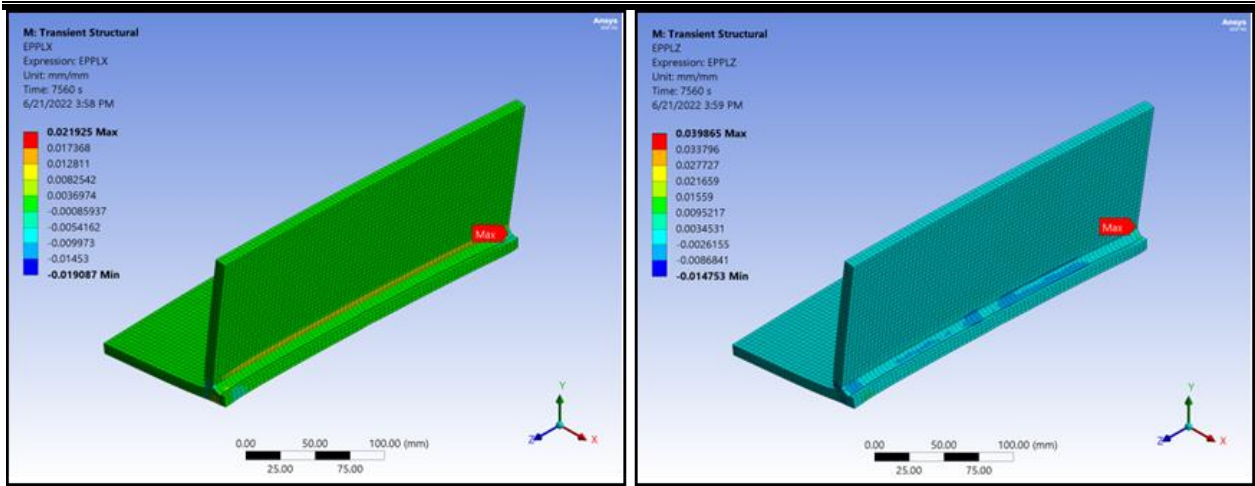
Gambar 4. 24 Nilai regangan plastis setelah proses pengelasan pada variasi HI 2



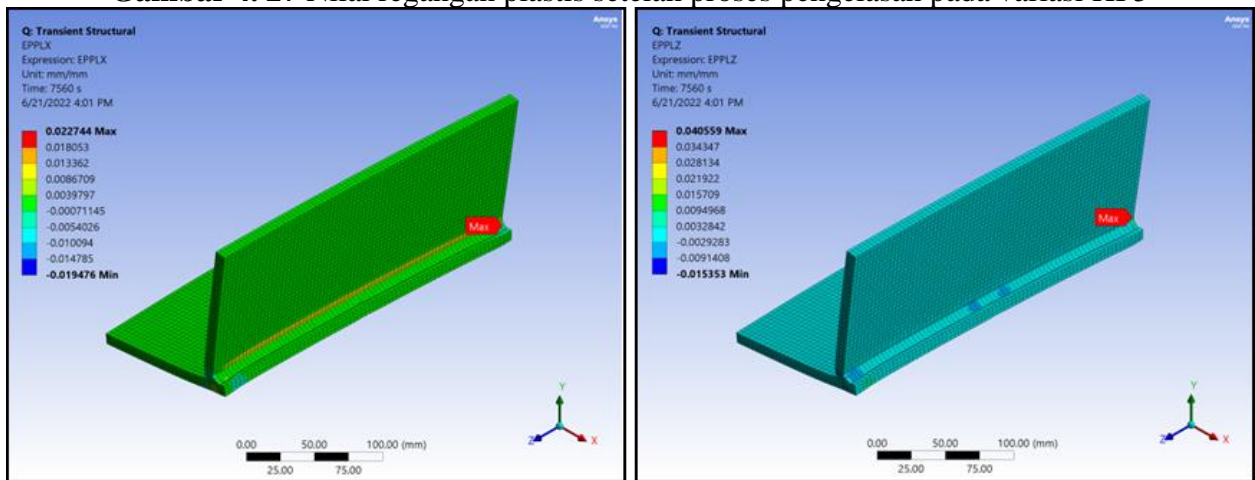
Gambar 4. 25 Nilai regangan plastis setelah proses pengelasan pada variasi HI 3



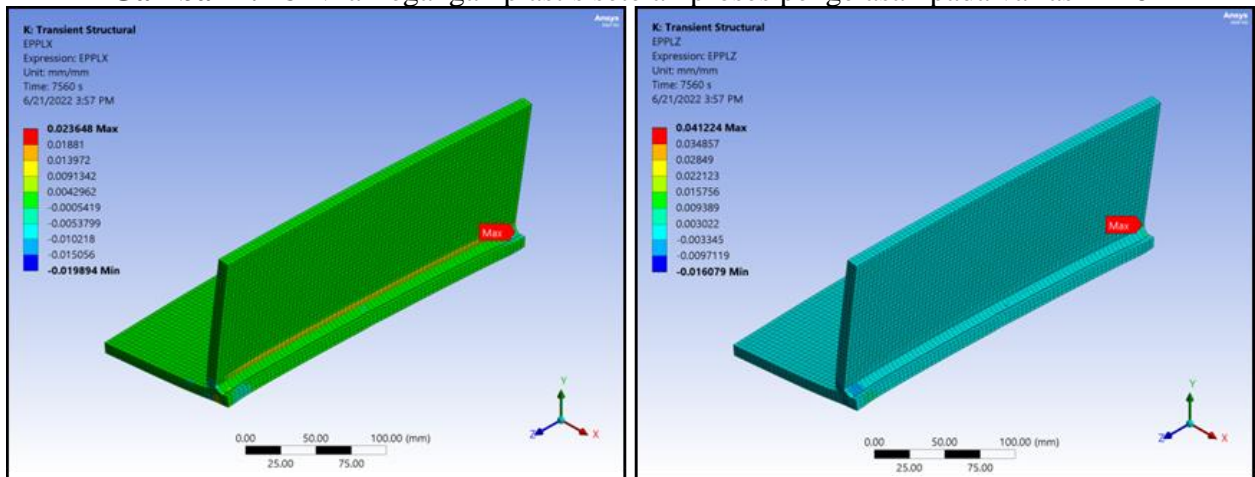
Gambar 4. 26 Nilai regangan plastis setelah proses pengelasan pada variasi HI 4



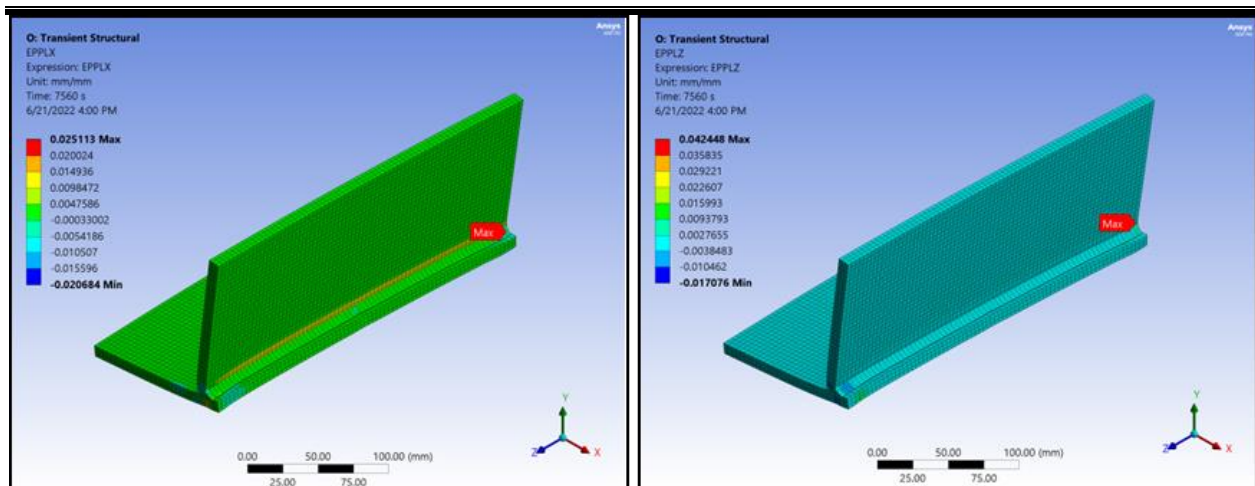
Gambar 4. 27 Nilai regangan plastis setelah proses pengelasan pada variasi HI 5



Gambar 4. 28 Nilai regangan plastis setelah proses pengelasan pada variasi HI 6



Gambar 4. 29 Nilai regangan plastis setelah proses pengelasan pada variasi HI 7



Gambar 4. 30 Nilai regangan plastis setelah proses pengelasan pada variasi HI 8

Tabel 4. 5 Rentang nilai tegangan sisa transversal

Variasi Las	Heat Input (J/mm)	Rentang Nilai Regangan Plastis Transversal	Nilai Tegangan Sisa Transversal (MPa)
HI 1	552,220	-0,0089 - 0,0332	-276,570 - 343,044
HI 2	576,230	-0,0092 - 0,0337	-276,979 - 344,954
HI 3	600,240	-0,0093 - 0,0343	-277,119 - 346,771
HI 4	648,259	-0,00971 - 0,0351	-277,716 - 349,382
HI 5	920	-0,0147 - 0,0399	-287,395 - 364,362
HI 6	960	-0,0153 - 0,0406	-288,816 - 366,487
HI 7	1000	-0,016 - 0,0412	-290,531 - 368,504
HI 8	1080	-0,017 - 0,0424	-293,082 - 372,169

Tabel 4. 6 Rentang nilai tegangan sisa longitudinal

Variasi Las	Heat Input (J/mm)	Rentang Nilai Regangan Plastis Longitudinal	Nilai Tegangan Sisa Longitudinal (MPa)
HI 1	552,220	-0,0146 - 0,0136	-287,163 - 284,939
HI 2	576,230	-0,0149 - 0,0137	-287,64 - 285,198
HI 3	600,240	-0,0153 - 0,0139	-288,816 - 285,487
HI 4	648,259	-0,0158 - 0,0145	-290,035 - 287,004
HI 5	920	-0,019 - 0,0219	-298,50 - 307,039
HI 6	960	-0,0194 - 0,0227	-299,629 - 309,534
HI 7	1000	-0,0198 - 0,0236	-300,771 - 312,329
HI 8	1080	-0,02 - 0,0251	-301,347 - 316,938

Pada Tabel 4.5 dan Tabel 4.6 menunjukkan nilai dari tegangan sisa longitudinal dan transversal maksimum yang dihasilkan oleh masing-masing variasi pengelasan. Untuk kecepatan 8,33 mm/s didapatkan nilai tegangan sisa transversal maksimum pada variasi pengelasan HI 4 sebesar 349,38 MPa dan nilai tegangan sisa transversal minimum pada variasi pengelasan HI 1 dengan nilai 343,044 MPa. Sedangkan untuk nilai tegangan longitudinal maksimum terdapat pada variasi pengelasan HI 4 sebesar 287,004 MPa dan nilai tegangan sisa longitudinal minimum

terdapat pada variasi pengelasan HI 1 sebesar 284,93 MPa. Untuk kecepatan 5 mm/s didapatkan nilai tegangan sisa transversal maksimum pada variasi HI 8 sebesar 372,16 MPa dan nilai tegangan sisa transversal minimum pada variasi HI 5 sebesar 364,36 MPa. Sedangkan untuk nilai tegangan sisa longitudinal maksimum terdapat pada variasi pengelasan HI 8 sebesar 316,93 MPa, dan nilai tegangan longitudinal minimum terdapat pada variasi pengelasan HI 5 sebesar 307,03 MPa. Nilai minus yang didapatkan pada regangan menandakan adanya penyusutan material, dan nilai positif menandakan adanya pemuaihan material. Sedangkan pada tegangan nilai minus menandakan tegangan kompresi dan positif menandakan tegangan tarik.

4.2.2 Hasil Deformasi

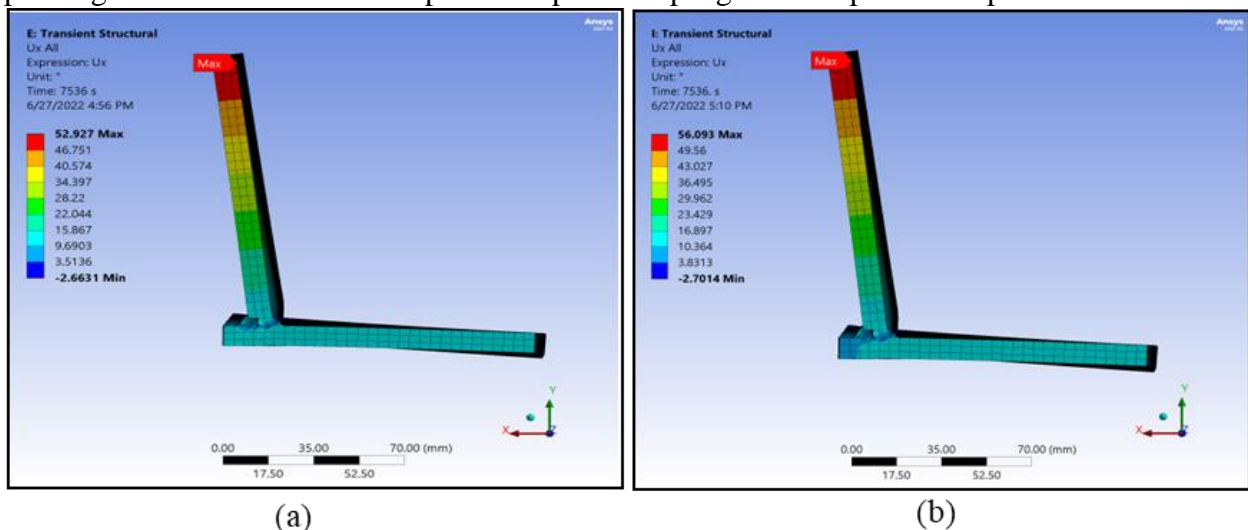
Proses verifikasi deformasi dilakukan dengan membandingkan hasil dari trial yang menggunakan parameter variasi pengelasan HI 1 oleh PT.X, dengan hasil simulasi. Perhitungan deformasi secara angular dihitung pada bagian tengah dari material pengelasan. Berikut merupakan yang telah dibandingkan:

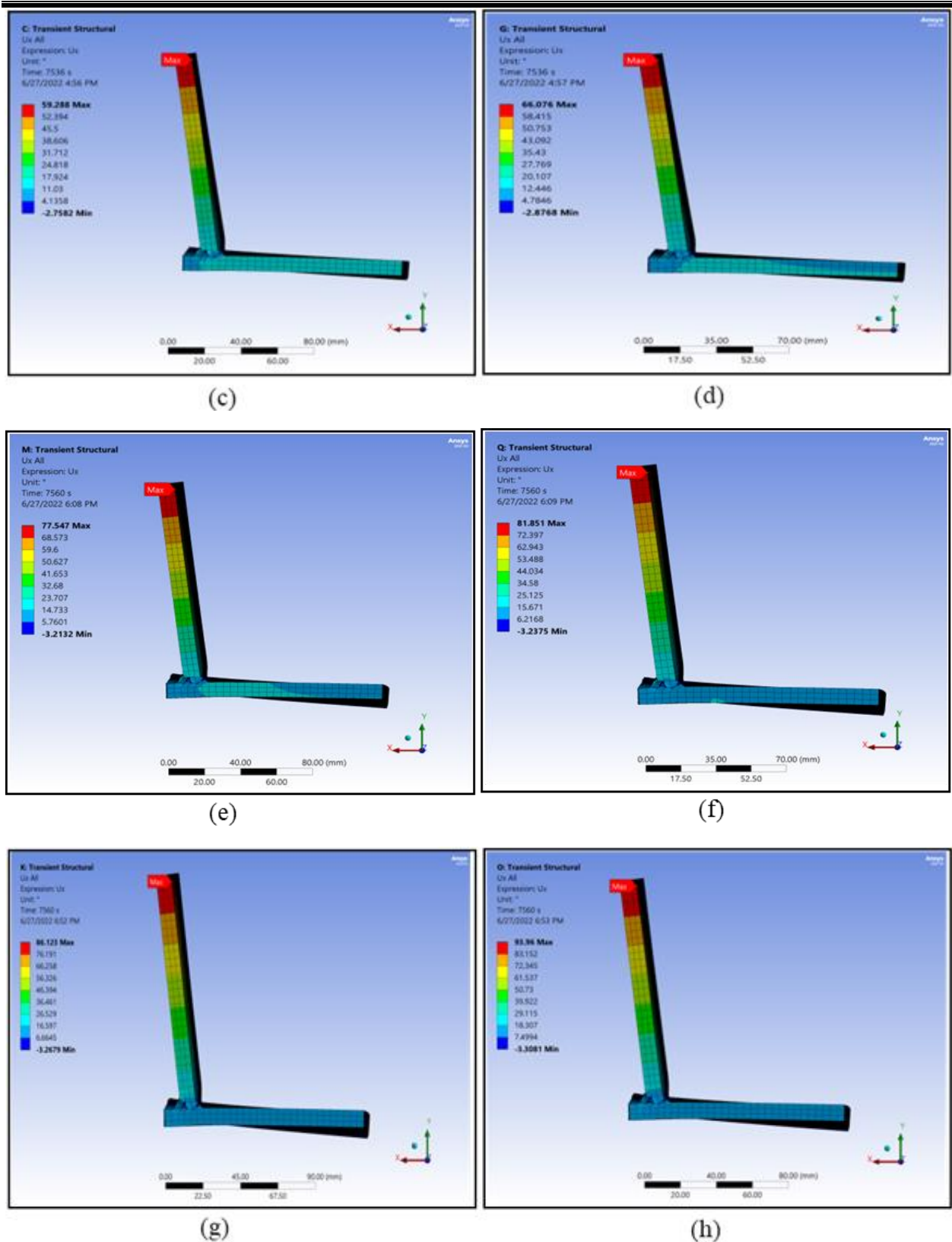
Tabel 4. 7 Perbandingan Hasil Deformasi

	Data trial PT. X (mm)	Simulasi (mm)	Error (%)
Deformasi	1,1	0,9	17

Pada **Tabel 4.7**, dapat dilihat bahwa nilai antara data trial yang dilakukan di PT. X memiliki nilai yang tidak jauh berbeda dengan hasil simulasi dengan nilai error sebesar 17 %.

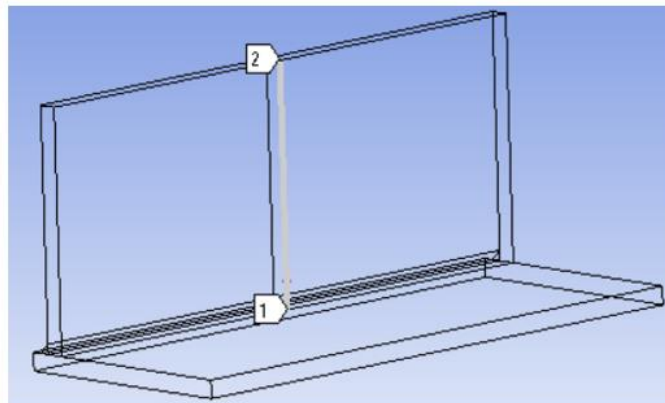
Pada analisa struktur, didapatkan nilai dari deformasi yang terjadi pada material. Deformasi pada pengelasan terjadi akibat distribusi temperatur yang tidak merata pada material setelah proses pendinginan. Besaran deformasi pada setiap variasi pengelasan dapat dilihat pada **Gambar 4.31**



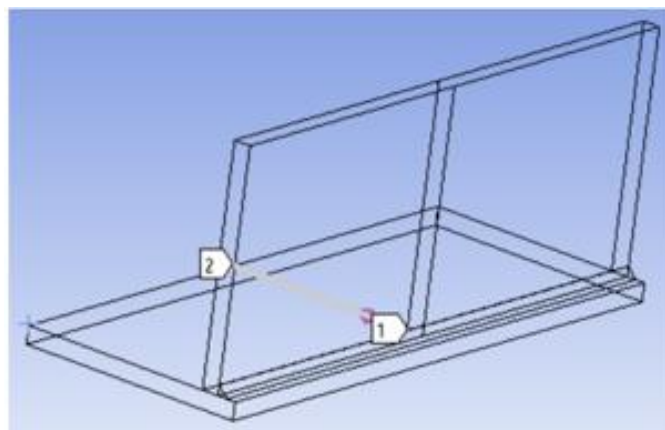


Gambar 4. 31 Deformasi pada variasi pengelasan (a) HI 1, (b) HI 2, (c) HI 3, (d) HI 4, (e) HI 5, (f) HI 6, (g) HI 7, (h) HI 8

Pada **Gambar 4.31**, deformasi angular terjadi di plat yang tersambung secara vertikal dan horizontal. Simpangan terjauh untuk seluruh variasi berada pada posisi yang sama yaitu diujung atas awal pengelasan.



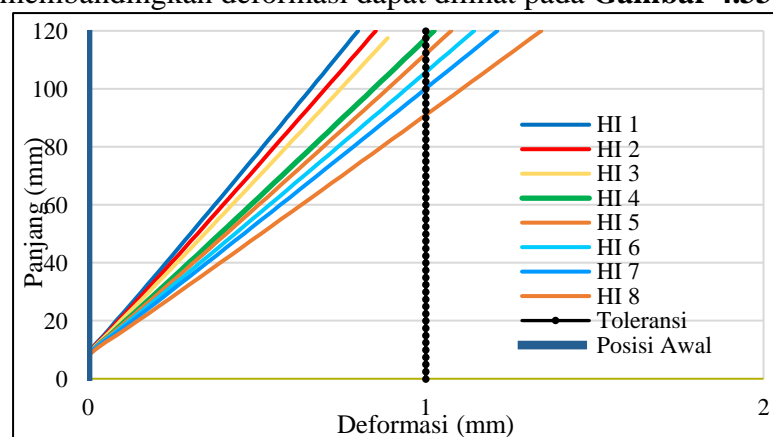
(a) *Path* deformasi plat vertikal



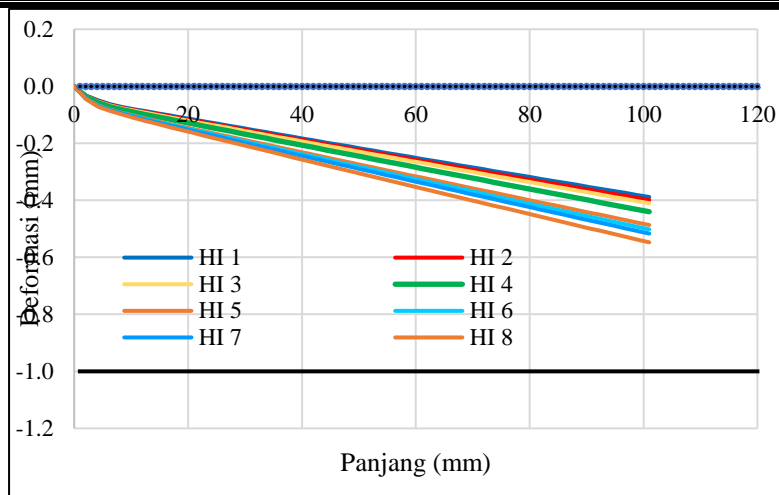
(b) *Path* deformasi plat horizontal

Gambar 4. 32 *Path* pengukuran deformasi

Dilakukan analisa perbandingan besar deformasi antara masing-masing variasi las menggunakan *path* yang berada di tengah material plat vertikal dan plat horizontal. *Path* yang digunakan untuk membandingkan deformasi dapat dilihat pada **Gambar 4.33**.



Gambar 4. 33 Grafik deformasi pengelasan pada plat vertikal



Gambar 4.34 Grafik deformasi pengelasan pada plat horizontal

Pada **Gambar 4.34**, dapat dilihat bahwa variasi yang memiliki nilai deformasi terbesar adalah HI 8. Dapat dilihat juga pada grafik bahwa PT.X memiliki toleransi untuk besar deformasi sebesar 1 mm. Nilai ini diperlukan untuk menjaga kualitas menuju proses pengelasan selanjutnya untuk proses *assembly* dari *boom* ekskavator, dan nilai toleransi 1 mm digunakan khusus untuk *assembly* dengan tinggi 120 mm. Variasi pengelasan yang memiliki nilai deformasi melebihi toleransi adalah HI 4, HI 5, HI 6, HI 7, dan HI 8. HI 4 memiliki nilai deformasi paling besar diantara variasi yang menggunakan kecepatan 5 mm/s.

Tabel 4.8 Nilai simpangan terjauh plat vertikal

Variasi Pengelasan	Heat Input (J/mm)	Nilai Simpangan Terjauh (mm)	Derajat Simpangan Terjauh (°)
HI 1	552,220	0,8	52,92
HI 2	576,230	0,85	56,09
HI 3	600,240	0,91	59,28
HI 4	648,259	1,02	66,07
HI 5	920	1,08	77,54
HI 6	960	1,14	81,85
HI 7	1000	1,21	86,12
HI 8	1080	1,34	93,96

Tabel 4.9 Nilai simpangan terjauh plat horizontal

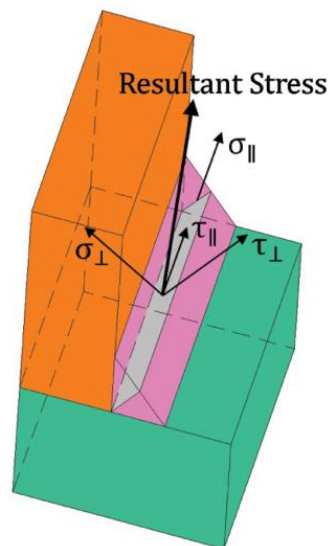
Variasi Pengelasan	Heat Input (J/mm)	Nilai Simpangan Terjauh (mm)	Derajat Simpangan Terjauh (°)
HI 1	552,220	-0,39	-22,24
HI 2	576,230	-0,40	-22,84
HI 3	600,240	-0,41	-23,49
HI 4	648,259	-0,44	-25,05
HI 5	920	-0,49	-27,87
HI 6	960	-0,50	-28,75
HI 7	1000	-0,52	-29,6
HI 8	1080	-0,55	-31,36

Pada **Tabel 4.8** dapat dilihat bahwa nilai simpangan terjauh pada plat vertikal dimiliki oleh variasi pengelasan HI 8 dengan nilai 1,34 mm dan derajat simpangan sebesar $93,96^\circ$, sedangkan nilai deformasi terendah dimiliki oleh variasi pengelasan HI 1 dengan nilai 0,8 mm dan derajat simpangan sebesar $52,92^\circ$. Selanjutnya pada **Tabel 4.9** dapat dilihat bahwa nilai simpangan terjauh pada plat horizontal dimiliki oleh variasi pengelasan HI 8 dengan nilai -0,55 mm dan derajat simpangan sebesar $-31,36^\circ$, sedangkan nilai deformasi terendah dimiliki oleh variasi pengelasan HI 1 dengan nilai -0,39 mm dan derajat simpangan sebesar $-22,24^\circ$.

4.4 Pembahasan

4.4.1. Analisa Temperatur

Ketika panas diberikan pada material, akan menghasilkan distribusi gaya terhadap berbagai arah seperti yang ada pada **Gambar 4.35**



Gambar 4. 35 Distribusi gaya pada saat pengelasan T-Joint

Distribusi yang dihasilkan berlaku untuk seluruh daerah las-lasan. σ_{\perp} merupakan gaya normal yang tegak lurus dengan arah datangnya las-lasan, τ_{\perp} merupakan tegangan geser yang tegak lurus sepanjang daerah las-lasan, dan τ_{\parallel} yang merupakan tegangan geser searah dengan las-lasan. Ketiga gaya ini akan menghasilkan gaya total atau *resultant force*. (Packer et al., 2016)

Pada hasil dari simulasi pembebanan termal, dapat dilihat bahwa temperatur tertinggi untuk seluruh variasi paengelasan 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. Kecepatan dan arus berpengaruh pada hasil dari distribusi temperatur. Kecepatan yang lebih lambat menghasilkan *heat input* yang lebih besar sehingga panas yang dihasilkan juga lebih besar. Sedangkan dengan kecepatan konstan, semakin besar nilai arus meningkatkan *heat input* sehingga temperatur puncak yang dihasilkan juga semakin tinggi. Temperatur puncak yang didapatkan pada nodal A seperti pada **Gambar 4.7** memiliki nilai diatas 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 4.8**

mencapai suhu puncak dibawah temperatur leleh, namun diatas 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 memiliki sifat yang mudah getas dikarenakan dapat menghasilkan fasa martensit. Pada nodal C seperti pada **Gambar 4.9** yang berjarak 5 mm dari *weld bead* memiliki temperatur puncak dibawah 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 juga tersebar ke udara melalui proses konveksi dan radiasi. Ketika memasuki proses pendinginan, panas mayoritas mengalir kepada plat yang disambungkan secara vertikal melalui proses konduksi dikarenakan urutan pengelasan yang digunakan adalah progresif, atau dari ujung kanan *base metal* menuju ujung kiri *base metal*. Selain itu, pengelasan yang dilakukan juga merupakan pengelasan satu sisi sehingga hanya terdapat 2 sisi pengelasan yang memiliki *Heat Affected Zone (HAZ)*, yaitu sisi yang tersambung pada plat vertikal dan sisi yang tersambung pada plat horizontal. Untuk sisi yang berada di plat horizontal memiliki luas yang kecil, dikarenakan dimensi ujung *base metal* yang hanya berjarak 5 mm dari *weld bead*.

4.4.2. Analisa Tegangan Sisa

Pada hasil pembebanan struktur tegangan sisa. Dapat dilihat pada **Gambar 4.21** yang menunjukkan distribusi tegangan transversal menunjukkan bahwa selama proses pendinginan dapat dilihat bahwa pada daerah dekat las cenderung lebih cepat dingin dibanding daerah sekitarnya. Sehingga pada daerah las mengalami tegangan tarik dikarenakan pada saat dilakukan pemberian beban termal, daerah tersebut mengalami tegangan tekan. Sedangkan daerah yang semakin jauh dengan daerah las mengalami tegangan kompresi untuk menyeimbangkan tegangan yang terjadi pada daerah dekat las.

Pada **Gambar 4.22** yang menunjukkan distribusi tegangan longitudinal, terlihat bahwa pada daerah las sebelah kiri dan kanan terjadi tegangan tarik. Hal ini dikarenakan *support* membuat tegangan yang terjadi pada ujung pengelasan menahan adanya beban tekan pada saat proses pemanasan, sehingga menghasilkan tegangan tarik. Pada daerah tengah las, terdapat tegangan kompresi, hal ini disebabkan adanya *support* yang digunakan untuk menjaga deformasi dari material. 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 equilibrium 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 pengelesan disekitar *fusion zone* menghasilkan tegangan tarik yang relatif kecil dibanding *fusion zone* dan *tempered zone*. Setelah itu tegangan bersifat permanen hingga temperatur mencapai temperatur rungan. Dari sini dapat terlihat bahwa tekan di daerah fusi menyebabkan diskontinuitas atau adanya tegangan sisa yang tinggi.

4.4.3. Analisa Deformasi

Pada **Gambar 4.31**, deformasi angular terjadi di plat yang tersambung secara vertikal dan horizontal. Simpangan terjauh untuk seluruh variasi berada pada posisi yang sama yaitu diujung atas awal pengelasan. Hal ini terjadi dikarenakan ketika proses pengelasan dari ujung *base metal* kanan dilakukan menuju ujung *base metal* kiri, sehingga bagian yang lebih dulu mengalami pendinginan adalah bagian awal pengelasan. 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 pemuaian 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 Arus dan Kecepatan Las

Hasil distribusi temperatur menunjukkan bahwa semakin tinggi arus, menghasilkan temperatur puncak yang semakin tinggi. Hal ini dikarenakan arus merupakan pembawa panas yang menggerakkan *wirefeed* sehingga semakin besar arus, maka *wirefeed rate* semakin tinggi dan *heat input* lebih besar. Sedangkan kecepatan las yang semakin cepat, menghasilkan *heat input* semakin kecil sehingga temperatur puncak juga semakin kecil.

Pada hasil dari tegangan sisa yang didapatkan, dapat dianalisa bahwa semakin meningkatnya arus menghasilkan tegangan sisa yang semakin besar, sedangkan semakin meningkatnya kecepatan menghasilkan tegangan sisa yang semakin kecil. Ketika *heat input* meningkat, hambatan dan kontraksi yang diberikan oleh *base metal* juga semakin besar, hal ini menyebabkan tegangan sisa yang dihasilkan juga semakin besar. Ketika kecepatan pengelasan meningkat, tegangan yang diinduksi pada pelat berkurang karena ketika kecepatan pengelasan meningkat, waktu untuk pengelasan berkurang dan ketika semakin cepat pengelasan dilakukan, semakin sedikit panas yang diserap oleh logam dasar, dan dengan demikian tegangan yang diinduksi berkurang, hasil ini juga sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Sudersanan pada tahun 2012 (Sudersanan, 2012). 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, jarak antar kisi menjadi semakin rapat. (Radaj, 1990).

Pada hasil dari deformasi, dapat dilihat bahwa semakin bertambahnya arus, menghasilkan deformasi yang juga semakin besar. Sedangkan semakin cepatnya kecepatan las, menghasilkan deformasi yang lebih kecil. Hal ini berpengaruh pada *heat input* yang didapat, semakin besar arus

meningkatkan *heat input*, sehingga semakin cepat kecepatan las, menurunkan *heat input*. *Heat input* yang semakin tinggi menghasilkan pemuaihan dan penyusutan akibat beban termal yang lebih besar, sehingga deformasi yang didapatkan semakin besar. Namun, sedikitnya *heat input* menurunkan kekuatan dari sambungan las dikarenakan *weld deposit* yang juga kecil. *Weld deposit* yang kecil menghasilkan penetrasi las yang juga sedikit, hasil penelitian ini juga sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Wibowo, dkk pada tahun 2016 (Wibowo et al., 2016). Sehingga pada umumnya, ketika terjadi deformasi minimum, diiringi juga kekuatan sambungan las yang kurang baik. Hal ini perlu diantisipasi agar tetap didapatkan penetrasi las yang diharapkan dengan deformasi yang minimum.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

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

1. Pada pengelasan sambungan T SS400, temperatur puncak paling kecil didapat pada pengelasan dengan variasi HI 1 atau dengan nilai *heat input* 552 J/mm sebesar 2504,7 °C. Untuk temperatur puncak tertinggi didapat pada pengelasan dengan variasi HI 8 atau dengan nilai *heat input* 1080 J/mm sebesar 3438,3 °C. Dapat dilihat bahwa semakin besar nilai arus yang diberikan, temperatur yang dihasilkan juga semakin besar. Sedangkan semakin cepat kecepatan las, maka temperatur yang dihasilkan semakin kecil.
2. Pada pengelasan sambungan T SS400, tegangan sisa transversal paling kecil didapat pada pengelasan HI 1 dengan nilai *heat input* 552 J/mm sebesar 343,044 MPa. Untuk nilai tegangan sisa transversal paling besar didapat pada pengelasan HI 8 dengan nilai *heat input* 1080 J/mm sebesar 372,16 MPa. Sedangkan untuk nilai tegangan sisa longitudinal paling kecil didapat pada pengelasan HI 1 sebesar 284,93 MPa dan tegangan sisa longitudinal paling besar didapat pada pengelasan HI 8 dengan nilai *heat input* 1080 J/mm sebesar 316,93 MPa. Dapat dilihat bahwa semakin besar nilai arus yang diberikan, mengakibatkan nilai tegangan sisa semakin besar. Sedangkan semakin cepat kecepatan las menghasilkan nilai tegangan sisa yang semakin kecil.
3. Pada pengelasan sambungan T SS400, deformasi secara angular pada plat vertikal terkecil didapat pada variasi HI 1 dengan nilai *heat input* 552 J/mm sebesar 0,8 mm dan derajat simpangan sebesar 52,92°. Untuk deformasi angular tertinggi pada plat vertikal didapat pada pengelasan dengan variasi HI 8 dengan nilai *heat input* 1080 J/mm sebesar 1,34 mm dan derajat simpangan sebesar 93,96°. Selanjutnya untuk deformasi secara angular pada plat horizontal terkecil didapat pada variasi HI 1 dengan nilai *heat input* 552 J/mm sebesar -0,55 mm dan derajat simpangan sebesar -31,36°. Untuk deformasi angular tertinggi pada plat horizontal didapat pada pengelasan dengan variasi HI 8 dengan nilai *heat input* 1080 J/mm sebesar -0,39 mm dan derajat simpangan sebesar -22,24°. Diketahui bahwa semakin besar arus, maka menghasilkan deformasi yang juga semakin besar. Sedangkan semakin cepat kecepatan las, maka deformasi yang dihasilkan semakin kecil.

Pada seluruh variasi pengelasan dapat dilihat bahwa variasi HI 1 dengan nilai *heat input* 552,22 J/mm dengan kecepatan mengikuti *best practice* dari PT. X yaitu 8,33 mm/s menghasilkan deformasi dan tegangan sisa yang paling kecil. Namun, dengan *heat input* yang paling sedikit, parameter ini perlu diuji kedalaman penetrasi las dan juga kekuatan sambungan las yang dihasilkan. Sedangkan, pada parameter yang menggunakan kecepatan las 5 mm/s, didapatkan variasi dengan tegangan sisa dan deformasi paling kecil adalah HI 5 dengan nilai *heat input* 920 J/mm. Nilai *heat input* yang berada pada variasi pengelasan 5 mm/s sudah mengikuti rata-rata *heat input* pada penelitian sebelumnya dengan kekuatan sambungan las yang baik. Pada parameter HI 5, simpangan terjauh yang didapatkan adalah 1,08 mm, diluar toleransi dari PT.X. Namun, hal ini dapat diantisipasi dengan menyusun sambungan pelat secara miring dengan besaran simpangan terjauh yang sudah diprediksi, sehingga dapat menghasilkan deformasi yang diharapkan, dengan kekuatan sambungan las yang baik.

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 perlakuan *Post Weld Heat Treatment (PWHT)* dan *peening*.
3. Pada penelitian selanjutnya, sebaiknya dilakukan eksperimen untuk di analisa struktur mikro dan makro yang dihasilkan setelah pengelasan untuk mengetahui parameter yang digunakan dalam simulasi sudah memenuhi target kualitas yang diharapkan atau tidak.

DAFTAR PUSTAKA

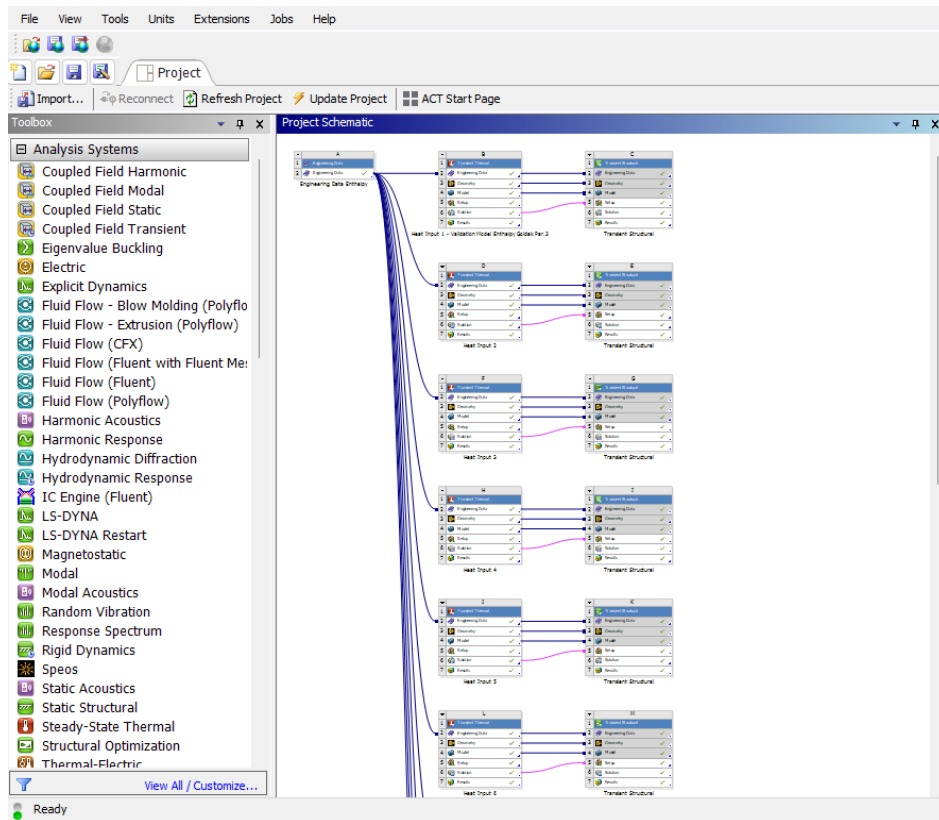
- Certificate, M. T. (2008). *Mill Test Certificate / 검사증명서 Mill Test Certificate / 검사증명서*. 773, 60633.
- Cross, C. E., & Kohn, M. L. (2018). Metal Handbook, Welding, Brazing, and Soldering. In *ASM International*. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v06.a0001418>
- Dai, Q., Ji, P., Yin, C., Yi, D., Wang, B., & Zhu, J. (2010). Application of similitude theory for welding deformation prediction of large hydraulic excavator. *Applied Mechanics and Materials*, 26–28, 448–451. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.26-28.448>
- Dhawale, R. M.; Wagh, S. R., Dhawale, R.M, Wagh, S. R., Dhawale, R. M., Wagh, S. R., Dhawale, R. M.; Wagh, S. R., Dhawale, R.M, Wagh, S. R., Dhawale, R. M., & Wagh, S. R. (2014). Finite Element Analysis of Components of Excavator Arm — a Review. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 3(2), 340–346.
- Dimas Prasetyo, & Yulianto, T. (2012). *Perbandingan Deformasi dan Tegangan Sisa Metode Elemen Hingga*. 1(1).
- Drosos, K., & Kotsakis, S. (2014). Influence of welding parameters on weld quality and productivity using metal cored wires. *Department of Materials and Manufacturing Technology, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden*, 1–60.
- DTWD. (2018). *Perform Gas Metal Arc Welding*.
- 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>
- Ghosh, A. (2012). Modeling of thermal transport for GMAW. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/263429>
- Goldak, J. A., & Akhlaghi, M. (2005). Computational welding mechanics. In *Computational Welding Mechanics*. <https://doi.org/10.1007/b101137>
- Govinda Rao, P., Srinivasa Rao, P., & Gopala Krishna, A. (2014). Review on residual stresses in welded joints prepared under the influence of mechanical vibrations. *Journal of Manufacturing Technology Research*, 6(1–2), 33–40.
- Grong, O. (1997). Metallurgical Modelling of Welding. *Institute of Materials, 1 Carlton House Terrace, London, SW 1 Y 5 DB, UK, 1997*. 605, 620.
- Ida Bagus Putra Anandya. (2016). ANALISIS ELEMEN HINGGA PADA PROSES BENDING PIPA BERPENAMPANG SEGI EMPAT DENGAN LASER. *Institut Teknologi Sepuluh Nopember*, 18(2), 22280. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jplph.2009.07.006%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.neps.2015.06.001%0Ahttps://www.abebooks.com/Trease-Evans-Pharmacognosy-13th-Edition-William/14174467122/bd>
- Ivanka, R., Irfan, M., Hidayat, P., Jatimurti, W., Teknik, D., Teknologi, F., & Sistem, R. (2021). *Analisis Pengaruh Heat Flux terhadap Tegangan Sisa dan Distorsi pada Pengelasan Sambungan T SUS304L dan SUS316L Menggunakan Metode Elemen Hingga*.
- 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>
- Julian, N., Budiarto, U., & Arswendo, B. (2017). Analisa perbandingan kekuatan tarik pada sambungan las baja SS400 pengelasan MAG dengan variasi arus Pengelasan dan Media Pendingin Sebagai Material Lambung Kapal. *Teknik Perkapalan*, 5(2), 421–430.
- Kiran. (2022). *Heat Source Modeling and Residual Stress Analysis for Metal Directed Energy Deposition Additive Manufacturing*.
- Kubo, A., & Sasaki, T. (n.d.). *Fast and versatile measurement of residual stress and hardness of gear and shaft materials*.
- Kumar, A., & Gandhinathan, R. (2020). Process Parameters for Metal Inert Gas Welding of Mild

- Steel by Using Taguchi Technique-A Review. *International Journal of Material Sciences and Technology*, 10(1), 1–14. <http://www.ripublication.com>
- 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>
- Lundbäck, A. (2003). Finite Element Modelling and Simulation of Welding of Aerospace Components. *Aerospace Engineering*, 21(4), 383–395. <http://epubl.ltu.se/1402-1757/2003/27/LTU-LIC-0327-SE.pdf>
- Maddox, S. J. (2011). Fatigue design rules for welded structures. In *Fracture and Fatigue of Welded Joints and Structures*. Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1533/9780857092502.2.168>
- Mondal, A. K., Lohit, A., Biswas, P., Bag, S., & Das, M. (2018). Prediction of weld-induced distortion of large structure using equivalent load technique. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 232(3), 499–512. <https://doi.org/10.1177/0954405416646309>
- Naidu, D. S. (2003). *Modeling, Sensing, and Control of Gas Metal Arc Welding*.
- Nasir, N. S. M., Razab, M. K. A. A., Mamat, S., & Ahmad, M. I. (2016). Review on Welding Residual Stress. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(9), 6166–6175.
- No, V., Pratikno, H., Adhi, N., & Lalitya, W. (2021). *Comparative Analysis of FCAW, and GMAW Welding With Heat Input Variations on A36 Steel Against Vickers Hardness Test and Macrostructure*. 5(2), 58–61.
- NOVIANTO, A. (2018). Teknik Pengelasan Gas Metal (MIG/MAG). *Universitas Negeri Yogyakarta*, 10–27.
- P.Lakshminarayana, M. (2016). *reduction of residual stresses in welded joints using mechanical vibrations*. 5(2), 685–692.
- 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>
- Pentenrieder, B. (2005). *Finite Element Solutions of Heat Conduction Problems in Complicated 3D Geometries Using the Multigrid Method*.
- Pilipenko, A. (2001). Computer simulation of residual stress and distortion of thick plates in multi-electrode submerged arc welding. Their mitigation techniques. *Department of Machine Design and Materials Technology Norwegian University of Science and Technology*, 1289.
- 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*.
- 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>
- Ranjarnodeh, E., Serajzadeh, S., Kokabi, A. H., & Fischer, A. (2011). Effect of welding parameters on residual stresses in dissimilar joint of stainless steel to carbon steel. *Journal of Materials Science*, 46(9), 3225–3232. <https://doi.org/10.1007/s10853-010-5207-8>
- Siswanto, R. (2018). Buku Ajar Teknologi Pengelasan (HMKB791). *Teknik Mesin Univeristas Lambung Mangkurat*, 1–20.

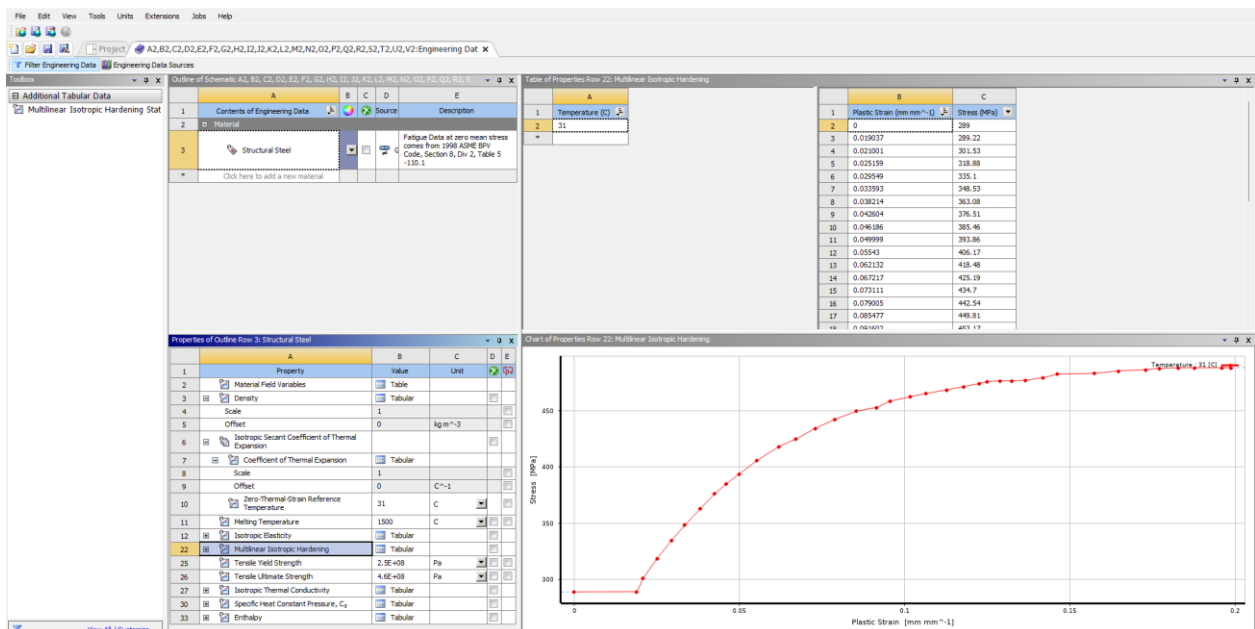
- Sriwijaya, R., Ghupta, B. N., & Yunanto, K. (2016). *Pengaruh Urutan Las Terhadap Deformasi Las Pada Pengelasan Chassis MOLINA UGM*. *Snttm Xv*, 5–6.
- Subeki, N. (2009). Optimalisasi Penggunaan Heat Input Pada Pengelasan Pipa Spiral Untuk Meningkatkan Kekuatan Sambungan. *Jurnal Teknik Industri*, 10(2), 180–185.
- Sudersanan. (2012). *the Effect of Heat Input & Travel Speed on the Welding Residual*. 2(4), 43–50.
- 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>
- Ugural, A. C. (1999). *Stresses in Plate and Shell*. W.C Brown Pub.Co.
- Vemanaboina, H., Sridhar Babu, B., Gundabattini, E., Ferro, P., & Kumar, K. (2021). Effect of Heat Input on Distortions and Residual Stresses Induced by Gas Tungsten Arc Welding in SS 316L to INCONEL625 Multipass Dissimilar Welded Joints. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/1028461>
- Wahab, M. A. (2014). Manual Metal Arc Welding and Gas Metal Arc Welding. In *Comprehensive Materials Processing* (Vol. 6). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00610-5>
- Wei, L. (2005). Measurement of Inherent Deformations in Typical Weld Joints Using Inverse Analysis (Part 2) Prediction of Welding Distortion of Large Structures †. *Transactions of JWRI Is, Part 2*.
- Weman, K. (n.d.). *MIG Welding Guide*.
- Wibowo, H., Ilman, M. N., Iswanto, P., & Mada, U. G. (2016). *Analisa Heat Input Pengelasan terhadap Distorsi , Struktur Mikro dan Kekuatan Mekanis Baja A36*. 7(1), 3–8.
- Yu, C., Bao, Y., & Li, Q. (2021). Finite element analysis of excavator mechanical behavior and boom structure optimization. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 173(January 2020). <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108637>
- 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>

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

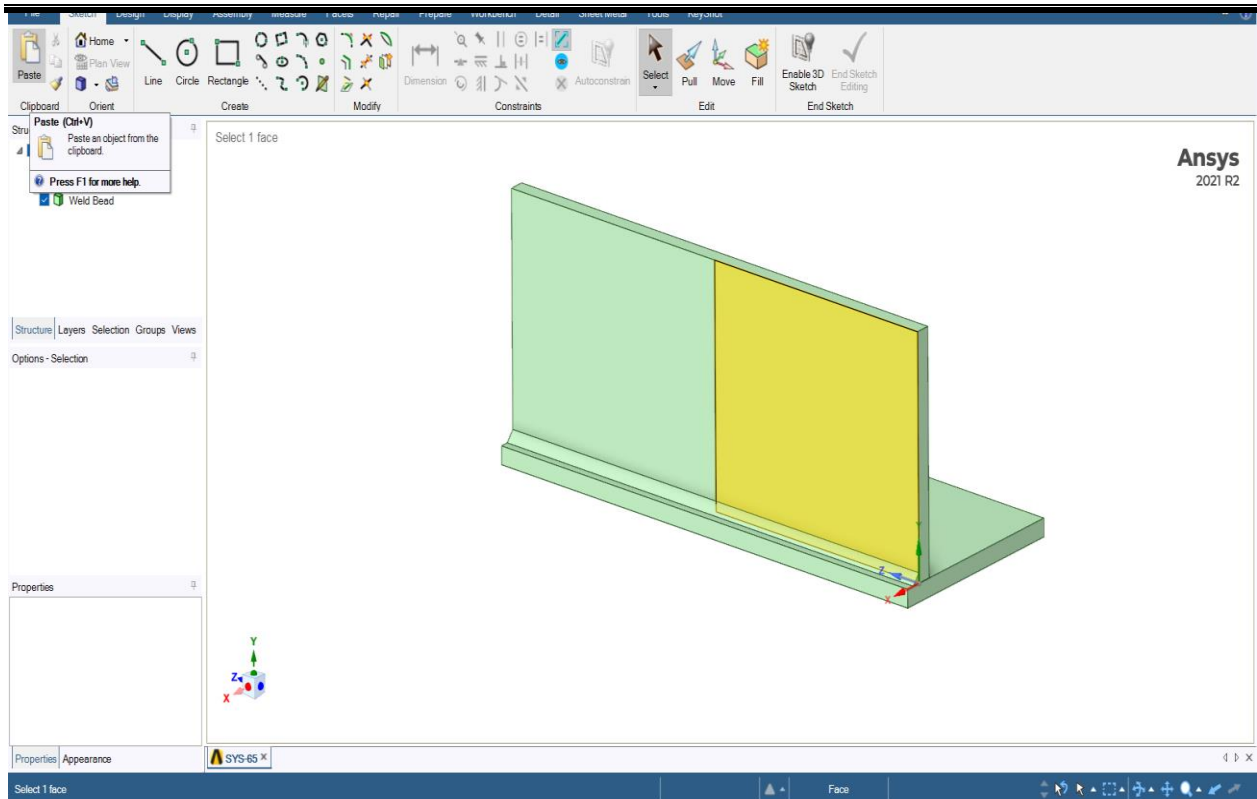
LAMPIRAN A TAHAP SIMULASI NUMERIK PADA *SOFTWARE* ANSYS WORKBENCH 2021 R2



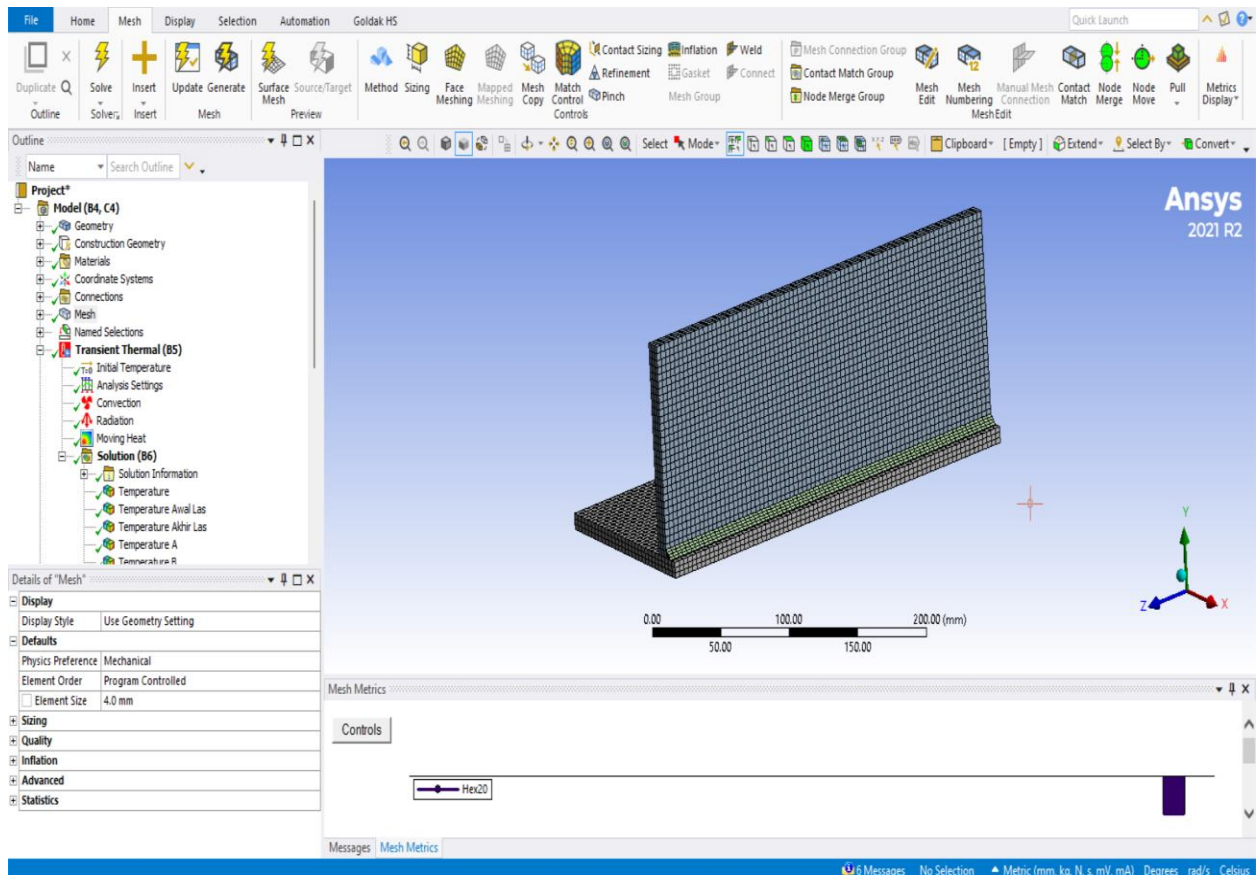
Gambar A. 1 Penyusunan cabang pada ANSYS Workbench 2021 R2



Gambar A. 2 Pengisian material properties sesuai dengan data

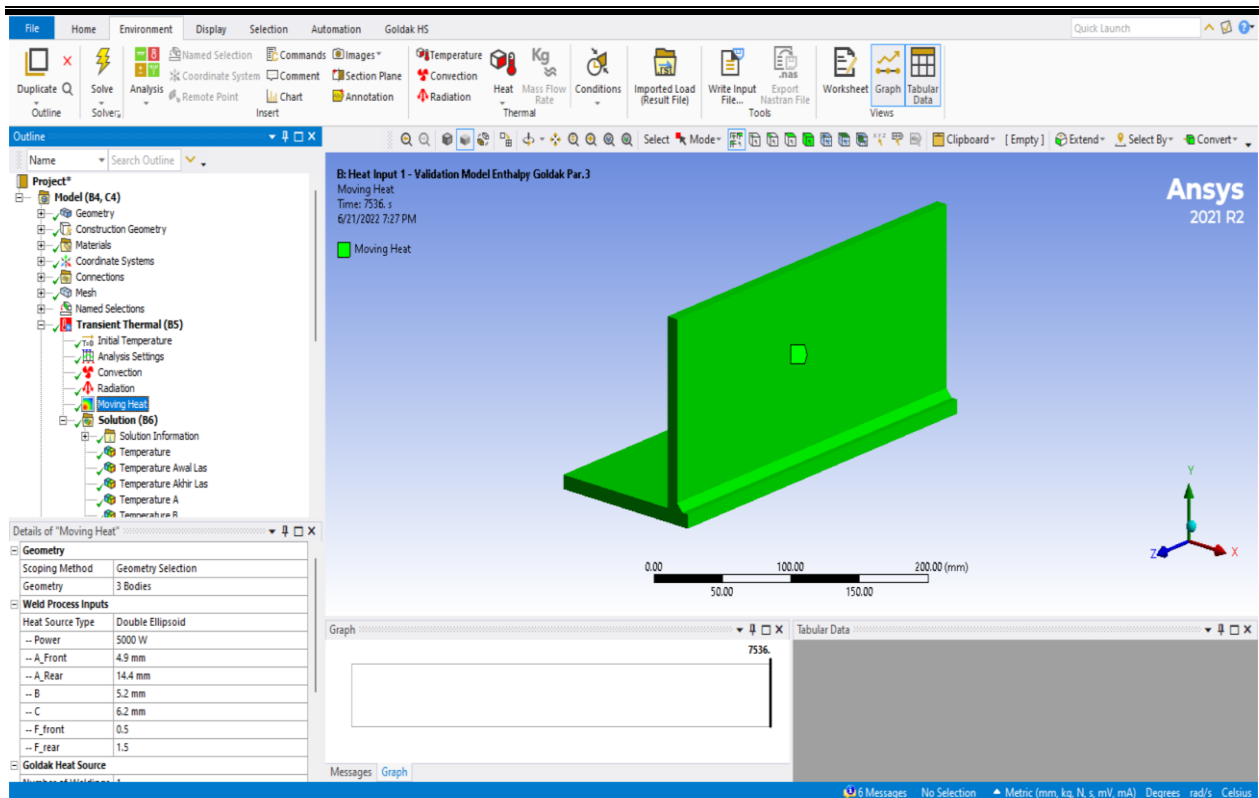


Gambar A. 3 Pembuatan geometri sambungan T menggunakan SpaceClaim

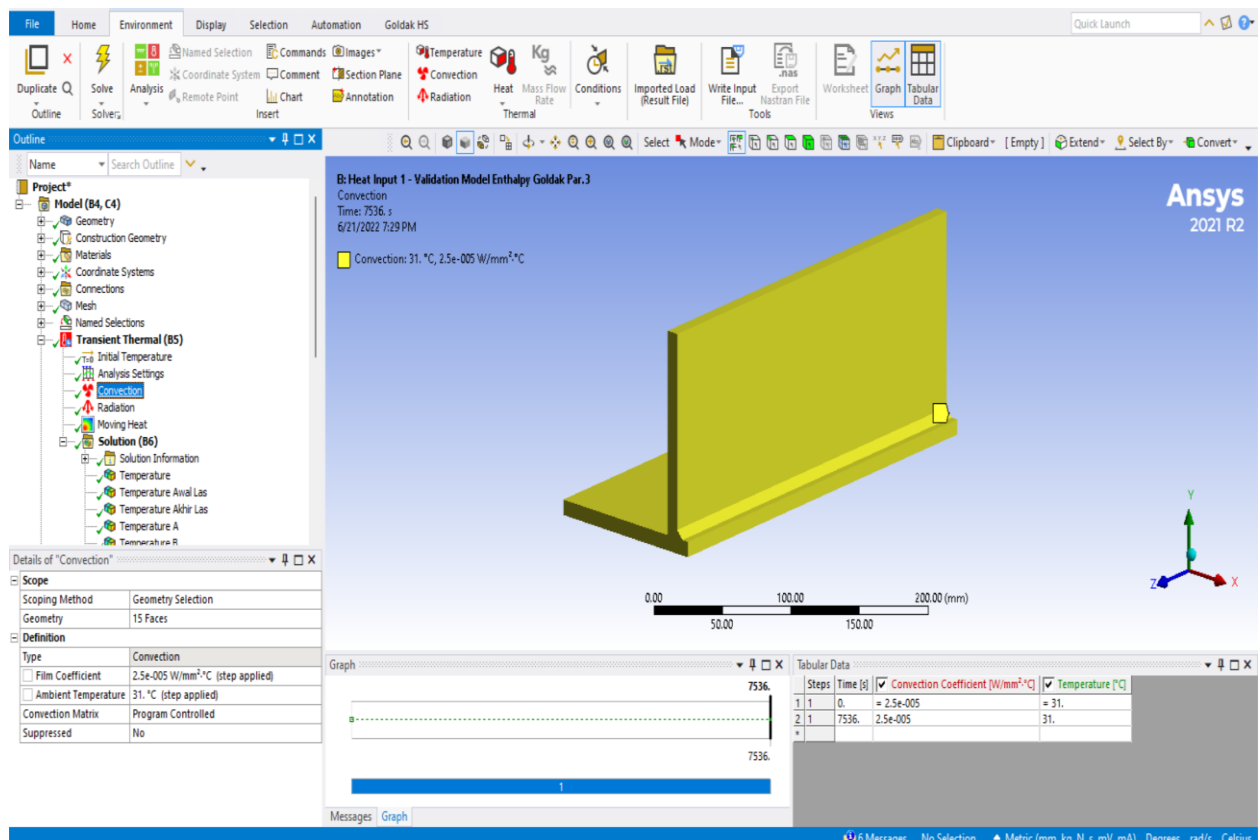


Gambar A. 4 Pembuatan *meshing* pada model

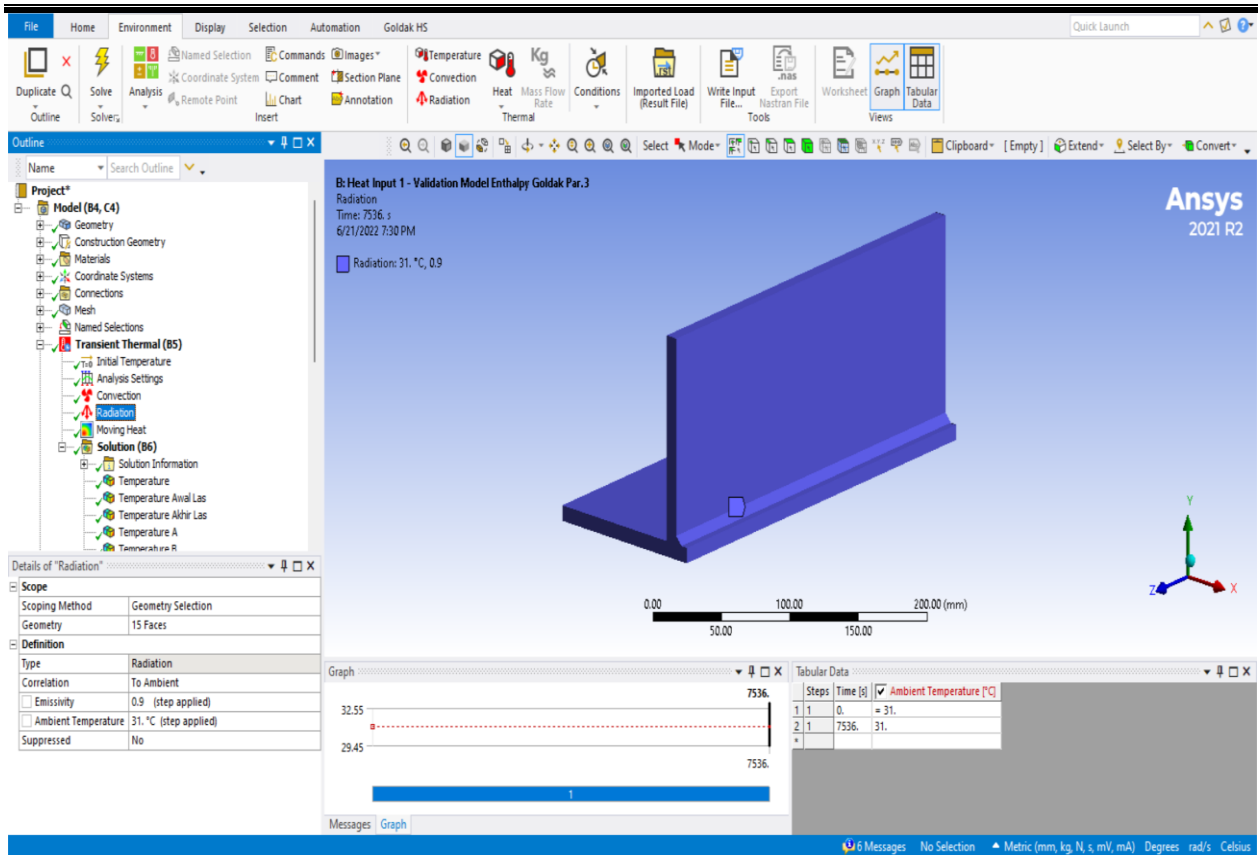
LAPORAN TUGAS AKHIR TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI



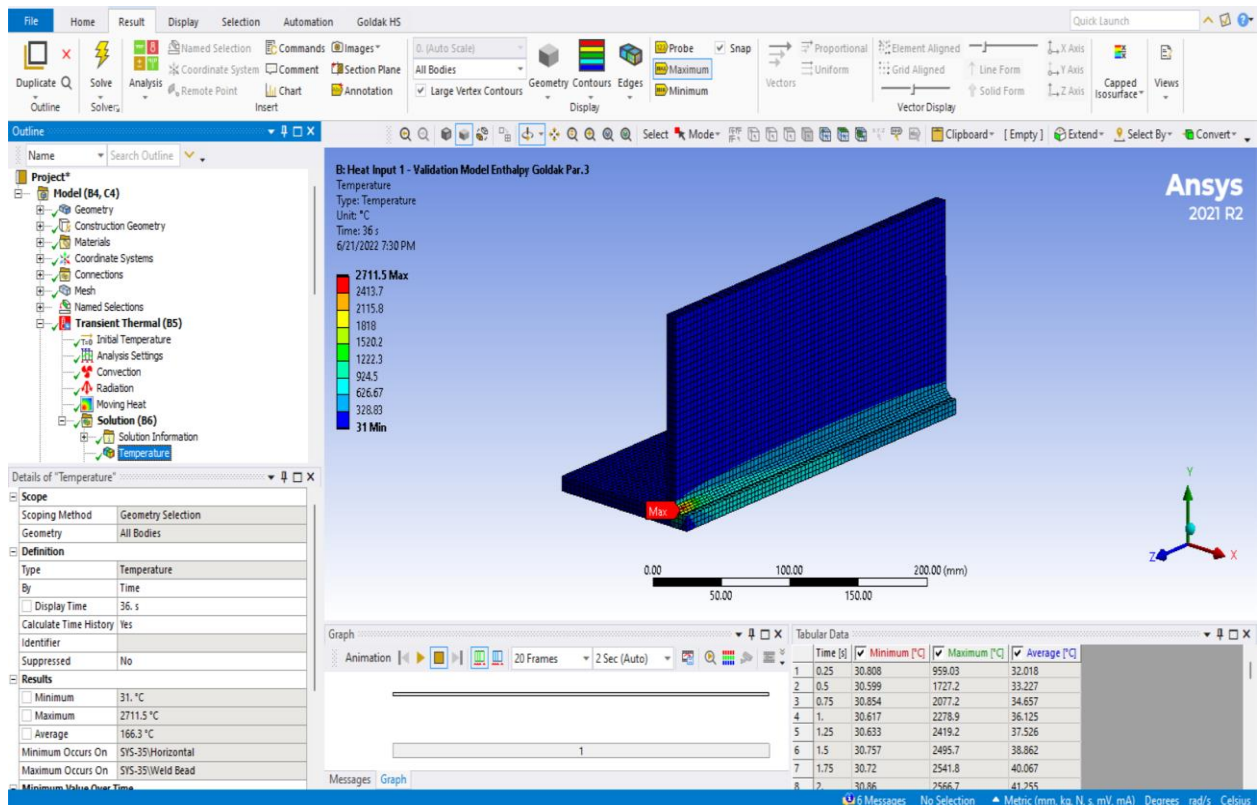
Gambar A. 5 Pemberian beban *heat input* dan kecepatan las pada weld line sesuai dengan masing-masing variasi



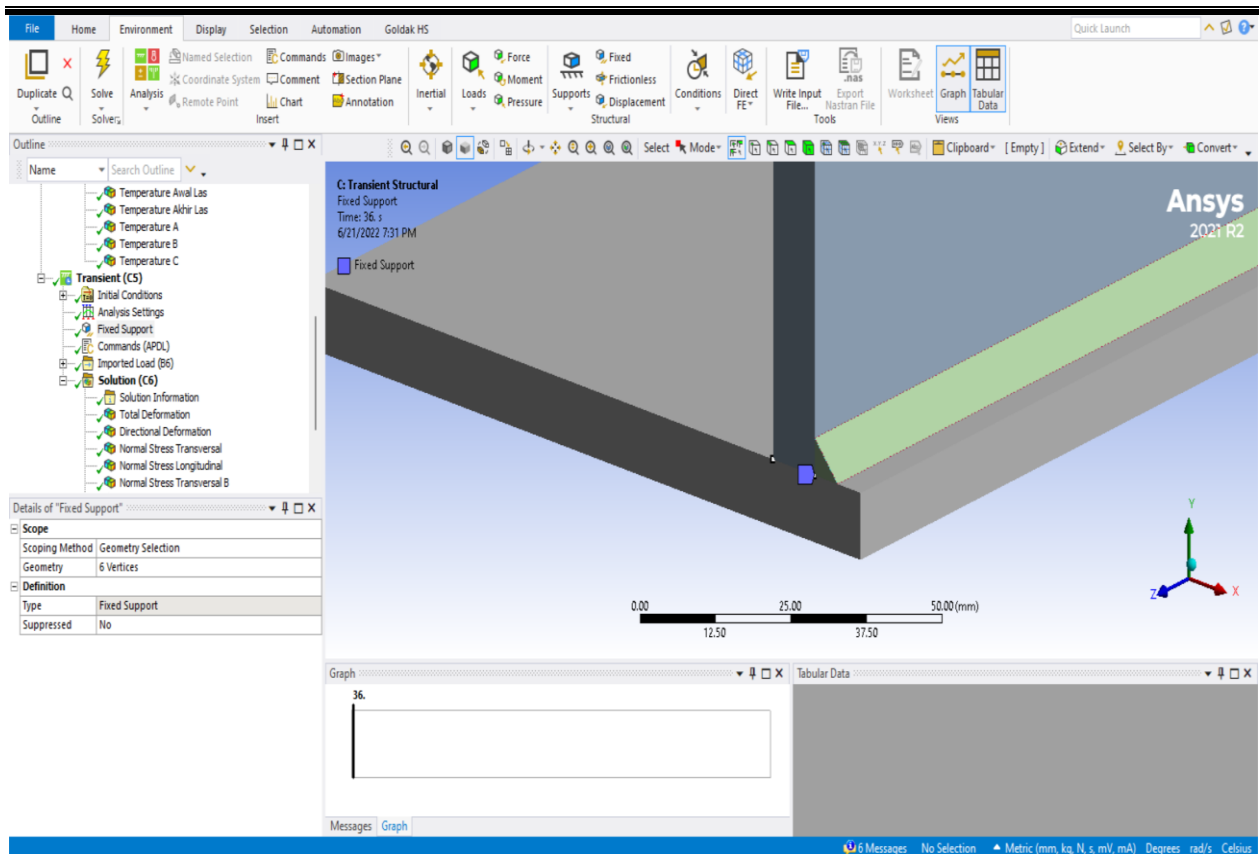
Gambar A. 6 Pemberian kondisi batas berupa konveksi pada seluruh permukaan model



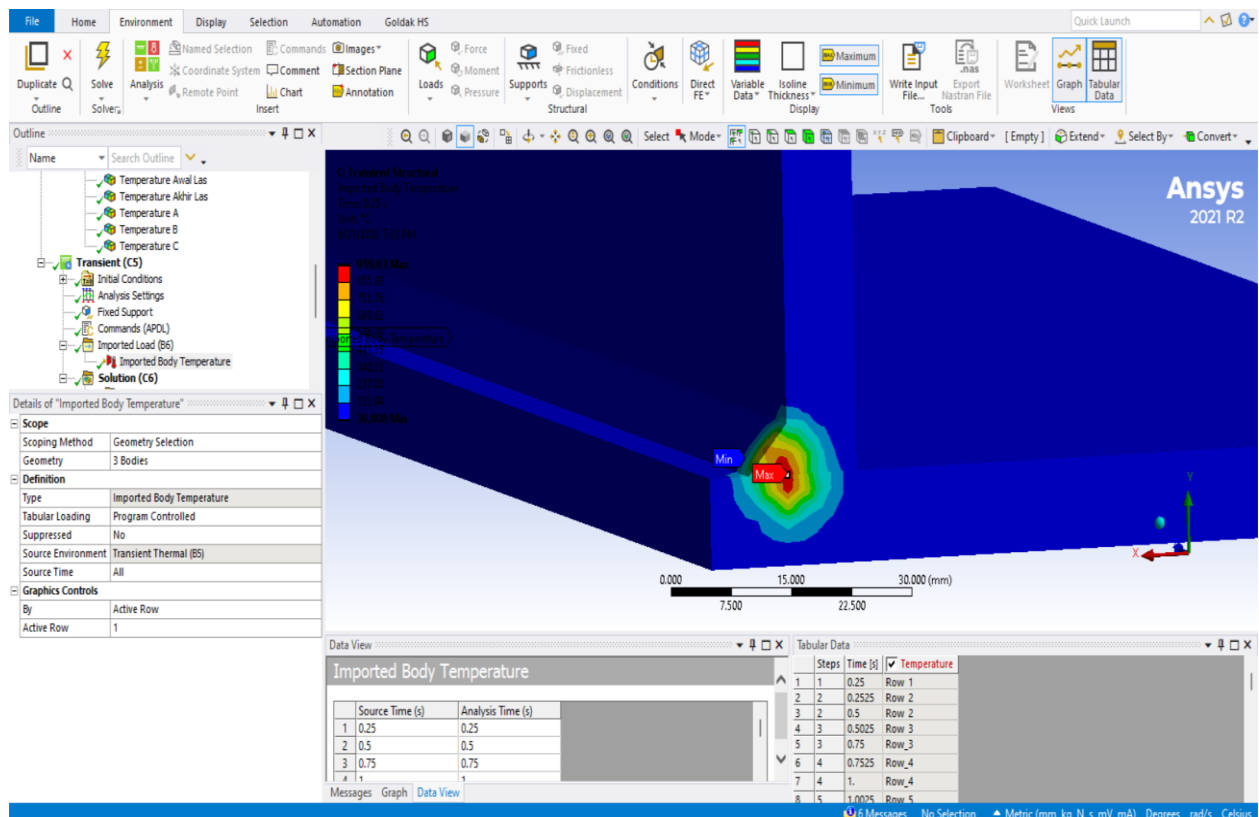
Gambar A. 7 Pemberian kondisi batas berupa radiasi pada permukaan model



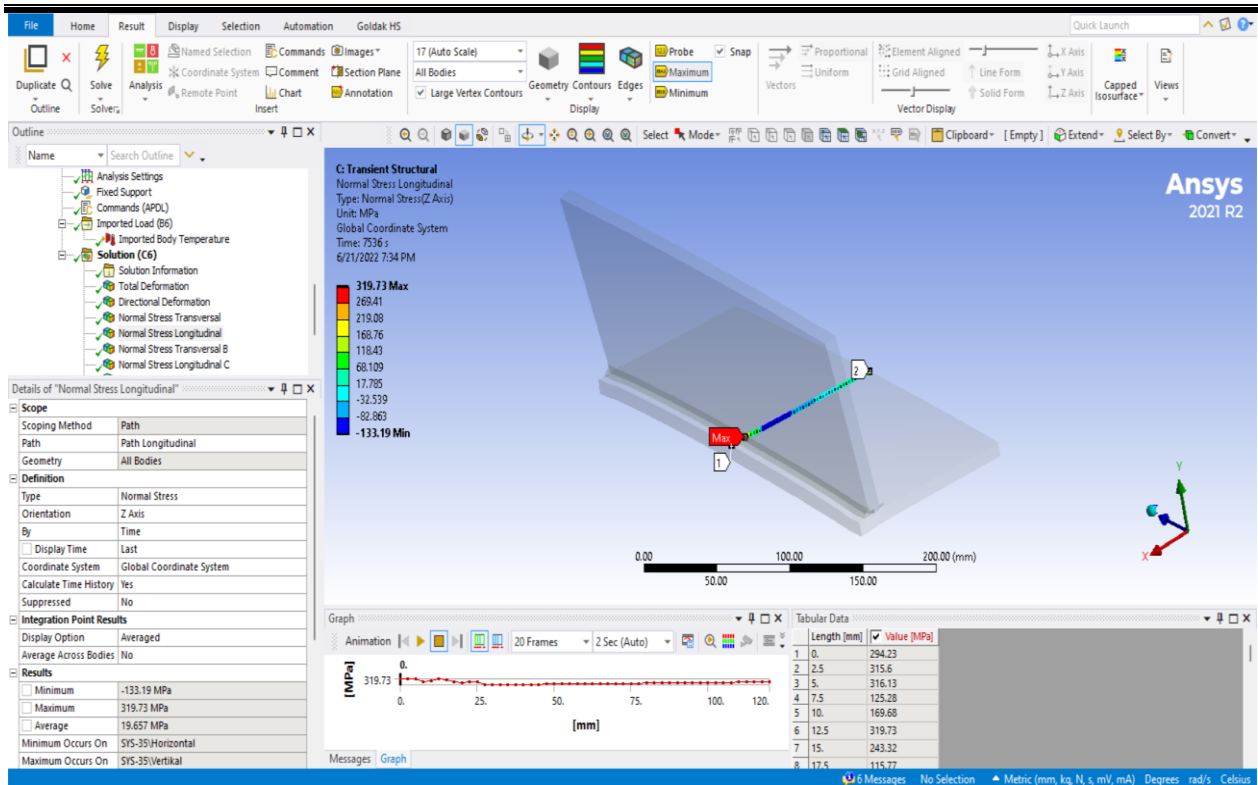
Gambar A. 8 Pemberian output simulasi berupa *Temperature*.



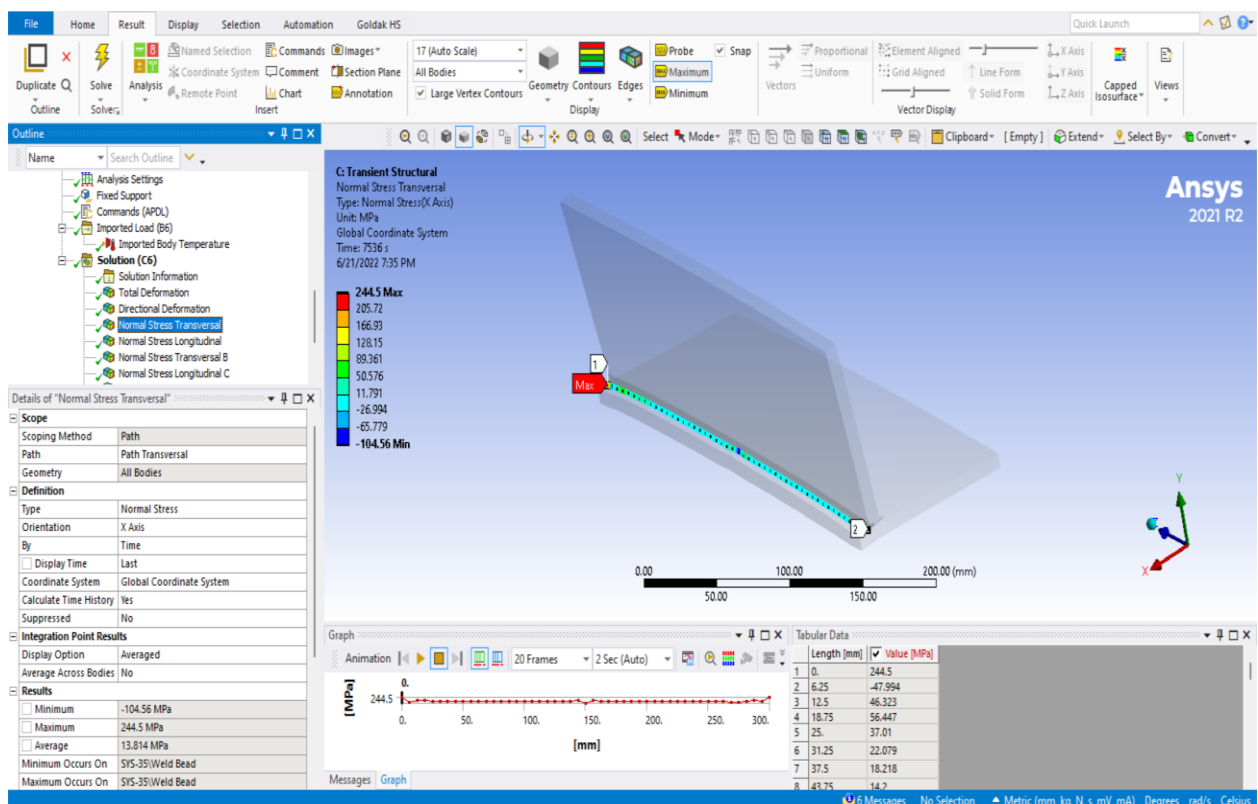
Gambar A. 9 Pemberian kondisi batas berupa fixed support pada pembebanan struktural



Gambar A. 10 Memasukkan beban termal pada simulasi struktural

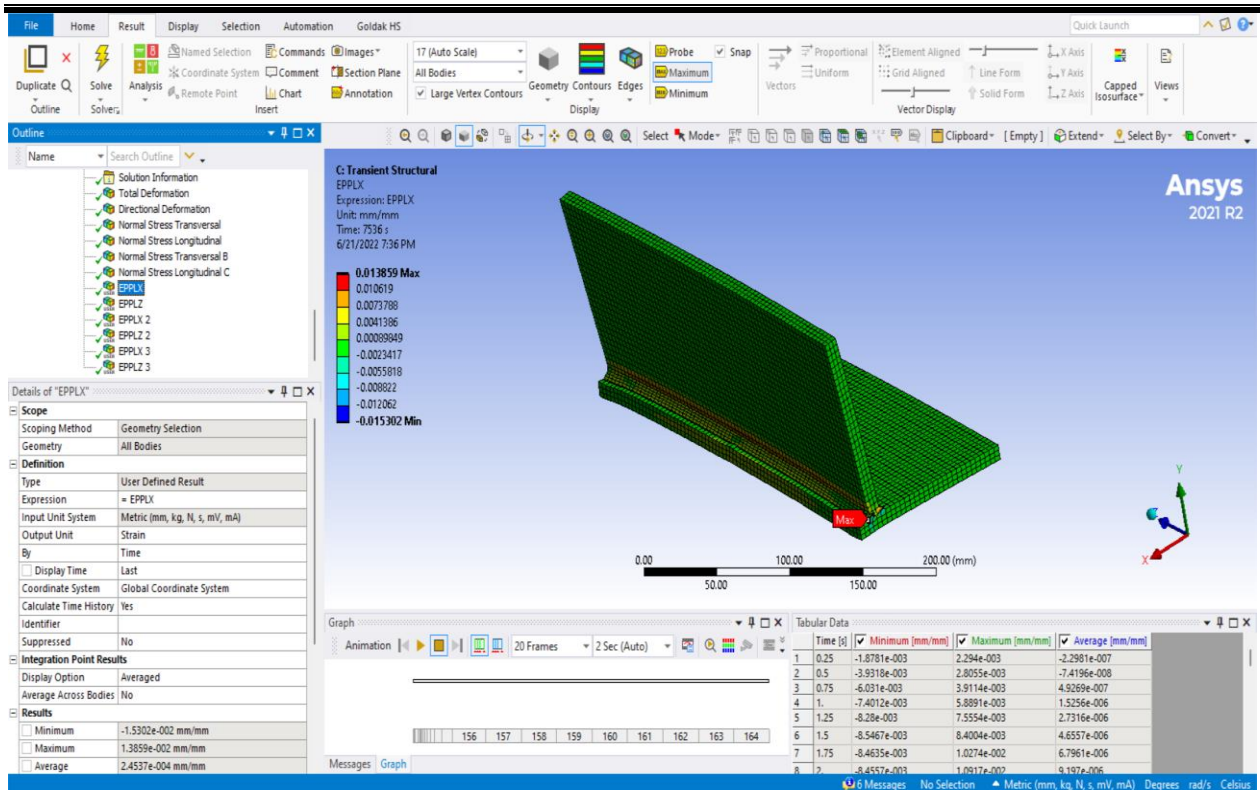


Gambar A. 11 Pemberian output berupa *Normal Stress* orientasi sumbu z untuk distribusi tegangan longitudinal

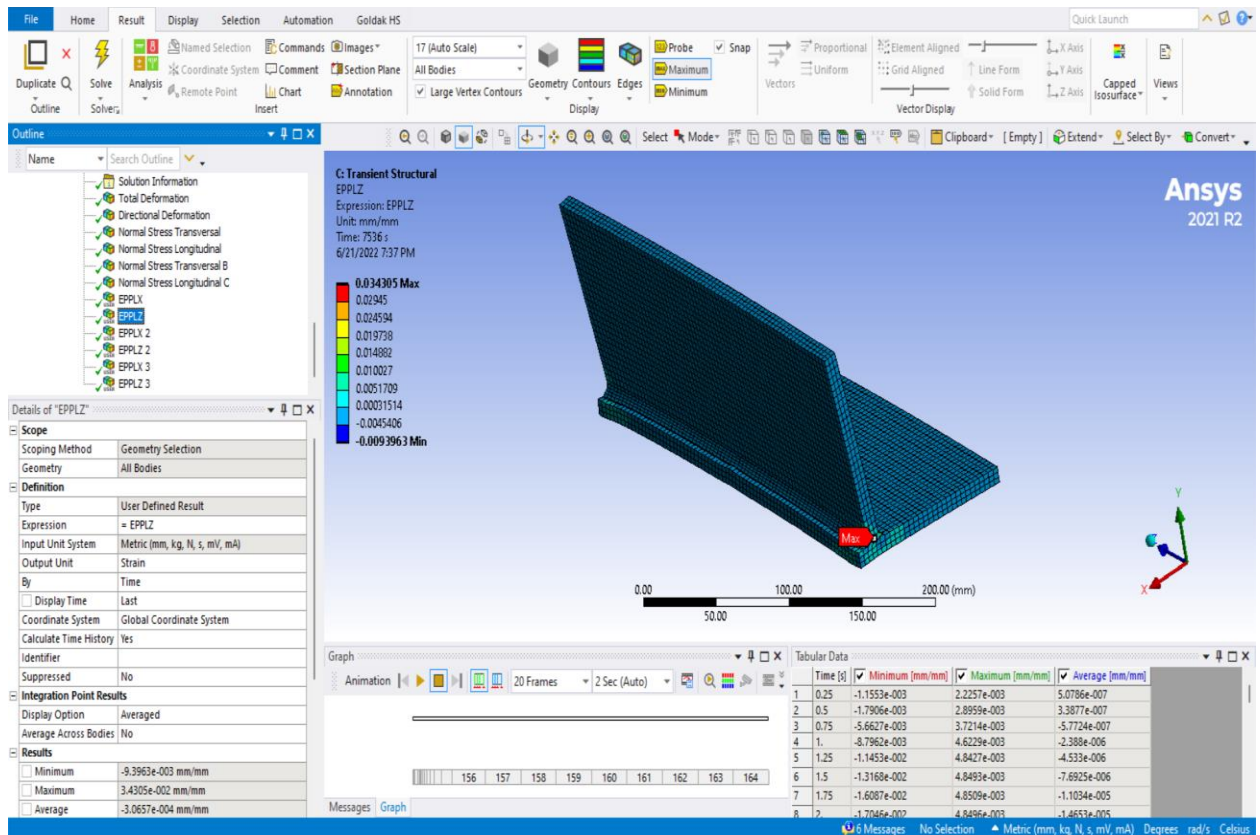


Gambar A. 12 Pemberian output berupa *Normal Stress* orientasi sumbu x untuk distribusi tegangan transversal

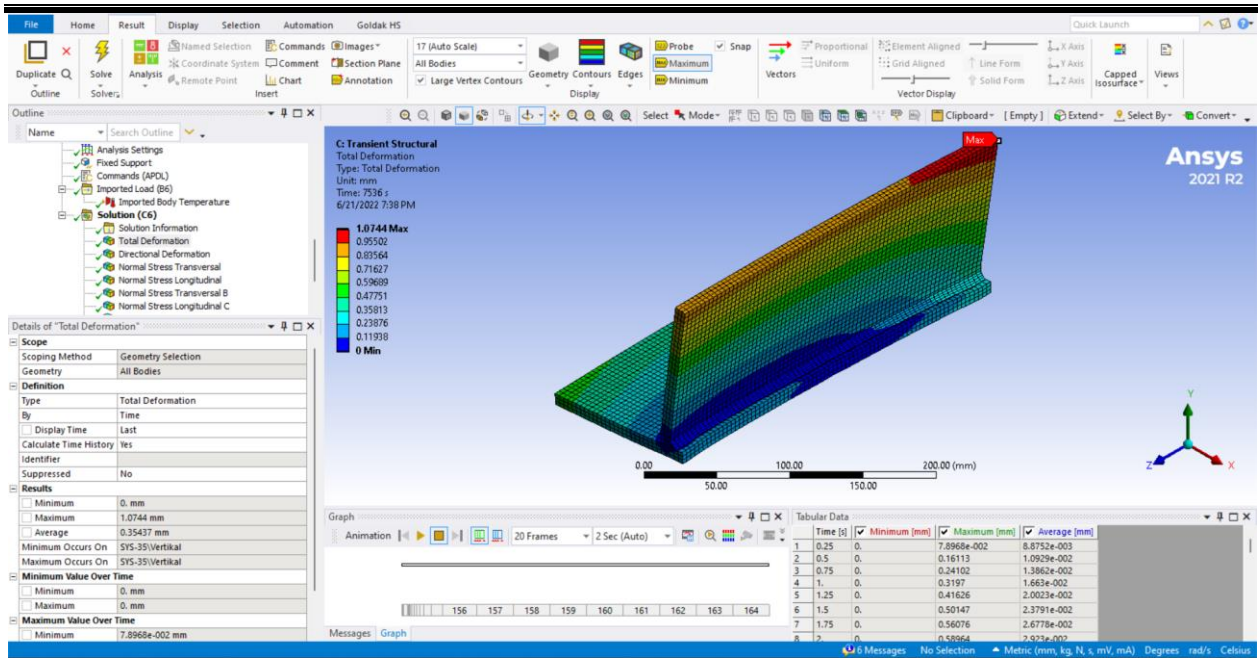
LAPORAN TUGAS AKHIR TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI



Gambar A. 13 Pemberian output berupa EPPLX untuk nilai regangan plastis transversal



Gambar A. 14 Pemberian output berupa EPPLZ untuk distribusi regangan plastis longitudinal

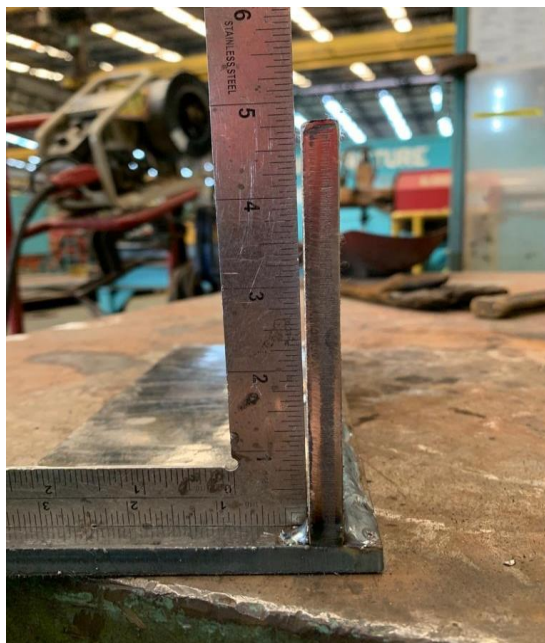


Gambar A. 15 Pemberian output berupa *Total Deformation* untuk deformasi

LAMPIRAN B
DOKUMENTASI PENGELASAN EKSPERIMENTAL



Gambar B. 1 Trial Pengelasan di PT. X



Gambar B. 2 Hasil deformasi trial pengelasan di PT.X

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN C

PERBANDINGAN HASIL MENGGUNAKAN PERHITUNGAN HEAT FLUX DAN PERSAMAAN GOLDAK

Terdapat dua metode yang dapat digunakan dalam simulasi pengelasan, yaitu menggunakan pembebanan *heat flux* pada *surface weld bead* dan menggunakan pembebanan *heat flux* dengan metode persamaan Goldak yang dilakukan secara volumetrik. Kedua metode ini memiliki perumusan nilai *heat flux* yang berbeda. Untuk metode dengan pembebanan *heat flux* pada *surface* 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.

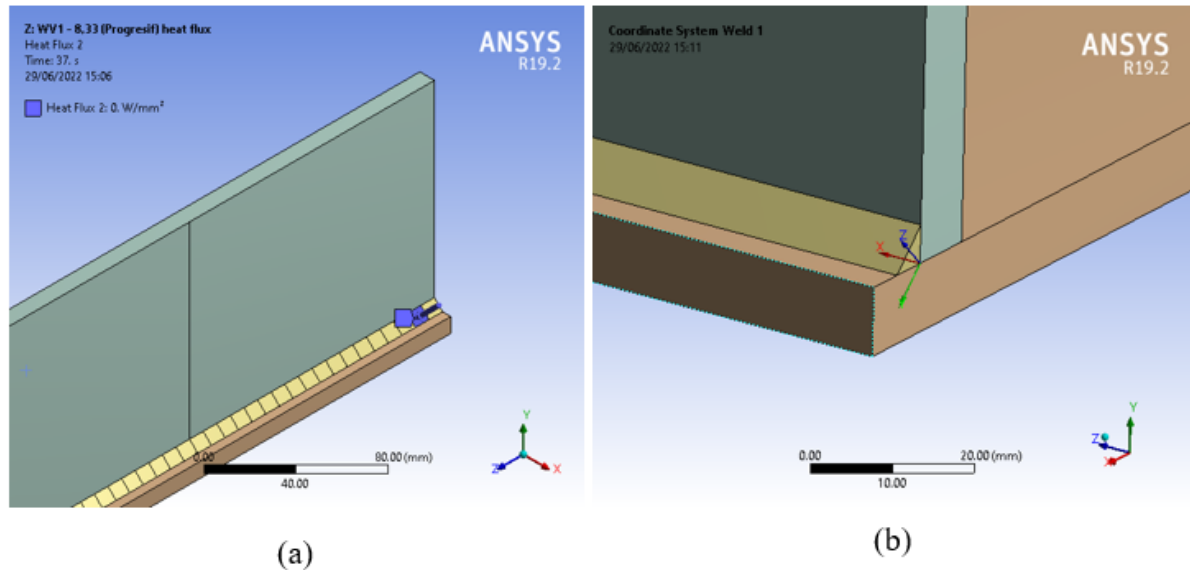
Dan berikut adalah rumus untuk mendapatkan nilai *heat flux* sebagai beban thermal ketika simulasi pengelasan dilakukan.

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

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 . 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 hasil data *best practice* dengan data simulasi *surface heat flux* dan Goldak. Data temperature puncak pada nodal 1 dan nodal 2. Deformasi simpangan maksimum pada bagian tengah pelat vertical, 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 *surface heat flux* memiliki error yang lebih besar dibanding dengan hasil dari data *best practice*, namun untuk nilai tegangan sisa memiliki error yang sama. Sehingga dapat disimpulkan bahwa simulasi dengan metode pembebanan Goldak *equation* memiliki nilai error yang kecil terhadap data *best practice*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN D
HASIL INTERPOLASI REGANGAN PLASTIS MAKSIMUM PADA GRAFIK *TRUE*
STRESS-STRAIN

Tabel D. 1 Data Grafik *True* Stress-Strain (Nguyen, 2014)

Regangan Plastis	Tegangan (MPa)
0	289
0.019037	289.22
0.021001	301.53
0.025159	318.88
0.029549	335.1
0.033593	348.53
0.038214	363.08
0.042604	376.51
0.046186	385.46
0.049999	393.86
0.05543	406.17
0.062132	418.48
0.067217	425.19
0.073111	434.7
0.079005	442.54
0.085477	449.81
0.091602	453.17
0.095647	458.76
0.101888	462.68
0.106511	465.48
0.112868	468.84
0.117954	471.63
0.122693	474.43
0.125004	476.11
0.128934	476.67
0.132402	476.67
0.136563	477.23
0.141995	479.47
0.146271	482.82
0.152745	482.27
0.157483	483.38
0.164765	485.62
0.172972	486.74
0.177133	487.86
0.182912	488.42
0.187767	488.42
0.192506	487.86
0.195974	488.42
0.198864	488.42

Pada grafik yang dihasilkan dari data **Tabel D.1** didapatkan bahwa grafik memiliki persamaan polinomial yang kemudian akan digunakan sebagai persamaan untuk dilakukannya interpolasi regangan plastis. Persamaannya adalah sebagai berikut:

$$275 -1207x + 183185x^2 + -3.35E+06x^3 + 2.71E+07x^4 + -1.04E+08x^5 + 1.55E+08x^6 \dots\dots\dots (D.1)$$

Persamaan diatas memiliki nilai standard deviasi 0,998 terhadap grafiik dari *true plastic-strain*. Melalui persamaan tersebut dilakukan interpolasi untuk masing-masing nilai regangan plastis maksimum pada setiap variasi las. Dimana nilai x merupakan nilai regangan plastis yang akan dimasukkan kedalam persamaan.

Tabel D. 2 Hasil Interpolasi Regangan Plastis Longitudinal

Nilai Regangan Plastis Longitudinal	Nilai Tegangan Sisa Longitudinal (MPa)
-0,0089 - 0,0332	-276,570 - 343,044
-0,0092 - 0,0337	-276,979 - 344,954
-0,0093 - 0,0343	-277,119 - 346,771
-0,00971 - 0,0351	-277,716 - 349,382
-0,0147 - 0,0399	-287,395 - 364,362
-0,0153 - 0,0406	-288,816 - 366,487
-0,016 - 0,0412	-290,531 - 368,504
-0,017 - 0,0424	-293,082 - 372,169

Tabel D. 3 Hasil Interpolasi Regangan Plastis Transversal

Nilai Regangan Plastis Transversal	Nilai Tegangan Sisa Transversal (MPa)
-0,0146 - 0,0136	-287,163 - 284,939
-0,0149 - 0,0137	-287,64 - 285,198
-0,0153 - 0,0139	-288,816 - 285,487
-0,0158 - 0,0145	-290,035 - 287,004
-0,019 - 0,0219	-298,50 - 307,039
-0,0194 - 0,0227	-299,629 - 309,534
-0,0198 - 0,0236	-300,771 - 312,329
-0,02 - 0,0251	-301,347 - 316,938

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, Ph.D. selaku dosen pembimbing yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu kepada penulis dalam pengerjaan Laporan Tugas Akhir.
2. Bapak Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu kepada penulis dalam pengerjaan Laporan Tugas Akhir.
3. Kedua orang tua penulis Bapak Dwi Winarno dan Ibu Lina Fitriani, serta keluarga besar yang telah banyak memberikan doa, motivasi dan dukungan kepada penulis selama pengerjaan Tugas Akhir hingga dapat terselesaikan.
4. Mas Rino Ivanka 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 laporan ini.
6. Seluruh member *Manufacturing Engineering* PT.X yang banyak membantu, memberikan nasihat dan dukungan selama pengerjaan laporan ini.
7. Sulthan Naufal Atharif sebagai partner pengerjaan Tugas Akhir penulis.
8. Seluruh member Tim Antasena ITS yang telah bersedia untuk membagi ruangan lab komputasi sebagai tempat penulis mengerjakan tugas akhir.
9. Teman-teman Angkatan 2018 (MT 20) yang selalu memberikan dukungan kepada penulis.
10. 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, 21 Juni 2022

Penulis

Ario Bhisno Nugroho

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis memiliki nama lengkap Ario Bhismo Nugroho dilahirkan di Jakarta pada tanggal 17 Desember 2000. Penulis merupakan anak tunggal. Penulis menempuh pendidikan formal sekolah dasar di SD Cakra Buana Depok dari tahun 2006 hingga 2012. Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan sekolah menengah pertama di SMP Negeri 2 Depok dari tahun 2012 hingga 2015. Penulis kemudian melanjutkan pendidikan sekolah menengah atas di SMA Negeri 1 Depok dari tahun 2015 hingga 2018. Pada tahun 2018 hingga 2022, penulis melanjutkan studi di perguruan tinggi Institut Teknologi Sepuluh Nopember jurusan Teknik Material.

Penulis aktif mengikuti berbagai kegiatan organisasi dan kepanitiaan di kampus. Diantaranya adalah dengan menjadi staf internal di Indonesia Corrosion Association (INDOCOR) ITS pada tahun 2018, menjadi staf *fundraising* di *National Association of Corrosion Engineers* (NACE ITS) pada tahun 2019, dan staf keuangan di Tim Antasena ITS pada tahun 2019. Penulis selanjutnya juga melatih *soft skill* dalam hal kepemimpinan dengan menjadi *Project Manager* di Silver Parade VII, dan *General Manager* di Tim Antasena ITS. Penulis juga menjadi salah satu *founding team* untuk TEDxITS 2021 setelah sebelumnya vakum selama 4 tahun.

Dalam pengalaman profesional, penulis pernah mengikuti beberapa kegiatan magang dan juga satu kerja praktek selama masa kuliah. Penulis pernah menjalani magang di PT. Dunia Tambang Digital sebagai penulis konten, selanjutnya penulis menjalani magang di PT. Bakrie Autoparts, PT. Toyota Motor Manufacturing Indonesia, dan PT. Komatsu Indonesia. Untuk keperluan kerja praktek (KP), penulis melaksanakan KP di PT. Astra Honda Motor sebagai *welding engineer*. Beragam kegiatan yang telah diikuti telah mengembangkan penulis dalam segi teknis dan juga manajerial yang diharapkan dapat menunjang karir penulis. Untuk segala bentuk pertanyaan, kritikan, dan masukan terhadap penelitian TA penulis dapat disampaikan melalui alamat email yang tertera. Terima kasih.

E-mail: arbhis.bhismo@gmail.com