



TUGAS AKHIR- MO184804

**ANALISIS NUMERIK DAN EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI  
JUMLAH ALUR *LINE HEATING* UNTUK PERBAIKAN DISTORSI  
*ANGULAR* PADA T-JOINT**

Muhammad Bilal Teguh  
NRP. 0431154000131

DOSEN PEMBIMBING:  
Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.  
Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN  
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2019



**FINAL PROJECT - MO184804**

**NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS ON THE EFFECT  
ON VARIATION OF THE AMOUNT OF LINE HEATING FLOWS  
FOR ANGULAR DISTORTION ON T-JOINT REPARATION**

**Muhammad Bilal Teguh  
NRP. 0431154000131**

**SUPERVISORS:  
Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.  
Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.**

**OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT  
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY  
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
SURABAYA**

**2019**

**ANALISIS NUMERIK DAN EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI  
JUMLAH ALUR *LINE HEATING* UNTUK PERBAIKAN DISTORSI  
ANGULAR PADA T-JOINT**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik pada program  
studi S-1 Departemen Teknik Kelautan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh:

**Muhammad Bilal Teguh**

NRP. 04311540000131

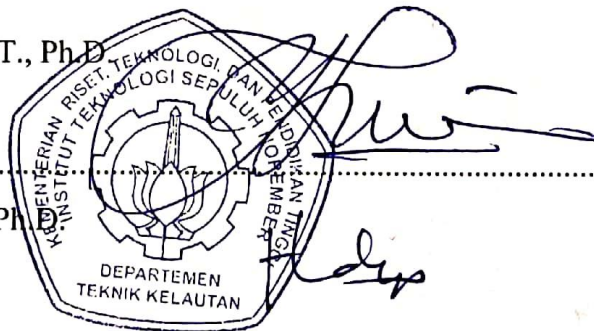
Disetujui Oleh:

1. Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D. (Pembimbing 1)

2. Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D. (Pembimbing 2)

3. Ir. Imam Rochani, M.Sc. (Penguji 1)

4. Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc. (Penguji 2)



Surabaya, Juli 2019

# **ANALISIS NUMERIK DAN EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI JUMLAH ALUR *LINE HEATING* UNTUK PERBAIKAN DISTORSI *ANGULAR* PADA *T-JOINT***

Nama Mahasiswa : Muhammad Bilal Teguh  
NRP : 0431154000131  
Departemen : Teknik Kelautan FTK-ITS  
Dosen Pembimbing : Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.  
Ir. Handayanu, M.Sc.Ph.D

## **ABSTRAK**

Teknologi pengelasan merupakan sektor penting dalam setiap pembangunan berbasis *engineering*. Pengelasan juga banyak digunakan pada industri maritim, seperti pembangunan struktur lepas pantai, penyambungan pipa dan pembangunan kapal. Penggunaan teknologi las ini sangat luas karena mudah diterapkan, biaya yang murah, dan efisien. Akan tetapi, pada proses pengelasan sering kali terjadi cacat las yang berakibat fatal pada tahap fabrikasi dalam pembangunan. Cacat las yang terjadi dapat berupa porositas, *crack*, perubahan bentuk atau distorsi, dan lain-lain. Cacat las yang telah terjadi ini tetap dapat dibenahi dengan metode yang bermacam-macam sesuai dengan jenis cacat las yang muncul. Distorsi merupakan perubahan bentuk yang terjadi akibat *heat input* yang terlalu besar yang mengakibatkan benda kerja mengalami perubahan bentuk. Terdapat dua cara efektif untuk memperbaiki distorsi, yaitu dengan teknik mekanik dan teknik termal. Teknik termal sendiri terbagi menjadi tiga, yaitu *spot heating*, *line heating*, dan *wedge-shaped heating*. Pada penelitian kali ini dilakukan analisis eksperimen dan pemodelan numerik perbaikan distorsi *angular* dengan variasi jumlah alur *line heating*. Berdasarkan hasil dari analisis eksperimen dan numerik, *line heating* dengan jumlah alur 4 kali memiliki hasil penurunan distorsi paling besar.

***Kata kunci:*** Distorsi angular, line heating, pengelasan, T-joint

# **NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS ON THE EFFECT OF VARIATION OF LINE HEATING FLOWS FOR ANGULAR DISTORTION REPARATION ON T-JOINT**

Name : Muhammad Bilal Teguh  
Student Registry ID : 04311540000131  
Major : Ocean Engineering FTK-ITS  
Supervisor : Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.  
Ir. Handayanu, M.Sc.Ph.D

## **ABSTRACT**

Welding technology is an important sector in almost every engineering-based construction. Welding is also widely used in the maritime industry, such as the construction of offshore structures, pipe connections and ship building. The use of welding technology is very broad because it is easy to implement, inexpensive, and efficient. However, in welding processes weld defects often discovered which are fatal at the fabrication stage in construction. Welding defects that occur can be porosity, cracks, deformation or distortion, and others. This weld defect can still be repaired by various methods according to the type of weld defect that appears. Distortion is also deformation that occurs due to the heat input that is too large which causes the workpiece to change the shape. There are two effective ways to correct distortions, using mechanical technique and thermal technique. The thermal technique itself is divided into three, there are spot heating, line heating, and wedge-shaped heating. In this study, an experimental analysis and numerical modeling of the angular distortion reparation were carried out with variations in the amount of line heating flow. Based on the results of experimental and numerical analysis, line heating with a number of 4 grooves has the highest reduction in distortion.

***Keywords:*** Angular distortion, line heating, T-joint, welding

## **KATA PENGANTAR**

Assalamualaikum Wr. Wb.

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT, karena atas segala rahmat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan penyusunan tugas akhir ini dengan baik dan tepat waktu.

Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan Program Sarjana (S-1) di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan (FTK), Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS).

Dalam penyusunan dan penulisan laporan tugas akhir ini, penulis mohon maaf apabila hasil penelitian dan penulisan masih banyak kekurangan dan kesalahan, oleh karena itu saran dan kritik dibutuhkan bagi penulis sebagai bahan pembelajaran untuk penelitian selanjutnya. Penulis berharap semoga penelitian ini dapat bermanfaat bagi perkembangan teknologi dalam bidang teknologi kelautan.

Wassalamualaikum Wr. Wb.

Surabaya, Juli 2019

Muhammad Bilal Teguh

## UCAPAN TERIMA KASIH

Tugas Akhir ini dapat dilaksanakan dan diselesaikan tidak lepas dari bantuan serta dukungan baik secara moral maupun material dari banyak pihak, baik secara langsung maupun tidak langsung. Penulis sangat berterima kasih kepada semua pihak yang telah membantu. Untuk itu penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Gusti Allah SWT, atas segala rahmat dan karunia-Nya.
2. Ibu, Bapak, dan kedua adik yang telah memberikan bantuan pada penulis, baik dukungan, doa, materi, dan hal banyak lainnya selama masa perkuliahan dan penyusunan tugas akhir ini.
3. Bapak Nur Syahroni, S.T.,M.T.,Ph.D. selaku dosen pembimbing tugas akhir, yang selalu memberikan arahan, nasehat, fasilitas, dan dukungan moral selama masa perkuliahan dan penyusunan tugas akhir ini.
4. Bapak Ir. Handayanu M.Sc.Ph.D selaku dosen pembimbing tugas akhir, yang telah membimbing, membantu, dan mengarahkan proses penyusunan tugas akhir ini.
5. Bapak Dr. Eng. Kriyo Sambodho, S.T., M.Eng. selaku dosen wali penulis selama menempuh studi di Departemen Teknik Kelautan, FTK-ITS.
6. Bapak Ir. Imam Rochani, M.Sc. dan bapak Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc. selaku dosen penguji tugas akhir penulis, yang telah memberikan arahan, nasehat, dan mempermudah penulis selama proses sidang P1, P2, dan P3.
7. Bapak Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T. selaku kepala Departemen Teknik Kelautan, FTK-ITS.
8. PT PAL Indonesia (Persero), khususnya seluruh anggota Bengkel Pipa Divisi Kapal Niaga yang telah memberi material, tempat, dan kesempatan bagi penulis untuk melaksanakan eksperimen.
9. Teman-teman Pusat Studi Kelautan bimbingan pak Roni (Tedja, Yayak, Tuhu, Burung, Fadel, A-tank, Jeremi, dan Mora) yang banyak membantu penulis dalam kegiatan diskusi, belajar, mengerjakan, dan pertengkaran selama menyelesaikan berbagai konflik pada saat tugas akhir dikerjakan.
10. Serta semua pihak dan diri saya sendiri yang telah membantu dan menyelesaikan Tugas Akhir kali ini dengan semangat dan pantang menyerah.

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
ABSTRAK .....	iv
ABSTRACT .....	v
KATA PENGANTAR .....	vi
UCAPAN TERIMAKASIH.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	x
DAFTAR TABEL.....	xii
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Manfaat.....	2
1.5 Batasan Masalah.....	2
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	5
2.1 Tinjauan Pustaka .....	5
2.2 Dasar Teori .....	6
2.2.1 Distorsi Dalam Pengelasan .....	6
2.2.1.1 Jenis-jenis Distorsi .....	6
2.2.2 Teknik Perbaikan Distorsi.....	7
2.2.3 Penggunaan Teknik Mekanik dan Teknik Termal .....	13
2.2.4 Pembentukan Panas.....	14
2.2.5 Baja Karbon .....	16
2.2.6 Baja ASTM A36 .....	17
2.2.7 Metode Elemen Hingga.....	18
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	25
3.1 Skema Diagram Alir.....	25
3.2 Penjelasan Diagram Alir .....	26
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN .....	39
4.1 Eksperimen.....	39
4.1.1 Eksperimen Pengelasan.....	39



4.1.2	Eksperimen <i>Line Heating</i> .....	40
4.1.3	Analisis Perubahan Distorsi Eksperimen.....	42
4.2	Pemodelan Numerik.....	45
4.2.1	Perhitungan <i>Heat Flux</i> .....	45
4.2.3	Analisis <i>Transient Thermal</i> .....	48
4.2.4	Analisis <i>Transient Structural</i> .....	48
4.2.5	Hasil Distorsi Pemodelan Numerik Pengelasan.....	48
4.2.5	Hasil Distorsi Pemodelan Numerik <i>Line Heating</i> .....	49
4.3	Validasi Hasil Eksperimen dengan Numerik.....	53
4.3.1	Analisa Hasil Validasi.....	53
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		54
5.1	Kesimpulan.....	54
5.2	Saran.....	54
DAFTAR PUSTAKA.....		56
LAMPIRAN.....		58

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Distorsi Arah Melintang .....	6
Gambar 2.2 Distorsi Arah Memanjang .....	7
Gambar 2.3 Distorsi <i>Angular</i> .....	7
Gambar 2.4 Proses Penekanan Untuk Perbaikan <i>Bowing</i> .....	8
Gambar 2.5 Proses Pembentukan Dengan Mesin <i>Bending</i> .....	9
Gambar 2.6 Pemanasan Lokal Untuk Perbaikan Distorsi .....	9
Gambar 2.7 <i>Spot Heating</i> Untuk Perbaikan <i>Buckling</i> .....	10
Gambar 2.8 <i>Line Heating</i> Untuk Perbaikan Distorsi <i>Angular</i> Pada <i>Fillet Weld</i> ..	10
Gambar 2.9 Penggunaan <i>Wedge-Shaped Heating</i> Untuk Pelurusan Pelat.....	12
Gambar 2.10 <i>Wedge-Shaped Heating</i> Untuk Perbaikan Baja Standard Rolled....	12
Gambar 2.11 Tepi Pelat <i>Buckled</i> .....	13
Gambar 2.12 Fabrikasi Kotak. ....	13
Gambar 2.13 Proses <i>Meshing</i> Pada Sambungan T.....	19
Gambar 2.14 Geometri Elemen SOLID70.....	20
Gambar 2.15 Geometri elemen SOLID 90 .....	20
Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir.....	25
Gambar 3.2 Material Uji Tipe Sambungan T Joint.....	27
Gambar 3.3 Spesimen yang telah dilakukan proses pengelasan. ....	28
Gambar 3.4 <i>Dial indicator</i> dan meja perata.....	28
Gambar 3.5 Titik pengukuran distorsi. ....	29
Gambar 3.6 Spesimen dengan titik pengukuran. ....	29
Gambar 3.7 Proses pengukuran spesimen dengan <i>dial indicator</i> .....	30
Gambar 3.8 Daerah <i>line heating</i> pada pelat terdistorsi.....	30
Gambar 3.9 <i>Heating torch</i> .....	31
Gambar 3.10 Tabung LPG. ....	31
Gambar 3.11 <i>Stopwatch</i> . ....	32
Gambar 3.12 <i>Thermometer infrared</i> . ....	32
Gambar 3.13 Wadah air untuk pendinginan. ....	33
Gambar 3.14 <i>Line Heating</i> pada Spesimen 1.....	34

Gambar 3.15 <i>Line Heating</i> pada Spesimen 2.....	34
Gambar 3.16 <i>Line Heating</i> pada Spesimen 3.....	34
Gambar 3.17 Pengukuran suhu menggunakan <i>thermometer infrared</i> . ....	35
Gambar 3.18 Pemodelan geometri <i>T-joint</i> menggunakan SolidWorks. ....	36
Gambar 3.19 <i>Input</i> geometri ke ANSYS. ....	36
Gambar 4.1 Grafik penurunan distorsi eksperimen Spesimen 1.....	42
Gambar 4.2 Grafik penurunan distorsi eksperimen Spesimen 2.....	43
Gambar 4.3 Grafik penurunan distorsi eksperimen Spesimen 3.....	44
Gambar 4.4 Ilustrasi perhitungan persentase efektivitas.....	44
Gambar 4.5 Seleksi <i>boundary condition</i> .....	47
Gambar 4.6 Grafik penurunan distorsi pemodelan Spesimen 1.....	50
Gambar 4.7 Grafik penurunan distorsi pemodelan Spesimen 2.....	51
Gambar 4.8 Grafik penurunan distorsi pemodelan Spesimen 3.....	52

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi kimia Baja ASTM A36.....	18
Tabel 2.2 Properti mekanik Baja ASTM A36.....	18
Tabel 3.1 <i>Maximum heating temperature on surface for line heating</i> .....	33
Tabel 3.2 Parameter Proses <i>Line Heating</i> Pada Spesimen Uji.....	33
Tabel 4.1 Distorsi hasil pengelasan pada Spesimen 1.....	40
Tabel 4.2 Distorsi hasil pengelasan pada Spesimen 2.....	40
Tabel 4.3 Distorsi hasil pengelasan pada Spesimen 3.....	40
Tabel 4.4 Data pemanasan <i>line heating</i> . ....	41
Tabel 4.5 Distorsi hasil <i>line heating</i> pada eksperimen Spesimen 1.....	41
Tabel 4.6 Distorsi hasil <i>line heating</i> pada eksperimen Spesimen 2.....	41
Tabel 4.7 Distorsi hasil <i>line heating</i> pada eksperimen Spesimen 3.....	41
Tabel 4.8 Hasil penurunan distorsi eksperimen Spesimen 1.....	42
Tabel 4.9 Hasil penurunan distorsi eksperimen Spesimen 2.....	43
Tabel 4.10 Hasil penurunan distorsi eksperimen Spesimen 3.....	43
Tabel 4.11 Persentase efektivitas eksperimen <i>line heating</i> .....	45
Tabel 4.12 Distorsi pemodelan numerik pengelasan. ....	48
Tabel 4.13 Distorsi <i>line heating</i> pemodelan Spesimen 1.....	49
Tabel 4.14 Distorsi <i>line heating</i> pemodelan Spesimen 2.....	49
Tabel 4.15 Distorsi <i>line heating</i> pemodelan Spesimen 3.....	49
Tabel 4.16 Penurunan distorsi pemodelan Spesimen 1.....	50
Tabel 4.17 Penurunan distorsi pemodelan Spesimen 2.....	51
Tabel 4.18 Penurunan distorsi Spesimen 3. ....	51
Tabel 4.19 Persentase efektivitas pemodelan <i>line heating</i> .....	52
Tabel 4.20 Validasi hasil penurunan distorsi eksperimen dengan numerik.....	53

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar belakang

Teknologi pengelasan merupakan sektor penting dalam tiap pembangunan berbasis *engineering*. Pengelasan juga banyak digunakan pada industri maritim, seperti pembangunan struktur lepas pantai, penyambungan pipa dan pembangunan kapal. Pengelasan merupakan metode penyambungan antara material logam atau non logam dengan menggunakan energi panas dan tekanan. Penggunaan teknologi las ini sangat luas karena mudah diterapkan, biaya yang murah, dan efisien. Pada proses pengelasan sering kali terjadi cacat las yang berakibat fatal pada proses pembangunan. Cacat las memang dapat dicegah akan tetapi, apabila terjadi kesalahan dalam prosesnya maka cacat las masih dapat terjadi. Cacat las yang terjadi dapat berupa porositas, *crack*, perubahan bentuk atau distorsi, dan lain-lain. Cacat las yang telah terjadi ini tetap dapat dibenahi dengan metode yang bermacam-macam sesuai dengan jenis cacat las yang muncul.

Perubahan bentuk distorsi pada pelat sering kali terjadi pada pembangunan kapal. Distorsi merupakan perubahan bentuk yang terjadi akibat *heat input* yang terlalu besar yang mengakibatkan benda kerja mengalami perubahan bentuk. Terdapat dua cara efektif untuk memperbaiki distorsi, yaitu dengan teknik mekanik dan teknik termal. Teknik termal sendiri terbagi menjadi tiga, yaitu *spot heating*, *line heating*, dan *wedge-shaped heating*. Untuk memperbaiki distorsi *angular*, teknik yang paling efektif adalah menggunakan metode *line heating*.

Pada penelitian ini, dilakukan pengujian dan pemodelan menggunakan *software* untuk menganalisa pengaruh variasi jumlah alur *line heating* dengan suhu efektif untuk memperbaiki distorsi *angular* pada material uji. Sehingga akan didapat pengaruh variasi jumlah alur *line heating* terhadap hasil perbaikan material yang telah terdistorsi tersebut.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pemodelan numerik dan eksperimen distorsi pengelasan pada *T-joint*?
2. Bagaimana pengaruh variasi jumlah alur *line heating* terhadap perbaikan distorsi *angular* pada *T-joint* menggunakan pemodelan numerik dan eksperimen?

## 1.3 Tujuan

Tujuan dari penulisan tugas akhir yang ingin dicapai adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pemodelan numerik dan eksperimen distorsi pengelasan pada *T-joint*.
2. Menentukan jumlah alur *line heating* yang efektif untuk perbaikan distorsi *angular* pada *T-joint* menggunakan pemodelan numerik dan eksperimen.

## 1.4 Manfaat

Manfaat yang diharapkan dari penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Hasil analisis numerik dan eksperimen pengaruh variasi jumlah alur *line heating* untuk perbaikan distorsi *angular* pada *T-joint* diharapkan dapat dijadikan acuan untuk pekerjaan fabrikasi dalam memperbaiki distorsi *angular*.
2. Memberikan informasi kepada pembaca mengenai jumlah alur *line heating* yang efektif untuk perbaikan distorsi *angular* pada *T-joint*.

## 1.5 Batasan Masalah

Ada beberapa batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini, diantaranya adalah sebagai berikut :

1. Material yang digunakan adalah baja ASTM A36.
2. Metode pengelasan menggunakan metode SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*). Pembentukan deformasi dihasilkan melalui proses pengelasan.

3. Pengukuran distorsi dilakukan secara visual menggunakan alat *dial indicator* dan meja perata.
4. Metode perbaikan distorsi yang digunakan yaitu *line heating* dengan pendinginan menggunakan air.
5. Parameter yang diubah adalah jumlah alur dari area pemanasan tiap spesimen uji pada saat proses *line heating* dilakukan.
6. Pemodelan geometri menggunakan *software* SolidWorks 2013 dan analisis numerik menggunakan *software* ANSYS 16.0 Mechanical.
7. Jenis material yang digunakan pada pemodelan numerik *linear-elastic*.

## **1.6 Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan yang dibuat sebagai berikut:

### **BAB 1. PENDAHULUAN**

Bab ini berisi konsep dasar penyusunan tugas akhir yang meliputi latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah tujuan penelitian, manfaat penelitian, metodologi penelitian, sistematika penulisan.

### **BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

Bab ini berisi mengenai landasan-landasan teori yang digunakan untuk menyelesaikan tugas akhir ini. Dasar teori yang digunakan dalam bab ini digunakan untuk lebih memahami konsep dasar tentang distorsi angular, teknik memperbaiki distorsi dengan teknik mekanik dan teknik termal.

### **BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN**

Bab ini berisi uraian mengenai tahap-tahap yang akan dilakukan dalam pengerjaan tugas akhir, meliputi : Study literature, pengumpulan data, pengujian, pembuatan specimen uji, pemodelan numerik, analisis hasil pengujian dan pemodelan, kemudian kesimpulan.

### **BAB 4. ANALISIS DATA**

Bab ini berisi hasil data-data pengujian dan data-data analisa dari hasil pengujian dan pemodelan yang telah dilakukan. Data dari hasil analisis tersebut digunakan untuk mengetahui pengaruh variasi jumlah alur

pemanasan pada metode *line heating* dengan data-data hasil pengujian dan pemodelan sehingga didapatkan suatu kesimpulan.

## **BAB 5. PENUTUP**

Berisikan kesimpulan dari hasil analisa dan saran-saran untuk pengembangan lebih lanjut yang berkaitan dengan materi yang terdapat dalam tugas akhir ini.

## **DAFTAR PUSTAKA**

## **LAMPIRAN**



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

*Line heating* merupakan salah satu teknik termal untuk perbaikan distorsi. *Line heating* digunakan untuk memperbaiki distorsi atau untuk pembentukan baja secara akurat untuk fabrikasi seperti jembatan, bangunan dan pembangunan kapal. Pembangun kapal telah menggunakan *line heating* selama beberapa dekade, proses ini sangat penting dalam membentuk lengkungan kompleks untuk bagian lambung kapal. Meskipun proses ini banyak digunakan metode ini tidak mudah untuk dilakukan. Masalah utama pada metode ini adalah seberapa besar area yang dipanaskan, besar suhu, dan laju pemanasan yang sesuai untuk mencapai bentuk yang diinginkan.

Pada penelitian sebelumnya, (Sahri, 2015) telah melakukan penelitian mengenai pengaruh *line heating* terhadap sifat mekanik dan struktur mikro dari baja ASTM A36 dengan variasi pendinginan. Penelitian tersebut membandingkan dua jenis variasi pendinginan udara dan air. Penelitian ini bertujuan untuk meneliti pengaruh variasi pendinginan pada *line heating* terhadap struktur mekanik dan struktur mikro material yang diuji. Hasil pengujian menunjukkan bahwa perlakuan *line heating* dengan media pendinginan air memberikan hasil yang lebih baik secara keseluruhan. Dimulai dari nilai tegangan maksimum mengalami kenaikan sebesar 2.16% kemudian peningkatan *energy absorb* sebesar 18.30% dan penurunan kekerasan sebesar 3.16%. Sedangkan variasi pendinginan udara mengalami penurunan sebesar 7.83% kemudian peningkatan *energy absorb* sebesar 15.47% dan penurunan kekerasan sebesar 9.22% dari material tanpa perlakuan panas, untuk ukuran butir perlakuan panas dengan pendinginan air memiliki ukuran butir yang lebih besar diantara variasi lainnya.

## 2.2 Dasar Teori

### 2.2.1 Distorsi Dalam Pengelasan

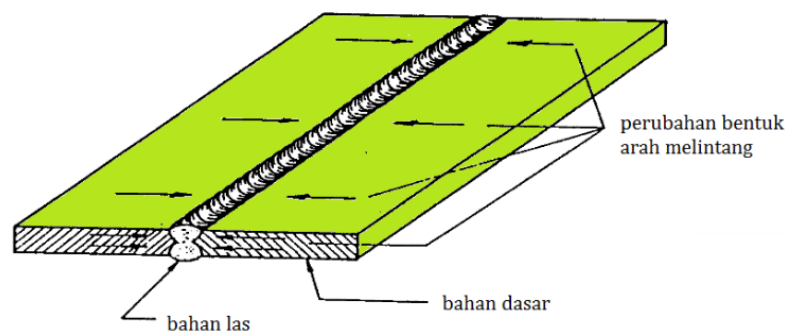
Distorsi merupakan cacat las yang terjadi akibat *heat input* yang terlalu besar yang mengakibatkan benda kerja mengalami perubahan bentuk. Perubahan bentuk ini terjadi karena adanya pencairan, pembekuan, pengembangan termal, perpendekan, dan penyusutan pada konstruksi las. Faktor yang memengaruhi distorsi las dapat dibagi menjadi dua bagian. Bagian pertama berhubungan dengan masukan panas atau *heat input* pada proses pengelasan, bagian kedua disebabkan oleh adanya penahan atau penghalang pada sambungan las. Faktor yang termasuk dalam bagian pertama adalah masukan panas pengelasan (yang ditentukan oleh tegangan listrik, aliran listrik, kecepatan, dan ukuran serta jenis elektroda), cara pengelasan, suhu pemanasan mula, tebal pelat, geometri sambungan, dan jumlah lapisan dari lasan. Sedangkan yang tercakup dalam bagian kedua adalah bentuk, ukuran serta susunan dari batang-batang penahan dan urutan pengelasan (Wiryosumarto & Okumura, 1996).

#### 2.2.1.1 Jenis-jenis Distorsi

Jenis-jenis distorsi pada pengelasan secara garis besar dibagi menjadi tiga, yaitu sebagai berikut:

##### 1. Distorsi Arah Melintang (Transversal)

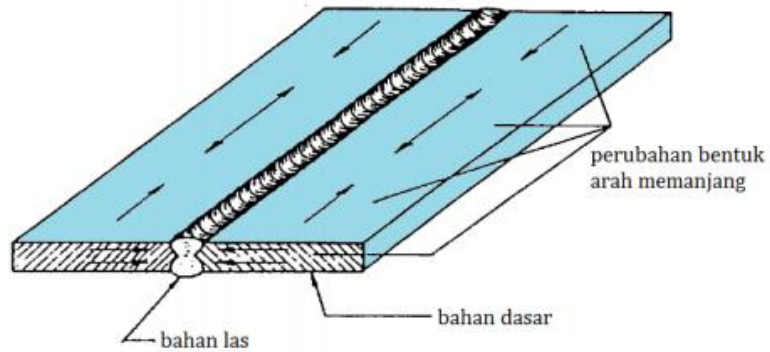
Distorsi arah melintang terjadi apabila mengelas salah satu ujung, dan sisi ujung yang lain akan bertambah panjang akibat pemuaian. Kemudian saat pendinginan, sisi kanan dan kiri logam akan saling menarik satu sama lain seperti pada Gambar 2.1 dibawah.



**Gambar 2.1** Distorsi Arah Melintang (Edzona, 2014)

## 2. Distorsi Arah Memanjang (Longitudinal)

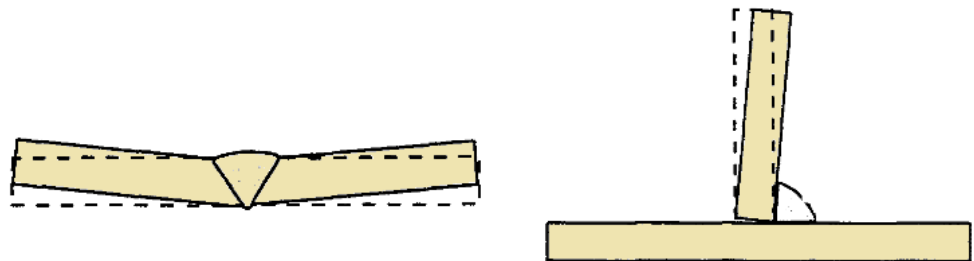
Distorsi arah memanjang terjadi apabila hasil las berkontraksi dan kemudian memendek sepanjang garis pengelasan setelah pendinginan seperti pada Gambar 2.2 dibawah.



**Gambar 2.2** Distorsi Arah Memanjang (Edzona, 2014)

## 3. Distorsi Menyudut (*Angular*)

Distorsi menyudut terjadi jika sudut dari benda yang dilas berubah akibat kontraksi lebih besar pada permukaan pengelasan karena jumlah hasil pengelasan yang lebih banyak seperti pada Gambar 2.3 dibawah.



**Gambar 2.3** Distorsi *Angular* (Edzona, 2014)

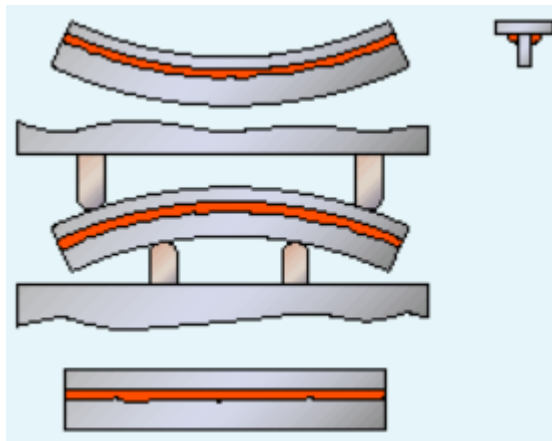
### 2.2.2 Teknik Perbaikan Distorsi

Segala jenis usaha harus dilakukan untuk mencegah distorsi pada tahap desain dengan menggunakan prosedur fabrikasi yang sesuai. Karena distorsi tidak selalu bisa dihindari selama fabrikasi, beberapa teknik perbaikan yang benar dapat digunakan. Proses pembentukan maupun perbaikan akibat distorsi pelat dapat dilaksanakan dengan berbagai cara sesuai dengan bentuk pelat yang ingin diperbaiki maupun dilakukan pembengkokan. Untuk memperbaiki distorsi akibat

setelah pengelasan dapat menggunakan teknik mekanik dan teknik termal. Teknik mekanik dapat dikerjakan melalui proses bending dengan mesin, sedangkan teknik termal dapat dikerjakan melalui proses *fairing* seperti *spot heating*, *line heating*, dan *wedge-shaped heating*.

### 2.2.2.1 Perbaikan Distorsi Teknik Mekanik

Prinsip dari teknik mekanik adalah menempa dan penekanan pelat. Penempaan dapat menyebabkan material pelat mengalami kerusakan pada permukaannya dan mempengaruhi kekerasan pada material tersebut. Pada kasus *bowing* atau distorsi *angular*, komponen material dapat diperbaiki dan diluruskan kembali dengan ditekan tanpa mengalami dampak negatif dari penempaan. Prinsip dari proses penekanan, material diletakkan diantara komponen dan pelat dari alat proses penekan. Sangat penting untuk memaksakan deformasi yang cukup dan memberikan *over-correction* sehingga penarikan elastisitas normal akan mengembalikan bentuk awal dari komponen material tersebut.



**Gambar 2.4** Proses Penekanan Untuk Perbaikan *Bowing* (Lucas dkk, 2014)

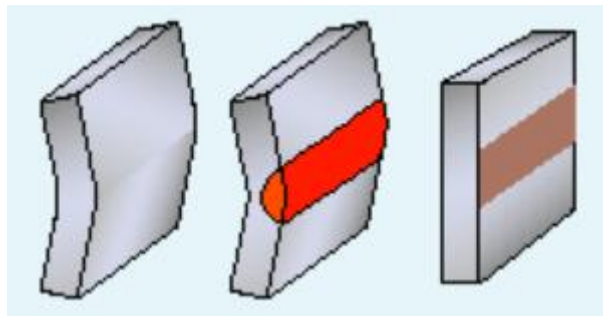
Proses penekanan untuk perbaikan bowing pada pelat melengkung dapat dilihat pada Gambar 2.4. Pada komponen material yang panjang, distorsi diperbaiki secara bertahap dengan rangkaian proses penekanan tambahan, tiap tahap dilakukan dengan panjang tertentu. Pada kasus pelat melengkung, penekanan harus terarah untuk mencegah kerusakan pada titik pembebanan. Penekanan berlebih pada titik pembebanan hanya akan menghasilkan komponen yang kelurusannya tidak seimbang, untuk mencapai komponen yang lurus atau menghasilkan lengkungan yang bagus lebih baik menggunakan mesin *bending* seperti pada Gambar 2.5.



**Gambar 2.5** Proses Pembentukan Dengan Mesin *Bending* (Sahri, 2015)

#### 2.2.2.2 Perbaikan Distorsi Teknik Termal

Prinsip dasar pada teknik termal adalah menciptakan tekanan panas yang cukup tinggi sehingga pada saat pendinginan, komponen ditarik kembali pada bentuk semula.

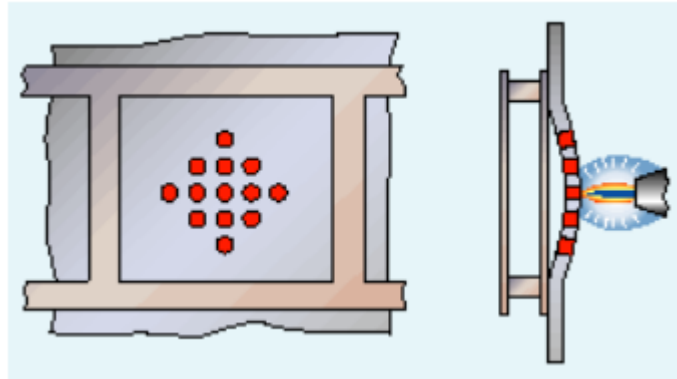


**Gambar 2.6** Pemanasan Lokal Untuk Perbaikan Distorsi (Lucas dkk, 2014)

Hal ini akan dicapai dengan memanaskan material pada suhu dimana deformasi plastis akan terjadi apabila material panas, dengan memperluas *yield strength* material yang rendah berlawanan dengan daerah yang dingin dengan *yield strength* yang tinggi. Pada saat pendinginan menuju suhu ruangan, daerah yang dipanaskan akan mengalami penyusutan ke ukuran yang lebih kecil dibandingkan pada saat sebelum dipanaskan. Tegangan yang dihasilkan dengan demikian akan menarik komponen kembali ke bentuk yang diinginkan, lihat Gambar 2.6. Oleh karena itu, pemanasan lokal merupakan cara yang relatif sederhana namun efektif untuk memperbaiki distorsi pada pengelasan. Tingkat penyusutan ditentukan oleh ukuran, jumlah, lokasi, dan suhu zona yang dipanaskan, sedangkan ketebalan dan ukuran pelat menentukan area zona panas. Jumlah dan penempatan zona pemanasan sebagian besar merupakan masalah pengalaman untuk pekerjaan baru, tes akan

sering diperlukan untuk mengukur tingkat penyusutan. Semua teknik pemanasan *spot*, *line*, atau *wedge-shaped* dapat digunakan untuk koreksi distorsi termal.

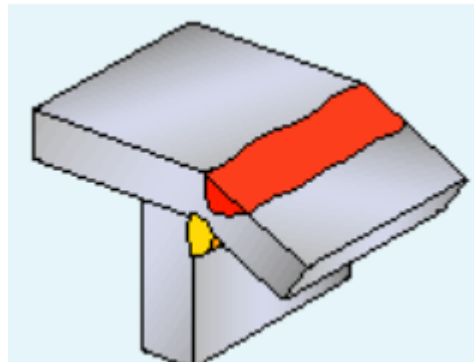
### 1. *Spot Heating*



**Gambar 2.7** *Spot Heating* Untuk Perbaikan *Buckling* (Lucas dkk, 2014)

*Spot heating* pada Gambar 2.7 digunakan untuk menghilangkan *buckling* pada pelat lembaran yang relatif tipis telah dilas pada rangka yang kaku. Distorsi diperbaiki dengan *spot heating* pada sisi cembung. Jika *buckling* teratur, titik pada *spot heating* dapat diatur secara simetris, mulai dari tengah pada daerah yang mengalami *buckling* sampai dengan batas akhir daerah *buckling*.

### 2. *Line Heating*



**Gambar 2.8** *Line Heating* untuk perbaikan Distorsi *Angular* pada *Fillet Weld* (Lucas dkk, 2014)

Pemanasan dalam garis lurus sering digunakan untuk memperbaiki distorsi sudut, misalnya, pada Gambar 2.8. Komponen material dipanaskan di sepanjang garis sambungan yang dilas, akan tetapi pada sisi yang berlawanan dengan las sehingga tegangan yang dipaksa akan menarik kearah semula. *Line heating* adalah

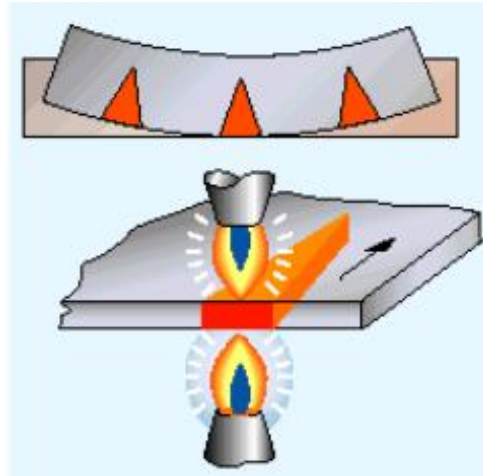
proses pengerjaan panas, panas yang dilakukan sesuai dengan garis yang telah dibuat untuk menentukan lajur pemanasan tersebut (Sahri, 2015). Panas yang dilakukan pada permukaan pelat akan didinginkan dengan air secara cepat ataupun dengan udara sehingga terjadi perubahan pada pelat tersebut dan terjadilah deformasi atau perbaikan pada pelat yang telah terjadi deformasi. Berikut langkah-langkah untuk melakukan proses *line heating*.

Langkah – langkah proses *line heating* adalah sebagai berikut:

1. Mempersiapkan spesimen yang akan dilakukan proses *line heating*.
2. Pemberian tanda pada spesimen berupa panjang *line heating* yang akan dilakukan pada spesimen.
3. Proses *line heating* dimulai dengan menyesuaikan *marking* yang telah dibuat dengan variasi laju pemanasan.
4. Kemudian dilakukan proses pemanasan pada garis *marking* yang telah dibuat dengan suhu  $\pm 500^{\circ}\text{C}$  sampai dengan  $\pm 650^{\circ}\text{C}$ .
5. Selanjutnya dilakukan proses pendinginan dengan menggunakan metode *watercooling* dan *aircooling* dengan suhu normal dan suhu dingin.

### **3. *Wedge-Shaped Heating***

Untuk memperbaiki distorsi pada fabrikasi yang lebih kompleks, diperlukan pemanasan di seluruh area sebagai tambahan selain menggunakan *line heating*. Pola ini bertujuan untuk menyusutkan suatu bagian material fabrikasi dan menarik material kembali ke bentuk semula. Terlepas dari *spot heating* panel tipis, *wedge-shaped heating* harus digunakan, lihat Gambar 2.9 dari dasar hingga puncak material kemudian profil suhu, harus teratur berdasarkan ketebalan material pelat. Untuk material yang lebih tebal, dibutuhkan dua api pembakaran, masing-masing satu pada tiap sisi pelat.



**Gambar 2.9** Penggunaan *Wedge-Shaped Heating* untuk pelurusan pelat (Lucas dkk, 2014).

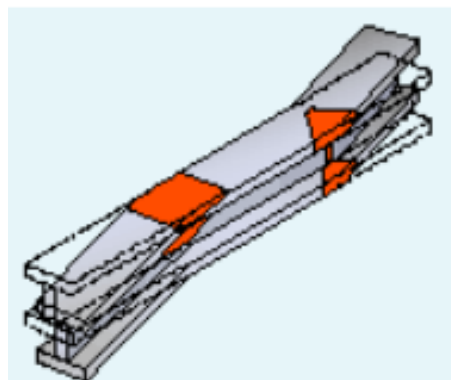
Sebagai panduan umum, untuk meluruskan pelat melengkung menggunakan *wedge-shaped heating* adalah:

1. Panjang *wedge* – dua pertiga dari lebar pelat.
2. Lebar *wedge* (alas) – satu perenam dari panjang pelat (alas k puncak)

Tingkat pelurusan yang dihasilkan pada umumnya 5 milimeter dari pelat dengan panjang 3 meter.

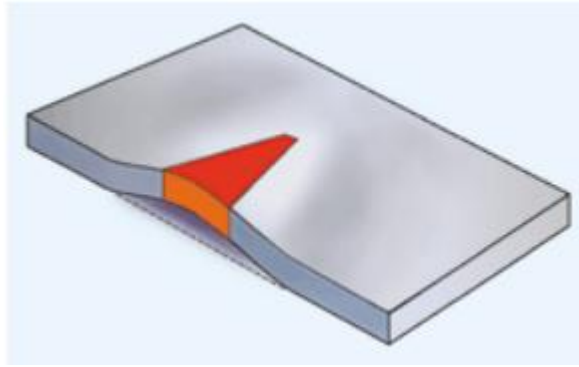
*Wedge-shaped heating* dapat digunakan untuk memperbaiki distorsi dalam berbagai situasi, seperti:

1. Bagian material yang hendak digulung yang harus diperbaiki pada dua sisi, lihat Gambar 2.10
2. *Buckle* pada tepi pelat sebagai alternatif untuk menggulung, lihat Gambar 2.11
3. Fabrikasi pelat kotak yang terdistorsi, lihat Gambar 2.12

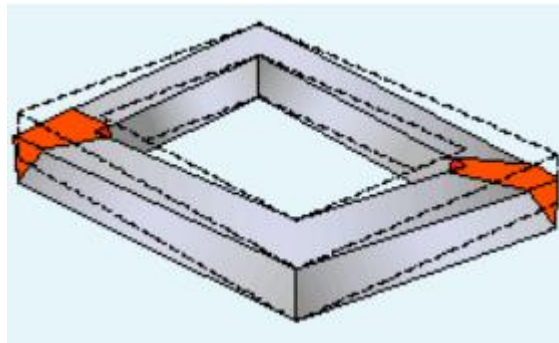


**Gambar 2.10** *Wedge-Shaped Heating* untuk perbaikan baja *Standard Rolled* (Lucas dkk, 2014).





**Gambar 2.11** Tepi Pelat *Buckled* (Lucas dkk, 2014).



**Gambar 2.12** Fabrikasi Kotak (Lucas dkk, 2014).

### 2.2.3 Penggunaan Teknik Mekanik dan Teknik Termal

Dalam penggunaan teknik pelurusan atau pembentukan material, teknik mekanik dan teknik termal memiliki batasannya masing-masing. Tiap teknik pun juga memiliki dampak negatif yang akan muncul apabila dilakukan pada prosesnya. Untuk meminimalkan dampak negatif dari proses yang dikerjakan tersebut, maka harus dilakukan praktek pekerjaan yang benar dan sesuai.

Praktik terbaik untuk pelurusan teknik mekanik yang berikut harus diperhatikan untuk menghilangkan distorsi:

1. Gunakan *packing pieces* yang akan menghasilkan *over-correct* dan memperbaiki distorsi sehingga elastisitas material akan mengembalikan material ke bentuk yang benar.
2. Periksa apakah komponen material diberikan penahan secara memadai selama ditekan untuk mencegah *buckling*.
3. Gunakan alat pembentuk (*former*) atau penggulung (*roller*) untuk menghasilkan komponen lurus atau menghasilkan lengkungan.

4. Karena *packing pieces* yang tidak aman dan dapat terbang keluar dari alat penekan, prosedur yang aman berikut harus diperhatikan:
  - Bautkan *packing pieces* pada pelat material.
  - Letakkan pelat logam dengan ketebalan yang memadai untuk mencegah 'missile'.
  - Kosongkan area bahaya pada saat pekerjaan sedang dilakukan.

Bahaya menggunakan teknik termal adalah risiko penyusutan area yang terlalu besar atau menyebabkan perubahan metalurgi dengan suhu pemanasan yang terlalu tinggi. Sebagai aturan umum, ketika memperbaiki distorsi pada baja, suhu area harus dibatasi sekitar 60 ° hingga 650 ° C.

Jika pemanasan terganggu, atau panas hilang, operator harus membiarkan logam menjadi dingin dan kemudian dilanjutkan kembali. Praktik terbaik untuk perbaikan distorsi menggunakan teknik termal yang harus diperhatikan:

1. Gunakan *spot heating* untuk memperbaiki *buckling* pada pelat tipis.
2. Selain menggunakan *spot heating* untuk pelat tipis, gunakan *wedge-shaped heating* untuk pelat yang lebih tebal.
3. Gunakan *line heating* untuk memperbaiki distorsi *angular*.
4. Batasi area pemanasan untuk menghindari penyusutan berlebih, batasi suhu dari 60<sup>0</sup>C hingga 650<sup>0</sup>C pada baja untuk mencegah kerusakan metalurgi.
5. Pada *wedge-shaped heating*, proses pemanasan dimulai dari dasar hingga puncak *wedge*, penetrasi secara merata dari ketebalan pelat dan pertahankan suhu konstan.

#### **2.2.4 Pembentukan Panas**

Tujuan utama dari pembentukan panas adalah untuk membentuk dan meluruskan kembali logam sesuai dengan apa yang diinginkan. Proses dari pembentukan panas sendiri terdiri dari pemanasan logam kerja, kemudian diikuti dengan proses pendinginan, rangkaian dari proses ini memiliki ciri khusus bahwa semua proses pemanasan dilakukan tanpa pernah mencapai suhu lebur dari material yang dipanaskan (Hardiansyah & Supomo, 2012). Tahapan dalam perlakuan panas harus memenuhi tiga hal berikut (Todd, 1994):

1. Pemanasan yaitu memanaskan logam secara perlahan-lahan untuk menjamin bahwa suhu merata diseluruh ruangan dan logam uji.
2. Penahanan yaitu menahan suhu yang diinginkan beberapa saat.
3. Pendinginan yaitu mendinginkan logam uji pada suhu kamar.

Kecepatan pemanasan tergantung pada beberapa hal, yang terpenting adalah konduktivitas panas dari logam yang diuji (Todd, 1994). Logam dengan konduktivitas tinggi dapat dipanaskan lebih cepat daripada logam dengan konduktivitas rendah. Kondisi dari logam uji juga menentukan kecepatan pemanasan, logam pada peralatan yang diperkeras akan lebih lambat dari pada logam yang tidak bertegangan. Specimen dengan ukuran dan luas penampang lebih besar akan membutuhkan waktu pemanasan lebih lama.

Tahap penahanan saat suhu tercapai kemudian dilakukan hingga perubahan struktur logam terjadi dan hampir konstan. Periode penahanan tergantung pada analisa kimia dan massa jenis logam uji (Todd, 1994). Waktu penahanan dilakukan pada suhu tertentu disebut periode penahanan (*soaking period*). Periode penahanan bertujuan untuk menjamin semua bagian specimen mencapai suhu yang sama yang dapat menjegah terjadinya cacat akibat pengerjaan.

Setelah periode penahanan maka spesimen harus dikembalikan ke suhu kamar untuk menyelesaikan proses perlakuan panas. Periode pendinginan tergantung pada jenis logam dan hasil komposisi akhir yang diinginkan (Totten, 1991). Metode dari tahap pendinginan ini tergantung pada jenis perlakuan panas yang kita terapkan. Untuk proses pendinginan dapat didinginkan dengan medium pendingin dari gas, padat, cairan ataupun kombinasi dari ketiganya. Perbedaan penggunaan medium pendinginan dapat membuat komposisi hasil proses pemanasan yang berbeda pula.

*Quenching* adalah prosedur yang digunakan untuk mendinginkan logam yang menerima perlakuan panas (Totten, 1991). Pendinginan pada *quenching* dilakukan dengan cepat menggunakan oli, air, *brine*, atau medium pendinginan lain. Logam yang dikeraskan dengan pendinginan udara, mempunyai periode pendinginan yang lambat. *Quenching* biasanya selalu berhubungan dengan pengerasan, biarpun demikian, *quenching* tidak selalu menghasilkan peningkatan

kekerasan, sebagai contoh untuk proses *annealing* pada tembaga, biasanya digunakan air sebagai media pendinginan (Sahri, 2015).

### **2.2.5 Baja Karbon**

Baja merupakan material logam yang paling banyak digunakan dalam pembangunan berbasis *engineering*. Baja merupakan material campuran dengan komponen utama besi (Fe) dengan tambahan karbon (C) dan sebagian kecil senyawa lainnya, variasi properti baja (kekuatan dan daktilitas) ditentukan oleh komposisi kimiawi dari sejumlah komponen pembentukannya. Pembentukan komposisi dari senyawa karbon ini akan memberikan kontribusi dalam peningkatan nilai kekuatan dan menurunkan sifat daktilitasnya. Baja karbon merupakan salah satu jenis logam paduan besi karbon terpenting dengan prosentase berat karbon hingga 2.11%. Baja karbon memiliki kadar C hingga 1.2% dengan Mn 0.30%-0.95%. Elemen-elemen prosentase maksimum lainnya yang terkandung selain bajanya adalah sebagai berikut: 0.60% Silicon, 0.60% Copper (Sahri, 2015).

Karbon adalah unsur kimia dengan nomor atom 6, tingkat oksidasi 4.2 sedangkan Mangan adalah unsur kimia dengan nomor atom 25, tingkat oksidasi 7.6. Mangan dan Karbon merupakan material pokok yang berfungsi meninggikan tegangan (*strength*) dari baja murni. Pada karbon (C), mempunyai fungsi tersendiri yaitu sebagai komponen kimia pokok yang menentukan sifat baja. Sehingga semakin tinggi kadar karbon di dalam baja, maka semakin tinggi kekuatan tarik. Tetapi, koefisien muai bahannya menjadi turun dan baja semakin getas. Karbon mempunyai pengaruh yang paling signifikan terhadap sifat mampu las. Karena semakin tinggi kadar karbon maka sifat mampu lasnya menjadi semakin rendah (Cardarelli, 1999).

Selama periode pengenalan baja struktural sebagai bahan bangunan utama hingga tahun 1960, baja yang dipakai adalah baja karbon. Baja karbon bukan berarti baja yang tidak mengandung sama sekali sejumlah unsur lain selain besi dan karbon. Baja masih mengandung unsur lain, tetapi masih dalam batas-batas tertentu yang tidak banyak berpengaruh terhadap sifatnya. Namun ada berbagai macam jenis baja karbon sesuai dengan kandungan yang bermacam-macam sesuai dengan kadar karbon yang berada pada material tersebut. Berikut macam-macam jenis baja

karbon sesuai dengan kandungan karbon yang terdapat pada material tersebut (Amanto, 1999):

### **1. *Low Carbon Steel* (Baja Karbon Rendah)**

Baja karbon rendah (*Low Carbon Steel/Mild Steel*) merupakan baja karbon yang mempunyai kadar karbon sampai 0.30%. baja karbon rendah sangat luas penggunaannya, yaitu sebagai baja konstruksi umum untuk baja profil rangka bangunan, baja tulangan beton, rangka kendaraan, mur-baut, pipa, pelat dan lainnya. Strukturnya terdiri dari ferrit dan sedikit perlit sehingga kekuatan baja ini relatif rendah, lunak tetapi keuletannya tinggi, mudah di-*bending* dan di-*machining*. Ada juga yang membagi kelompok ini, diantaranya adalah untuk kadar karbon yang sangat rendah, yaitu kurang dari 0.15% sebagai *dead mild steel*, yang biasanya digunakan untuk besi lembaran, besi ton dan lainnya (Zakharov, 1962).

### **2. *Medium Carbon Steel* (Baja Karbon Sedang)**

Baja karbon menengah (*Medium Carbon Steel*) yang mempunyai kandungan karbon sebesar 0.30%-0.70% masih terdiri dari ferrit dan perlit, tetapi dengan perlit yang cukup banyak. Sehingga baja karbon ini lebih kuat dan keras serta dapat dikeraskan akan tetapi akan membuatnya lebih getas. Baja karbon ini banyak digunakan untuk konstruksi mesin, seperti poros engkol, batang torak, roda gigi, pegas dan lainnya yang lebih memerlukan kekuatan dan ketangguhan yang tinggi (Zakharov, 1962).

### **3. *High Carbon Steel* (Baja Karbon Tinggi)**

Baja karbon tinggi (*High Carbon Steel*) mempunyai kadar karbon lebih dari 0.70% yang bersifat lebih kuat dan lebih keras, tetapi keuletan dan ketangguhannya rendah. Baja jenis ini digunakan untuk konstruksi mesin yang membutuhkan kekuatan dan ketangguhan yang tinggi dan untuk perkakas yang memerlukan sifat tahan aus, misalnya mata bor, *reamer*, pisau dan perkakas lain (Zakharov, 1962).

#### **2.2.6 Baja ASTM A36**

Baja ASTM A36 adalah baja karbon rendah yang memiliki kemampuan yang baik dan cocok untuk proses pengelasan, penggilingan, pembentukan, pengeboran dan permesinan. Pada proses pengelasan Baja ASTM A36 mudah dilas

menggunakan berbagai jenis metode pengelasan, dan hasil lasan dengan sambungannya terbentuk dengan kualitas yang cukup bagus. ASTM A36 biasa diaplikasikan pada konstruksi pengelasan jembatan, bangunan, dan juga *oil rigs*. Komposisi kimia dan properti mekanik Baja ASTM A36 dapat dilihat pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2 dibawah.

**Tabel 2. 1** Komposisi kimia Baja ASTM A36

<b>Element</b>	<b>Content</b>
Carbon, C	0.25 - 0.290 %
Copper, Cu	0.20 %
Iron, Fe	98.0 %
Manganese, Mn	1.03 %
Phosphorous, P	0.040 %
Silicon, Si	0.280 %

**Tabel 2. 2** Properti mekanik Baja ASTM A36

<b>Mechanical Properties</b>	<b>Metric</b>	<b>Imperial</b>
Tensile Strength, Ultimate	400 - 550 MPa	58000 - 79800 psi
Tensile Strength, Yield	250 MPa	36300 psi
Elongation at Break (in 200 mm)	20.0 %	20.0 %
Elongation at Break (in 50 mm)	23.0 %	23.0 %
Modulus of Elasticity	200 GPa	29000 ksi
Bulk Modulus (typical for steel)	140 GPa	20300 ksi
Poissons Ratio	0.260	0.260
Shear Modulus	79.3 GPa	11500 ksi

### 2.2.7 Metode Elemen Hingga

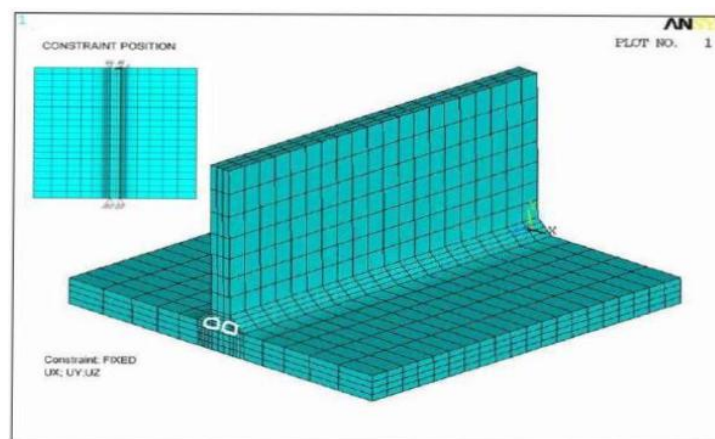
Metode elemen hingga merupakan metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan dalam bidang rekayasa seperti geometri, pembebanan dan sifat-sifat dari material yang sangat rumit. Hal-hal tersebut sangat sulit untuk diselesaikan dengan metode matematis (Logan, 2000). Pendekatan metode elemen hingga adalah menggunakan informasi-informasi pada titik simpul (*node*). Dalam proses penentuan titik simpul yang di sebut dengan pendeskritan (*discretization*), suatu sistem di bagi menjadi bagian-bagian yang lebih kecil, kemudian penyelesaian masalah dilakukan pada bagian-bagian tersebut dan selanjutnya digabung kembali sehingga diperoleh solusi secara menyeluruh (Bantami, 2009).

### 2.2.7.1 Langkah Metode Elemen Hingga

Secara umum tahapan dalam perumusan metode elemen hingga adalah sebagai berikut:

#### 1. Pendiskritan dan pemilihan jenis elemen.

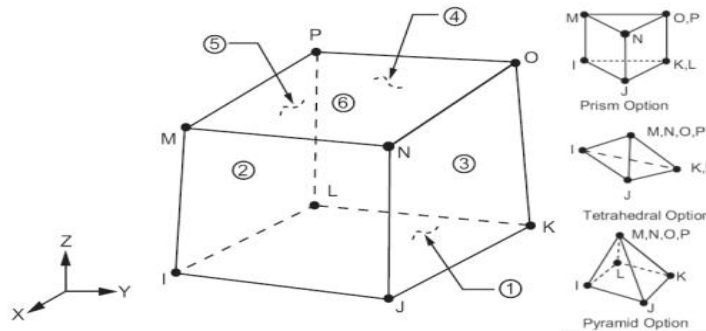
Pemilihan jenis elemen merupakan tahap dimana struktur dibuat menjadi sebuah sistem yang ekuivalen yang terdiri dari elemen-elemen hingga yang saling berhubungan dengan simpul. Pemilihan jenis elemen berguna untuk menentukan keakuratan hasil analisis. Pemilihan jenis elemen harus sesuai dengan permasalahan yang ingin diselesaikan agar hasil analisis mendekati keadaan sebenarnya. Agar hasil analisis mendekati keadaan sebenarnya juga dipengaruhi oleh pendiskritan, dimana dalam pemodelan disebut dengan proses *meshing*. Untuk proses *meshing*, ukuran yang dipilih harus mewakili keadaan struktur sebenarnya. Contoh proses *meshing* pada sebuah model dapat dilihat pada Gambar 2.13 dibawah.



**Gambar 2.13** Proses *Meshing* Pada Sambungan T (Syahroni & Hidayat, 2012).

Jenis elemen yang akan digunakan untuk analisis *thermal* yaitu SOLID 70 dan SOLID 90. Elemen SOLID 70 memiliki delapan *nodes* dengan masing-masing *node* memiliki satu derajat kebebasan dan *temperature* seperti pada Gambar 2.14. Elemen ini memiliki kemampuan menghantarkan panas sehingga dapat digunakan untuk analisis *thermal transient* dan *steady-state*. Elemen SOLID 70 memiliki bentuk elemen prisma, *tetrahedral*, dan juga piramida. Elemen ini dapat didefinisikan dengan delapan *nodes* dan *orthotropic material properties*. Untuk analisis *steady-state*, *specific heat* dan massa jenis dapat diabaikan. Elemen yang

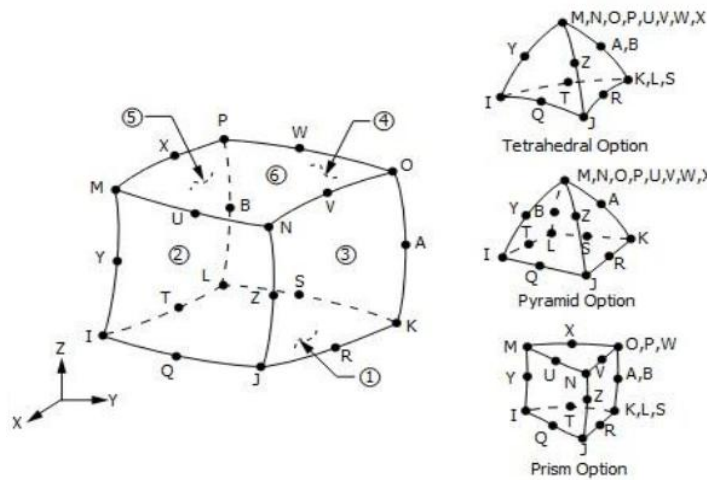
memiliki kemampuan menghantarkan panas ini secara otomatis dapat juga digunakan untuk analisis struktural.



**Gambar 2.14** Geometri Elemen SOLID70

(ANSYS Mechanical APDL Element Reference)

Untuk SOLID 90 memiliki kemampuan yang sama dengan SOLID 70, yang menjadi pembeda adalah jumlah node pada SOLID 90 sebanyak 20 derajat kebebasan seperti pada Gambar 2.15 berikut.



**Gambar 2.15** Geometri elemen SOLID 90

(ANSYS Mechanical APDL Element Reference)

Kemudian untuk jenis elemen yang digunakan dalam analisis struktural adalah SOLID185 dan SOLID186. Elemen SOLID185 mempunyai delapan *nodes* yang masing-masing *node* memiliki tiga derajat kebebasan. Elemen ini bertranslasi ke arah sumbu x dan y dan memiliki kemampuan plastisitas dan elastisitas yang tinggi serta defleksi dan regangan yang besar. Elemen SOLID185 memiliki opsi bentuk prisma, *tetrahedral*, dan piramida. Sedangkan untuk elemen SOLID186 adalah



elemen solid 3D yang memiliki 20 *nodes* untuk mengetahui perilaku *displacement*, mempunyai kemampuan yang sama dengan SOLID185. Perbedaannya terletak pada jumlah *node* yaitu 20 *nodes* dan tiap *node* memiliki 3 derajat kebebasan.

## 2. Pemilihan fungsi *displacement*.

Pada tahap ini menentukan fungsi *displacement* yang didefinisikan pada tiap elemen dengan menggunakan nilai parameter di simpul element tersebut, fungsi yang dipakai berupa *polynomial*, linier kuadrat, kubik atau deret trigonometri.

## 3. Pendefinisian hubungan regangan displasemen dan tegangan regangan.

Hubungan antara tegangan, regangan, dan *displacement* akan digunakan dalam proses penurunan persamaan untuk masing-masing elemen hingga. Kemampuan untuk mendefinisikan kekakuan atau sifat material secara tepat adalah hal yang wajib untuk mendapatkan hasil yang dapat diterima. Hubungan tegangan-regangan nanti akan digunakan dalam proses penurunan persamaan untuk masing-masing elemen (Sutekat, 2018).

$$\sigma = D \varepsilon^{el} \quad (2.1)$$

$$\varepsilon = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{th} \quad (2.2)$$

Dimana :

$\sigma$  : tegangan

$D$  : kekakuan material

$\varepsilon^{el}$  : regangan elastis

$\varepsilon$  : regangan total

$\varepsilon^{th}$  : regangan termal

*Vector thermal strain* untuk isotropik medium dengan suhu yang tergantung pada koefisien ekspansi termal, dengan rumus:

$$\varepsilon^{th} = \Delta T \alpha(T) \quad (2.3)$$

$\Delta T$  adalah perbedaan antara *reference temperature* dengan *actual temperature*.

## 4. Penurunan matriks kekakuan elemen dan persamaan elemen.

Pada tahap ini, untuk menentukan matriks kekakuan dan persamaan elemen dapat menggunakan metode keseimbangan langsung dan metode energi dengan menggunakan prinsip energi potensial minimum.

$$\delta U = \delta P \quad (2.4)$$

Dimana :

$U$  : internal strain energy (internal work)

$P$  : external work, seperti efek inersia

$\delta$  : virtual operator

Virtual strain energy dapat ditulis:

$$\delta = \int [\delta \varepsilon]^T \{\sigma\} d\{V\} \quad (2.5)$$

Dimana :

$\varepsilon$  : vektor regangan

$\sigma$  : vektor tegangan

$V$  : volumen elemen

Substitusi persamaan untuk memperoleh  $\delta U$

$$\delta U = \int (\{\delta \varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon\} - \{\delta \varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon_{th}\}) dV \quad (2.6)$$

Strain yang dikaitkan dengan nodal displacement:

$$\{\varepsilon\} = [B] \{u\} \quad (2.7)$$

Dimana :

$B$  : Matriks ketegangan displacement

Untuk displacement konstan, energi regangan virtual adalah:

$$\delta U = \{\delta \varepsilon\}^T \int [B]^T [D] [B] dV \{u\} - \{\delta u\}^T \int [B]^T [D] \{\varepsilon_{th}\} dV \quad (2.8)$$

External work karena gaya inersia diformulasikan sebagai:

$$\delta P = - \int \{\delta w\}^T \{Fa\} dV \quad (2.9)$$

Dimana :

$w$  : vektor displasmen dari general point

$\{Fa\}$  : vektor acceleration force

## 5. Penggabungan persamaan elemen dengan penentuan kondisi batas.

Persamaan elemen dalam tahap empat digabungkan menggunakan metode kekakuan langsung untuk mendapatkan persamaan global keseluruhan struktur. Matrik kekakuan global ini berupa matrik singular, sehingga untuk menghindari masalah singularitasnya harus ditentukan kondisi batas.

## 6. Menyelesaikan derajat kebebasan yang belum diketahui.

Pada tahap ini untuk mendapatkan besaran yang belum diketahui dapat menggunakan metode eliminasi (misalkan metode *gauss*) dan iterasi (misalkan metode *gauss-siedel*).

## 7. Menentukan regangan dan tegangan elemen.

Pada tahap ini besaran yang didapat pada tahap enam digunakan untuk menentukan regangan dan tegangan di elemen.

### **8. Interpretasi hasil.**

Pada tahap ini hasil yang diperoleh dapat ditampilkan dalam bentuk grafis sehingga akan mempermudah pembacaan hasil

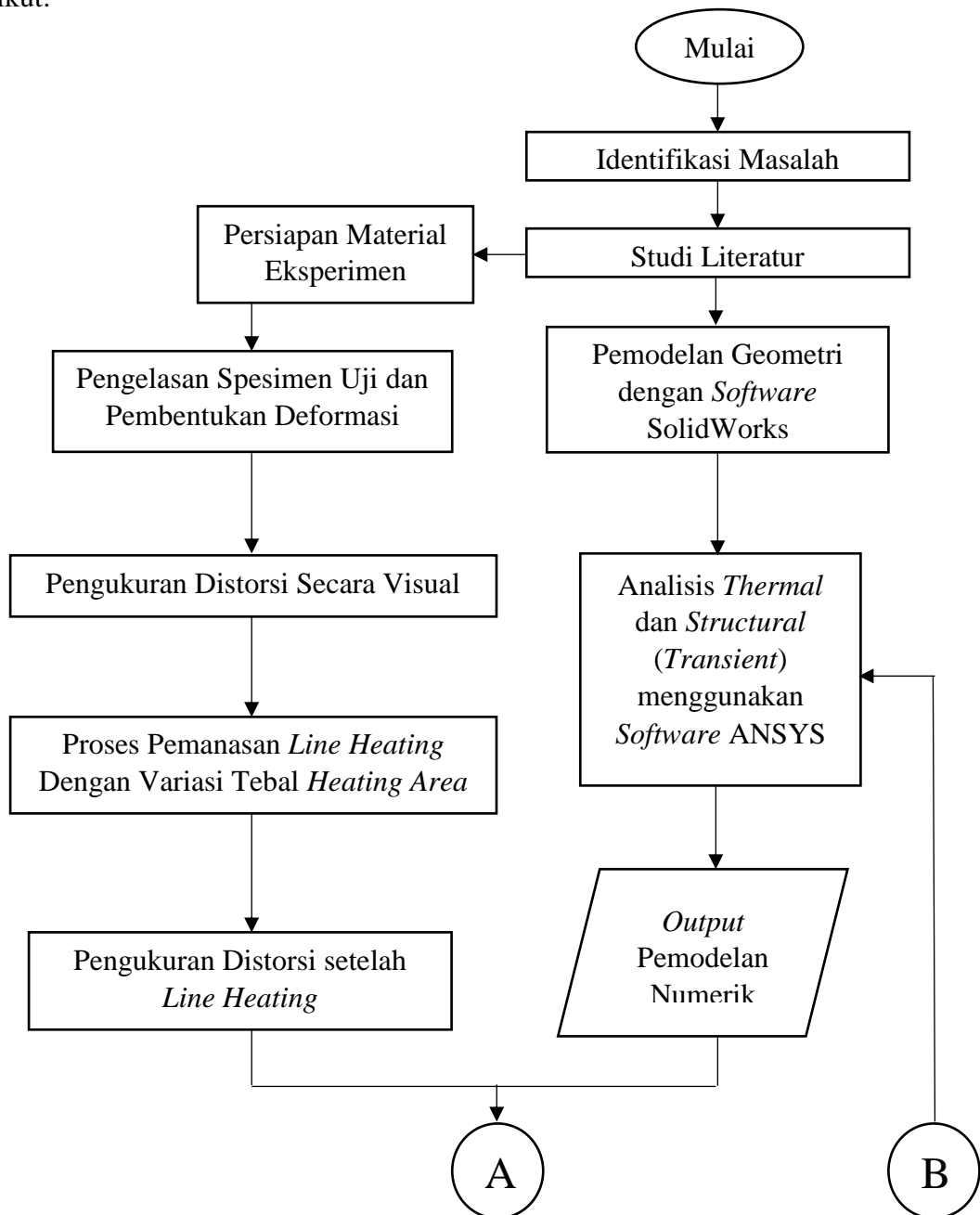
**(Halaman ini sengaja dikosongkan)**

## BAB III

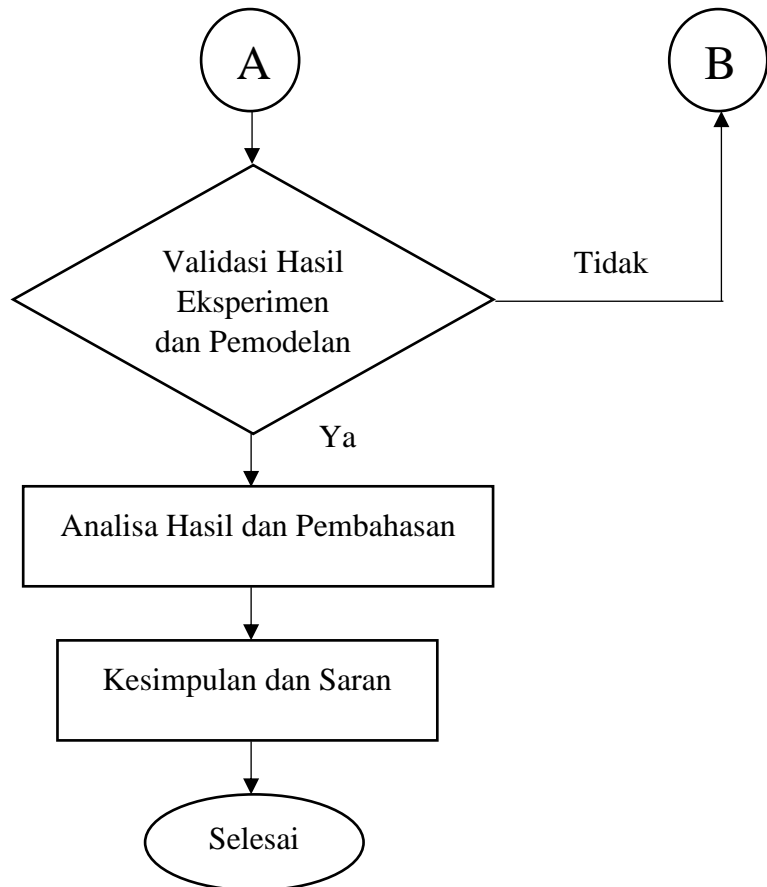
### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Skema Diagram Alir

Untuk memudahkan dalam pelaksanaan penelitian tugas akhir, maka digunakan metode diagram alir (*flow diagram*) seperti pada Gambar 3.1 sebagai berikut:



**Gambar 3.1** Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir



**Gambar 3.1** Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir (Lanjutan)

### 3.2 Penjelasan Diagram Alir

#### 1. Identifikasi Masalah

Pada tahap awal penelitian dilakukan identifikasi masalah yang telah didapatkan, berupa tujuan, manfaat, dan apakah memungkinkan jika dilakukan penelitian lebih lanjut.

#### 2. Studi Literatur

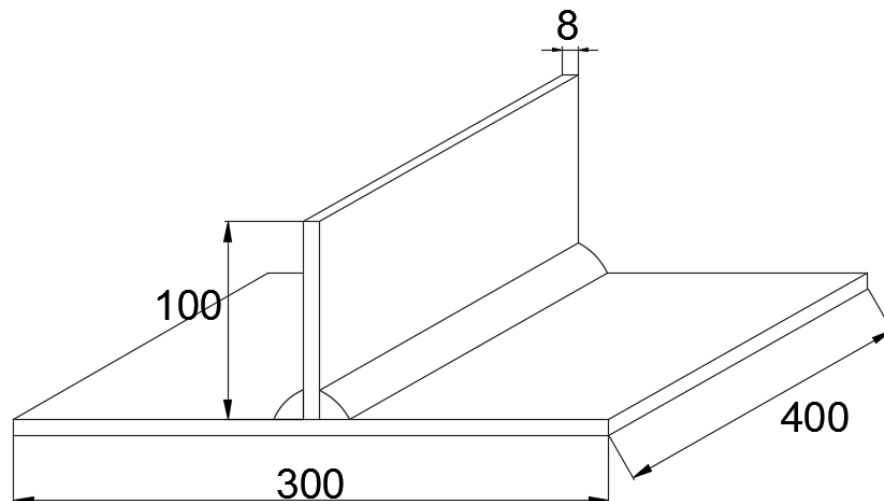
Tahap studi literatur berupa kegiatan mencari, mengkaji, dan mengumpulkan materi serta informasi yang sesuai dengan penelitian yang akan dilakukan.

#### 3. Persiapan Material Eksperimen

Pada tahap ini eksperimen akan dilakukan menggunakan material berupa Baja ASTM A36 dengan dimensi 300 x 400 mm sejumlah tiga pelat, dan 100 x 400 mm sejumlah tiga pelat dengan ketebalan masing-masing pelat sebesar 8 mm.

#### 4. Pengelasan Spesimen Uji dan Pembentukan Deformasi

Pada tahap ini akan dilakukan proses pengelasan SMAW pada spesimen Baja ASTM A36 dengan *T-joint* dan dimensi 300 x 400 x 100 mm dengan ketebalan 8 mm seperti pada Gambar 3.2 dan pembentukan deformasi berupa distorsi *angular*.



**Gambar 3.2** Material Uji Tipe Sambungan *T-Joint*.

Proses pengelasan dilakukan menggunakan parameter pengelasan sebagai berikut:

Proses	: SMAW
Kampuh	: <i>Fillet Weld</i>
Arus	: 85 A
Voltase	: 23 V
Elektrode	: JIS Z3211 E4916 AWS A5 1 E7016
Diameter Elektrode	: 2,6 mm
Jumlah Lapisan	: 1 lapis

Parameter tersebut mengikuti *welding procedure specification* (WPS) dari PT. PAL Indonesia untuk proses pengelasan SMAW yang tercantum pada Lampiran I. Proses pengelasan dengan parameter tersebut dilakukan pada tiga spesimen *T-joint* dengan dimensi yang sama seperti pada Gambar 3.3 dibawah.



**Gambar 3.3** Spesimen yang telah dilakukan proses pengelasan.

### 5. Pengukuran Distorsi Secara Visual.

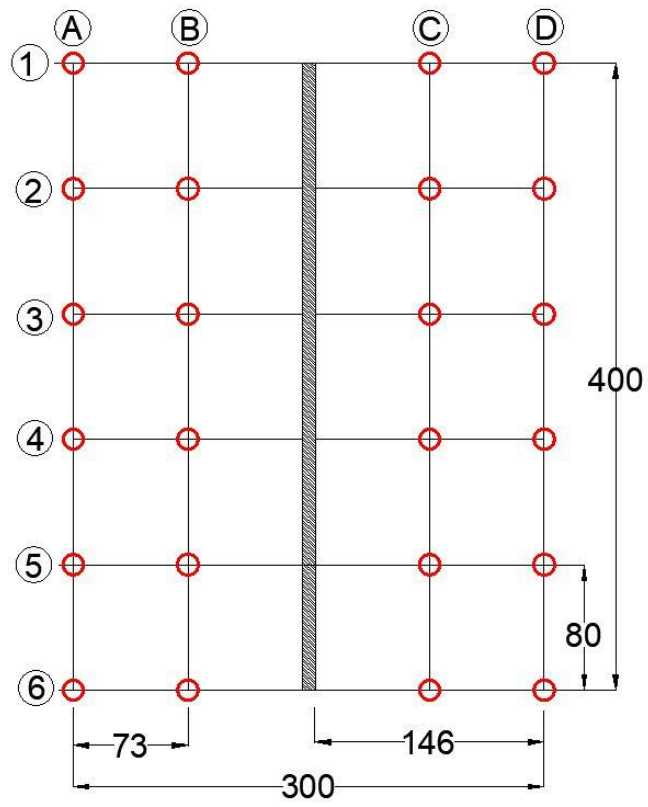
Pengukuran distorsi secara visual setelah proses pengelasan diperlukan untuk mengetahui titik distorsi awal sebelum proses pemanasan dengan metode *line heating* dimulai. Pengukuran distorsi dilakukan dengan menggunakan alat *dial indicator* pada tiap sisi sambungan dan spesimen diletakkan pada meja perata seperti Gambar 3.4 dibawah.



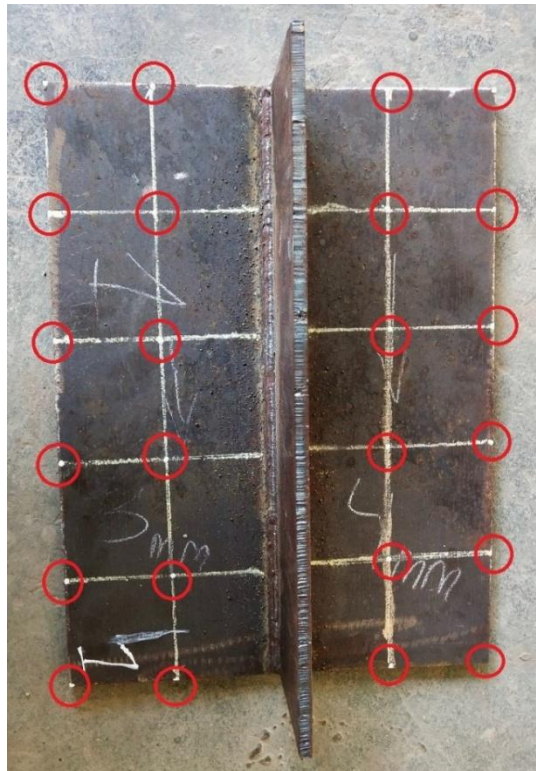
**Gambar 3.4** Dial indicator dan meja perata.

Pengukuran distorsi dilakukan pada tiap titik yang telah ditandai pada spesimen seperti Gambar 3.5 dibawah.





**Gambar 3.5** Titik pengukuran distorsi.



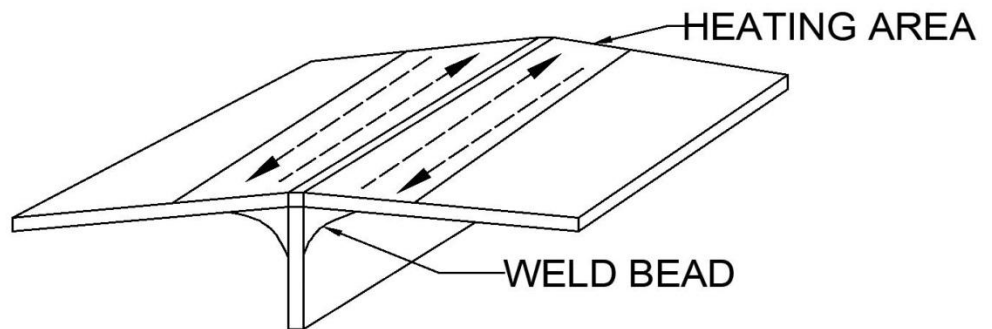
**Gambar 3.6** Spesimen dengan titik pengukuran.



**Gambar 3.7** Proses pengukuran spesimen dengan *dial indicator*.

**6. Proses Pemanasan *Line Heating* Dengan Variasi Alur *Heating Area*.**

Pada tahap ini, material uji yang telah terdistorsi akibat dari proses pengelasan dilakukan proses *line heating*. Dalam proses *line heating* akan dilakukan perbedaan variasi jumlah alur *heating area* dengan alur bolak-balik seperti pada Gambar 3.8.



**Gambar 3.8** Daerah *line heating* pada pelat terdistorsi.

Proses eksperimen *line heating* pada tiap spesimen T-joint dilakukan menggunakan peralatan sebagai berikut:

- *Heating Torch*

*Heating torch* pada Gambar 3.9 dibawah berfungsi untuk memfokuskan gas yang keluar dari tabung LPG.



**Gambar 3.9** Heating torch.

- Tabung LPG

Tabung LPG pada Gambar 3.10 dibawah merupakan wadah dari sumber gas yang akan digunakan untuk proses *line heating*.



**Gambar 3.10** Tabung LPG.

- Stopwatch

Stopwatch pada Gambar 3.11 dibawah digunakan untuk mencatat waktu berlangsungnya proses line heating tiap spesimen.



**Gambar 3.11** *Stopwatch.*

- *Thermometer Infrared*

*Thermometer infrared* pada Gambar 3.12 dibawah digunakan untuk melihat suhu saat proses line heating berlangsung, suhu pemanasan harus dijaga agar tidak melebihi 650°C.



**Gambar 3.12** *Thermometer infrared.*

- Air

Air dalam ember pada Gambar 3.13 dibawah digunakan untuk proses pendinginan setelah proses pemanasan pada satu spesimen selesai.



**Gambar 3.13** Wadah air untuk pendinginan.

Setelah peralatan disiapkan, pada tahap ini, spesimen yang telah dilakukan proses pengelasan dan menghasilkan distorsi akan dilakukan proses *fairing* menggunakan metode *line heating*. Proses *line heating* pada eksperimen tugas akhir ini dilakukan di Laboratorium Produksi Kapal Jurusan Teknik Perkapalan ITS. Untuk variasi alur *heating area* akan dilakukan dengan lebar 10 mm dan alur 2x, 15 mm dan alur 3x, dan 20 mm dan alur 4x pada tiap sisi kanan dan kiri pelat lihat Tabel 3.2 dan Gambar 3.14 sampai dengan Gambar 3.16. Untuk proses *line heating* menggunakan pendinginan dengan air dilakukan dengan suhu dibawah  $\pm 650^{\circ}\text{C}$  mengacu pada *rules IACS no. 47 tahun 1996 Shipbuilding and Repair Quality Standard* lihat Tabel 3.1 dibawah.

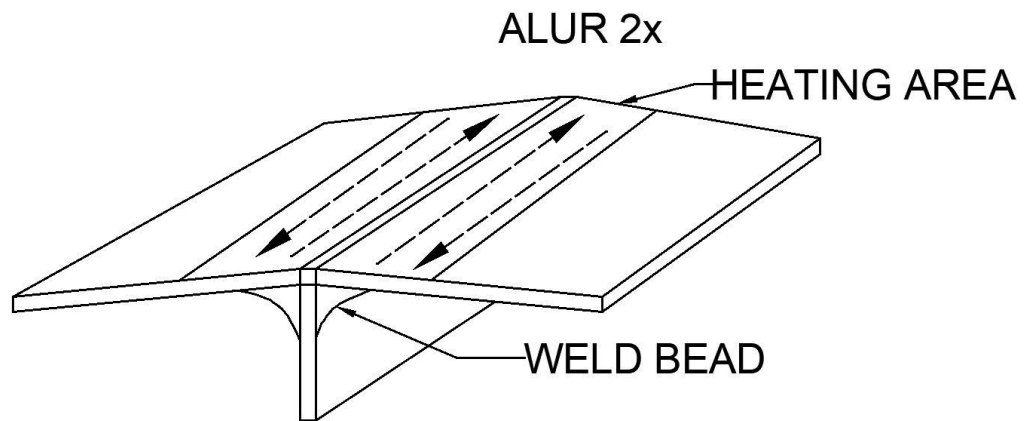
**Tabel 3.1** *Maximum heating temperature on surface for line heating.*

[*Shipbuilding and Repair Quality Standard, 1996*]

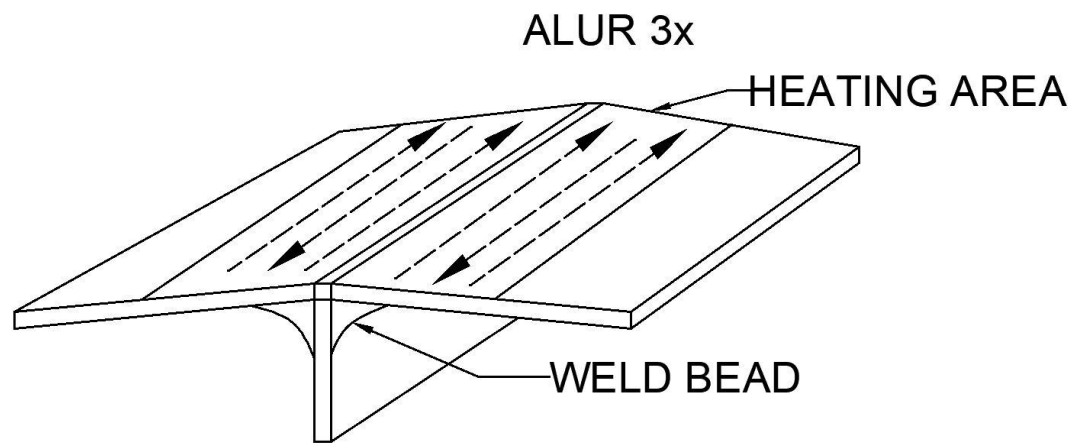
<i>Process</i>	<i>Standard</i>
<i>Water cooling just after heating</i>	<i>Under 650°C</i>
<i>Air Cooling after heating</i>	<i>Under 900°C</i>

**Tabel 3.2** Parameter Proses *Line Heating* Pada Spesimen Uji.

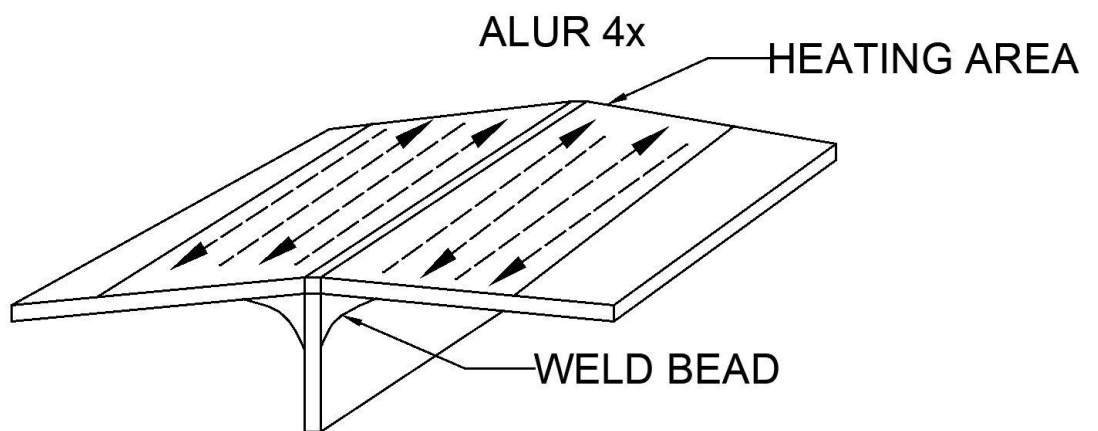
Spesimen	Alur
Spesimen 1	2x
Spesimen 2	3x
Spesimen 3	4x



**Gambar 3.14** *Line Heating* pada Spesimen 1.



**Gambar 3.15** *Line Heating* pada Spesimen 2.



**Gambar 3.16** *Line Heating* pada Spesimen 3.

Untuk eksperimen pemanasan *line heating* tahap-tahap yang dilakukan ialah sebagai berikut:

1. Siapkan spesimen uji yang telah terdistorsi, dan beri tanda daerah yang hendak dilakukan pemanasan menggunakan kapur.
2. Siapkan peralatan untuk melakukan pemanasan *line heating* seperti *heating torch*, tabung gas elpiji, *thermometer infrared*, *stopwatch*, dan wadah air untuk pendinginan.
3. Pasang peralatan untuk pemanasan spesimen yaitu *heating torch* dan tabung gas elpiji.
4. Untuk perbaikan distorsi akibat pengelasan pada *T-joint* menggunakan metode *line heating* dilakukan dengan posisi terbalik, atau dibalik daerah pengelasan. Mulai pemanasan menggunakan *heating torch* dan sesuaikan alur sesuai dengan masing-masing variasi pada spesimen. Untuk eksperimen kali ini digunakan suhu mencapai 200°C. Pengukuran suhu pada saat proses *line heating* menggunakan alat *thermometer infrared* seperti pada Gambar 3.17.



**Gambar 3.17** Pengukuran suhu menggunakan *thermometer infrared*.

5. Setelah satu spesimen diselesaikan tiap alurnya, siram spesimen dengan air untuk proses pendinginan. Lakukan langkah-langkah diatas pada setiap spesimen berikutnya, dengan variasi jumlah alur yang telah ditentukan.

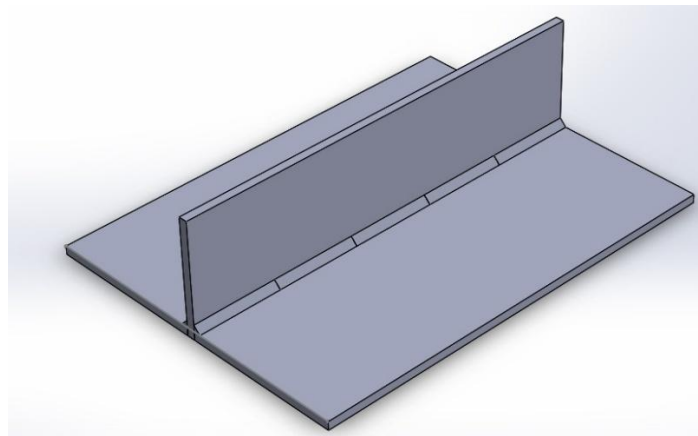


### 7. Pengukuran Distorsi setelah *Line Heating*.

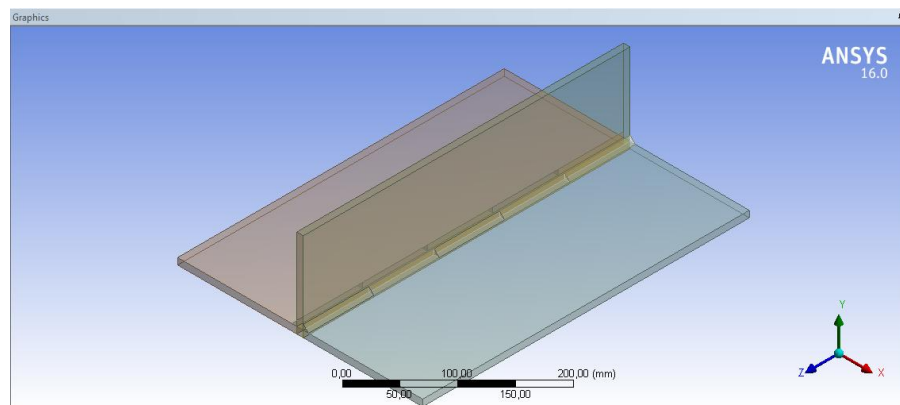
Setelah proses *line heating* dengan variasi alur *heating area* dilakukan, maka dilakukan pengukuran ulang pada masing-masing spesimen distorsi. Pengukuran dilakukan menggunakan alat *dial indicator* pada meja perata. Pengukuran dilakukan untuk melihat perubahan ukuran distorsi yang terjadi setelah dilakukan metode *line heating*. Pengukuran dilakukan dengan cara yang sama dengan pengukuran distorsi setelah pengelasan.

### 8. Pemodelan Geometri dengan *Software SolidWorks*.

Pemodelan geometri dari benda kerja merupakan tahap awal dari pemodelan numerik. Untuk perancangan bentuk geometri pengelasan dan *line heating* dari spesimen digunakan *software* SolidWorks 2013 dan Autodesk Inventor Professional 2015 seperti pada Gambar 3.18 dibawah. Hasil pemodelan geometri pada *software* SolidWorks selanjutnya diinputkan pada *software* ANSYS seperti pada Gambar 3.19 dibawah.



**Gambar 3.18** Pemodelan geometri T-joint menggunakan SolidWorks.



**Gambar 3.19** Input geometri ke ANSYS.



**9. Analisis *Thermal* dan *Structural (Transient)* menggunakan *Software ANSYS*.**

a. Analisis *Transient Thermal*.

Tahap analisis ini bertujuan untuk mengetahui persebaran panas yang diterima spesimen uji pada masing-masing variasi jumlah alur *line heating*.

b. Analisis *Transient Structural*.

Tahap ini bertujuan untuk mengetahui penyebaran penyusutan yang terjadi pada masing-masing spesimen uji dengan variasi jumlah alur *line heating*.

**10. Output Pemodelan Numerik.**

Setelah tahap Analisis *Transient Thermal* dan *Transient Structural* maka didapatkan data besar penyusutan berdasarkan pemodelan numerik pada tiap-tiap spesimen uji.

**11. Validasi Hasil Eksperimen dan Pemodelan Numerik.**

Tahap dimana telah didapatkannya hasil dari percobaan perbaikan distorsi menggunakan metode *line heating* dengan variasi jumlah alur *line heating* yang kemudian penyusutannya diukur dengan *dial indicator*, dan hasil pemodelan numerik dengan *software ANSYS*, kemudian dibandingkan hasil penyusutannya.

**12. Analisa Hasil dan Pembahasan.**

Setelah melakukan validasi hasil, maka dilakukan analisa dan pembahasan mengenai perbaikan distorsi *angular* yang efektif akibat pengaruh variasi jumlah *line heating* pada *T-joint*.

**13. Kesimpulan dan Saran.**

Pada tahap ini ditarik kesimpulan dari hasil penelitian serta saran untuk penelitian lebih lanjut mengenai topik yang berkaitan.

**(Halaman ini sengaja dikosongkan)**

## BAB IV

### ANALISIS DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Eksperimen

Pada tugas akhir ini eksperimen yang akan dilakukan memiliki dua tahap, yaitu eksperimen pengelasan dan eksperimen *fairing* dengan metode *line heating*.

##### 4.1.1 Eksperimen Pengelasan

Proses pengelasan pada Baja ASTM A36 dengan T-joint dilakukan menggunakan parameter pengelasan sebagai berikut:

Proses	: SMAW
Kampuh	: <i>Fillet Weld</i>
Arus	: 85 A
Voltase	: 23 V
Elektrode	: JIS Z3211 E4916 AWS A5 1 E7016
Diameter Elektrode	: 2,6 mm
Jumlah Lapisan	: 1 lapis

Parameter tersebut mengikuti *welding procedure specification* (WPS) dari PT. PAL Indonesia untuk proses pengelasan SMAW yang tercantum pada Lampiran I. Proses pengelasan dengan parameter tersebut dilakukan pada tiga spesimen T-joint dengan dimensi yang sama.

Setelah proses pengelasan dilakukan pengukuran distorsi yang terjadi pada tiap spesimen menggunakan *dial indicator*. Proses pengukuran distorsi dilakukan diatas *flat table* atau meja perata. Hasil dari pengukuran distorsi dapat dilihat pada Tabel 4.1 sampai dengan Tabel 4.3 dibawah.

**Tabel 4.1** Distorsi hasil pengelasan pada Spesimen 1.

TITIK	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)
1	1,36	0,58	1,88	2,76
2	1,41	0,78	1,69	2,02
3	1,68	0,84	1,50	2,22
4	1,89	0,84	1,31	2,31
5	1,96	0,88	1,24	3,37
6	1,93	1,11	0,93	3,29
RATA-RATA	1,705	0,838	1,425	2,662

**Tabel 4.2** Distorsi hasil pengelasan pada Spesimen 2.

TITIK	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)
1	0,94	0,56	1,29	1,93
2	1,46	0,80	1,25	2,29
3	1,73	0,85	1,24	2,51
4	1,87	0,89	1,17	2,41
5	1,07	0,48	1,94	3,24
6	1,05	0,45	2,05	3,31
RATA-RATA	1,353	0,672	1,490	2,615

**Tabel 4.3** Distorsi hasil pengelasan pada Spesimen 3.

TITIK	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)
1	1,57	0,89	1,64	3,12
2	1,51	0,86	1,63	2,82
3	1,68	0,92	1,73	2,87
4	1,97	1,02	1,82	3,02
5	2,82	1,27	1,84	2,96
6	2,75	1,27	1,95	3,21
RATA-RATA	2,05	1,038	1,768	3,00

#### 4.1.2 Eksperimen *Line Heating*

Proses pemanasan *line heating* pada Baja ASTM A36 dengan T-joint dilakukan dengan parameter sebagai berikut:

- Sumber gas : Tabung LPG  
Suhu : 200°C  
Pendinginan : Air  
Variasi : Alur pemanasan

**Tabel 4.4** Data pemanasan *line heating*.

Spesimen	Waktu	Alur	Jarak	Kecepatan	Suhu
1	5 menit 32 detik	2x	1600 mm	4,80 mm/s	200°C
2	7 menit 52 detik	3x	2400 mm	5,08 mm/s	200°C
3	9 menit 20 detik	4x	3200 mm	5,71 mm/s	200°C

Setelah spesimen dilakukan proses *line heating*, dilakukan pengukuran perubahan distorsi pada tiap spesimen menggunakan *dial indicator* dan *flat table*. Hasil pengukuran perubahan distorsi dapat dilihat pada Tabel 4.5 sampai dengan Tabel 4.7 dibawah.

**Tabel 4.5** Distorsi hasil *line heating* pada eksperimen Spesimen 1.

TITIK	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)
1	1,08	0,32	1,43	1,61
2	1,08	0,53	1,35	0,90
3	1,25	0,61	1,08	1,07
4	1,39	0,64	0,96	1,15
5	1,61	0,69	0,98	2,25
6	1,39	0,82	1,08	2,01
RATA-RATA	1,300	0,602	1,147	1,498

**Tabel 4.6** Distorsi hasil *line heating* pada eksperimen Spesimen 2.

TITIK	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)
1	0,66	0,44	0,96	1,70
2	1,27	0,66	1,34	1,11
3	1,53	0,68	1,24	1,31
4	1,69	0,69	1,25	1,22
5	1,17	0,09	1,64	0,21
6	1,03	0,07	1,66	0,12
RATA-RATA	1,225	0,438	1,348	0,945

**Tabel 4.7** Distorsi hasil *line heating* pada eksperimen Spesimen 3.

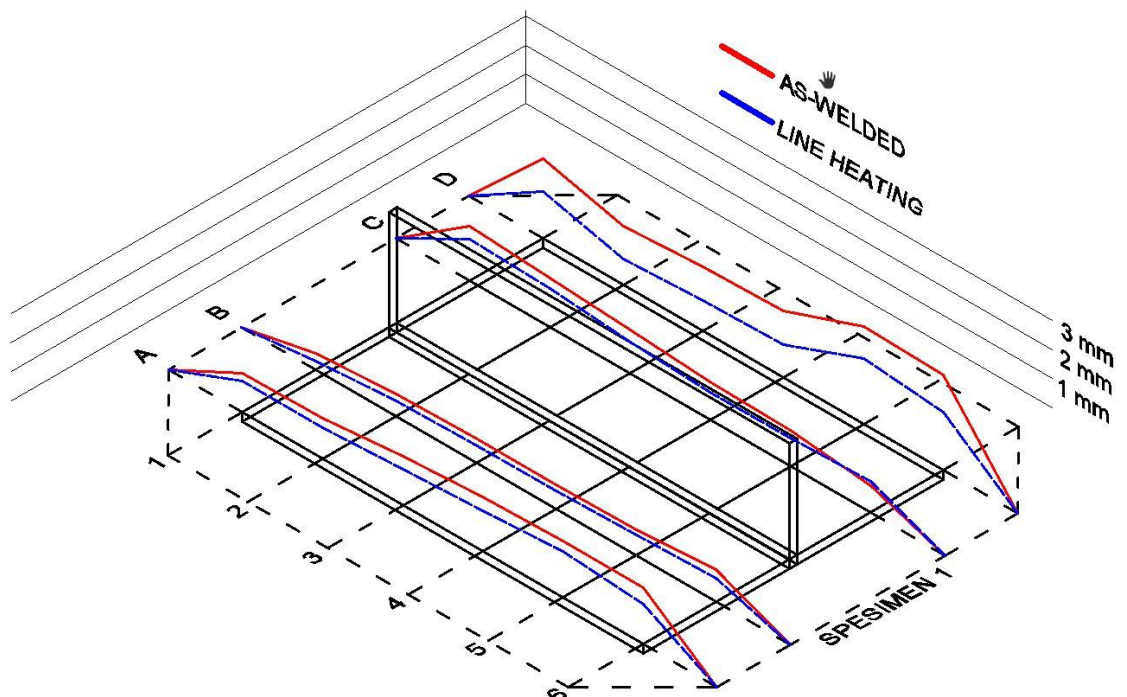
TITIK	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)
1	1,31	0,90	1,34	1,71
2	1,12	0,67	1,26	1,82
3	1,27	0,71	1,24	1,69
4	1,29	0,52	1,28	1,74
5	1,45	1,10	1,24	1,77
6	1,33	1,04	1,31	1,76
RATA-RATA	1,295	0,823	1,278	1,748

### 4.1.3 Analisis Perubahan Distorsi Eksperimen

Setelah eksperimen proses pengelasan dan *line heating* selesai dilakukan, hasil dari pengukuran distorsi tiap spesimen mengalami perubahan dari setelah dilakukan proses pengelasan dan setelah dilakukan *line heating*. Perubahan distorsi yang terjadi akibat *line heating* merupakan penurunan dari hasil distorsi awal setelah pengelasan. Besar penurunan distorsi akibat dari *line heating* dapat dilihat pada Tabel 4.8 sampai dengan Tabel 4.10 dibawah. Grafik perubahan distorsi dapat dilihat pada Gambar 4.1 sampai dengan Gambar 4.3 dibawah

**Tabel 4.8** Hasil penurunan distorsi eksperimen Spesimen 1.

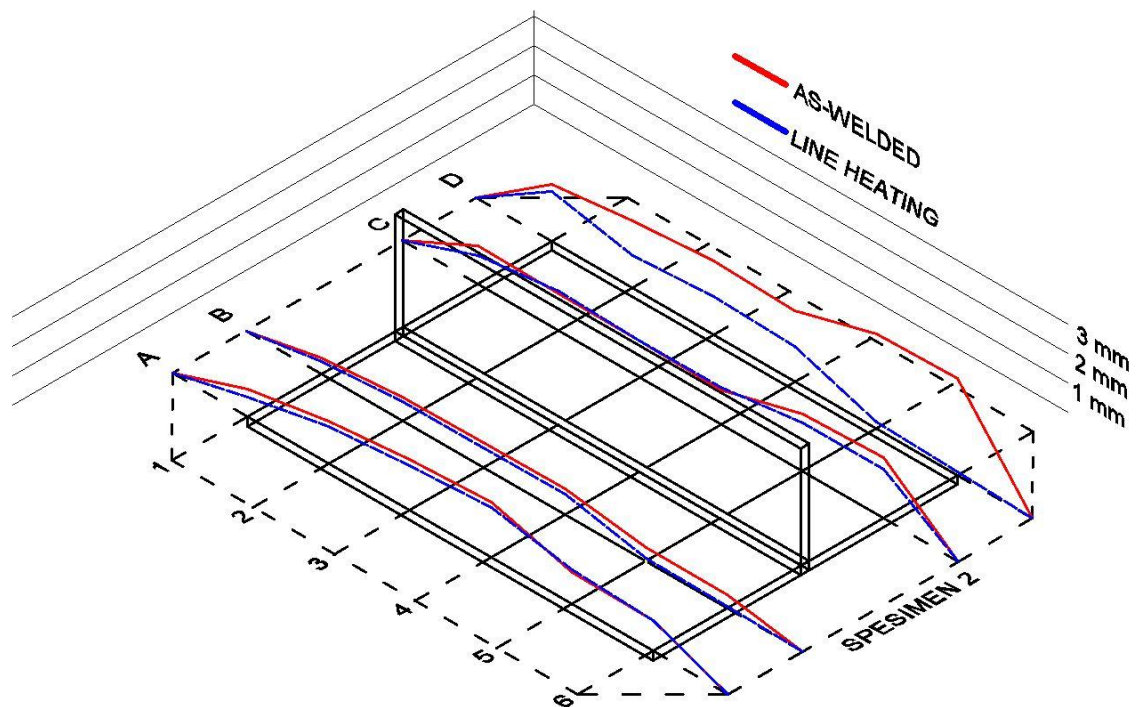
TITIK	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)
1	0,28	0,26	0,45	1,15
2	0,33	0,25	0,34	1,12
3	0,43	0,23	0,42	1,15
4	0,50	0,20	0,35	1,16
5	0,35	0,19	0,26	1,12
6	0,54	0,29	-0,15	1,28
RATA-RATA	0,405	0,237	0,278	1,163



**Gambar 4.1** Grafik penurunan distorsi eksperimen Spesimen 1.

**Tabel 4. 9** Hasil penurunan distorsi eksperimen Spesimen 2.

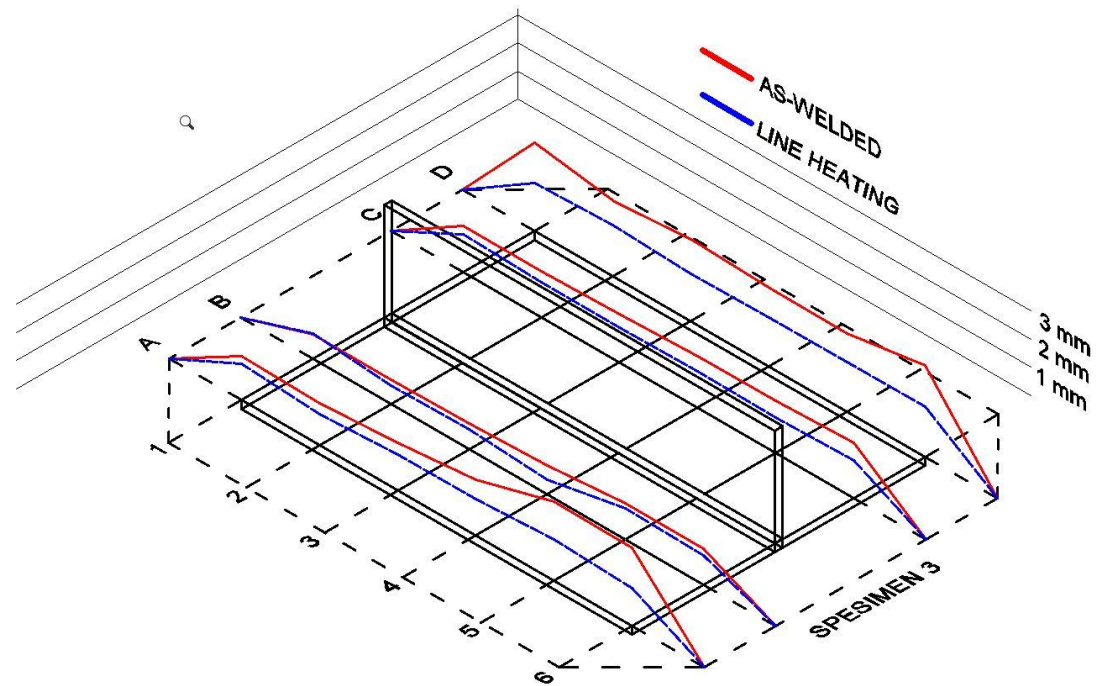
TITIK	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)
1	0,28	0,12	0,33	0,23
2	0,19	0,14	-0,09	1,18
3	0,20	0,17	0,00	1,20
4	0,18	0,20	-0,08	1,19
5	-0,10	0,39	0,30	3,03
6	0,02	0,38	0,39	3,19
RATA-RATA	0,128	0,233	0,142	1,670



**Gambar 4.2** Grafik penurunan distorsi eksperimen Spesimen 2.

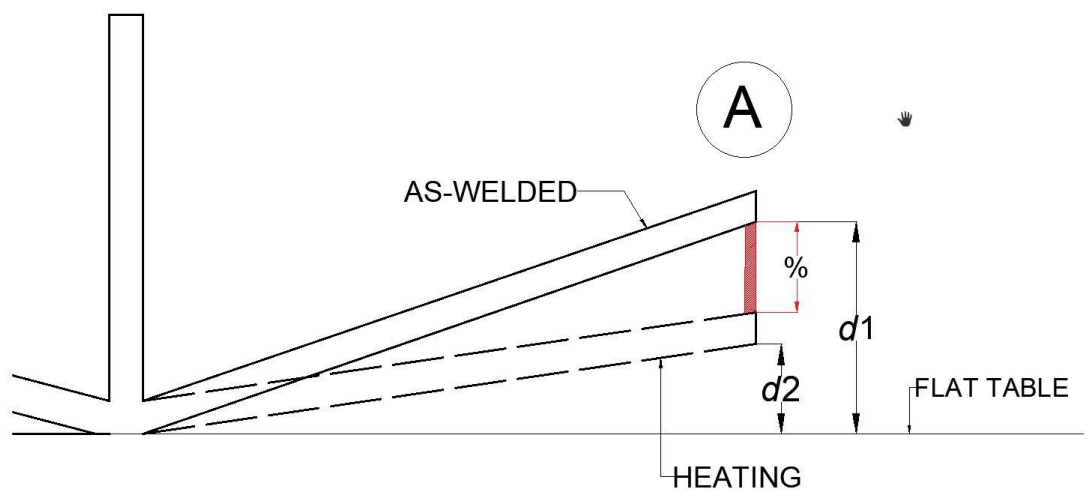
**Tabel 4. 10** Hasil penurunan distorsi eksperimen Spesimen 3.

TITIK	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)
1	0,26	-0,01	0,30	1,41
2	0,39	0,19	0,37	1,00
3	0,41	0,21	0,49	1,18
4	0,68	0,50	0,54	1,28
5	1,37	0,17	0,60	1,19
6	1,42	0,23	0,64	1,45
RATA-RATA	0,755	0,215	0,490	1,252



**Gambar 4.3** Grafik penurunan distorsi eksperimen Spesimen 3.

Setelah didapatkan hasil penurunan distorsi pada tiap spesimen, dilakukan perhitungan persentase dari efektivitas *line heating* terhadap perbaikan distorsi akibat pengelasan. Persentase efektivitas *line heating* terhadap perbaikan distorsi pengelasan didapatkan dengan perhitungan dibawah dan Gambar 4.4, hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 4.11 dibawah.



**Gambar 4.4** Ilustrasi perhitungan persentase efektivitas.



$$\% = \left( \frac{\Delta}{d1} \right) \times 100\%$$

$$\Delta = d1 - d2$$

Dimana,

% = persentase efektivitas *line heating*

$\Delta$  = selisih distorsi

$d1$  = distorsi *as-welded*

$d2$  = distorsi setelah *line heating*

**Tabel 4. 11** Persentase efektivitas eksperimen *line heating*.

PERSENTASE	SPESIMEN 1	SPESIMEN 2	SPESIMEN 3
A	23,75%	9,48%	36,83%
B	28,23%	34,74%	20,71%
C	19,53%	9,51%	27,71%
D	43,71%	63,86%	41,72%
RATA-RATA	28,81%	29,40%	31,74%

## 4.2 Pemodelan Numerik

Pada tugas akhir kali ini pemodelan numerik yang akan dilakukan ada dua jenis yaitu pemodelan proses pengelasan dan pemodelan *line heating*. Untuk pemodelan numerik masing-masing jenis memiliki tiga tahap pengerjaan, yaitu pembuatan model geometri, analisis *thermal*, dan analisis *structural*.

### 4.2.1 Perhitungan *Heat Flux*

Pemodelan spesimen pengelasan pada Baja ASTM A36 dengan T-joint ini menggunakan *software* ANSYS WORKBENCH 16.0. Proses pemodelan pengelasan ini diawali dengan pembuatan geometri menggunakan *software* SolidWorks 2013. Setelah pembuatan geometri, langkah selanjutnya ialah perhitungan *heat flux*. Untuk pemodelan pengelasan, beban yang akan diterima oleh *base metal* adalah beban dari *heat flux*. *Heat flux* yang terbentuk pada pemodelan pengelasan dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu, besar arus listrik, tegangan dan kecepatan pengelasan (Nurfitriana, 2016). Untuk menghitung *heat flux* ada beberapa parameter yang harus ditentukan.

Perhitungan *heat flux* pada pengelasan SMAW untuk T-joint, dimana dimensi model pelat, yaitu

$p = 300 \text{ mm} ; l = 400 \text{ mm} ; t = 100 \text{ mm}$

Parameter pemodelan pengelasan, yaitu

Kuat Arus (I)	= 85 A
Voltase (V)	= 23 V
Efisiensi SMAW ( $\eta$ )	= 0,75
Diameter Elektrode	= 2,6 mm
Luas penampang elektroda ( $A_e$ )	= 5,3092 mm <sup>2</sup>
Kecepatan pengelasan (v)	= 6,6 mm/sec
Spesifikasi kampuh las, yaitu	
Jumlah <i>step weld bead</i>	= 10 weld bead
Lebar <i>weld bead</i>	= 8,98 mm
Panjang satu <i>weld bead</i>	= 80 mm
Waktu yang diperlukan satu elemen	= 16 sec

Perhitungan *heat input* bersih:

$$\begin{aligned} Q &= (\eta V I) / v \\ &= 0,75 \times 23 \text{ V} \times 85 \text{ A} \\ &= 222,16 \text{ watt} \end{aligned}$$

Luas pada satu *weld bead*:

$$\begin{aligned} A_{wb} &= \text{kecepatan las} \times \text{sisi miring } \textit{weld bead} \\ A_{wb} &= 6,6 \text{ mm} \times 8,98 \text{ mm} \\ &= 59,86 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Perhitungan *heat flux* untuk satu elemen:

$$\begin{aligned} q &= Q / A_{wb} \\ &= 222,16 \text{ watt} / 59,86 \text{ mm}^2 \\ &= 3,711 \text{ watt/mm}^2 \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan diatas, diketahui beban *heat flux* yang dikenakan pada setiap elemen pada pemodelan pengelasan adalah sebesar 3,711 watt/mm<sup>2</sup>. Beban *heat flux* ini dimasukkan pada tiap elemen *weld bead* secara transien atau berjalan sesuai dengan fungsi waktu.

Selain beban *heat flux*, kondisi batas juga harus dimasukkan ke dalam pembebanan permodelan. Kondisi batas ini merupakan keadaan nyata bahwa antara

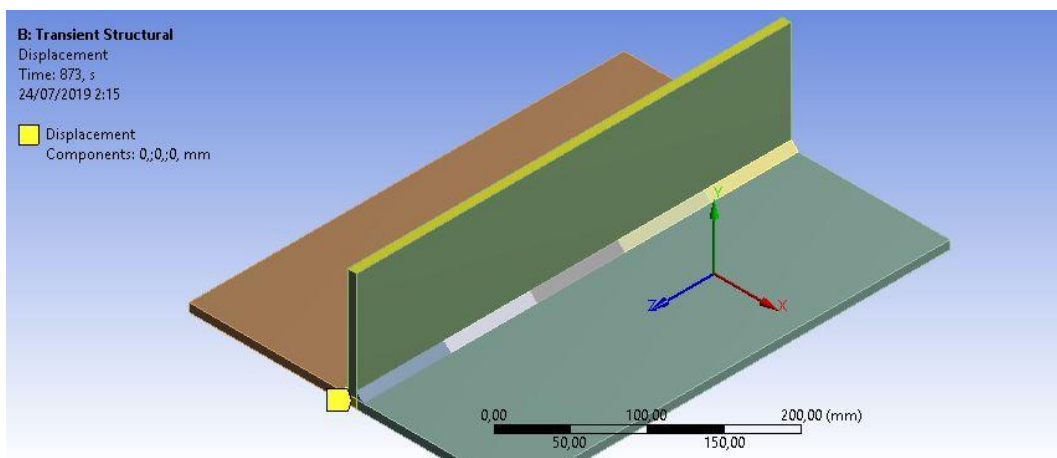
permukaan pelat dengan udara mengalami kontak langsung. Kondisi batas ini adalah beban konveksi, maka itu perlu dimasukkan koefisien yang digunakan untuk memasukkan factor konveksi ke dalam permodelan. Koefisien yang harus dimasukkan dalam perhitungan adalah sebagai berikut:

- *Film coefficient* =  $1,5e^{-005}$  W/m<sup>°C</sup>
- *Ambient temperature* = 22 °C

*Film coefficient* merupakan koefisien faktor konveksi yang terjadi antara logam yang dipanaskan dengan udara. Sedangkan *ambient temperature* adalah temperatur ruang yang terjadi pada saat pengelasan dilakukan.

#### 4.2.2 Penentuan *Displacement*

*Displacement* pada pemodelan *transient structural* merupakan pada merupakan *boundary condition*. *Displacement* ditentukan dengan mengunci daerah atau bagian yang tidak terpengaruh oleh perubahan bentuk yang disebabkan oleh beban termal. Daerah yang dikunci dengan *displacement* ini harus sesuai dengan kondisi lapangan pada proses pengelasan maupun pemanasan spesimen pada saat eksperimen, daerah mana yang tidak mengalami perubahan bentuk merupakan daerah yang harus dikunci. Penguncian dilakukan dengan memasukan nilai 0 pada *coordinate system* pada sumbu x, y dan z agar tidak terjadi perpindahan pada titik atau daerah tersebut. Peletakan *displacement* pada T-joint untuk proses pengelasan dan pemanasan terletak di daerah yang sama. Pemilihan *boundary condition* pada T-joint terletak pada 3 bagian *face* dari geometri 3D seperti pada Gambar 4.5 dibawah.



Gambar 4.5 Seleksi *boundary condition*.

### 4.2.3 Analisis *Transient Thermal*

Setelah selesai melakukan input data geometri dan perhitungan *heat flux*, langkah berikutnya adalah melakukan permodelan *transient thermal*. Analisis ini berfungsi untuk menentukan suhu maupun berbagai parameter *thermal* yang memiliki variasi terhadap waktu. Hasil yang akan diperoleh yaitu distribusi suhu (panas) yang mampu memicu terjadinya kegagalan suatu material. Hasil analisis ini dapat digunakan untuk melakukan analisis *transient structural* yang berkaitan dengan beban-beban yang terdapat pada material analisis.

Untuk melakukan analisis *transient thermal*, penulis menggunakan bantuan *software* ANSYS Workbench 16.0. Langkah-langkah untuk melakukan analisa *transient thermal* dapat dilihat pada **Lampiran II**. Hasil dari analisis *transient thermal* masing-masing spesimen dapat dilihat pada **Lampiran III**.

### 4.2.4 Analisis *Transient Structural*

Data hasil analisis *transient thermal* berikutnya akan dimasukkan kedalam analisis berikutnya, yaitu analisis *transient structural*. Analisis *transient structural* terdiri dari 2 jenis, yaitu analisis secara linier dan non-linier. Tujuan dari analisis *transient structural* adalah mendapatkan respon dinamis material akibat beban *heat flux* yang bergantung pada waktu.

Untuk melakukan analisis *transient structural* digunakan *software* ANSYS Workbench 16.0. Langkah-langkah untuk melakukan analisis *transient structural* dapat dilihat pada **Lampiran IV** dan hasilnya dapat dilihat pada **Lampiran V**.

### 4.2.5 Hasil Distorsi Pemodelan Numerik Pengelasan

Setelah berhasil melakukan analisis *transient thermal* dan *transient structural* proses pengelasan, akan didapatkan hasil distorsi yang terjadi pada spesimen dapat dilihat pada Tabel 4.12 dibawah.

**Tabel 4.12** Distorsi pemodelan numerik pengelasan.

TITIK	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)
1	2,089	1,662	1,857	2,243
2	2,312	1,790	2,077	2,296
3	2,572	2,030	2,416	2,533
4	2,781	2,189	2,511	2,78
5	2,842	2,256	2,271	2,763
6	2,610	1,850	2,523	2,744
RATA-RATA	2,534	1,963	2,276	2,560

#### 4.2.5 Hasil Distorsi Pemodelan Numerik *Line Heating*

Pada pemodelan *line heating*, digunakan geometri 3D yang telah terdistorsi sebesar 3 mm pada titik A dan D, untuk titik B dan C distorsi sebesar 1,5 mm. Penggunaan geometri ini dikarenakan kondisi pemodelan numerik proses pengelasan penelitian kali ini tidak berhasil menemukan proses pendinginan mencapai suhu ruangan pada spesimen sebelum dilakukan proses pemanasan *line heating*. Setelah melakukan analisis *transient thermal* dan *transient structural* proses *line heating*, akan didapatkan hasil distorsi yang terjadi pada spesimen dapat dilihat pada Tabel 4.13 sampai dengan Tabel 4.15 dibawah.

**Tabel 4.13** Distorsi *line heating* pemodelan Spesimen 1.

TITIK	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)
1	2,852	1,358	1,327	2,820
2	2,878	1,400	1,364	2,839
3	2,860	1,405	1,363	2,837
4	2,842	1,391	1,354	2,832
5	2,847	1,392	1,343	2,824
6	2,832	1,344	1,297	2,786
RATA-RATA	2,852	1,381	1,341	2,823

**Tabel 4.14** Distorsi *line heating* pemodelan Spesimen 2.

TITIK	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)
1	2,803	1,303	1,256	2,729
2	2,858	1,385	1,325	2,767
3	2,843	1,390	1,344	2,785
4	2,826	1,379	1,341	2,788
5	2,826	1,385	1,329	2,778
6	2,827	1,328	1,275	2,756
RATA-RATA	2,831	1,362	1,312	2,767

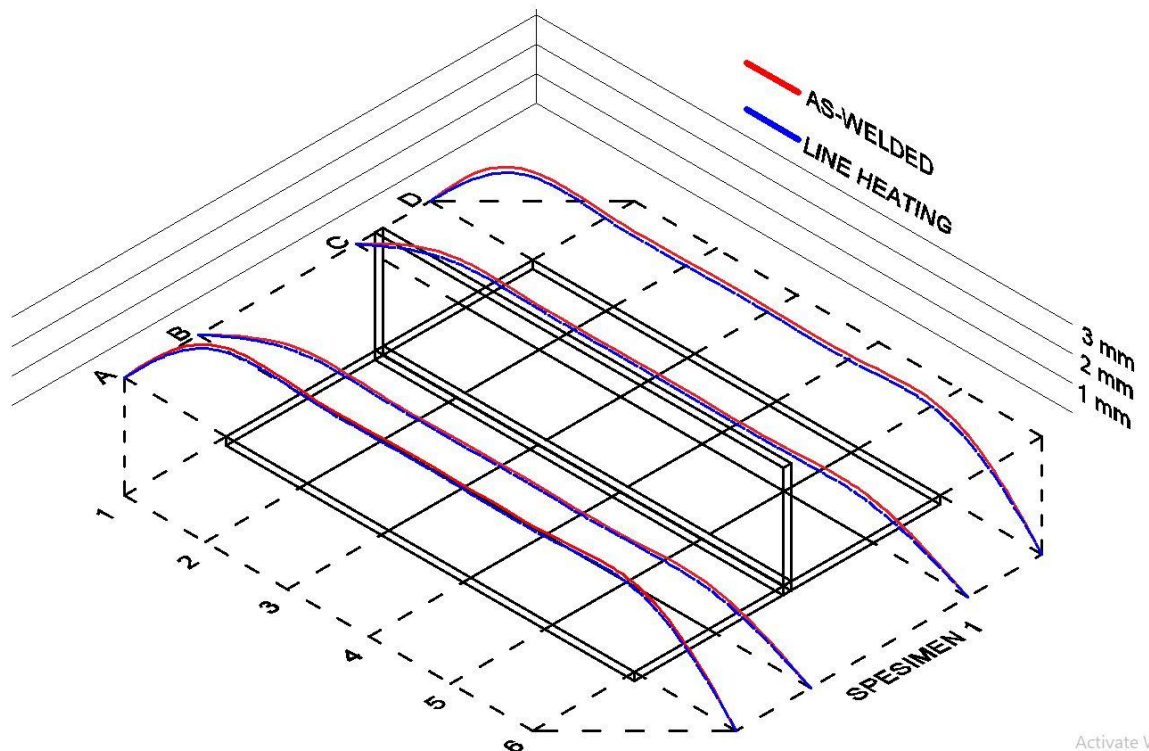
**Tabel 4.15** Distorsi *line heating* pemodelan Spesimen 3.

TITIK	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)
1	2,794	1,321	1,253	2,692
2	2,815	1,379	1,302	2,719
3	2,789	1,352	1,310	2,725
4	2,771	1,341	1,308	2,721
5	2,785	1,341	1,299	2,708
6	2,764	1,297	1,255	2,680
RATA-RATA	2,787	1,338	1,288	2,708

Besar penurunan distorsi akibat dari kondisi pemodelan numerik *as-welded* dan setelah *line heating* dapat dilihat pada Tabel 4.16 sampai dengan Tabel 4.18 dibawah. Besar perbedaan hasil dari kondisi *as-welded* dengan setelah *line heating* pemodelan numerik dapat dilihat pada Gambar 4.6 sampai dengan Gambar 4.8 dibawah.

**Tabel 4.16** Penurunan distorsi pemodelan Spesimen 1.

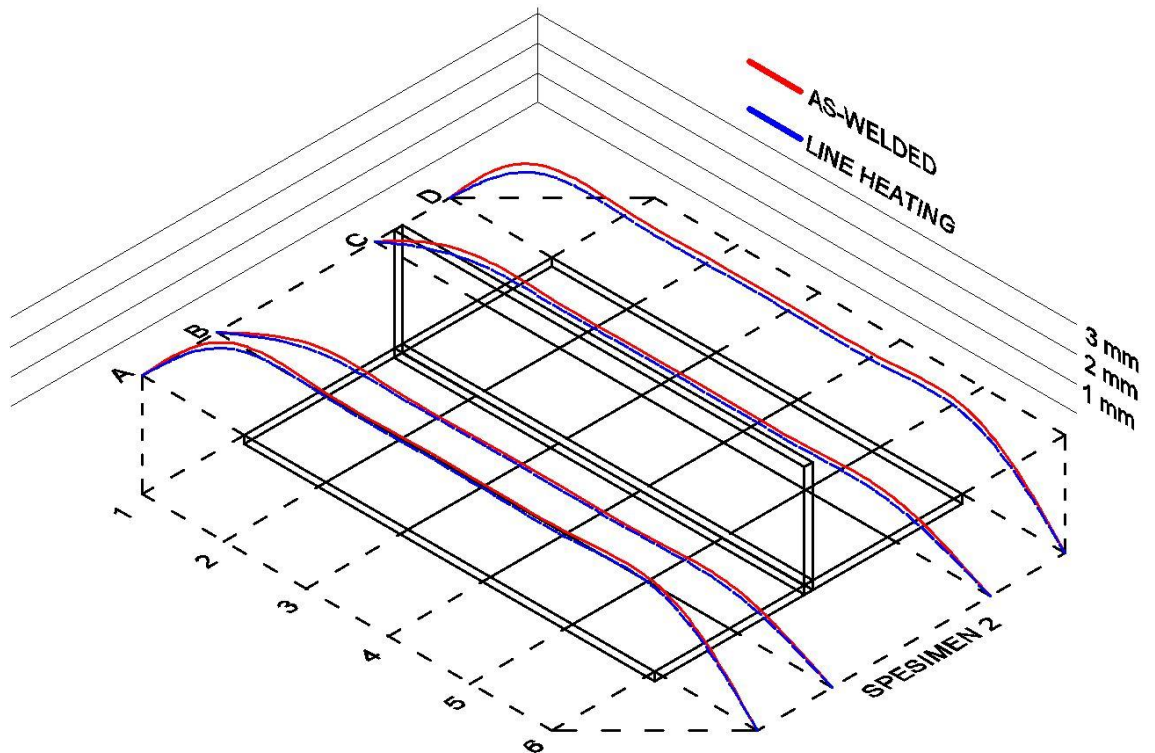
TITIK	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)
1	0,148	0,142	0,173	0,180
2	0,122	0,100	0,136	0,161
3	0,140	0,095	0,137	0,163
4	0,158	0,109	0,146	0,168
5	0,153	0,108	0,157	0,176
6	0,168	0,156	0,203	0,214
RATA-RATA	0,148	0,119	0,159	0,177



**Gambar 4.6** Grafik penurunan distorsi pemodelan Spesimen 1.

**Tabel 4.17** Penurunan distorsi pemodelan Spesimen 2.

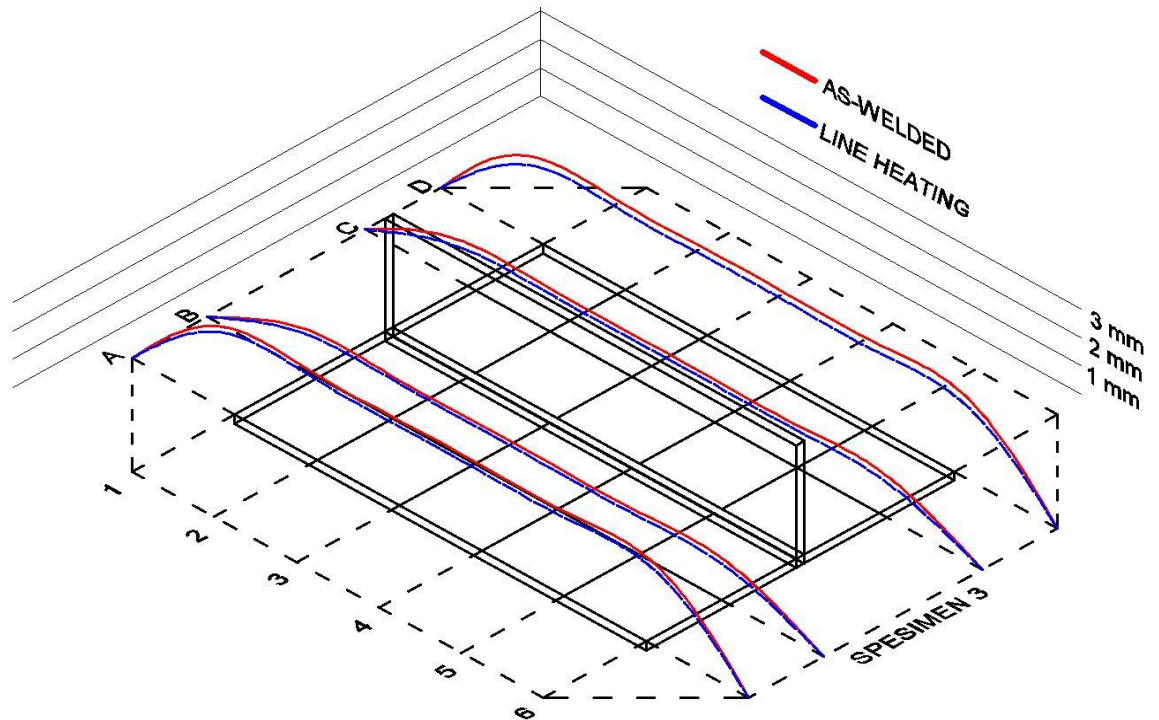
TITIK	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)
1	0,197	0,197	0,244	0,271
2	0,142	0,115	0,175	0,233
3	0,157	0,110	0,156	0,215
4	0,174	0,121	0,159	0,212
5	0,174	0,115	0,171	0,222
6	0,173	0,172	0,225	0,244
RATA-RATA	0,169	0,138	0,188	0,233



**Gambar 4.7** Grafik penurunan distorsi pemodelan Spesimen 2.

**Tabel 4.18** Penurunan distorsi Spesimen 3.

TITIK	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)
1	0,206	0,179	0,247	0,308
2	0,185	0,121	0,198	0,281
3	0,211	0,148	0,190	0,275
4	0,229	0,159	0,192	0,279
5	0,215	0,159	0,201	0,292
6	0,236	0,203	0,245	0,320
RATA-RATA	0,213	0,162	0,212	0,292



**Gambar 4.8** Grafik penurunan distorsi pemodelan Spesimen 3.

Setelah didapatkan hasil penurunan distorsi pada tiap spesimen, dilakukan perhitungan persentase dari efektivitas *line heating* terhadap perbaikan distorsi akibat pengelasan. Persentase efektivitas *line heating* terhadap perbaikan distorsi pengelasan didapatkan dengan perhitungan dibawah, dan hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 4.19 dibawah.

$$\% = \left( \frac{\Delta}{d1} \right) \times 100\%$$

$$\Delta = d1 - d2$$

Dimana,

% = persentase efektivitas *line heating*

$\Delta$  = selisih distorsi

$d1$  = distorsi *as-welded*

$d2$  = distorsi setelah *line heating*

**Tabel 4.19** Persentase efektivitas pemodelan *line heating*.

PERSENTASE	SPESIMEN 1	SPESIMEN 2	SPESIMEN 3
A	4,94%	5,65%	7,11%
B	7,90%	9,22%	10,78%
C	10,57%	10,37%	14,13%
D	5,90%	7,76%	9,75%
RATA-RATA	7,33%	8,25%	10,44%



### 4.3 Validasi Hasil Eksperimen dengan Numerik

Setelah dilakukan pengukuran pada ketiga spesimen eksperimen dan numerik setelah *line heating*, maka dilakukan validasi perubahan distorsi yang terjadi pada setiap spesimen. Validasi ini berguna untuk membandingkan hasil eksperimen dengan permodelan numerik, dan juga untuk mengetahui jumlah alur *line heating* yang paling efektif untuk mengurangi besarnya distorsi yang terjadi akibat pengelasan. Hasil validasi permodelan numerik dan eksperimen dapat dilihat pada Tabel 4.20 dibawah.

**Tabel 4.20** Validasi hasil penurunan distorsi eksperimen dengan numerik.

SPESIMEN	EKSPERIMEN	NUMERIK	ERROR
1	28,81%	7,33%	75%
2	29,40%	8,25%	72%
3	31,74%	10,44%	67%

#### 4.3.1 Analisa Hasil Validasi

Berdasarkan hasil validasi antara eksperimen dengan permodelan numerik pada Tabel 4.20, didapatkan hasil penurunan distorsi pada masing-masing spesimen. Pada spesimen 1, penurunan distorsi yang terjadi pada eksperimen adalah 28,81% dan pada permodelan numerik sebesar 7,33%, dengan *margin error* sebesar 75%. Pada spesimen 2, penurunan distorsi yang terjadi pada eksperimen adalah 29,40%, dan pada permodelan numerik adalah 8,25%, dengan *margin error* 72%. Pada spesimen 3, penurunan distorsi yang terjadi pada eksperimen adalah 31,74%, dan pada permodelan numerik adalah 10,44%, dengan *margin error* sebesar 67%.

Berdasarkan hasil penurunan distorsi pada eksperimen dan pemodelan *line heating*, dapat ditarik kesimpulan bahwa spesimen 3 dengan variasi jumlah alur *line heating* memiliki penurunan distorsi yang lebih efektif dibanding spesimen 1 dan spesimen 2.

Distorsi *angular* akibat proses pengelasan dapat dikurangi menggunakan metode *line heating* dengan suhu mencapai 200°C dan jumlah alur terbanyak, yaitu dengan alur 4 kali.

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Dari hasil analisis pada penelitian ini, dapat diambil kesimpulan, yaitu:

1. Berdasarkan hasil validasi antara eksperimen dengan pemodelan numerik, didapatkan hasil distorsi eksperimen pengelasan pada ketiga spesimen dengan sambungan T-joint dan *welding procedure* yang sama didapatkan rata-rata distorsi mencapai 21% dari titik awal tebal pelat, rata-rata distorsi ketiga spesimen mencapai 1,718 mm dengan besar distorsi maksimum 3,37 mm yang terdapat pada Spesimen 1. Hasil distorsi pemodelan numerik pengelasan dengan *welding procedure* yang sama didapatkan rata-rata distorsi sebesar mencapai 29% dari titik awal tebal pelat, rata-rata distorsi spesimen mencapai 2,333 mm dengan besar distorsi maksimum 2,87 mm.
2. Berdasarkan hasil validasi antara eksperimen dengan pemodelan numerik, didapatkan hasil penurunan distorsi pada masing-masing spesimen. Pada spesimen 1, penurunan distorsi yang terjadi pada eksperimen adalah 28,81% dan pada pemodelan numerik sebesar 7,33%, dengan *margin error* sebesar 75%. Pada spesimen 2, penurunan distorsi yang terjadi pada eksperimen adalah 29,40%, dan pada pemodelan numerik adalah 8,25%, dengan *margin error* 72%. Pada spesimen 3, penurunan distorsi yang terjadi pada eksperimen adalah 31,74%, dan pada pemodelan numerik adalah 10,44%, dengan *margin error* sebesar 67%. Spesimen 3 dengan variasi jumlah alur *line heating* memiliki penurunan distorsi yang lebih efektif dibanding spesimen 1 dan spesimen 2.

#### 5.2 Saran

Selama proses penyusunan penelitian ini, banyak terjadi *error* dan solusi yang telah didapatkan untuk membandingkan hasil pemodelan numerik dan eksperimen yang sesuai dengan kondisi lapangan. Sebagai tindak lanjut,

apabila topik tugas akhir ini hendak diteliti kembali, mohon untuk melakukan saran-saran berikut ini:

1. Melakukan pengukuran distorsi pelat baja sebelum dilakukan proses pengelasan untuk menyesuaikan titik 0 dan dilakukan eksperimen lebih lanjut.
2. Melakukan analisis struktur mikro, agar hasil kekuatan struktur yang disebabkan proses pengelasan dan *line heating* dapat dianalisis dengan akurat.
3. Menggunakan *meshing sensitivity* agar hasil permodelan numerik yang diperoleh menjadi lebih akurat.
4. Melakukan *cooling rate* pada pemodelan numerik pengelasan agar model spesimen dapat dilanjutkan dengan pemodelan *line heating* tanpa harus membuat geometri 3D yang berbeda lagi.
5. Menggunakan *gas oxyacetylene* untuk proses *line heating* agar suhu dapat mencapai  $\pm 650$  °C sesuai *rules IACS no. 47 tahun 1996 Shipbuilding and Repair Quality Standard*.
6. Menentukan *timeline* pengerjaan penelitian yang teratur, agar mampu menganalisis dengan waktu yang terjadwal sehingga mendapatkan hasil yang lebih maksimal.

## Daftar Pustaka

- Amanto, H. (1999). *Ilmu Bahan*. Jakarta: Bumi Aksara.
- ANSYS. (2013). *ANSYS Mechanical APDL Element Reference-Release 15.0*. USA: ANSYS Inc.
- ASTM. (1999). *Standard Specification for Carbon Structural Steel*. USA: ASTM International.
- Bantami, W. (2009). *Pengaruh Jarak Tanggem terhadap Deformasi dan Cacat Retak Pada Sambungan Butt Joint Material Baja SS 41 dengan Pengelasan SMAW*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Perkapalan. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Cardarelli, F. (2000). *Material Handbook*. London.
- Edzona. (2014). *Cara Mencegah Distorsi Las*. Semarang: CV. Jaya Manunggal Perkasa
- Hardiansyah, P., & Supomo, H. (2012). *Pengaruh Proses Pemanasan Line Heating pada Proses Pembentukan Badan Kapal terhadap Laju Korosi*. Surabaya: Jurusan Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan - ITS.
- The Lincoln Electric Company. (1973). *The Procedure Handbook of Arc Welding*. Toronto, Canada: The Lincoln Electric Company.
- Logan, D. L. (2000). *A First Course in the Finite Element Method Fourth Edition*. Canada.
- Lucas, B., Leggatt, R., & Mathers, G. (2014). *Distortion-Corrective Techniques*. Australia: The Welding Institute
- Robert H.todd. 1994. *Steel and its Heat Treatment*. Butterworth, London.
- Sahri, S. (2015). *Analisa Pengaruh Line Heating terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Baja ASTM A36 dengan Variasi Pendinginan*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Perkapalan. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sutekat, A.G. (2018). *Studi Eksperimen Dan Numerik Pengaruh Variasi Urutan Pengelasan Terhadap Distorsi Sudut Pada Struktur Panel Baja A36*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Syahroni, N., & Hidayat, M. I. (2012). *3D Finite Element Simulation of T-Joint Fillet Weld: Effect of Various Welding Sequences on the Residual Stress and Distortions*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

The International Association of Classification Societies (IACS). 1996. No.47  
*Shipbuilding and Repair Quality Standard*. London: International  
Association Of Classification Societies Ltd.

Totten, G.E., Bates, C.E. dan Clinton, N.A. 1991. *Quenchants and Quenching  
Technology*. ASM international.

Wiryo Sumarto, H., & Okumura, T. (1996). *Teknologi Pengelasan Logam*. Jakarta:  
PT. Pradnya Paramita.

Zakharov, B. (1962). *Heat Treatment of Metal*. Moscow: Peace Publisher.

**LAMPIRAN I**  
***WELDING PROCEDURE***  
***SPECIFICATION***

**WELDING PROCEDURE SPECIFICATION**  
 PREQUALIFIED       QUALIFIED BY TESTING

Company Name : PT. PAL INDONESIA  
 WPS No. : PAL GE-169-WPS  
 Welding Process(es) : SMAW+FCAW  
 Supporting PQR No.(s) : PAL GE-169-PQR  
 Applicable Code : AWS D1.1 / D1.1M : 2010

Revision No. : 0  
 Date : August 9, 2014  
 Type : Manual       Semi-Automatic   
 Machine :      Automatic

**JOINT DESIGN USED**  
 Type : TYK connection branch member and Fillet  
 Single       Double Weld   
 Backing : Yes  No       Backing Material :  
 Root Opening : min. 3 mm  
 Root Face Dimension : max. 1 mm  
 Groove Angle : 37.5° (+10°, -0°)  
 Back Gouging : Yes  No   
 Method :

**POSITION**  
 Position of Groove : All Position  
 Fillet : All Position  
 Vertical Progression : Uphill   
 Downhill

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS**  
 Current : AC       DCEP       DCEN   
 Transfer Mode : Spray Arc

**BASE METALS**  
 Material Spec. : All material as specified in AWS D1.1 table 3.1 group II or equivalent  
 Thickness : Groove : 3 - 12 (Non Impact)  
 Fillet : 8 - 12 (Impact)  
 Diameter ( Pipe ) : Any Size  
 4" (100 mm) and Over

**TECHNIQUE**  
 Stringer or Weave Bead : Stringer and Weave  
 Multipass or Single Pass (per side) : Multipass  
 Number of Electrodes : Single Electrode

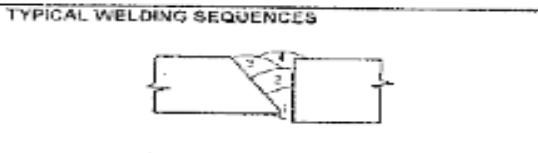
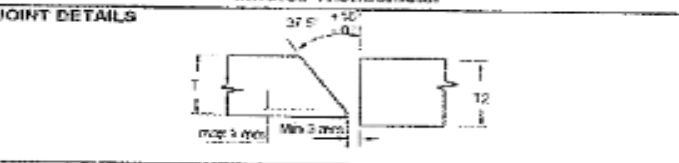
**FILLER METALS**  
 AWS Specification : A5.1 : A5.20  
 A No. : 1 : 1  
 F No. : 4 : 6  
 AWS Classification : E 7018 : E 717-9C-J  
 Brand Name : LB-529 (Kobe) or Equivalent ;  
 Dual Shield II 71HI (ESAB) or Equivalent

- Note:
- Maximum weaving shall not exceed 3 times of electrode core diameter or 12 mm whichever is least (for SMAW)
  - NDT should be conducted 48 hours after welding completion.
  - Preheat for permanent tack weld shall be 50° C higher than specified in WPS which maximum 300° C
  - Welding of each weld shall be continuous.
- In the case that welding must be discontinue, this shall not take place before at least a half of the final weld thickness is achieved.

**SHIELDING**  
 Flux : N/A  
 Electro-Flux (class) : N/A  
 Gas : 99.95% CO2  
 Composition : N/A  
 Flow Rate : 10 - 25 LPM  
 Gas Cup Size : N/A

**PREHEAT**  
 Preheat Temp., Min. : Ambient ( T 3 to 20 mm )  
 85°C ( T over 20 thru 38 mm )  
 110°C ( T over 38 thru 65 mm )  
 150°C ( T over 65 mm )  
 Interpass Temp., Min. : As Preheat Above      Max. 181 °C  
 Preheat Method : By heating torch or heating pad  
 Control Method : Digital, Temperature indicating Crayon or Infrared Thermometer

**POST WELD HEAT TREATMENT**  
 Temp : None  
 Time : None



**WELDING PARAMETERS**

Pass or Weld Layer(s)	Process	Filler Metals Class	Dia (mm)	Current		Volts (V)	Travel Speed (mm/min)	Heat Input (KJ/mm)	Shielding Gas		Remark
				Type & Polarity	Amps [A]				Type	Flow Rate (LPM)	
1st	SMAW	E7018	2.6	DCEP	80 - 85	15 - 25	35 - 55	1.0 - 2.3	-	-	
2nd	FCAW	E717-9C-J	1.2	DCEP	180 - 200	14 - 26	80 - 150	1.5 - 2.5	CO2	10 - 25	
Cap	FCAW	E717-9C-J	1.2	DCEP	150 - 190	17 - 26	85 - 125	1.6 - 2.3	CO2	10 - 25	

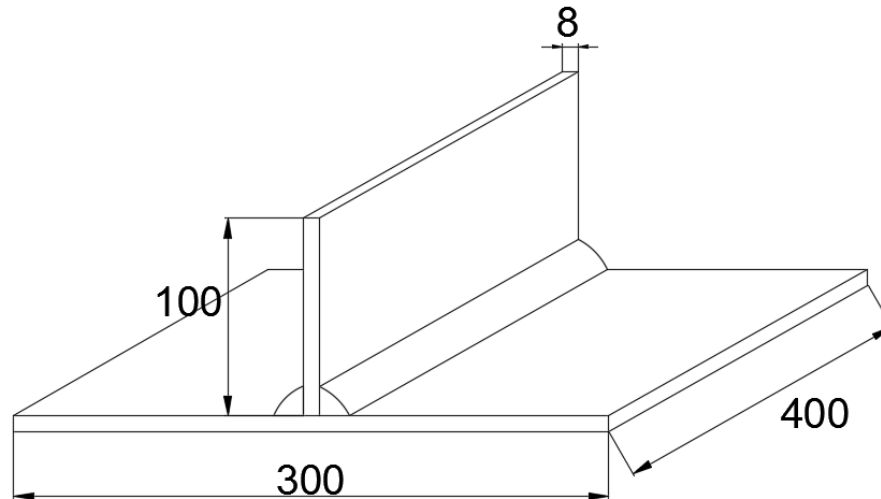
Certified by,  
 PT. PAL INDONESIA

**BAMBANG HARI ROESSANTOSO**  
 WELDING ENGINEER

Approved by Migas

No. Reg 667/10-09/WR/2014  
 Kepala Balai Pengkajian Teknologi Migas  
**Bambang Hardian**  
 Kepala Balai Pengkajian Teknologi Migas  
 +62 21 935 3225 100703 2007

Jenis Material : ASTM A36  
Metode Pengelasan : SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*)  
Jenis Sambungan : T-joint  
Dimensi (mm) : 300 x 400x 100  
Tebal (mm) : 8



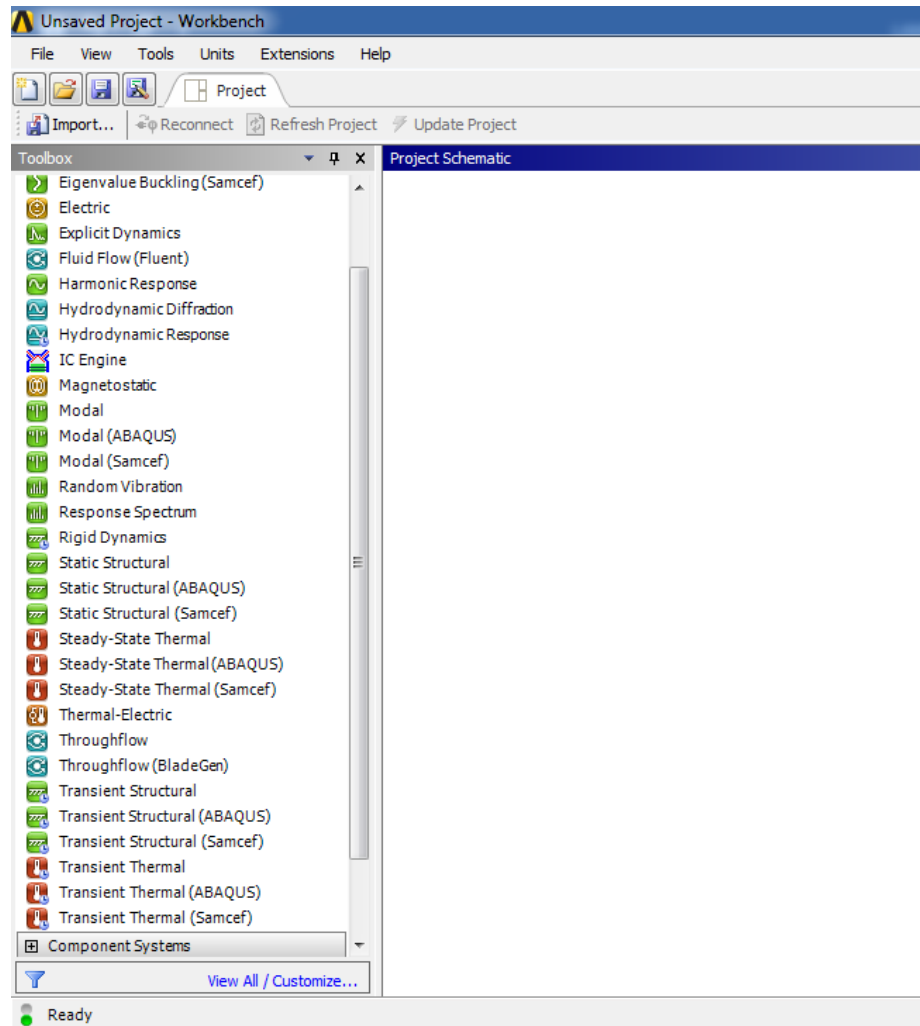
Position : Horizontal 2F  
Weld Quality Level : Commercial  
Steel Weldability : Good  
Weld Size, L (mm) : 6,35  
Pass : 1  
Electrode Class : E 7024  
Electrode Size (mm) : 4,7625  
Current (amp) AC : 275  
Arc Speed (in/min) : 35.0 – 55.0



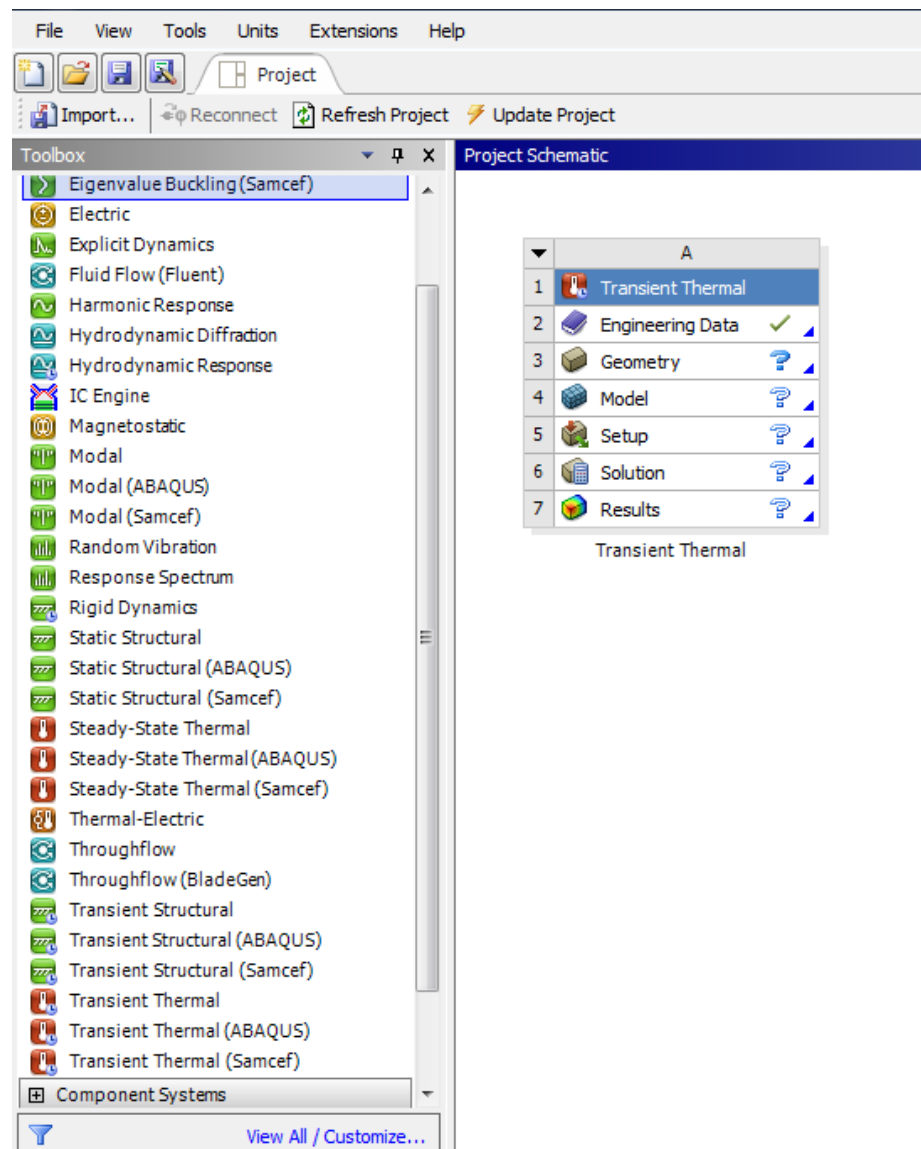
**LAMPIRAN II**  
**LANGKAH ANALISIS**  
***TRANSIENT THERMAL***

## 1. Mulai Workbench 16.0

Setelah *software* workbench 16.0 dibuka akan muncul tampilan awal, kemudian pilih *transient thermal* seperti pada Gambar II.1 dan Gambar II.2 dibawah:



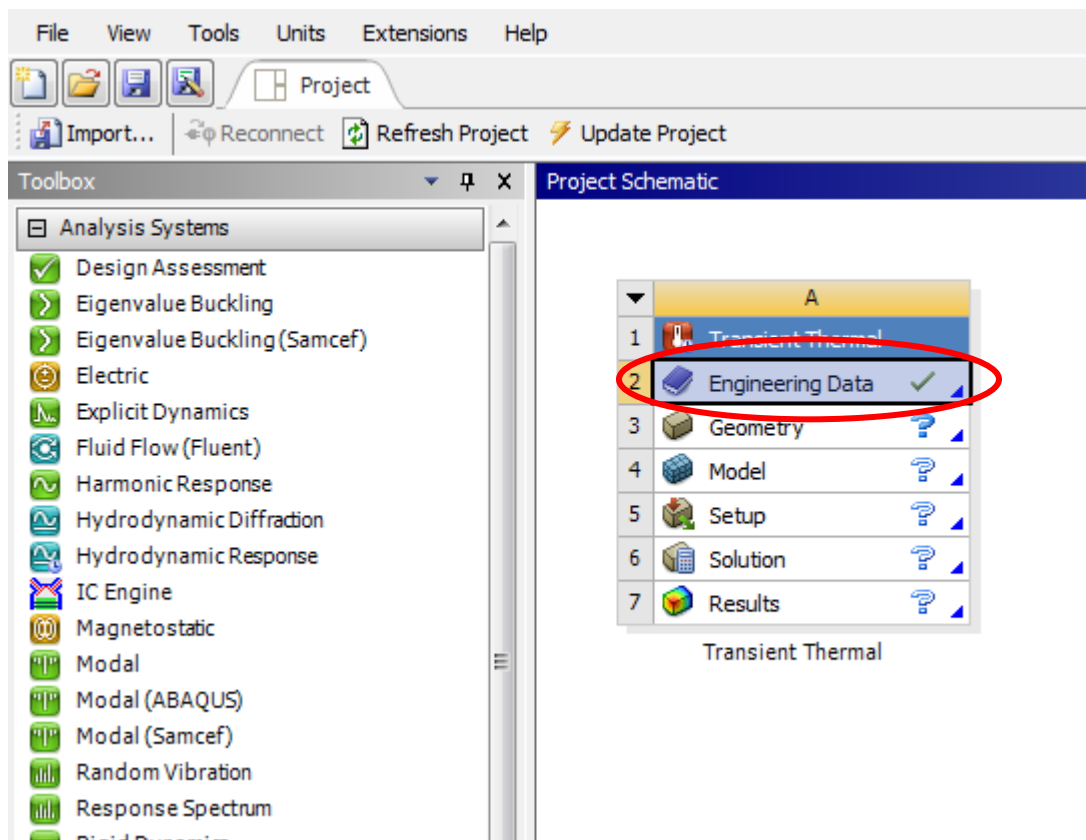
**Gambar II.1** Tampilan awal workbench 16.0



**Gambar II.2** Tampilan awal *transient thermal*

## 2. *Input Engineering Data*

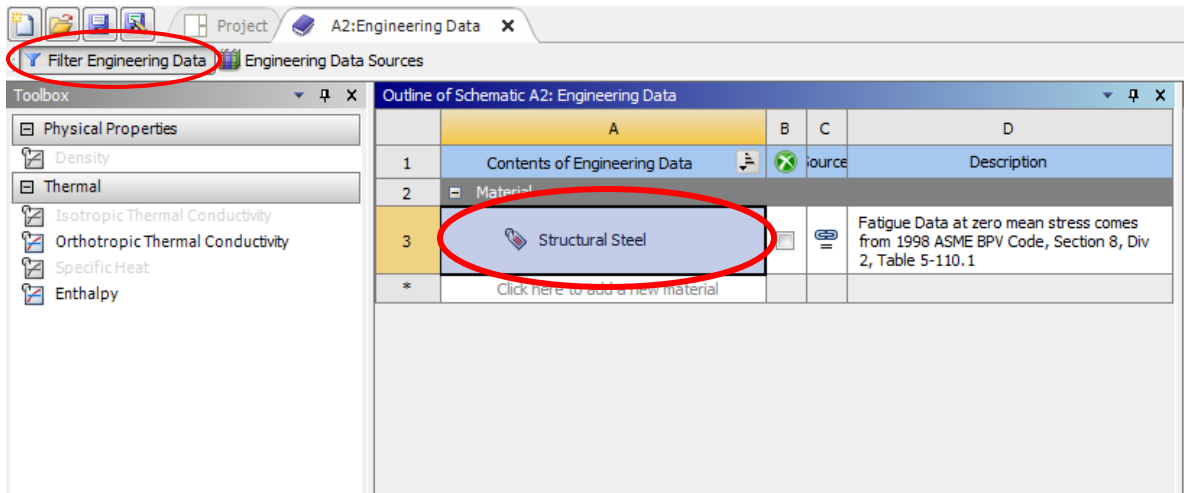
Langkah berikutnya adalah mengganti *Engineering Data*, data yang diganti merupakan data *Structural Steel* menjadi data material yang dikehendaki. Material yang digunakan pada tugas akhir ini merupakan Baja ASTM A36, cara mengganti *Engineering Data* pada *software* ANSYS Workbench 16.0 dapat dilihat pada Gambar II.3 dibawah:



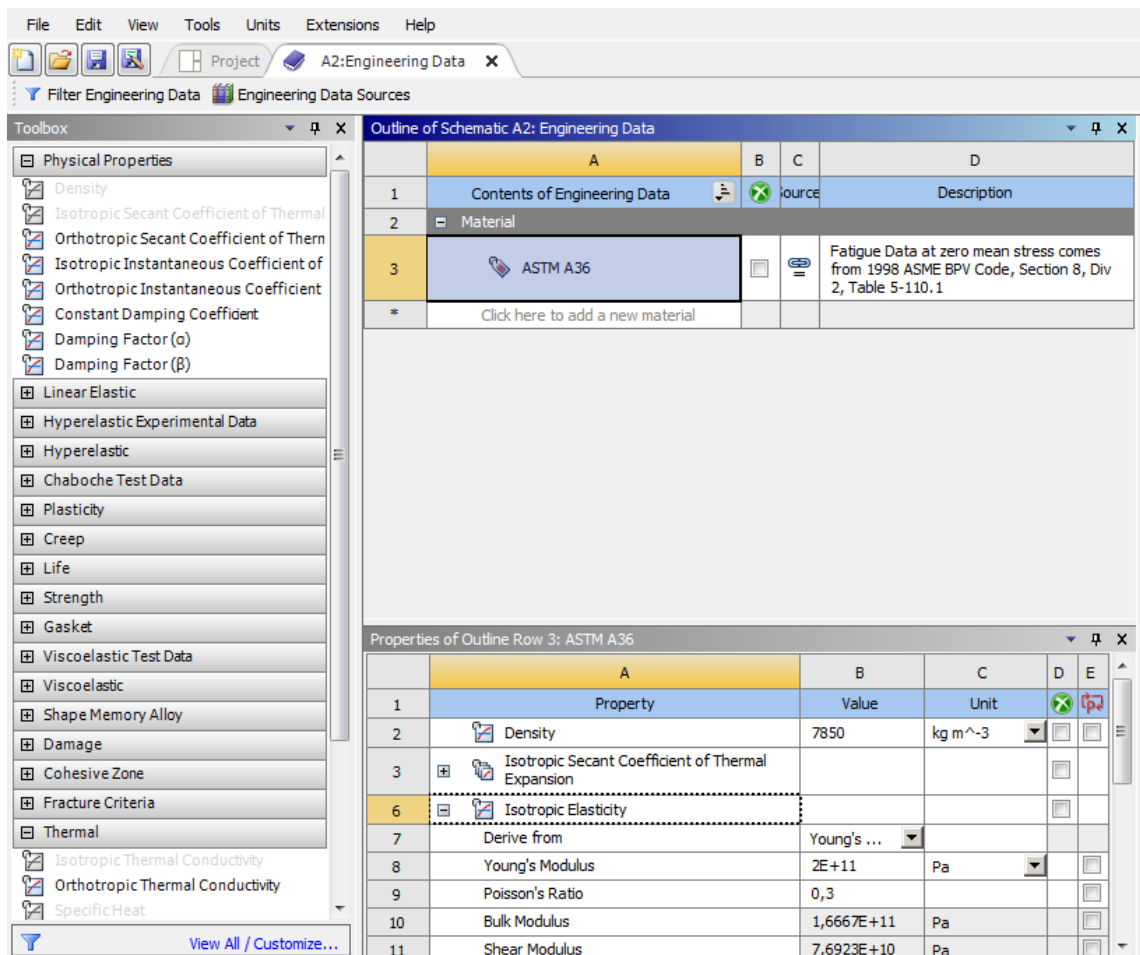
**Gambar II.3** Double-click Engineering Data

Berikutnya, rename data *Structural Steel* menjadi material baja yang dikehendaki, ganti *Structural Steel* menjadi ASTM A36. Kemudian klik *Filter Engineering Data*, agar seluruh spesifikasi *Structural Steel* dapat terlihat, lalu ganti dengan spesifikasi ASTM A36 seperti berikut:

- **Density** = 7860 kg m<sup>3</sup>
- **Isotropic Elasticity**
  - Derive from* = *Shear Modulus and Poisson's Ratio*
  - Poisson's Ratio* = 0,26
  - Shear Modulus* = 79300 Mpa
- **Tensile Yield Strength** = 250 Mpa
- **Tensile Ultimate Strength** = 500 Mpa
- **Spesific Heat** = 43 W/m K
- **Isotropic Thermal Conductivity** = 440 J/kg K



**Gambar II.4** Klik *Filter Engineering Data* dan rename *Sturctural Steel*



**Gambar II.5** Tampilan setelah *Filter Engineering Data* dimatikan

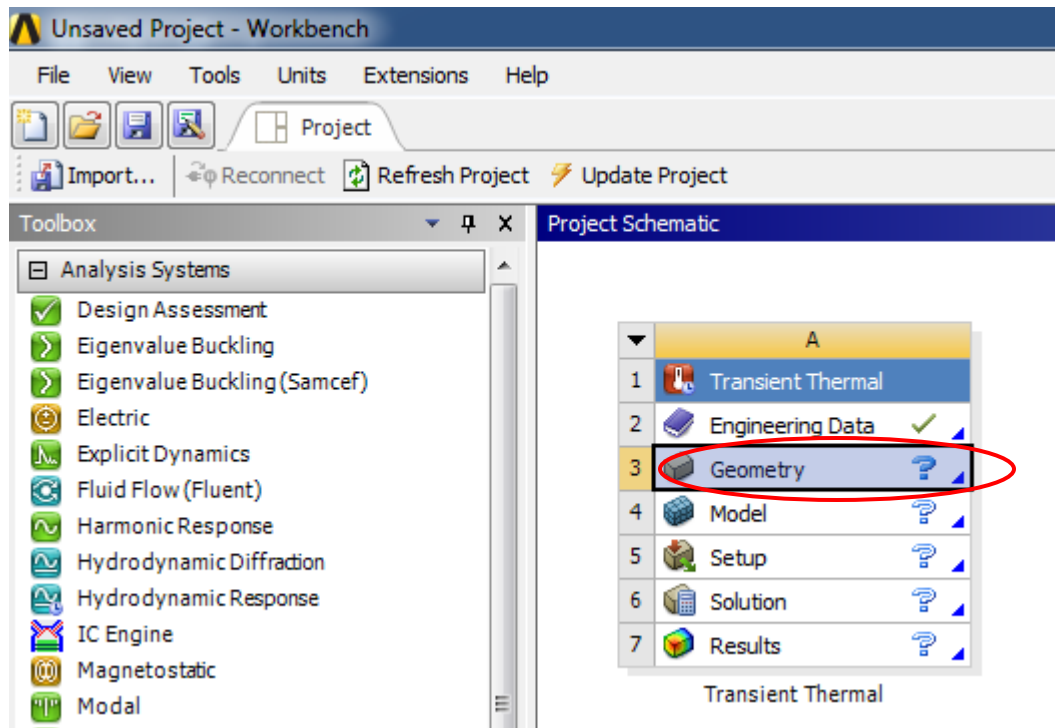
Properties of Outline Row 3: ASTM A36				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
2	Density	7860	kg m <sup>-3</sup>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			<input type="checkbox"/>
6	Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>
7	Derive from	Shear Modu...		
8	Young's Modulus	1,9984E+11	Pa	<input type="checkbox"/>
9	Poisson's Ratio	0,26		<input type="checkbox"/>
10	Bulk Modulus	1,3878E+11	Pa	<input type="checkbox"/>
11	Shear Modulus	79300	MPa	<input type="checkbox"/>
12	Field Variables			
13	Temperature	Yes		
14	Shear Angle	No		
15	Degradation Factor	No		
16	Alternating Stress Mean Stress	Tabular		<input type="checkbox"/>
20	Strain-Life Parameters			<input type="checkbox"/>
28	Tensile Yield Strength	250	MPa	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
29	Compressive Yield Strength	2,5E+08	Pa	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
30	Tensile Ultimate Strength	500	MPa	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
31	Compressive Ultimate Strength	0	Pa	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
32	Isotropic Thermal Conductivity	43	W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
33	Specific Heat	440	J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
34	Isotropic Relative Permeability	10000		<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
35	Isotropic Resistivity	1,7E-07	ohm m	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

**Gambar II.6** Ganti spesifikasi *Structural Steel* menjadi ASTM A36

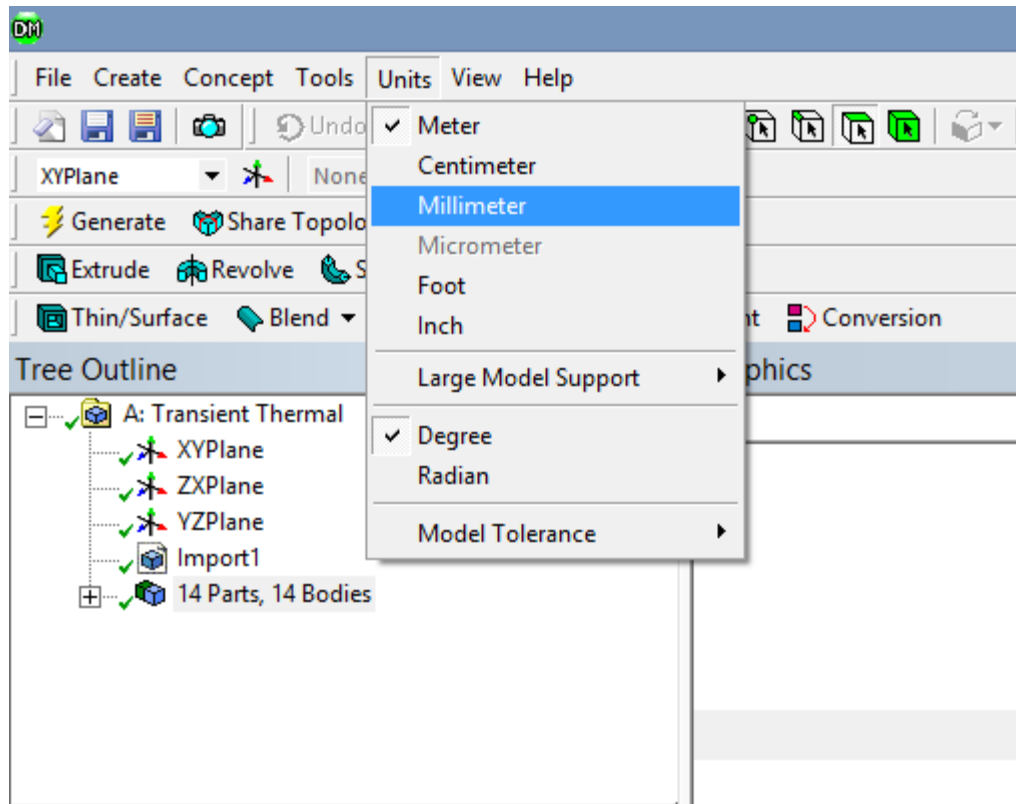
Setelah mengganti seluruh spesifikasi yang telah tersedia, langkah berikutnya *save project* dan tutup *Engineering Data*.

### 3. *Input Geometry*

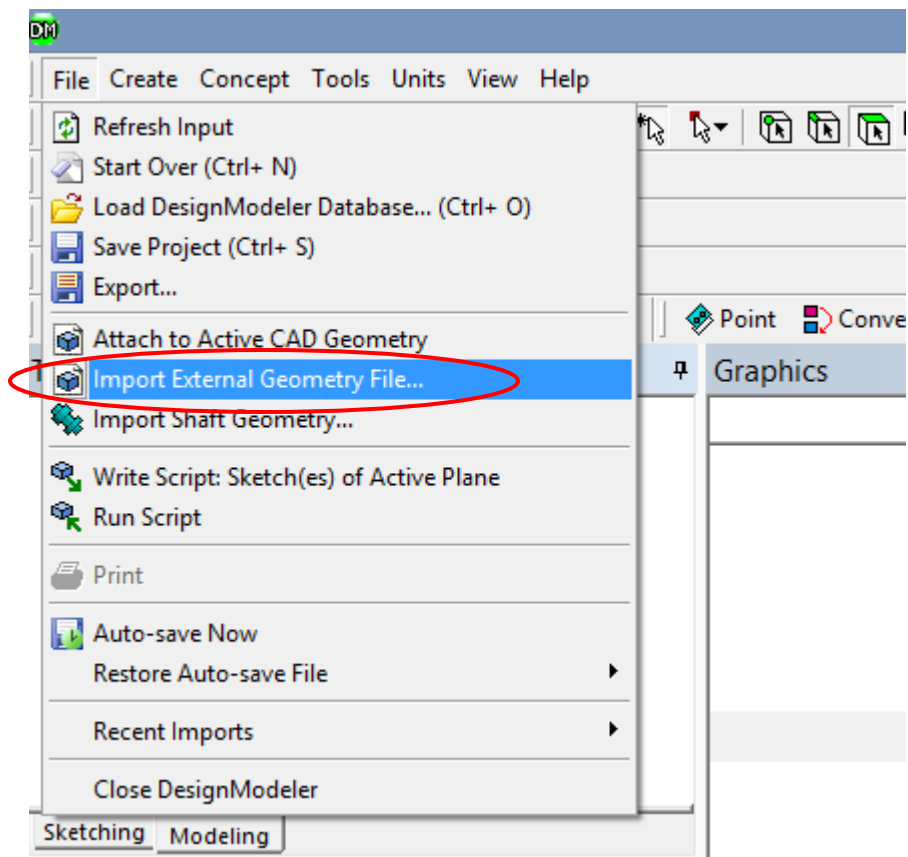
Langkah berikutnya yaitu melakukan *Input Geometry* 3D spesimen yang telah dirancang menggunakan *software* SolidWorks 2013 maupun Autodesk Inventor 2015. Untuk file yang akan dimasukkan ke Workbench 16.0 disarankan dengan format “.IGS”. Setelah membuka pilihan *Geometry*, pastikan *Units* diganti terlebih dahulu sesuai dengan satuan Geometri 3D yang telah dirancang kemudian klik *Generate*.



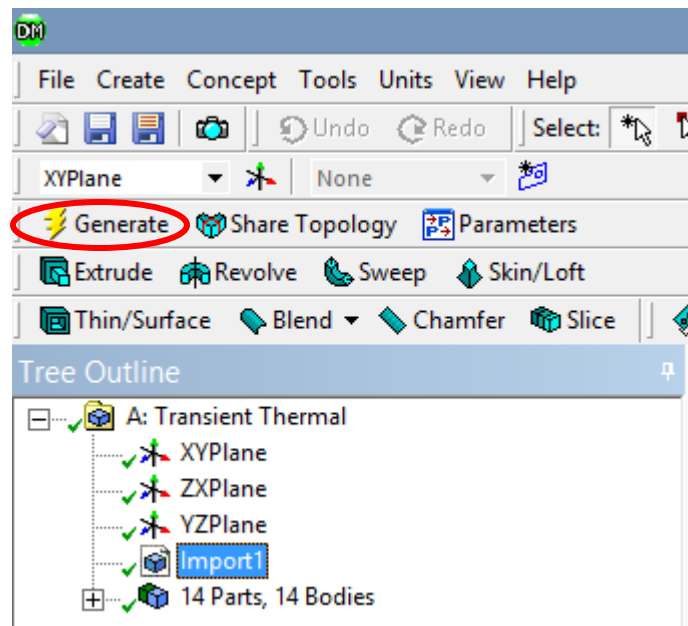
**Gambar II.7** Double-click Geometry



**Gambar II.8** Ganti Units sesuai dengan satuan model geometri 3D

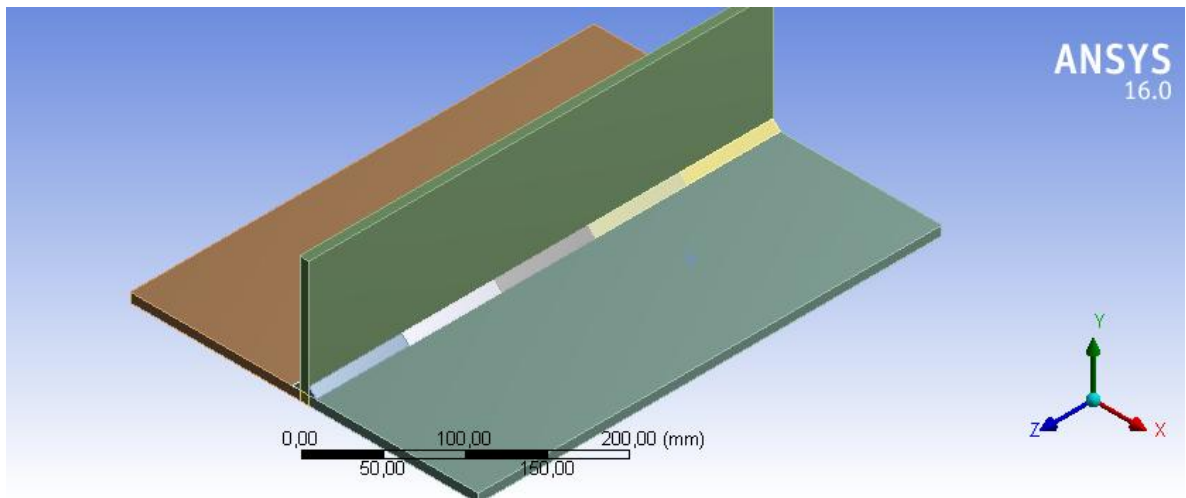


**Gambar II.9** Klik *Import External Geometry* dan masukan geometri 3D



**Gambar II.10** Klik *Generate* kemudian *save project*



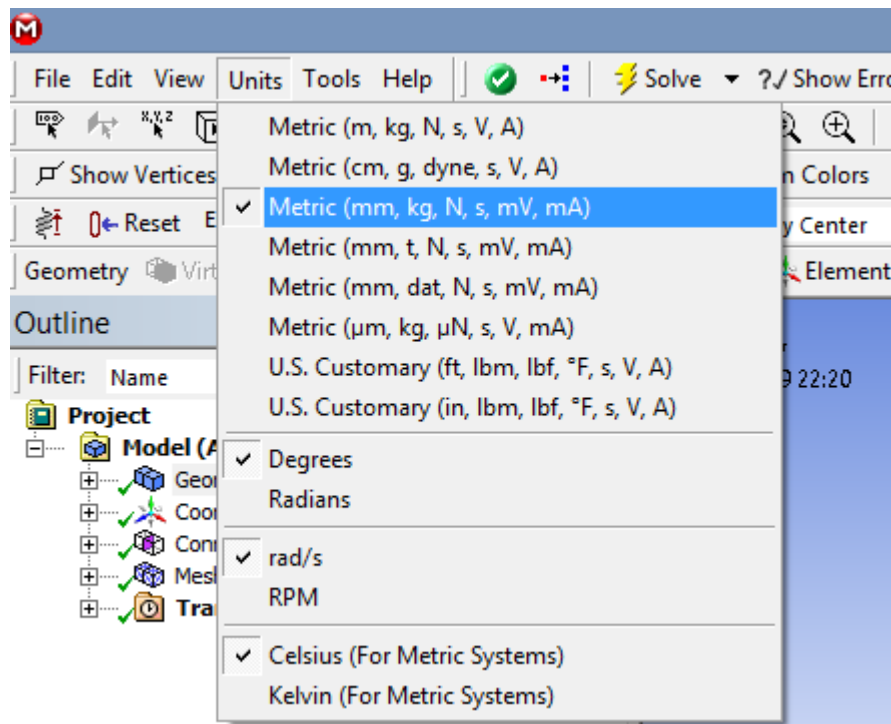


**Gambar II.11** Contoh geometri 3D yang telah di *import*

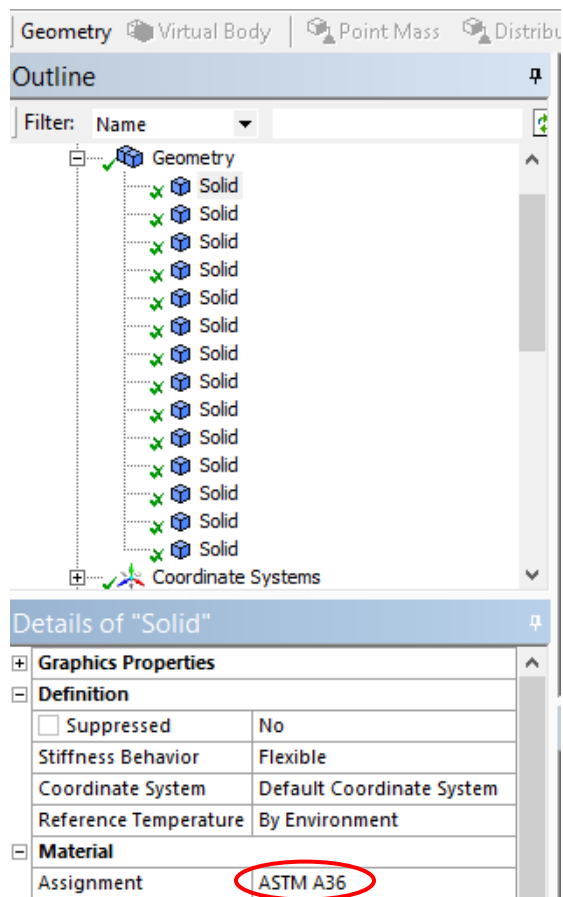
Setelah geometri telah di *Generate* dan *save*, tutup *DesignModeler* dan buka *Model*.

#### 4. Analisis Model

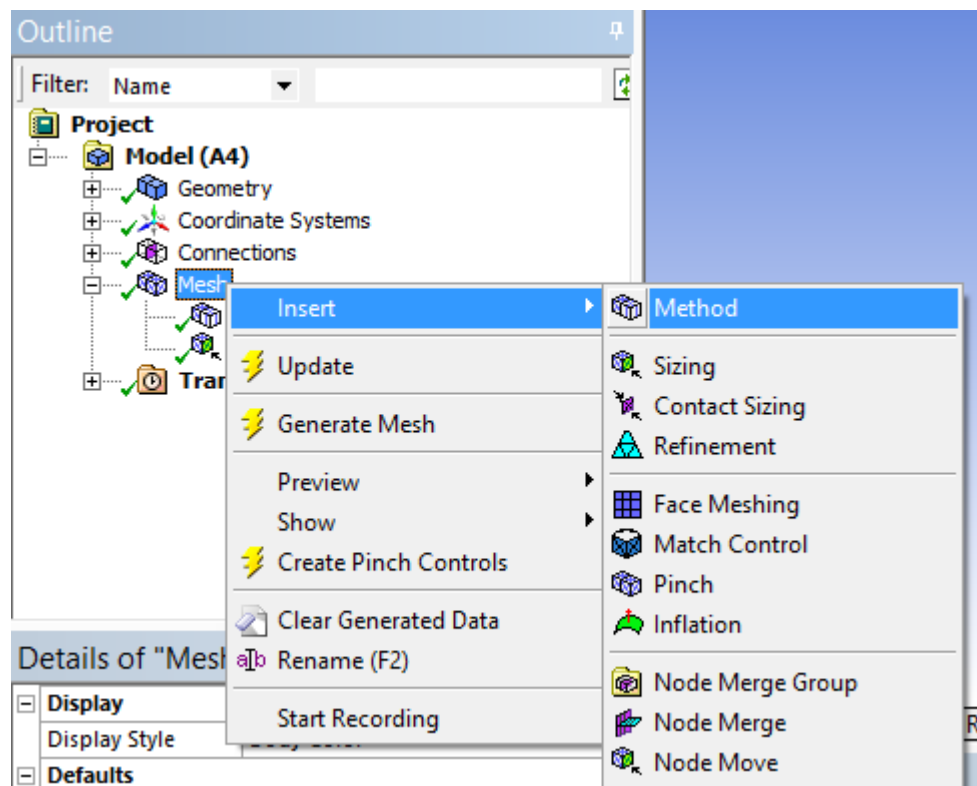
Langkah berikutnya untuk analisis model yaitu mengganti *Units* yang sesuai dengan model, *Units* yang digunakan pada penelitian kali ini yaitu *Metric* (mm, kg, N, s, mV, mA). Kemudian memilih jenis *Material Assignment* pada geometri, lalu menentukan *meshing* pada model geometri.



**Gambar II.12** Pemilihan *Units*



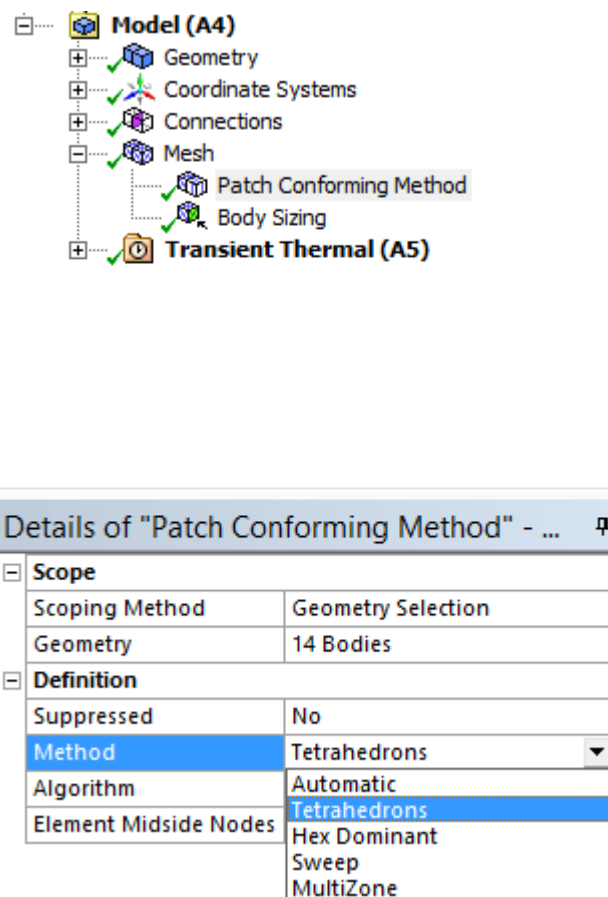
Gambar II.13 Ganti *material assignment* dengan ASTM A36



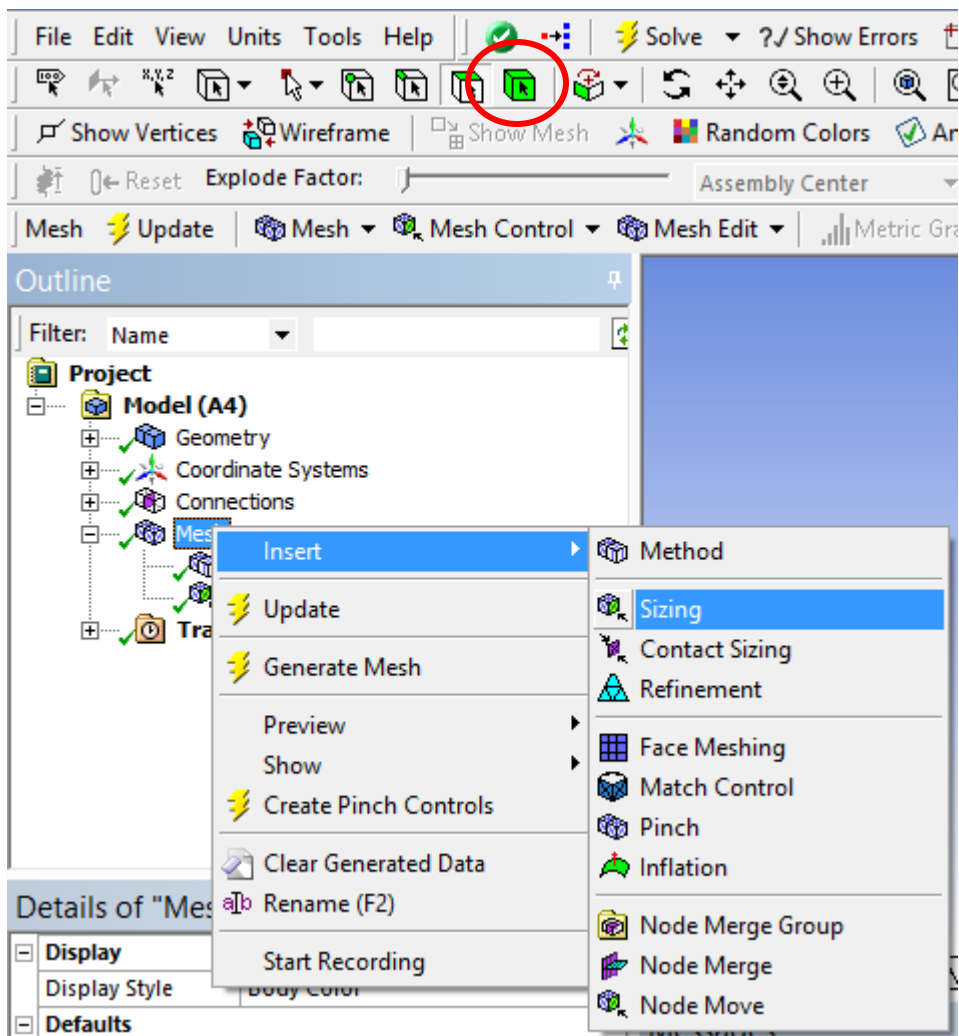
Gambar II.14 Langkah metode *meshing*

## 5. *Insert Mesh*

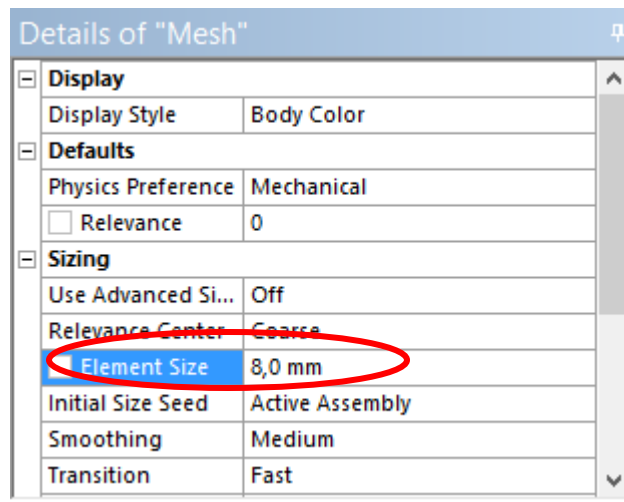
*Meshing* dilakukan untuk pendiskritan model agar mendekati keadaan yang sebenarnya. Pada saat memulai *meshing*, hal pertama yang harus dilakukan merupakan pemilihan *method*, pada pemilihan *method* akan diberikan lima pilihan, yaitu *Automatic*, *Tetrahedrons*, *Hex Dominant*, *Sweep*, dan *MultiZone*. Penelitian kali ini menggunakan metode *meshing Tetrahedrons*. Langkah kedua yaitu menentukan *sizing* atau ukuran *meshing*. Pada saat menentukan ukuran *meshing*, bagian yang hendak diberikan pembebanan diberikan ukuran yang lebih kecil agar hasil yang didapatkan semakin detail. Bagian yang hendak diberi ukuran lebih kecil dapat dilakukan dengan dua metode yaitu *Sizing* dan *Contact sizing*. Pada penelitian kali ini digunakan metode *Sizing* dengan memilih *Body* pada bagian yang hendak diberikan beban *Heat Flux* maupun *Temperature*. Setelah semua langkah pada *meshing* dilakukan, klik kanan pada *Mesh* kemudian klik *Generate Mesh*. . Jika input yang digunakan benar, maka akan ditandai dengan centang hijau.



**Gambar II.15** Pemilihan jenis metode *meshing*



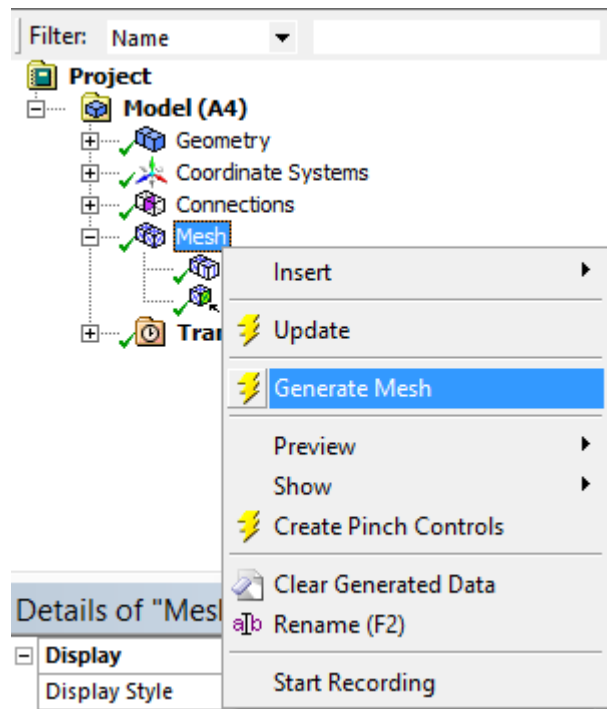
**Gambar II.16** Pemilihan jenis *Body Sizing* pada *meshing*



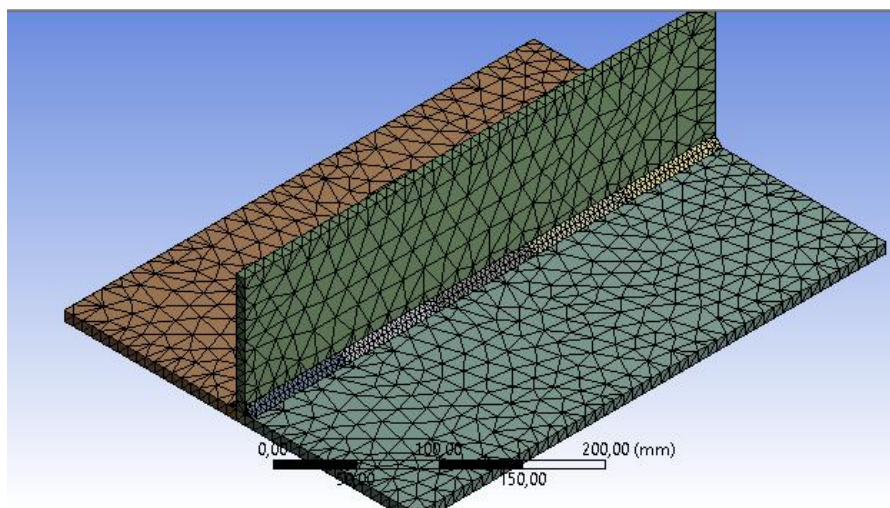
**Gambar II.17** Memilih ukuran *meshing* pada seluruh geometri

Details of "Body Sizing" - Sizing	
<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	10 Bodies
<b>Definition</b>	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	4, mm
Behavior	Soft

**Gambar II.18** Memilih ukuran *meshing* pada bagian *Body Sizing*



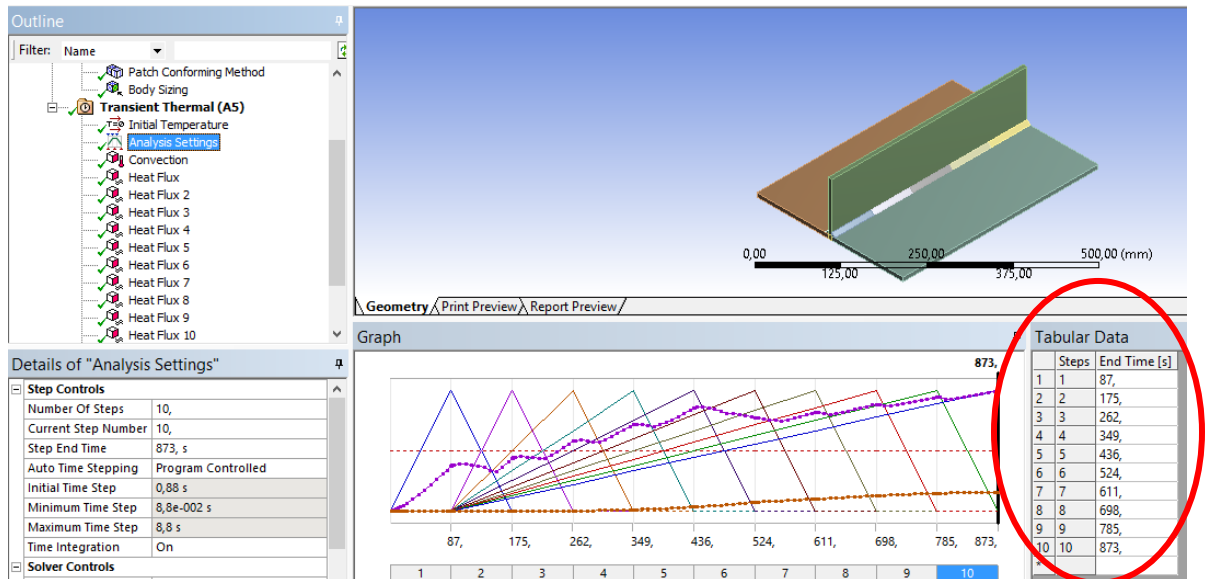
**Gambar II.19** Klik kanan dan *Generate Mesh*



**Gambar II.20** Tampilan hasil akhir *meshing*

## 6. Insert Analysis Settings

Pada *Analysis Settings*, data yang diperlukan adalah waktu yang digunakan selama proses pemanasan atau pengelasan. Masukkan *Time-Step*, yaitu waktu yang dibutuhkan pada setiap elemen pada saat pengelasan maupun pemanasan. *Time-Step* dapat dibagi tiap waktunya dengan Microsoft Excel, kemudian di *copy-paste* pada ANSYS Workbench di bagian *Tabular Data*, klik kanan pada kolom *End Time*, lalu pilih *Paste Cell* hasil dari Microsoft Excel. . Jika input yang digunakan benar, maka akan ditandai dengan centang hijau.



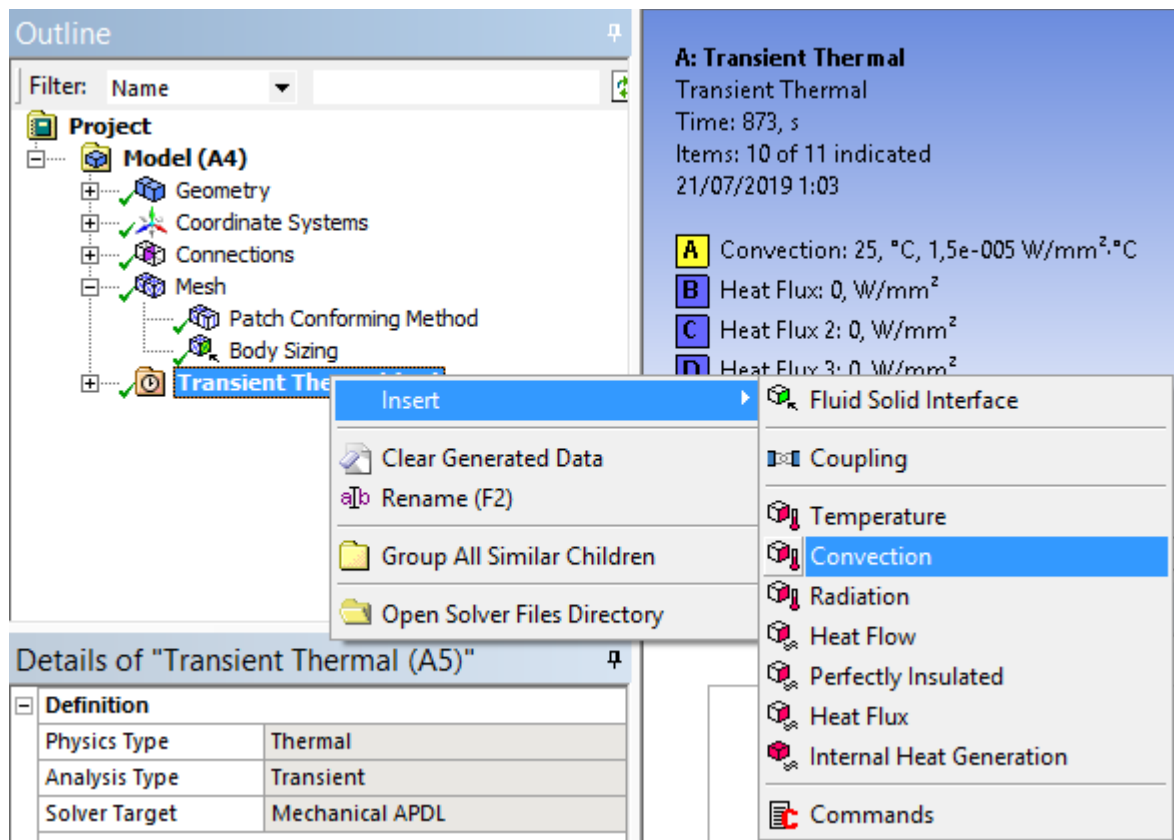
Gambar II.21 Contoh tampilan *Time-Step* pada Workbench

Tabular Data		
	Steps	End Time [s]
1	1	87,
2	2	175,
3	3	262,
4	4	349,
5	5	436,
6	6	524,
7	7	611,
8	8	698,
9	9	785,
10	10	873,
*		

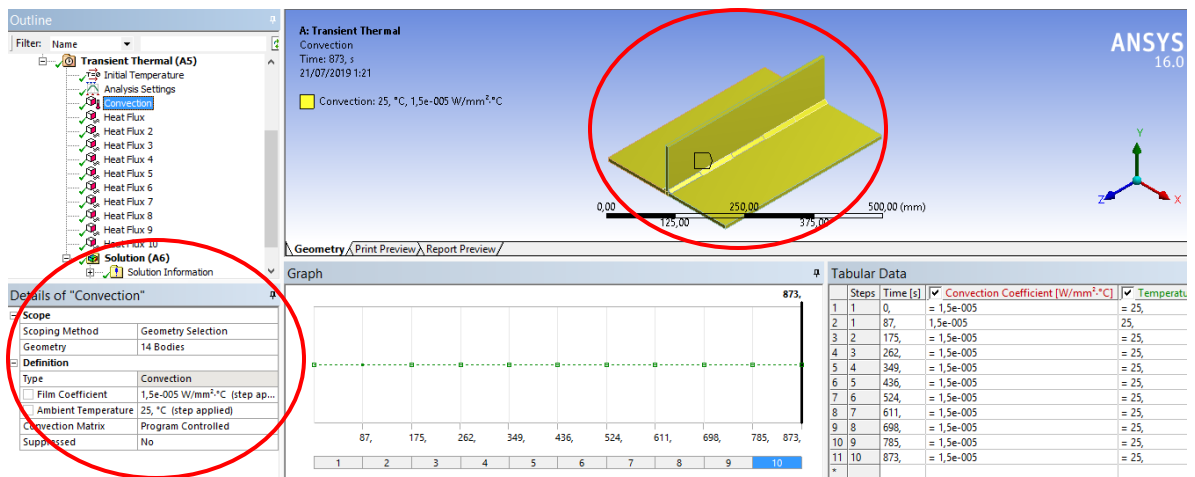
Gambar II.22 Contoh tampilan *Time-Step* pada pengelasan

## 7. *Insert Convection*

*Convection* adalah beban yang harus dimasukkan untuk analisis *Transient Thermal*. Nilai *Film Coefficient* yang digunakan adalah  $1,5e-005 \text{ W/mm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  dengan *Ambient Temperature*  $25^\circ\text{C}$ . Langkah-langkah yang dilakukan adalah klik kanan pada *Transient Thermal*, pilih *Insert*, lalu pilih *Convection*. Seleksi semua *Bodies* yang ada pada model di bagian *Scope-Geometry*. Kemudian, masukan nilai *Film Coefficient* dan *Ambient Temperature* sesuai data yang akan digunakan. Jika input yang digunakan benar, maka akan ditandai dengan centang hijau.



**Gambar II.23** Klik kanan kemudian *Insert Convection*

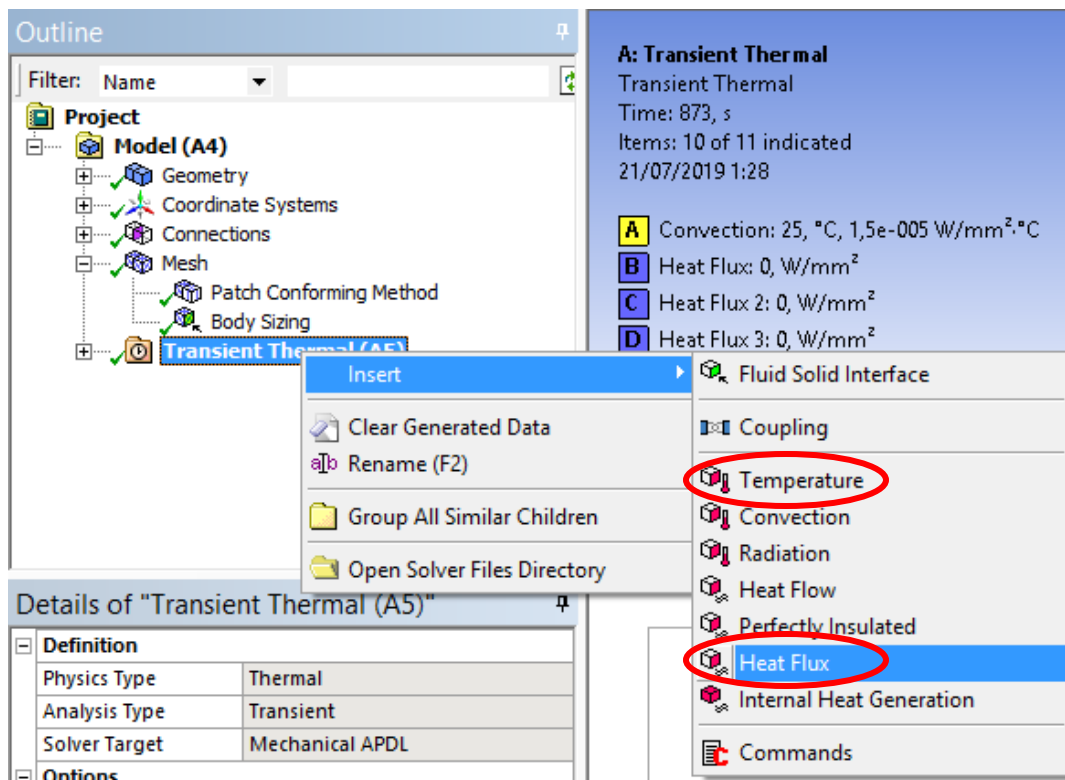


Gambar II.24 Contoh hasil *Insert Convection*

### 8. *Insert Heat Flux* atau *Temperature*

Jumlah *heat flux* yang dimasukkan pada model pengelasan T-joint penelitian ini adalah 10 *heat flux*. Sedangkan untuk jumlah *temperature* yang dimasukkan pada model *line heating* berdasarkan variasi 1, 2, dan 3 yaitu 20, 30, dan 40 *temperature*. Langkah-langkah *input* beban termal *heat flux* adalah sebagai berikut:

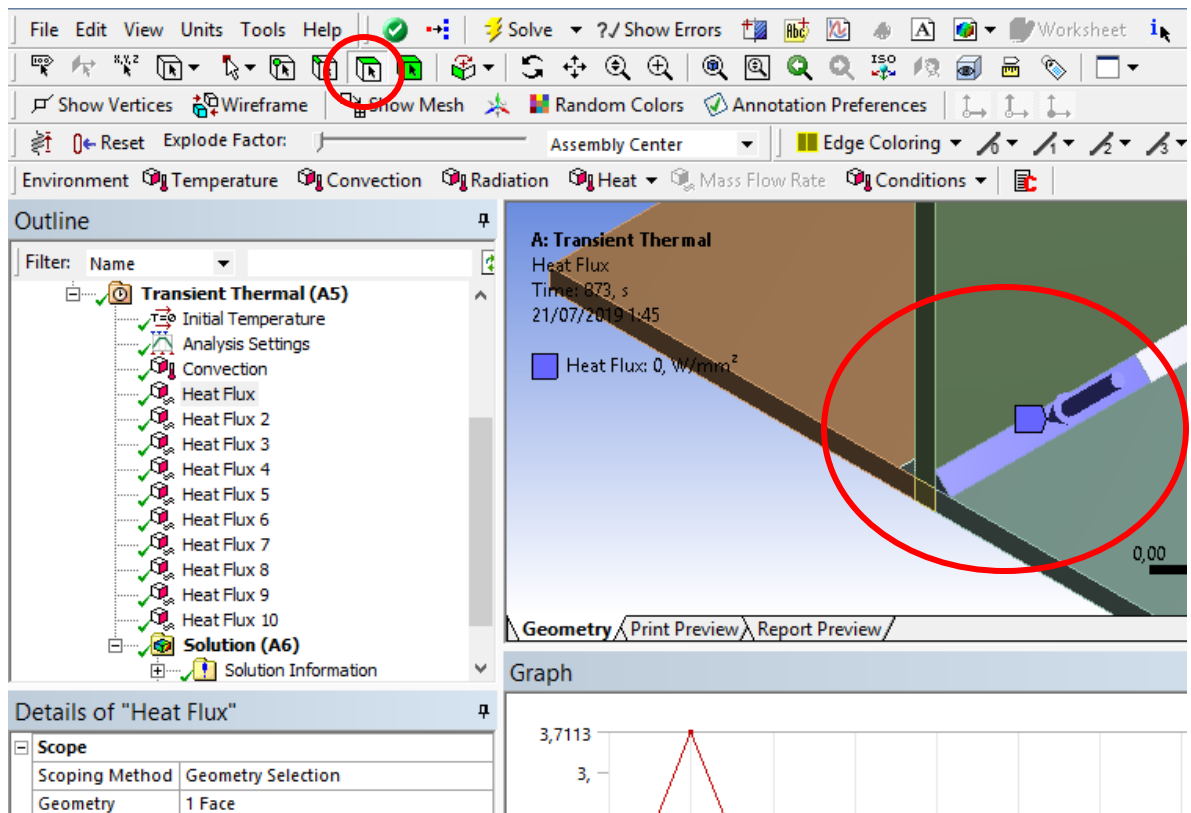
- Klik kanan pada *Transient Thermal*, pilih *Insert*, lalu pilih *Heat Flux* untuk pengelasan dan pilih *Temperature* untuk proses pemanasan.



Gambar II.25 Contoh cara *Insert Heat Flux* atau *Temperature*

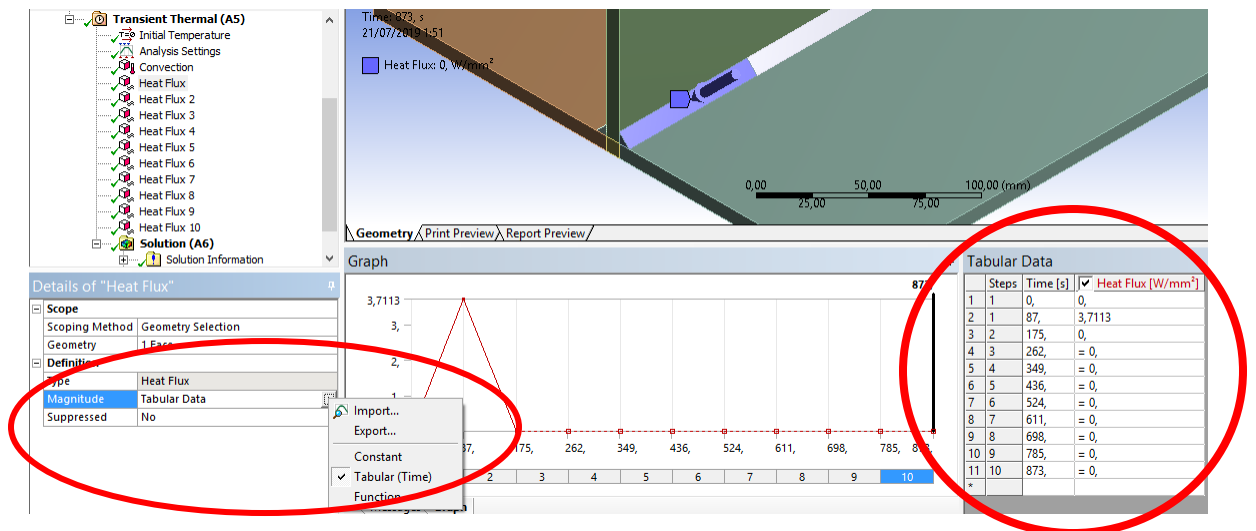


- Lakukan pemilihan lokasi *heat flux* atau *temperature* yang akan diterapkan pada bagian model. Penerapan *heat flux* atau *temperature* harus di *input* pada bagian *Face* model.



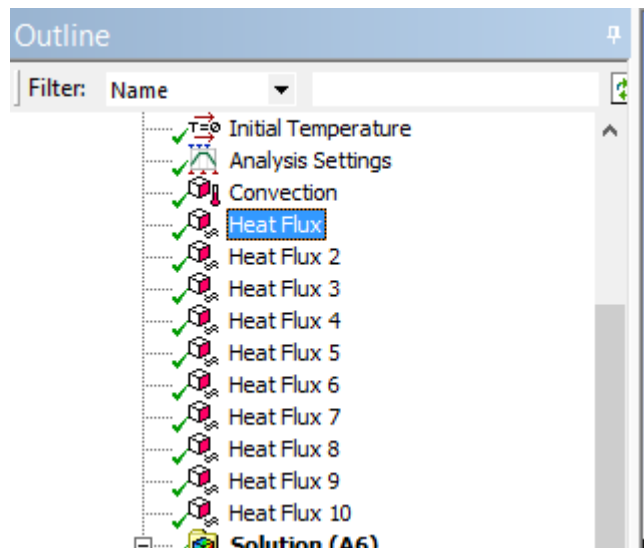
Gambar II.26 Contoh *Insert Heat Flux* bagian *face* geometri

- Masukkan nilai *Heat Flux* atau *Temperature* yang digunakan. Pada *Definition-Magnitude*, pilih *Tabular*, lalu masukkan nilai *Heat Flux* atau *Temperature* sesuai pada step yang telah ditetapkan.



Gambar II.27 Contoh *input* nilai *heat flux* dan pilihan *tabular data*

- Kemudian lakukan langkah yang sama untuk setiap *heat flux* atau *temperature* yang ingin ditambahkan. Jika *heat flux* atau *temperature* berhasil ditambahkan, maka akan ditandai dengan centang hijau.

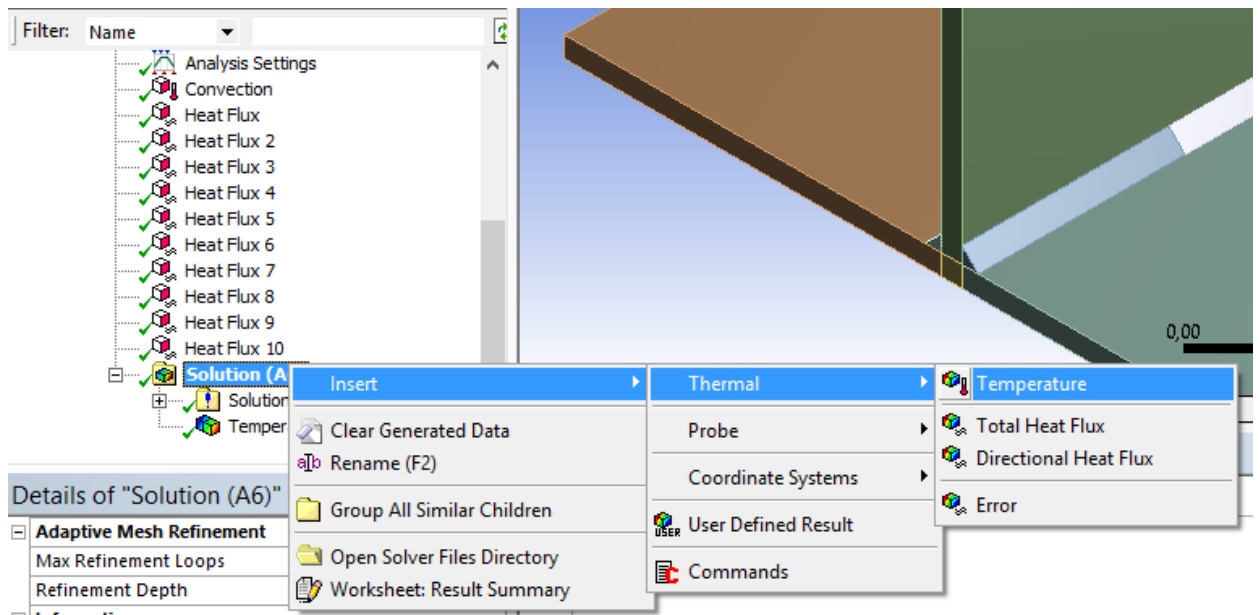


**Gambar II.28** Contoh *input* nilai *heat flux* yang sudah berhasil

### 9. *Insert Solution*

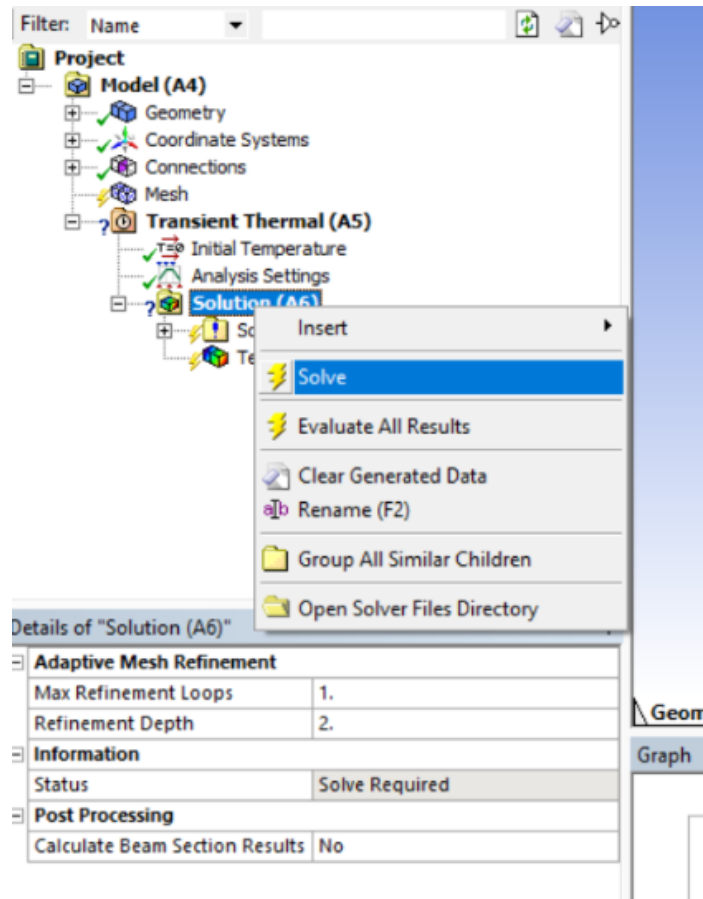
Solusi yang ingin diketahui dari analisa *Transient Thermal* adalah temperatur pada model yang terjadi selama proses pengelasan. Langkah-langkah yang dilakukan adalah sebagai berikut:

- Klik kanan pada *Solution* (A6), pilih *Insert*, pilih *Thermal*, lalu pilih *Temperature*.



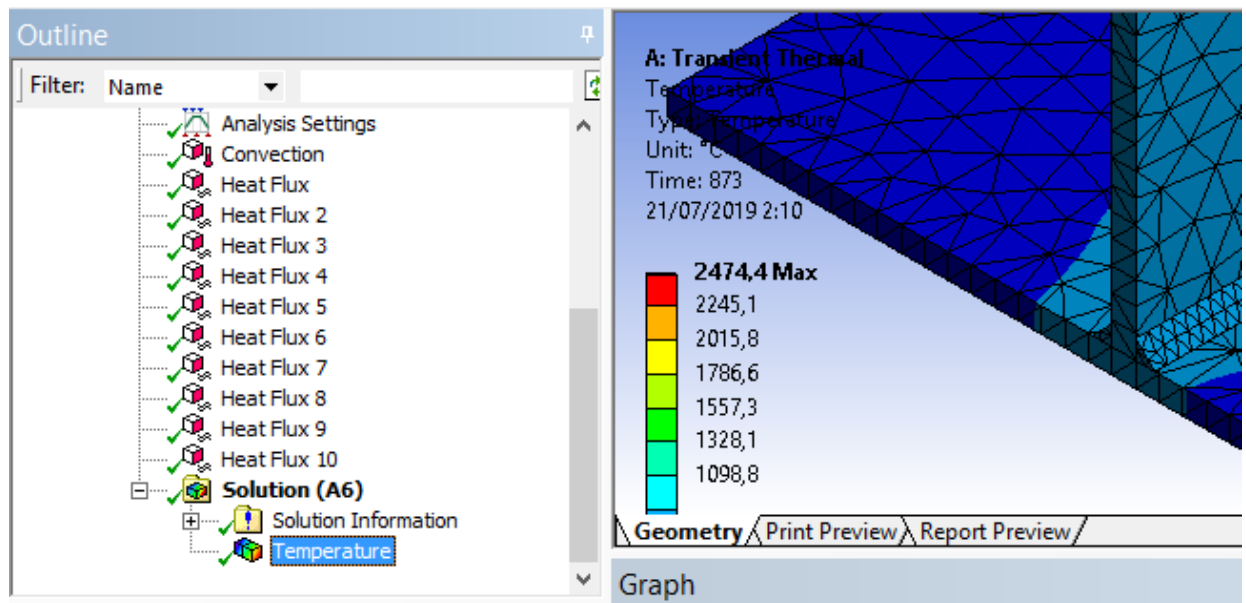
**Gambar II.29** *Insert Thermal Temperature*

- Klik kanan pada *Solution (A6)*, lalu pilih *Solve* untuk memulai analisa.



**Gambar II.30** *Solve Thermal Temperature*

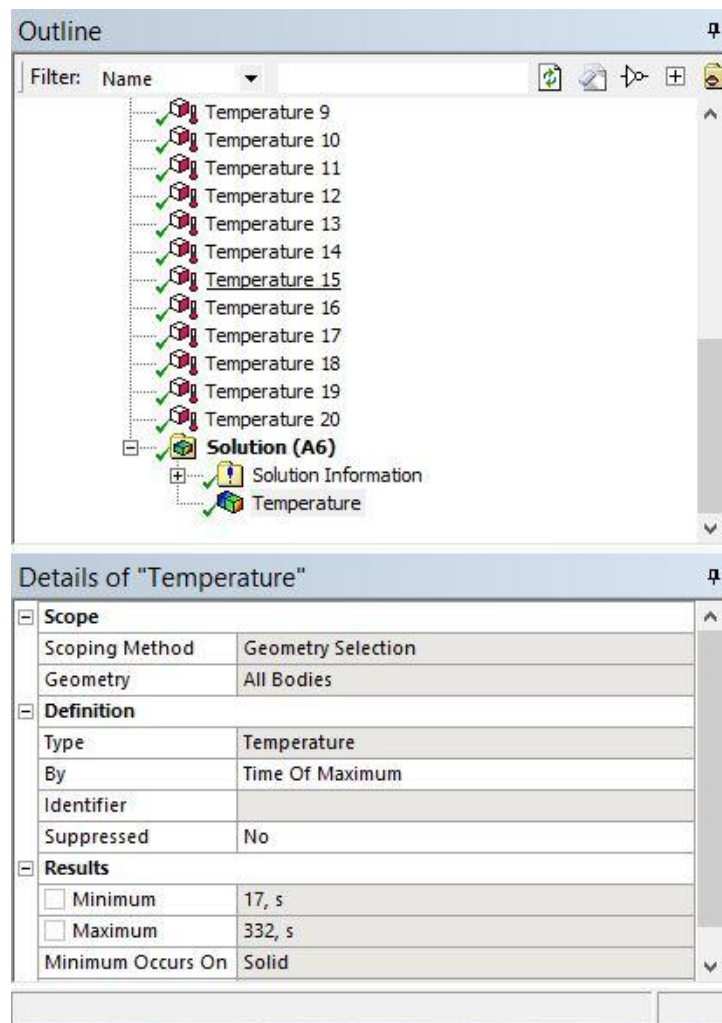
- Jika hasil analisa sudah selesai, maka akan ditandai dengan centang hijau.



**Gambar II.31** Contoh hasil *Thermal Temperature*

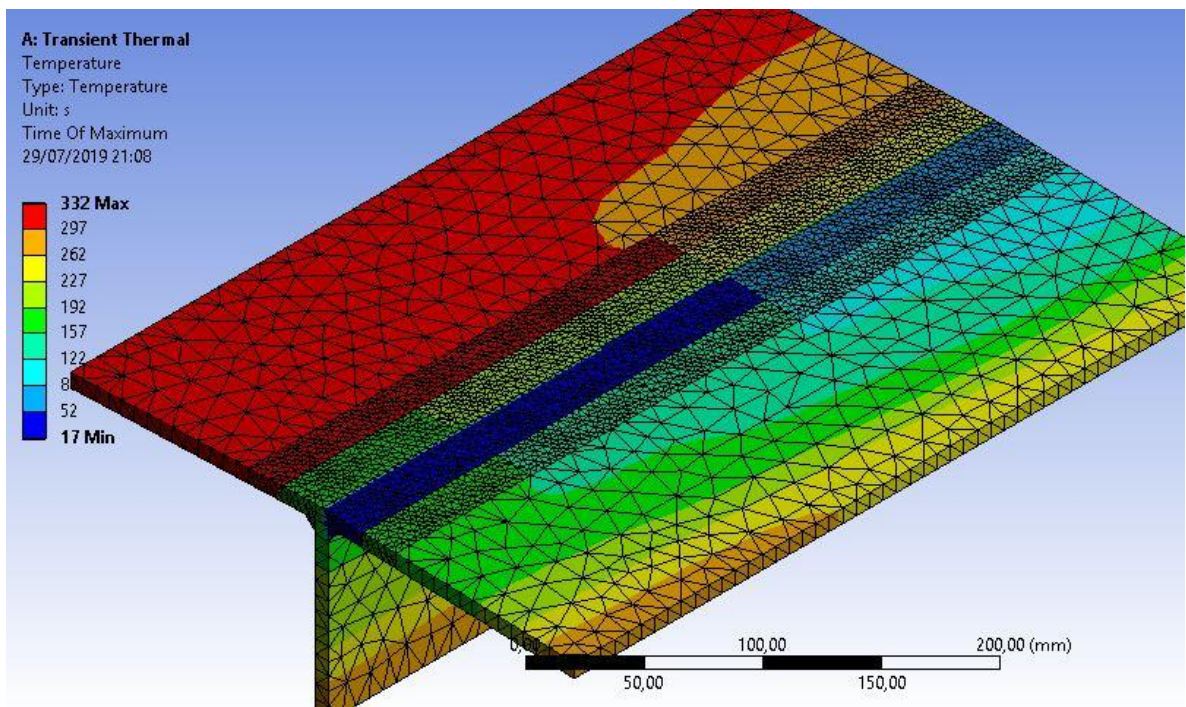
**LAMPIRAN III**  
**HASIL ANALISIS *TRANSIENT***  
***THERMAL***

Hasil analisis *transient thermal* pada pemodelan numerik *line heating* variasi 1, *line heating* variasi 2, dan *line heating* variasi 3, menggunakan *definition by time of maximum*. *Definition by time of maximum* menunjukkan waktu pada saat pemodelan dimana terjadi persebaran suhu yang paling tinggi nilainya. Nilai suhu yang di *input* pada pemodelan numerik *line heating* sebesar 200°C. Penulis menggunakan *definition* ini untuk menunjukkan persebaran suhu yang terjadi pada spesimen dapat dilihat dengan jelas dibanding *definition* yang lainnya. *Time of maximum* dapat dipilih melalui *result temperature*, kemudian cari *definition* dan ganti “*by*” menjadi *Time Of Maximum* seperti pada Gambar III.1 dibawah. Hasil dari analisis *transient thermal* menggunakan *definition by time of maximum* pada pemodelan numerik *line heating* variasi 1, *line heating* variasi 2, dan *line heating* variasi 3 dapat dilihat pada Gambar III.2 sampai dengan Gambar III.4 dibawah.

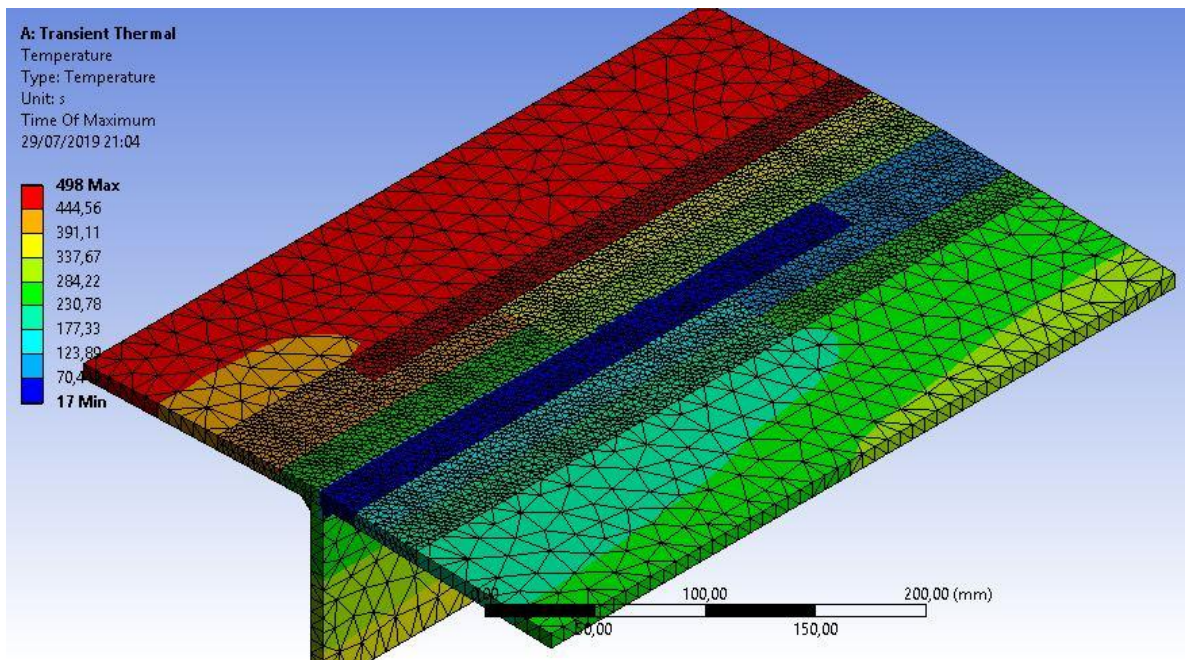


**Gambar III.1** Contoh pemilihan *definition by Time Of Maximum*

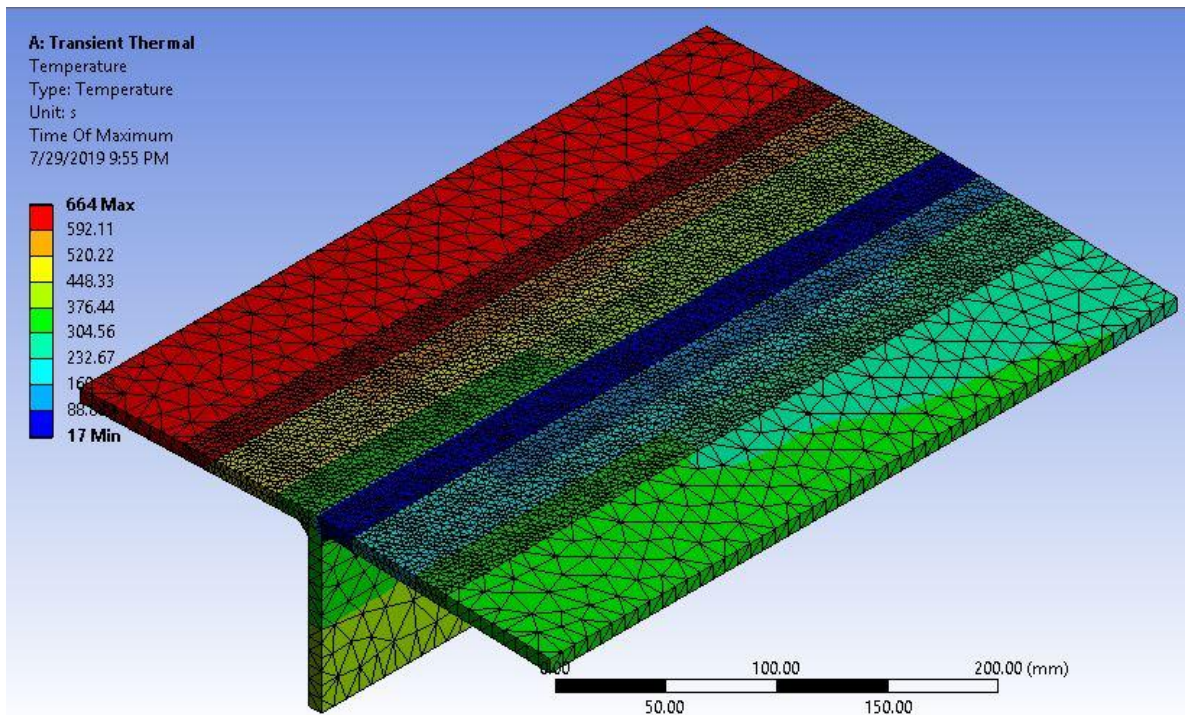




**Gambar III.2** Hasil analisis *transient thermal line heating* variasi 1

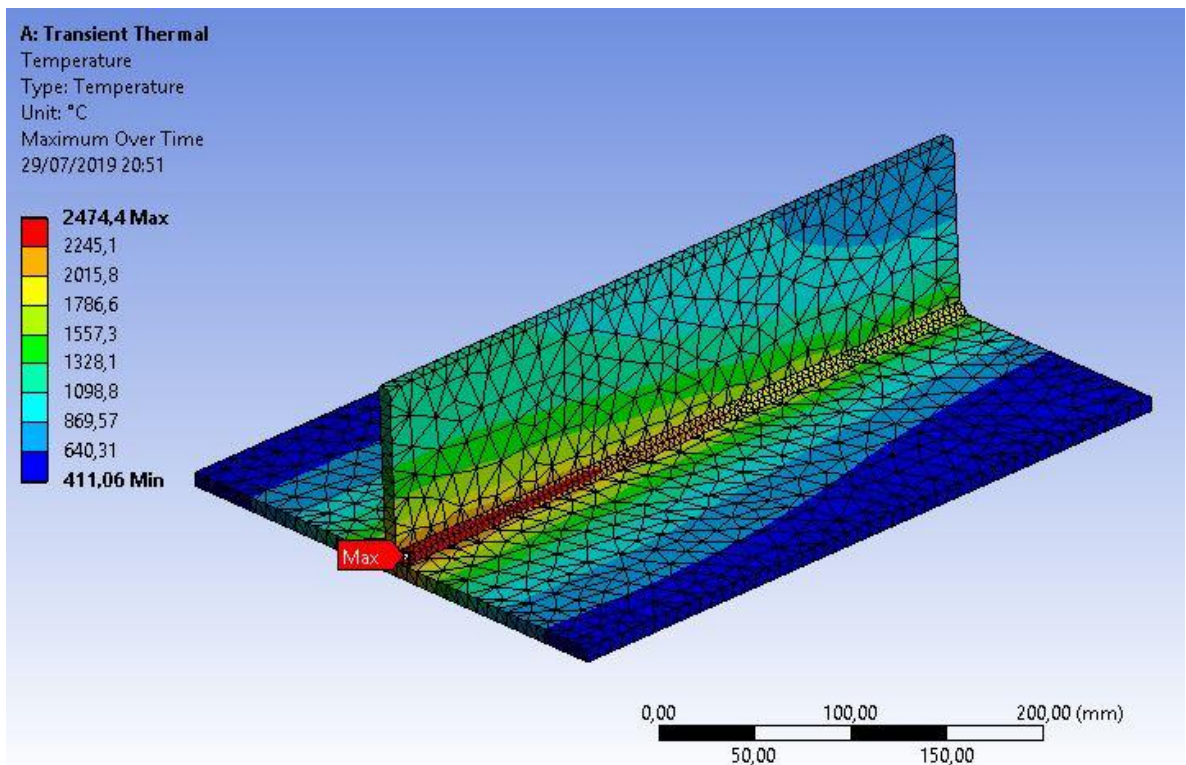


**Gambar III.3** Hasil analisis *transient thermal line heating* variasi 2



**Gambar III.4** Hasil analisis *transient thermal line heating* variasi 3

Sedangkan untuk pemodelan numerik pengelasan, hasil analisis *transient thermal* menggunakan *definition by last time* untuk mengetahui persebaran suhu yang terjadi pada saat proses pengelasan pemodelan numerik berakhir.



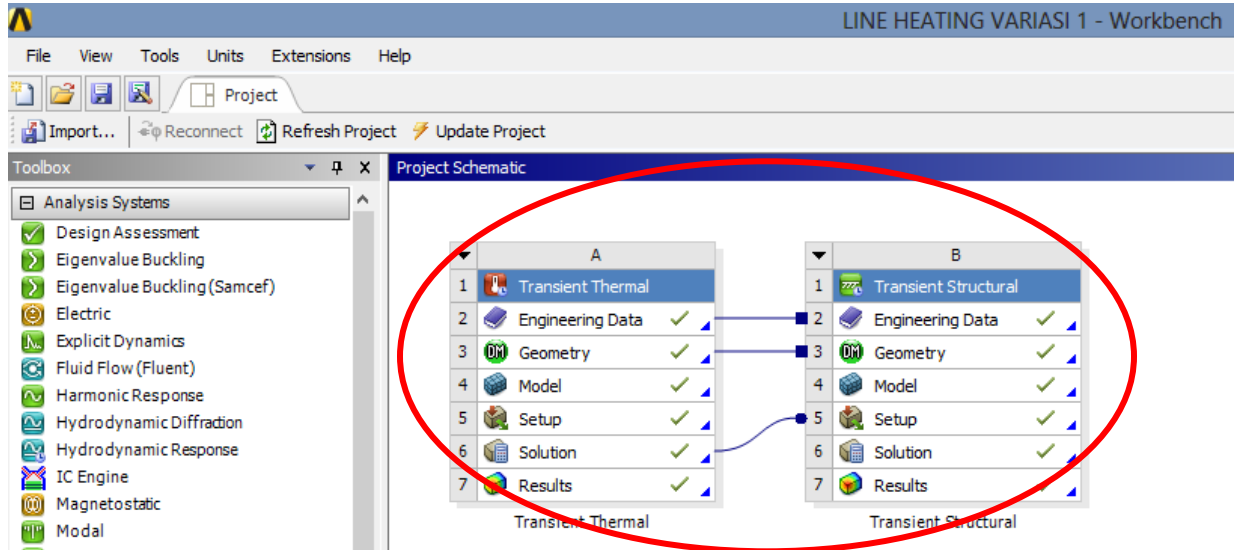
**Gambar III.5** Hasil analisis *transient thermal* pengelasan

**LAMPIRAN IV**  
**LANGKAH ANALISIS**  
***TRANSIENT STRUCTURAL***



## 1. Mulai Workbench 16.0

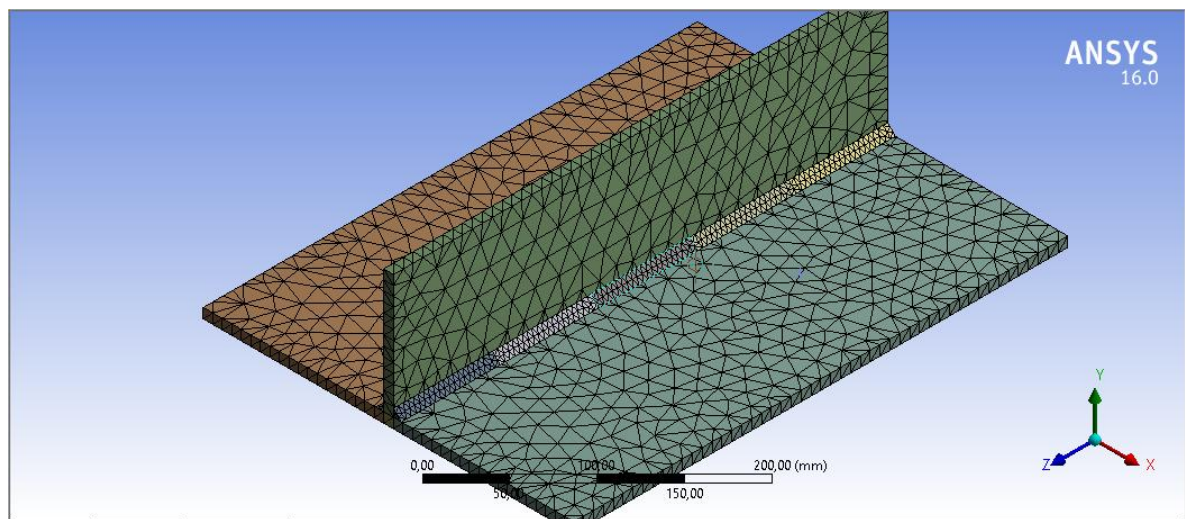
Setelah analisis *transient thermal* selesai, kembali ke layar workbench 16.0 lagi dan *double-click* pilihan *transient structural*. Kemudian *drag* hasil dan data *transient thermal* ke kolom *transient structural* seperti gambar dibawah:



Gambar IV.1 Drag Engineering Data, Geometry, dan Solution

## 2. Insert Mesh

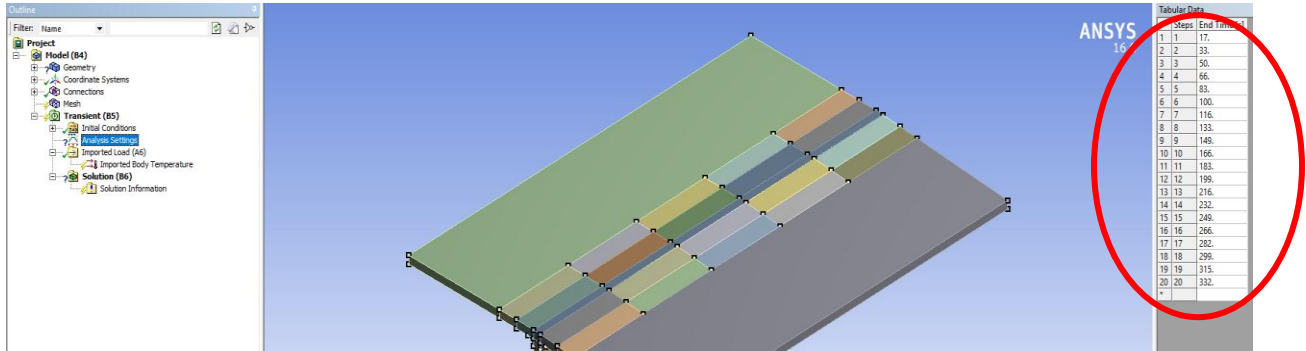
Meshing yang dilakukan untuk analisis *transient structural* sama dengan meshing pada *transient thermal*. Pada analisis *transient structural* metode meshing dan sizing yang digunakan juga sama dengan *transient thermal* yaitu *Tetrahedrons* dan *Body Sizing*. Jika input yang digunakan benar, maka akan ditandai dengan centang hijau.



Gambar IV.2 Contoh hasil meshing transient structural

### 3. Insert Analysis Settings

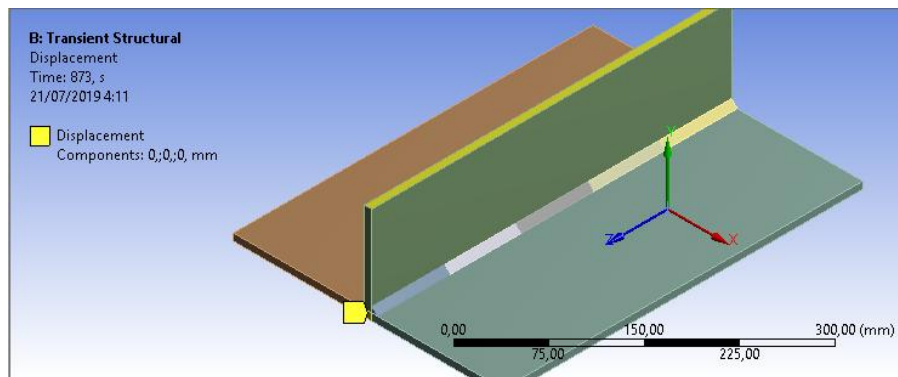
Pada *Analysis Settings*, data *Time-Step* yang dimasukan merupakan waktu yang sama dengan *Time-Step* yang dimasukan pada *Transient Thermal*. Jika input yang digunakan benar, maka akan ditandai dengan centang hijau.



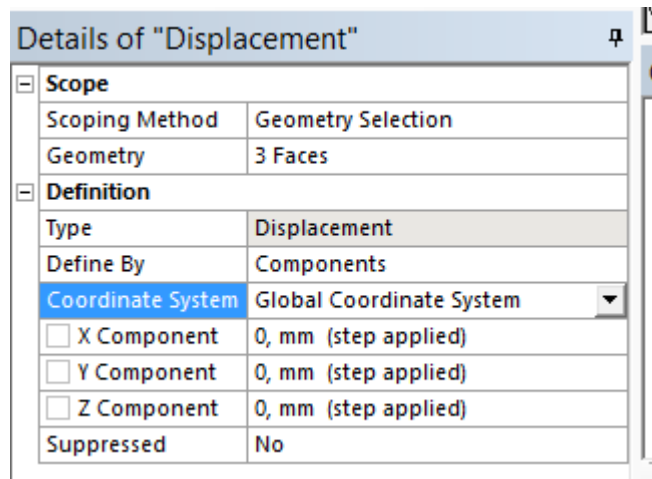
Gambar IV.3 Contoh tampilan *Time-Step Transient Structural*

### 4. Menentukan *Displacement*

*Displacement* yang dimaksud pada analisis transient structural merupakan boundary condition. *Displacement* ditentukan dengan mengunci daerah atau bagian yang tidak terpengaruh oleh perubahan bentuk yang disebabkan oleh beban termal. Daerah yang dikunci dengan *displacement* ini harus sesuai dengan kondisi nyata spesimen pada saat eksperimen, daerah mana yang tidak mengalami perubahan bentuk merupakan daerah yang harus dikunci. Penguncian dilakukan dengan memasukkan nilai 0 pada *coordinate system* pada sumbu x, y dan z agar tidak terjadi perpindahan pada titik atau daerah tersebut. Langkah-langkah yang dilakukan adalah klik kanan pada *Transient(B5)*, pilih *Insert*, lalu pilih *Displacement*. Pilih daerah yang dianggap sebagai *boundary condition* kemudian input nilai 0 pada sumbu x, y, dan z. Jika input yang digunakan benar, maka akan ditandai dengan centang hijau.



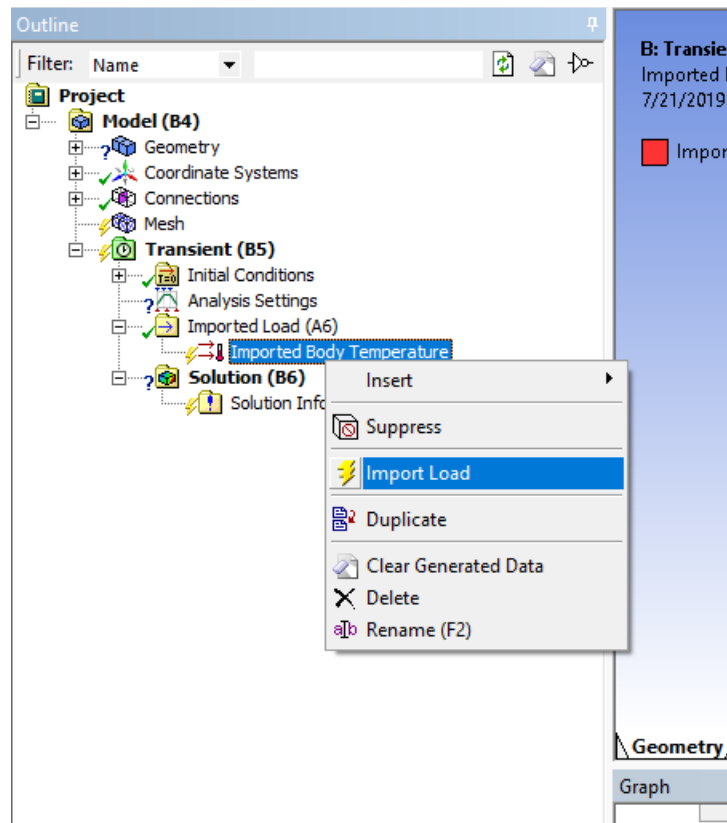
Gambar IV.4 Contoh pemilihan *face boundary condition*



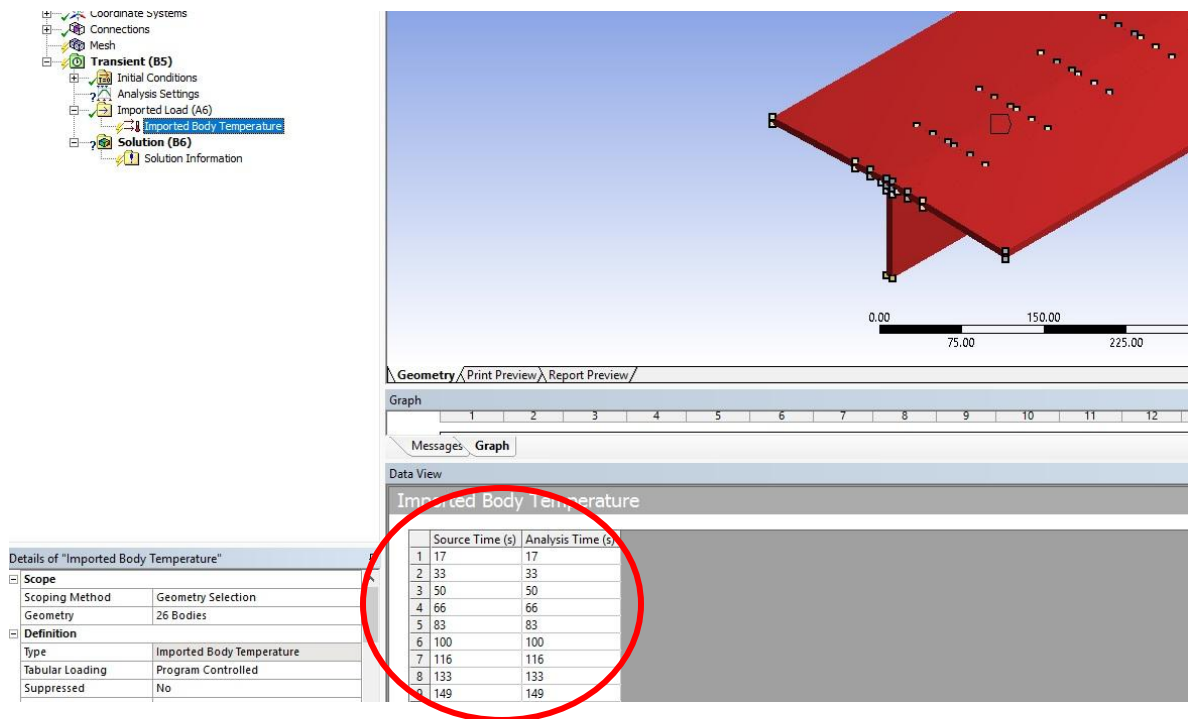
**Gambar IV.5** Input nilai 0 pada sumbu x, y, dan z

### 5. *Import Load*

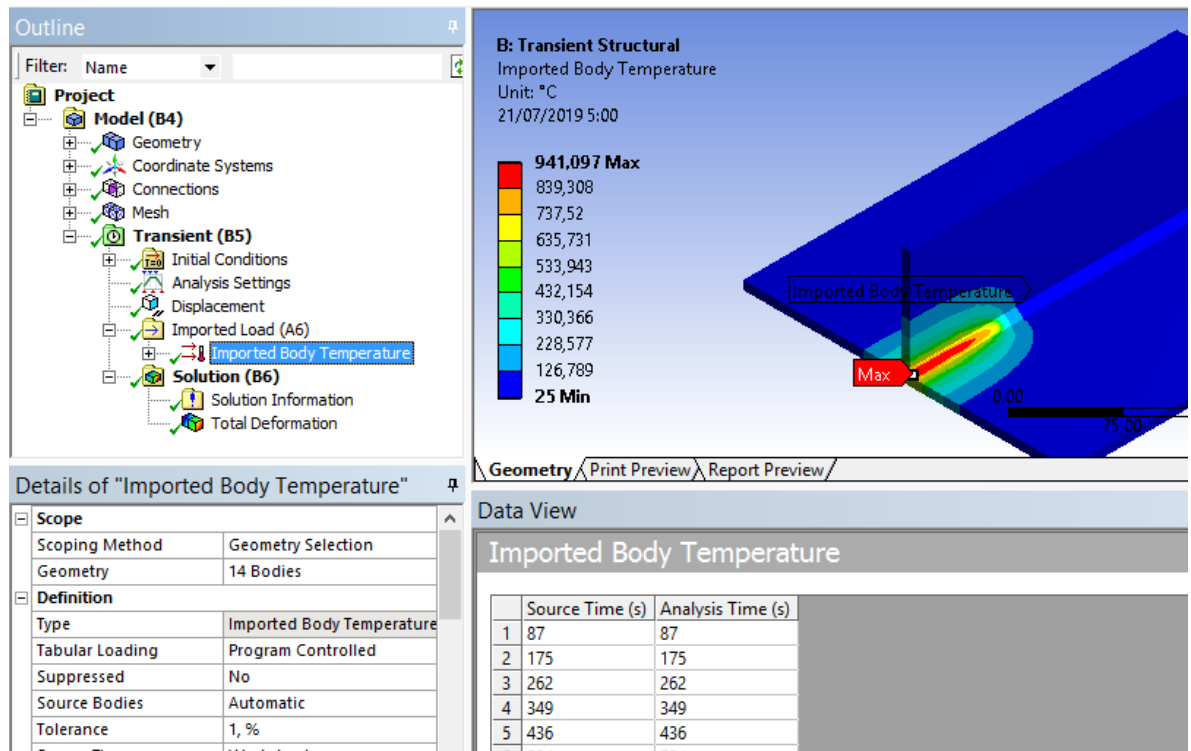
Tahap berikutnya merupakan *Import Load*, tahap ini merupakan transfer hasil pembebanan termal yang telah diselesaikan pada analisis *transient thermal*. Langkah-langkah *import load* beban termal yaitu *expand* pilihan *Imported Load* kemudian klik *Imported Body Temperature*. Jika *heat flux* atau *temperature* berhasil ditambahkan, maka akan ditandai dengan centang hijau.



**Gambar IV.6** Contoh langkah *Import Load*



Gambar IV.7 Input data Time-Step pada kolom Analysis Time dan Source Time

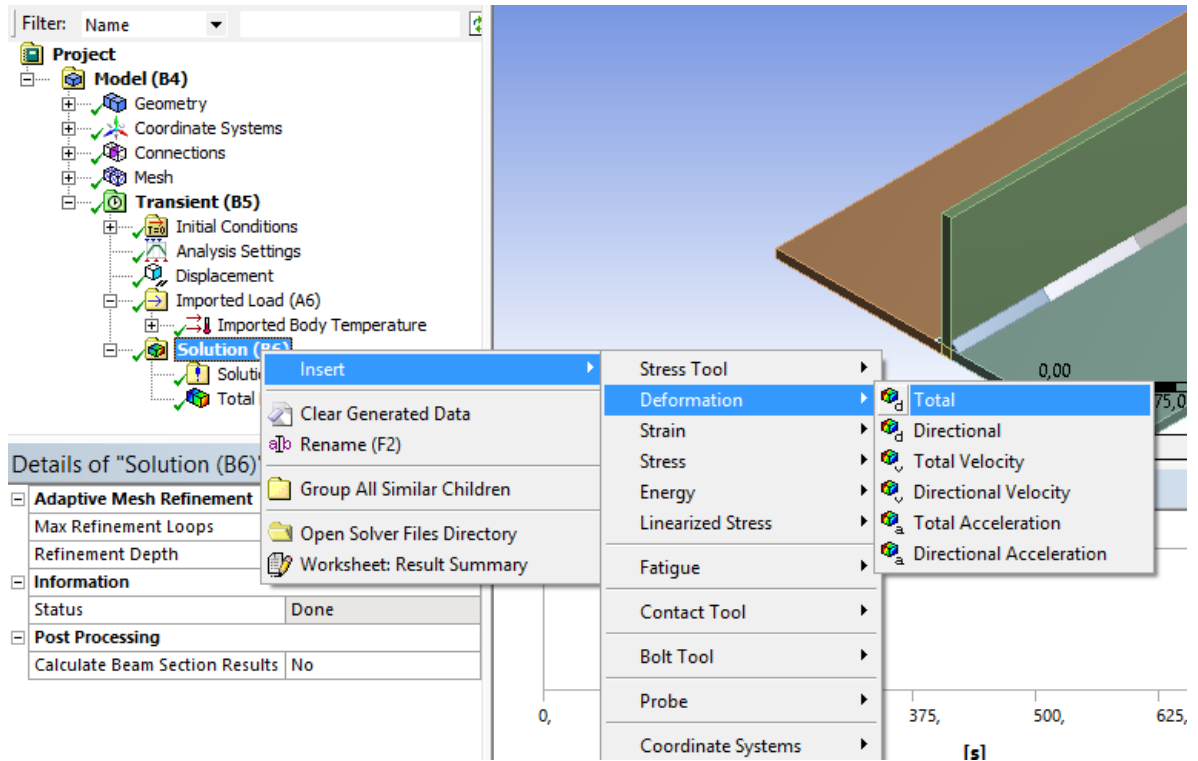


Gambar IV.8 Contoh hasil imported load

## 6. *Insert Solution*

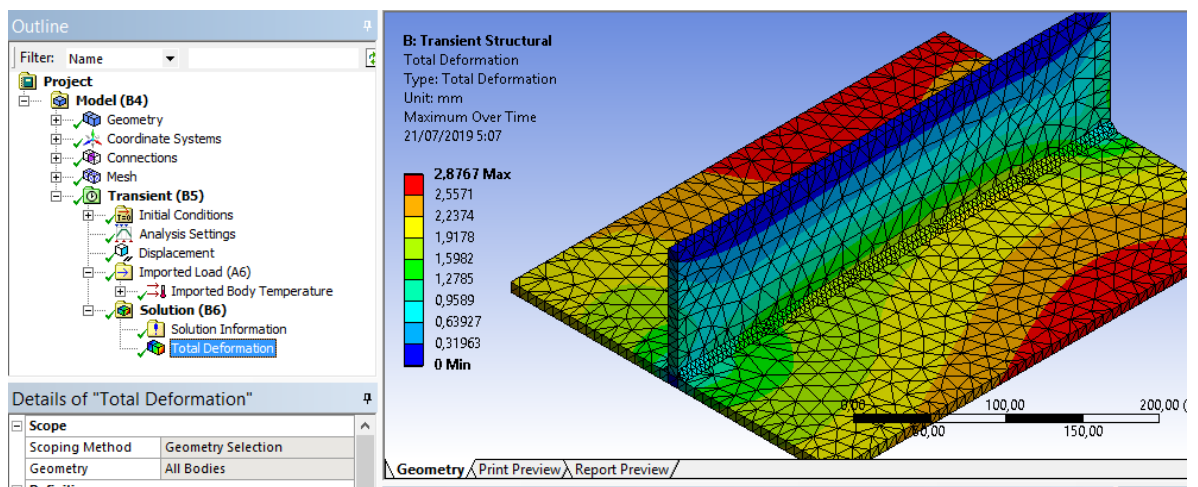
Solusi yang ingin diketahui dari analisis *Transient Structural* merupakan perubahan bentuk atau deformasi yang terjadi pada model selama proses pengelasan maupun pemanasan. Langkah-langkah yang dilakukan adalah sebagai berikut:

- Klik kanan pada *Solution (B6)*, pilih *Insert*, pilih *Deformation*, lalu pilih *Total*.



**Gambar IV.9** *Insert Total Deformation*

- Klik kanan pada *Solution (B6)*, lalu pilih *Solve* untuk memulai analisa. Jika hasil analisa sudah selesai, maka akan ditandai dengan centang hijau.

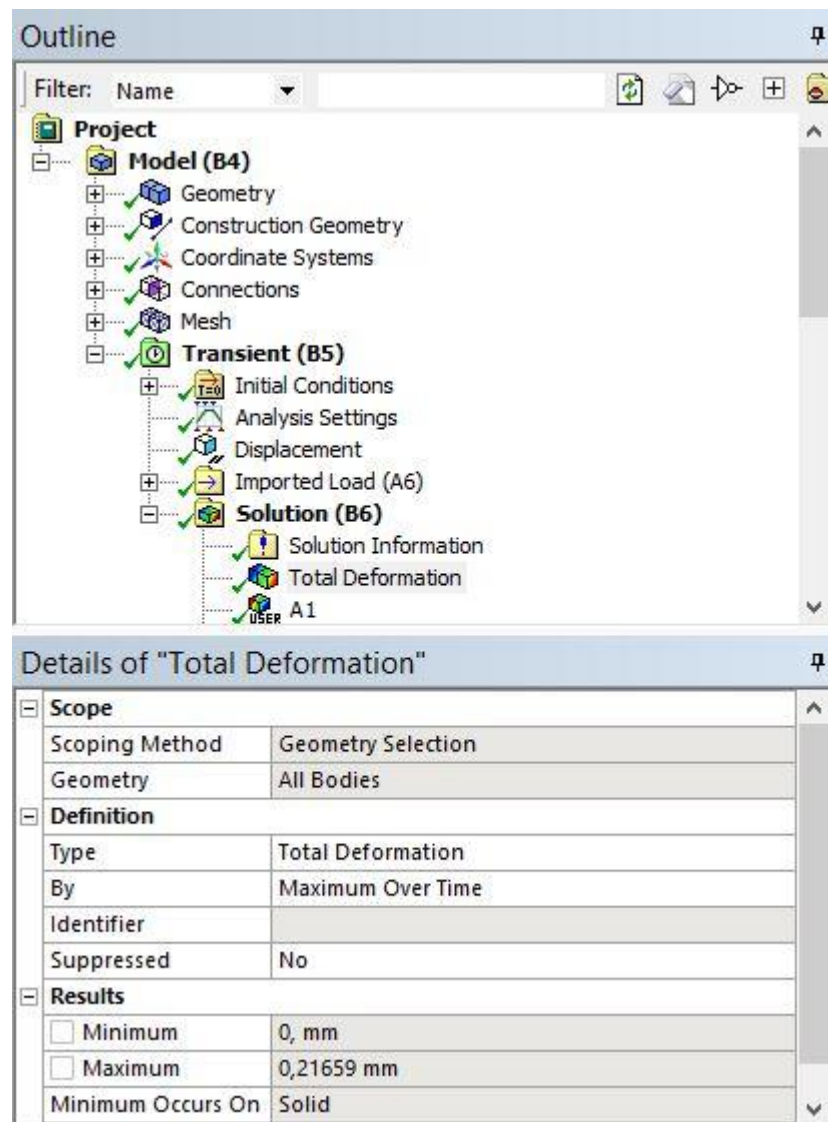


**Gambar IV.10** Contoh hasil *Transient Structural*

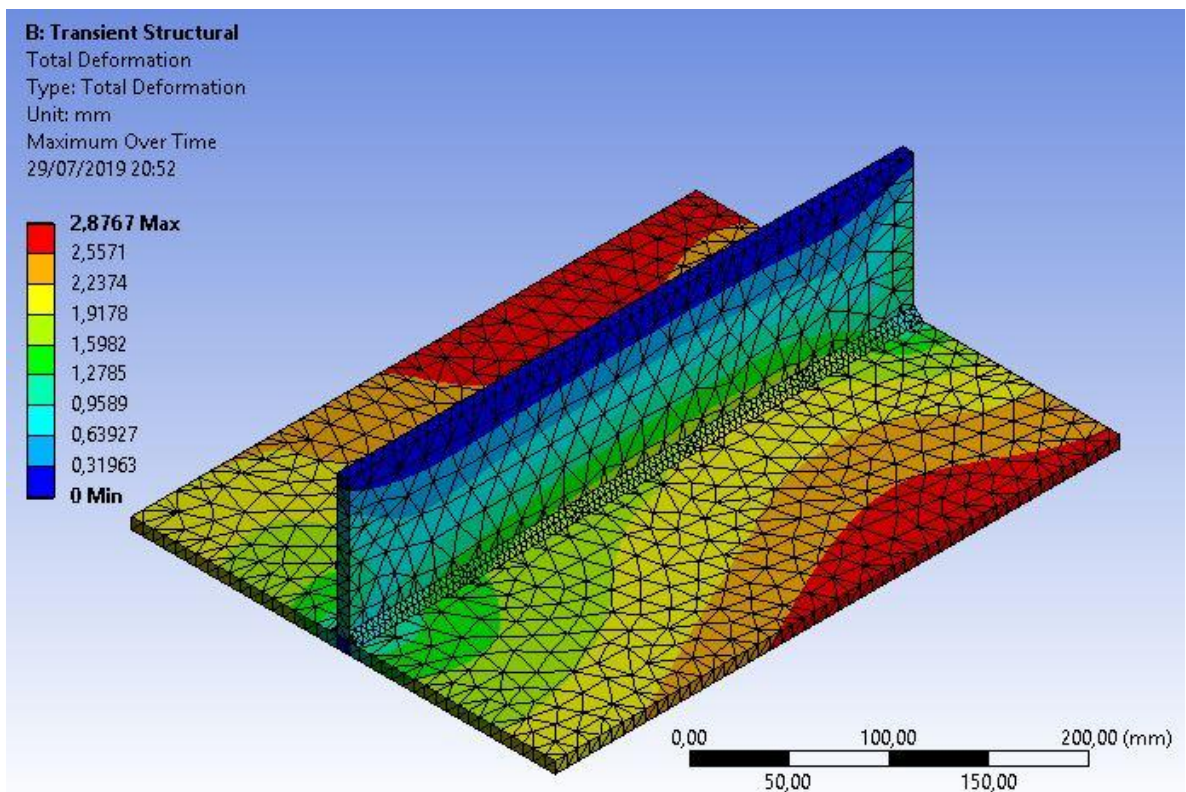
**LAMPIRAN V**  
**HASIL ANALISIS *TRANSIENT***  
***STRUCTURAL***



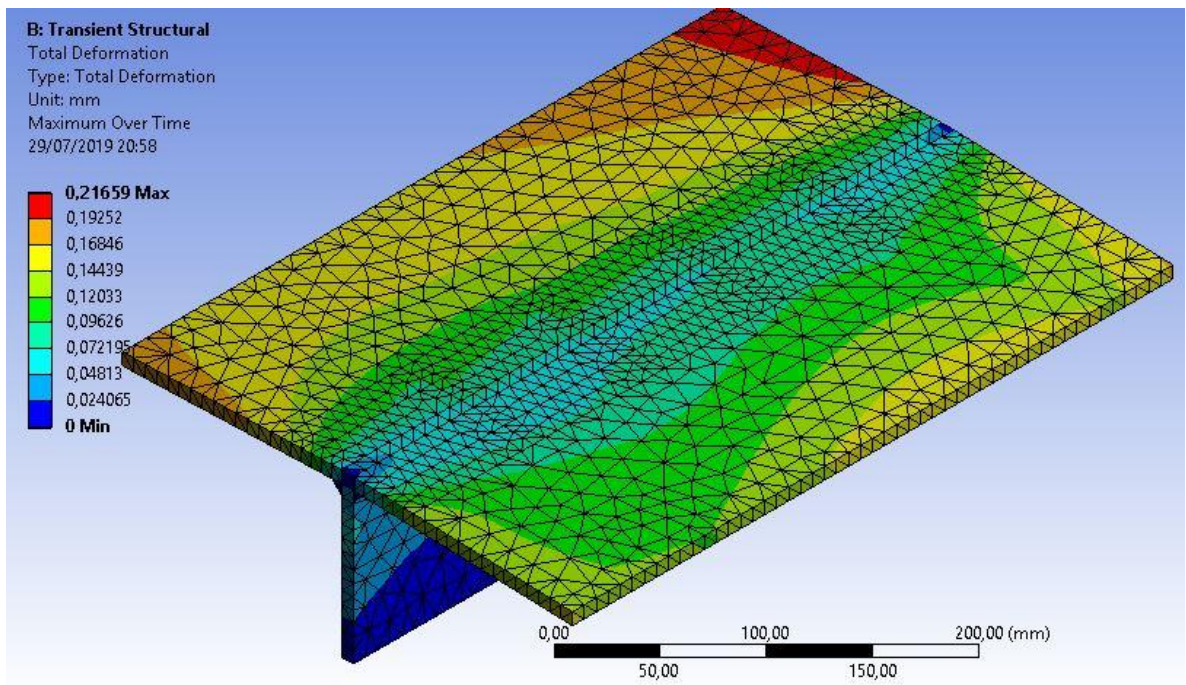
Hasil analisis *transient structural* pada pemodelan numerik pengelasan, *line heating* variasi 1, *line heating* variasi 2, dan *line heating* variasi 3, menggunakan *definition by maximum over time*. *Definition by maximum over time* menunjukkan hasil deformasi maksimal yang terjadi pada seluruh waktu saat pemodelan numerik. Penulis menggunakan *definition* ini untuk menunjukkan deformasi terbesar yang terjadi pada setiap spesimen yang telah dilakukan pemodelan. *Maximum over time* dapat dipilih melalui *result temperature*, kemudian cari *definition* dan ganti “by” menjadi *Maximum Over Time* seperti pada Gambar V.1 dibawah. Hasil dari analisis *transient structural* menggunakan *definition by maximum over time* pada pemodelan numerik pengelasan, *line heating* variasi 1, *line heating* variasi 2, dan *line heating* variasi 3 dapat dilihat pada Gambar V.2 sampai dengan Gambar V.5 dibawah.



**Gambar V.1** Contoh pemilihan *definition by Maximum Over Time*

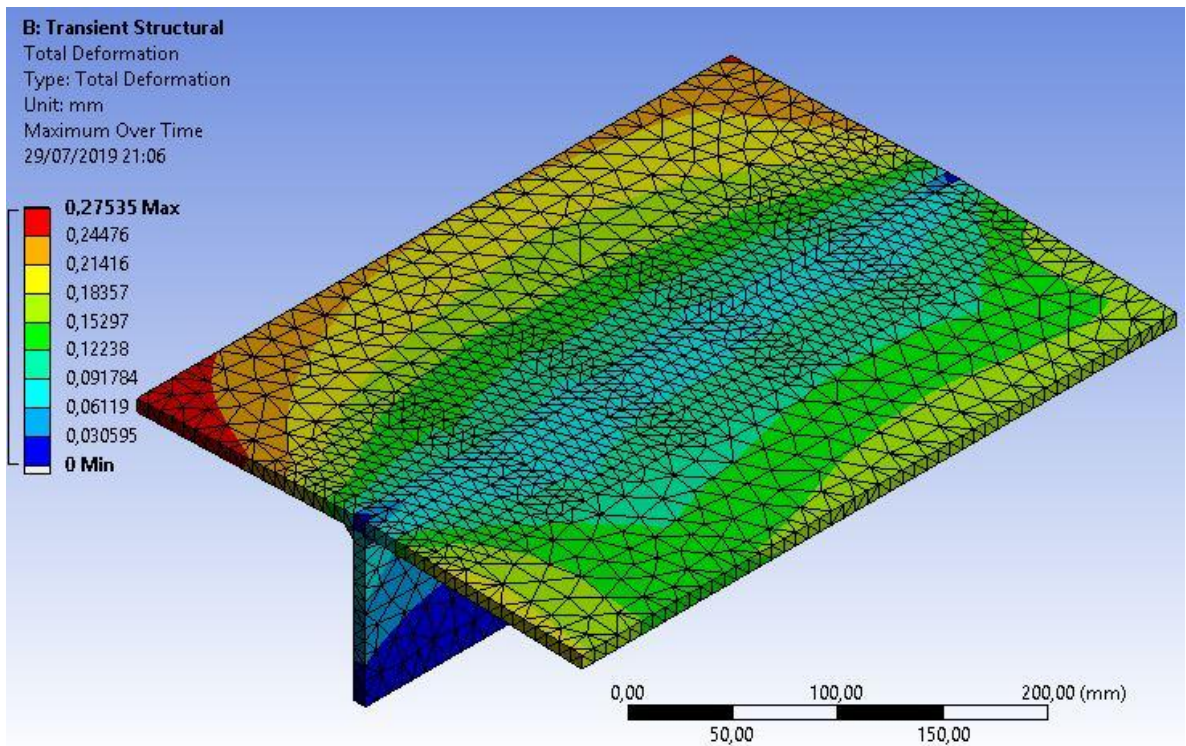


**Gambar V.2** Hasil analisis *transient structural* pengelasan

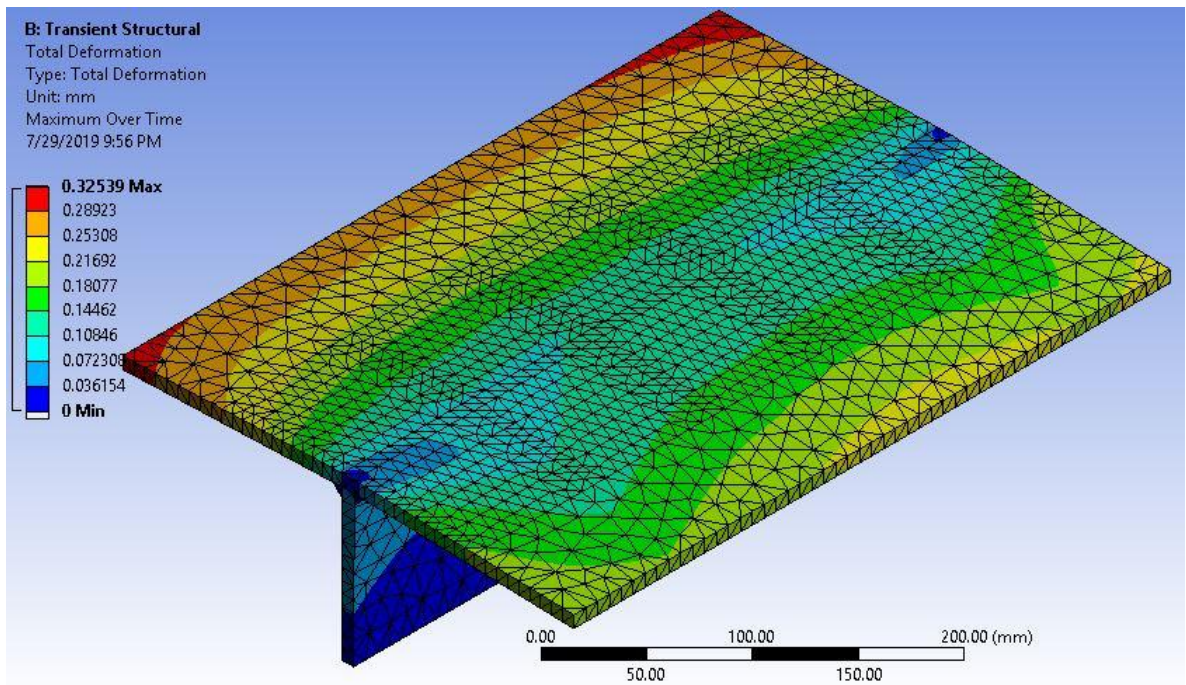


**Gambar V.3** Hasil analisis *transient structural line heating* variasi 1





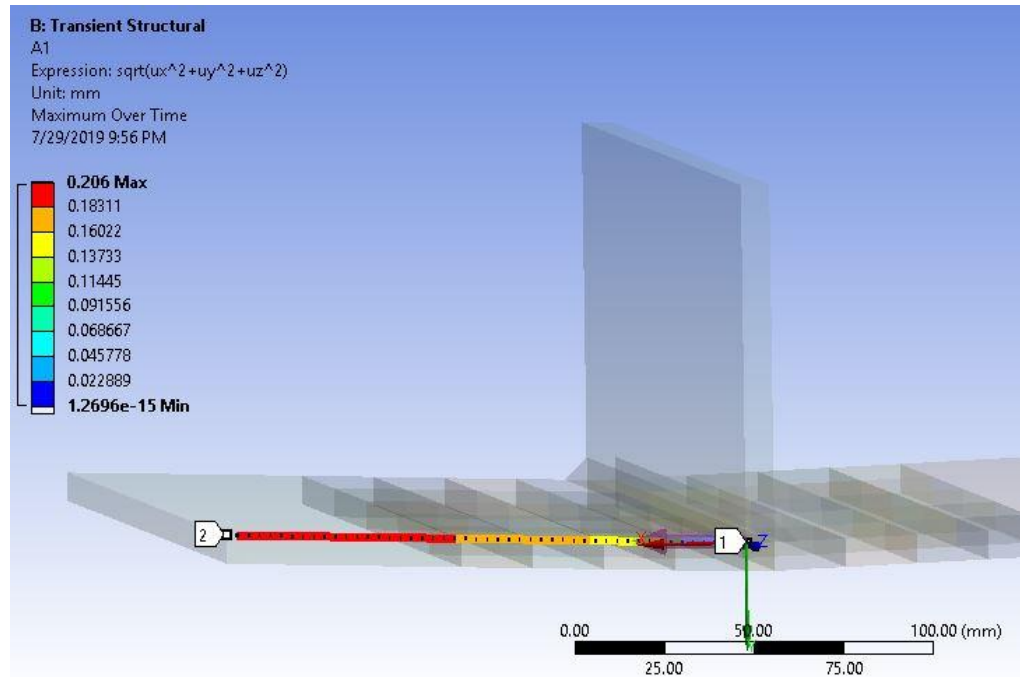
**Gambar V.4** Hasil analisis *transient structural line heating* variasi 2



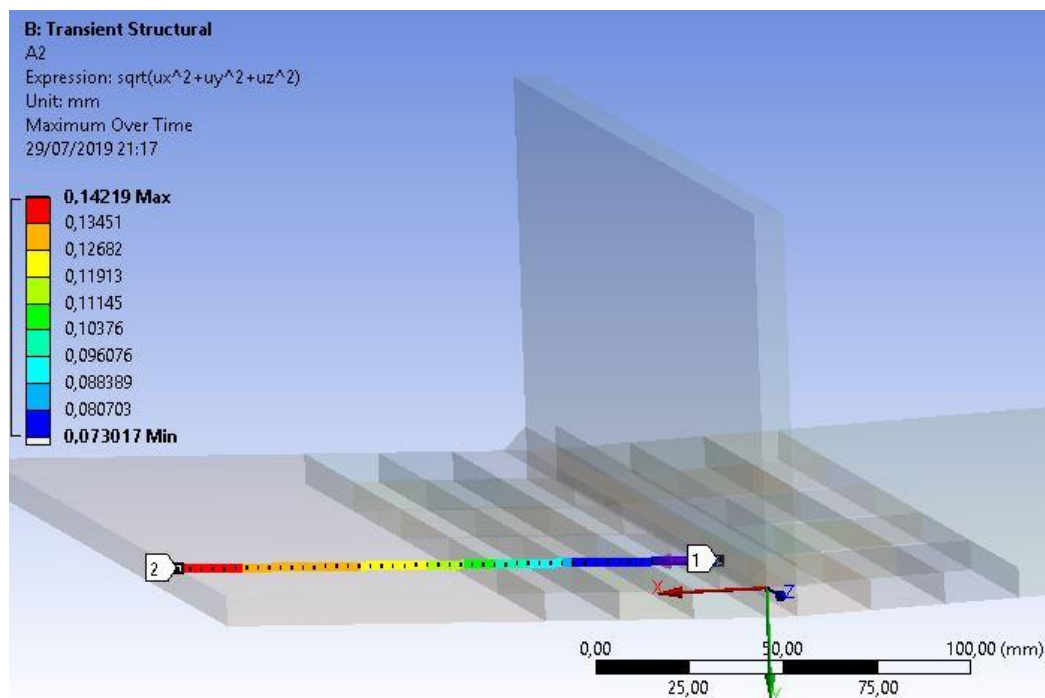
**Gambar V.5** Hasil analisis *transient structural line heating* variasi 3

**LAMPIRAN VI**  
**PENGUKURAN DEFORMASI**  
**MENGGUNAKAN *LINE PATH***

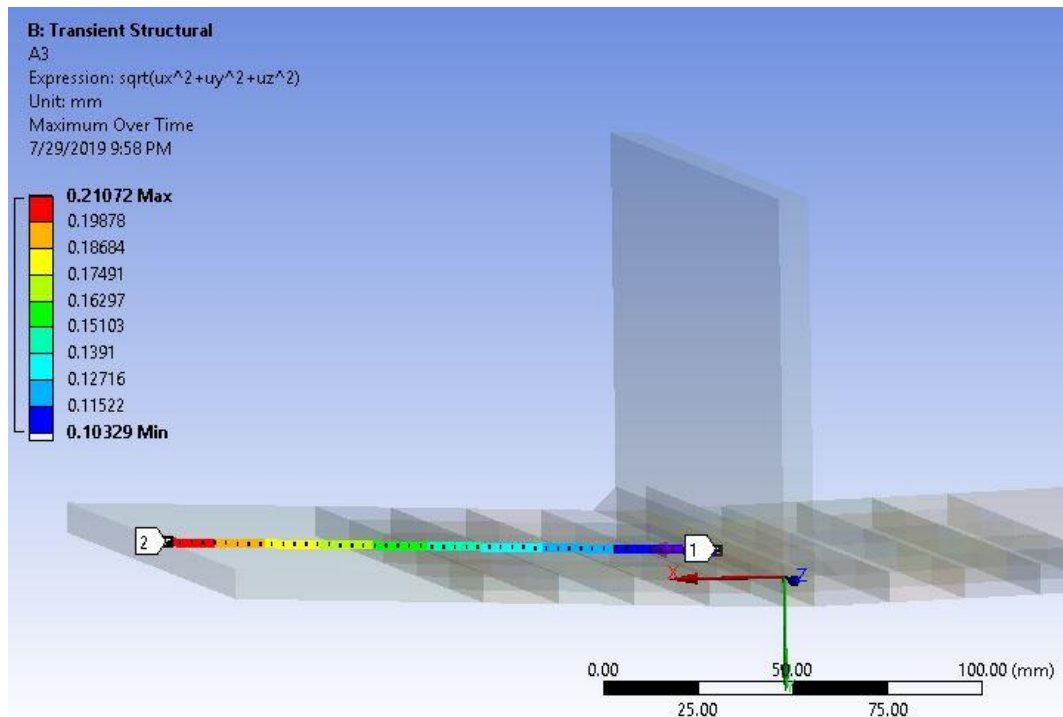
Pengukuran deformasi atau distorsi yang terjadi pada setiap titik yang ada pada setiap spesimen pemodelan numerik menggunakan *line path* dengan *coordinate system* yang telah disesuaikan pada tiap geometri spesimen. Hasil *line path* pada spesimen *line heating* variasi 3 dari titik A1 sampai dengan titik D6 dapat dilihat pada Gambar VI.1 sampai dengan Gambar VI.24 dibawah.



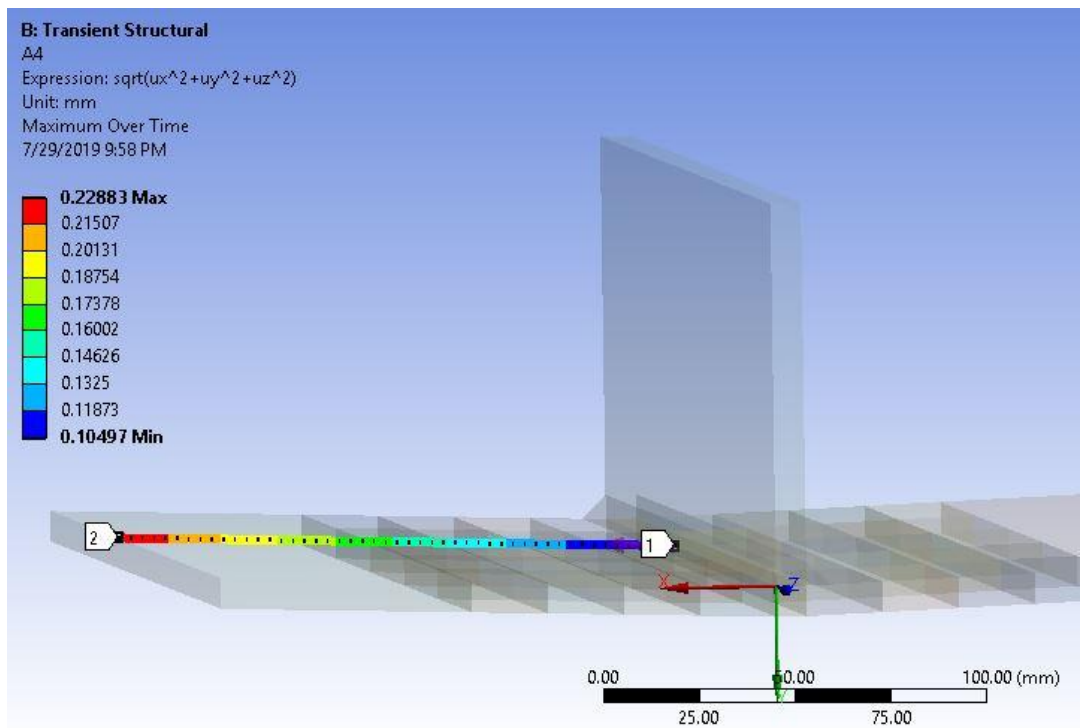
**Gambar VI.1** *Line path* titik A1 *line heating* variasi 3



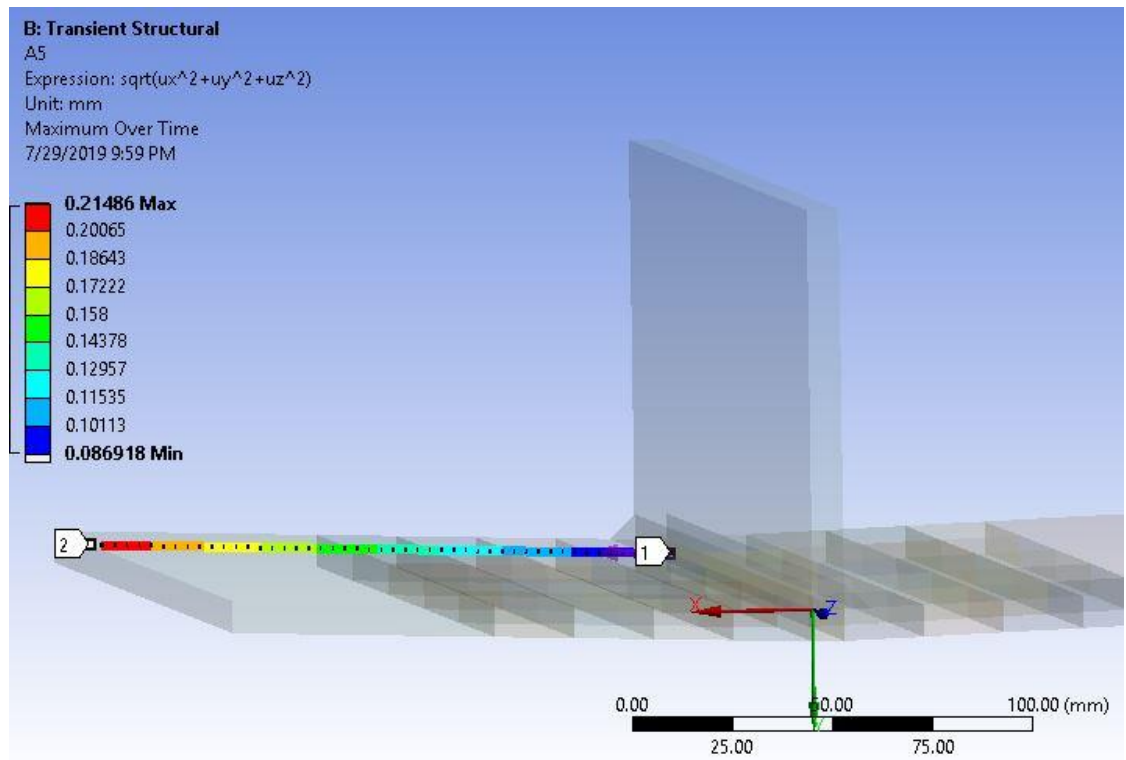
**Gambar VI.2** *Line path* titik A2 *line heating* variasi 3



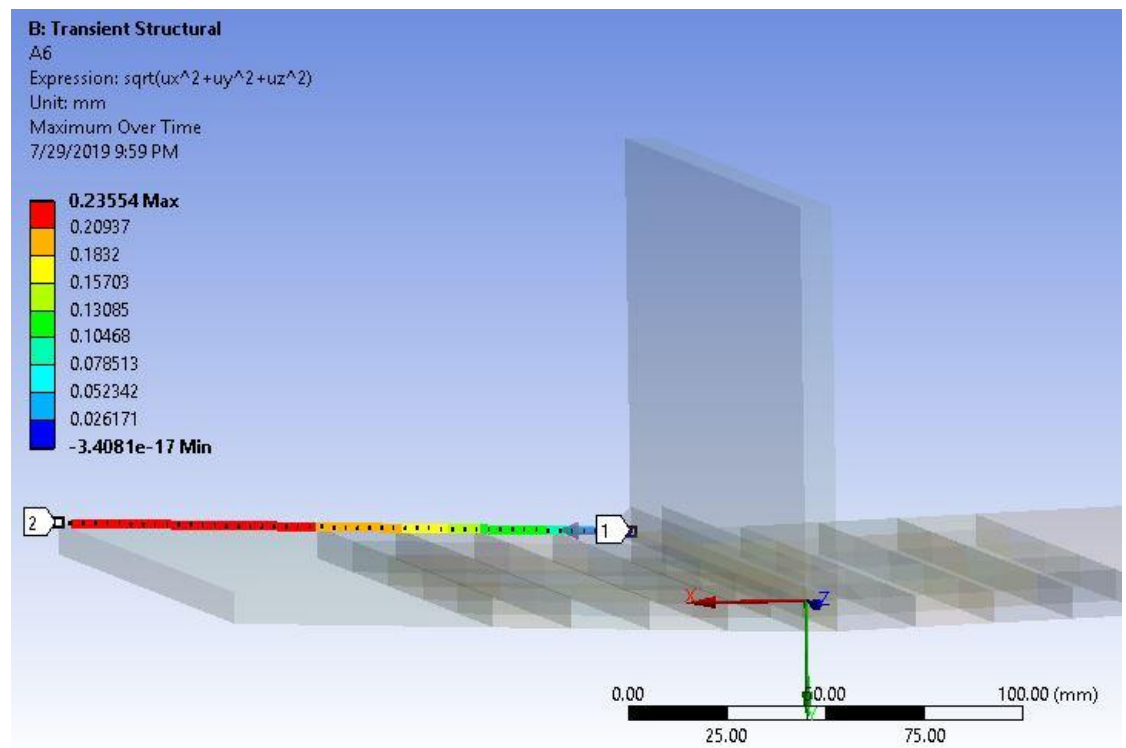
**Gambar VI.3** Line path titik A3 line heating variasi 3



**Gambar VI.4** Line path titik A4 line heating variasi 3

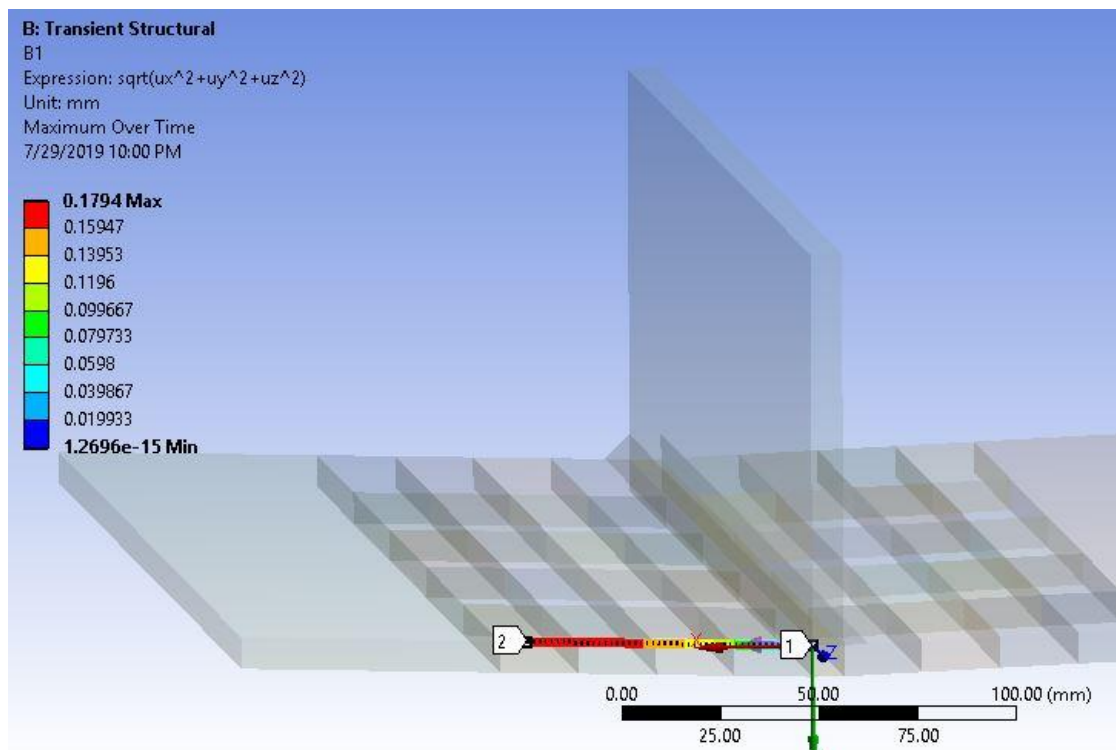


**Gambar VI.5** Line path titik A5 line heating variasi 3

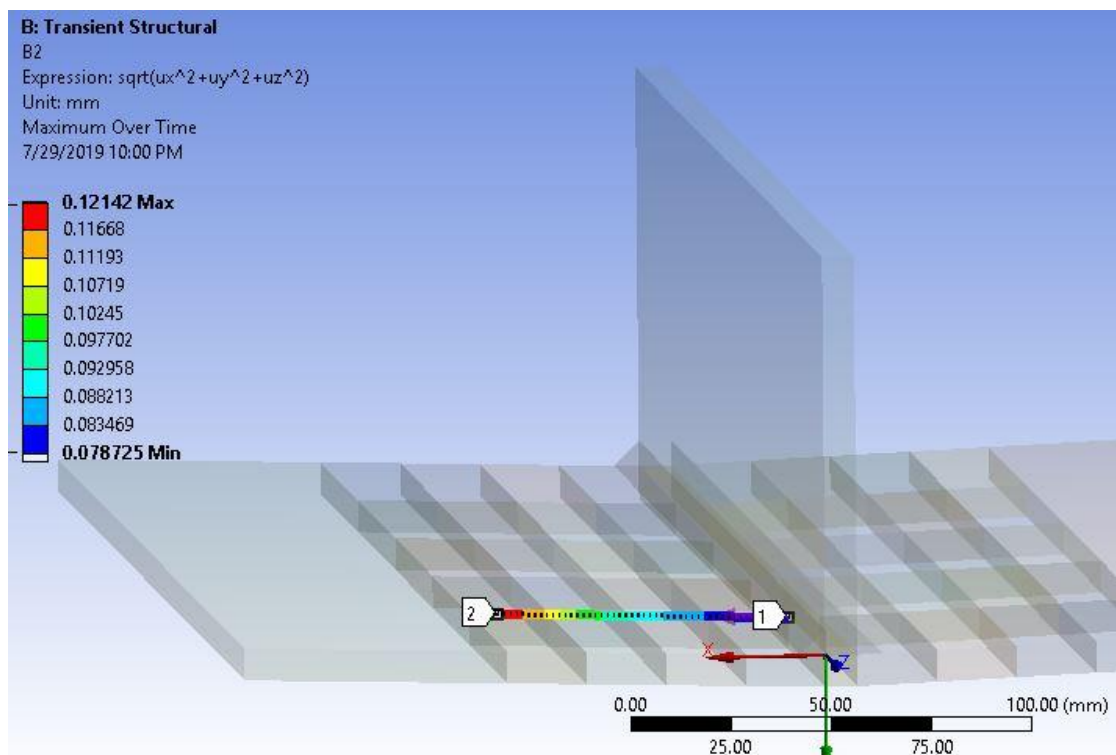


**Gambar VI.6** Line path titik A6 line heating variasi 3

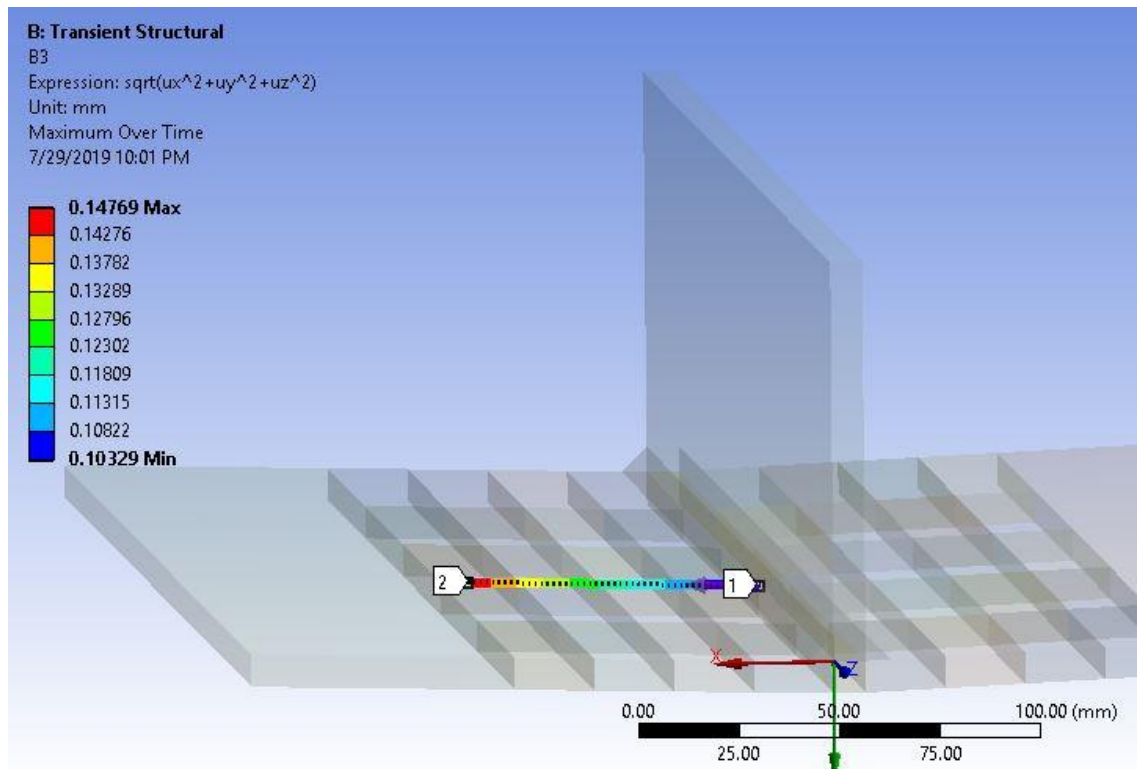




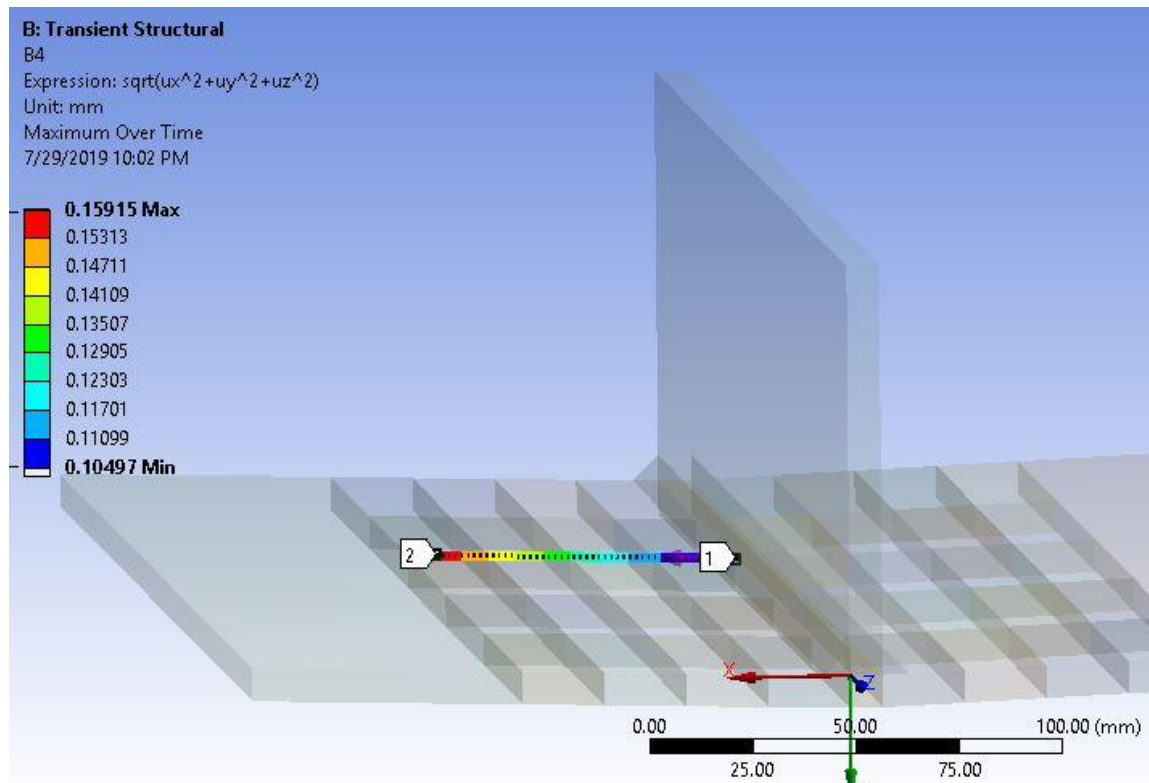
**Gambar VI.7** Line path titik B1 line heating variasi 3



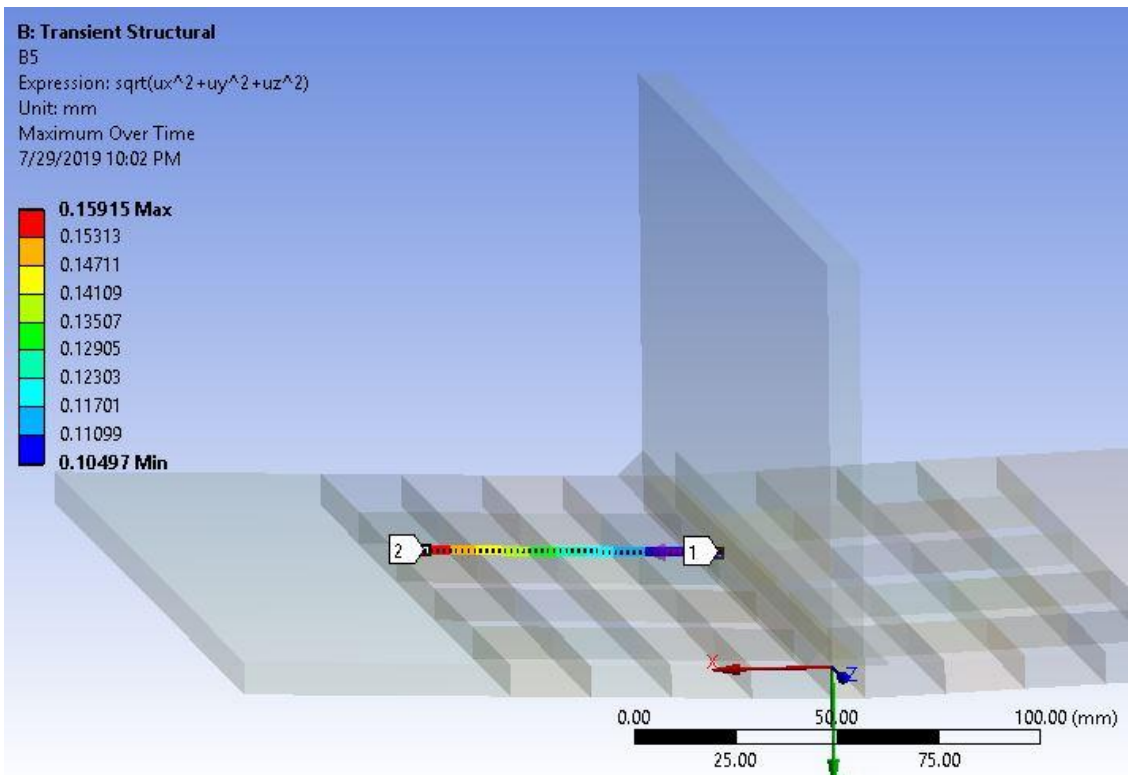
**Gambar VI.8** Line path titik B2 line heating variasi 3



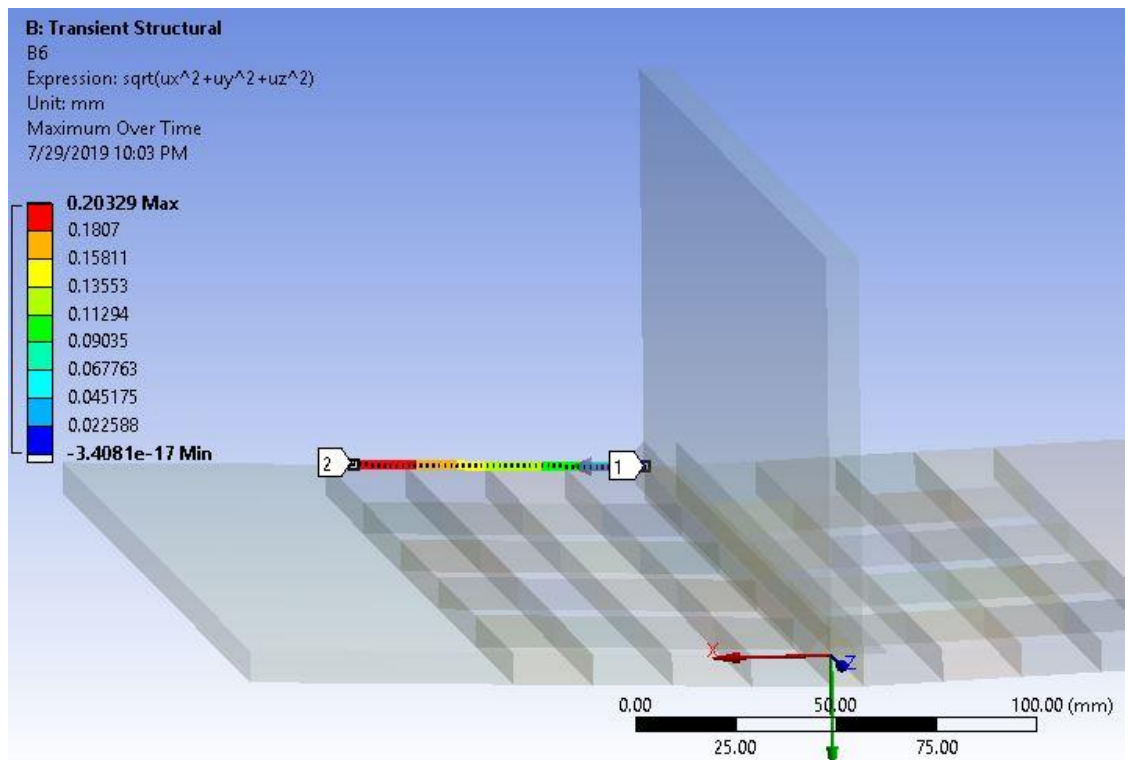
**Gambar VI.9** Line path titik B3 line heating variasi 3



**Gambar VI.10** Line path titik B4 line heating variasi 3

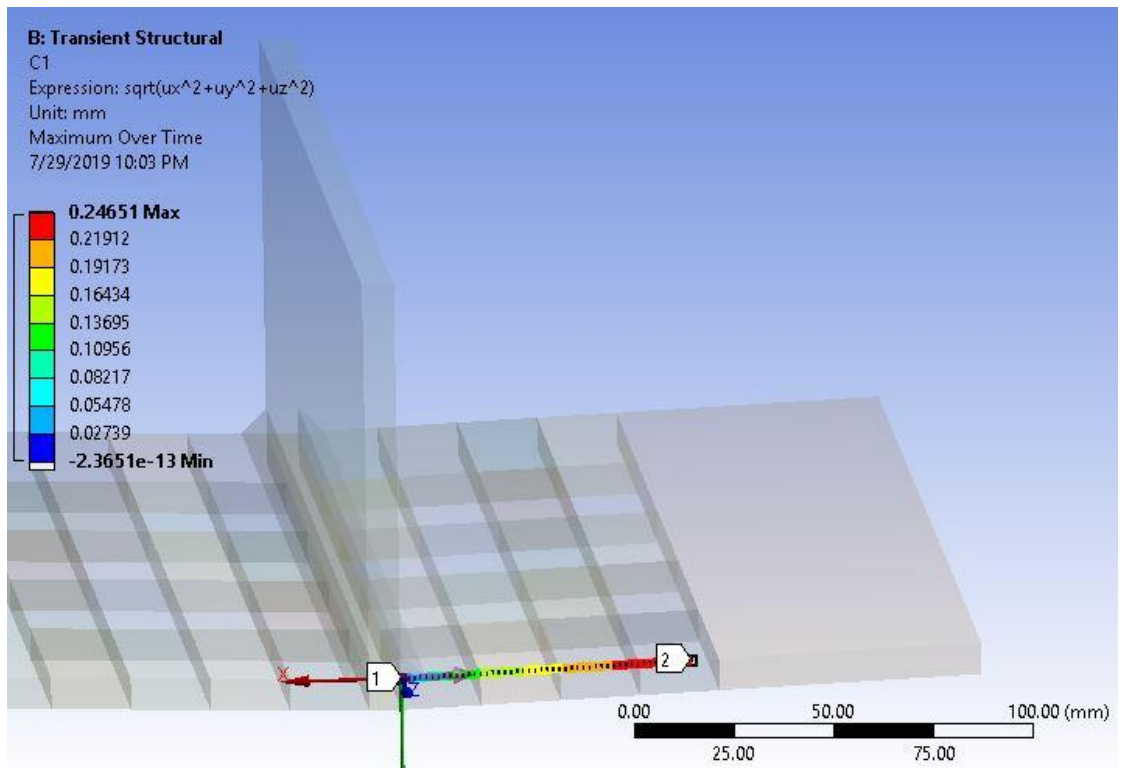


**Gambar VI.11** Line path titik B5 line heating variasi 3

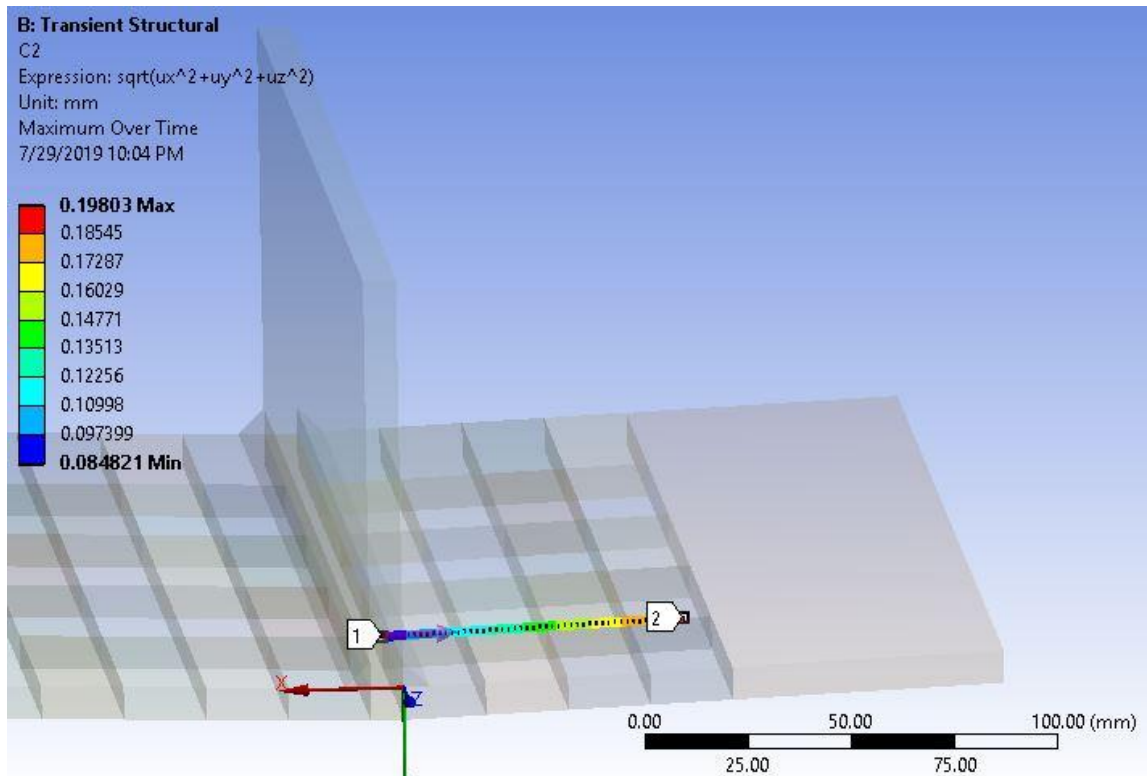


**Gambar VI.12** Line path titik B6 line heating variasi 3

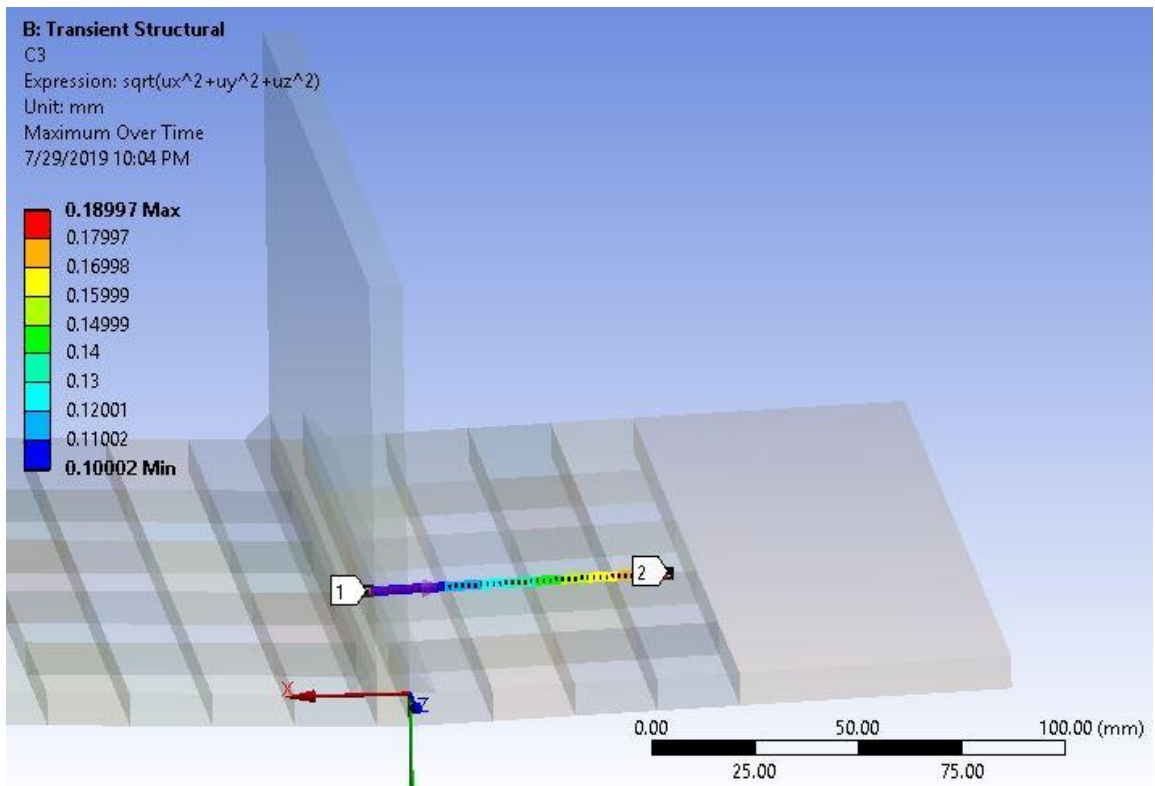




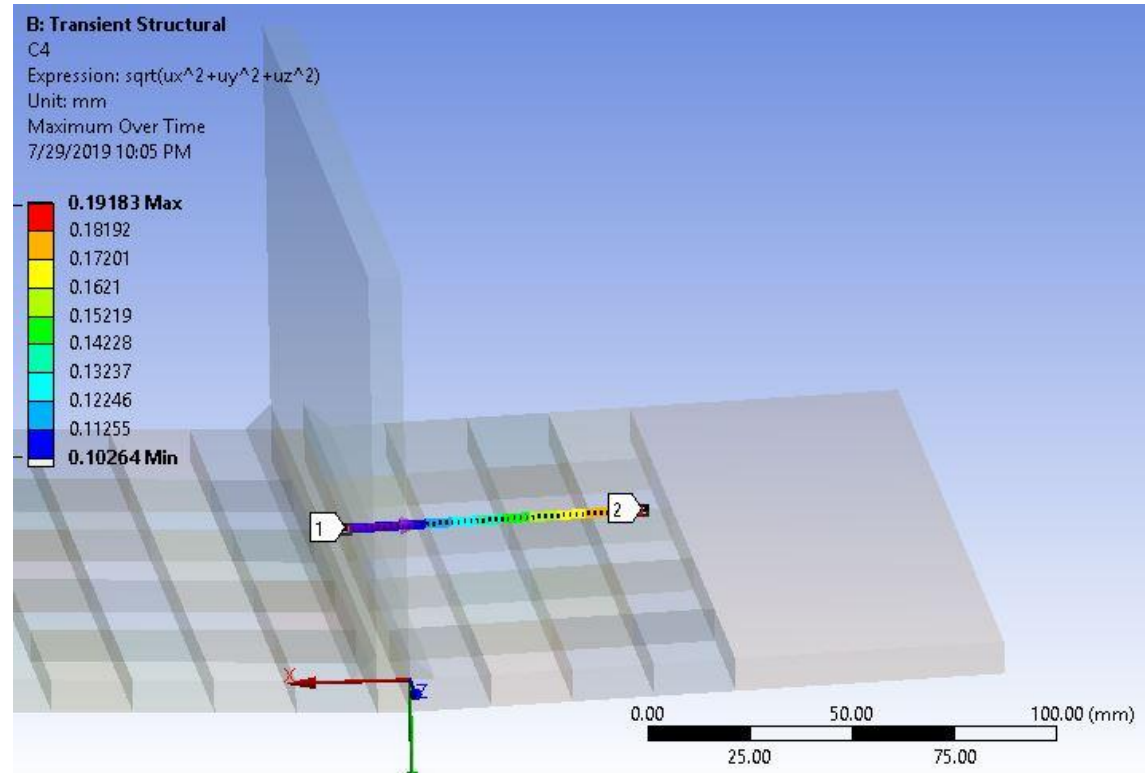
**Gambar VI.13** Line path titik C1 line heating variasi 3



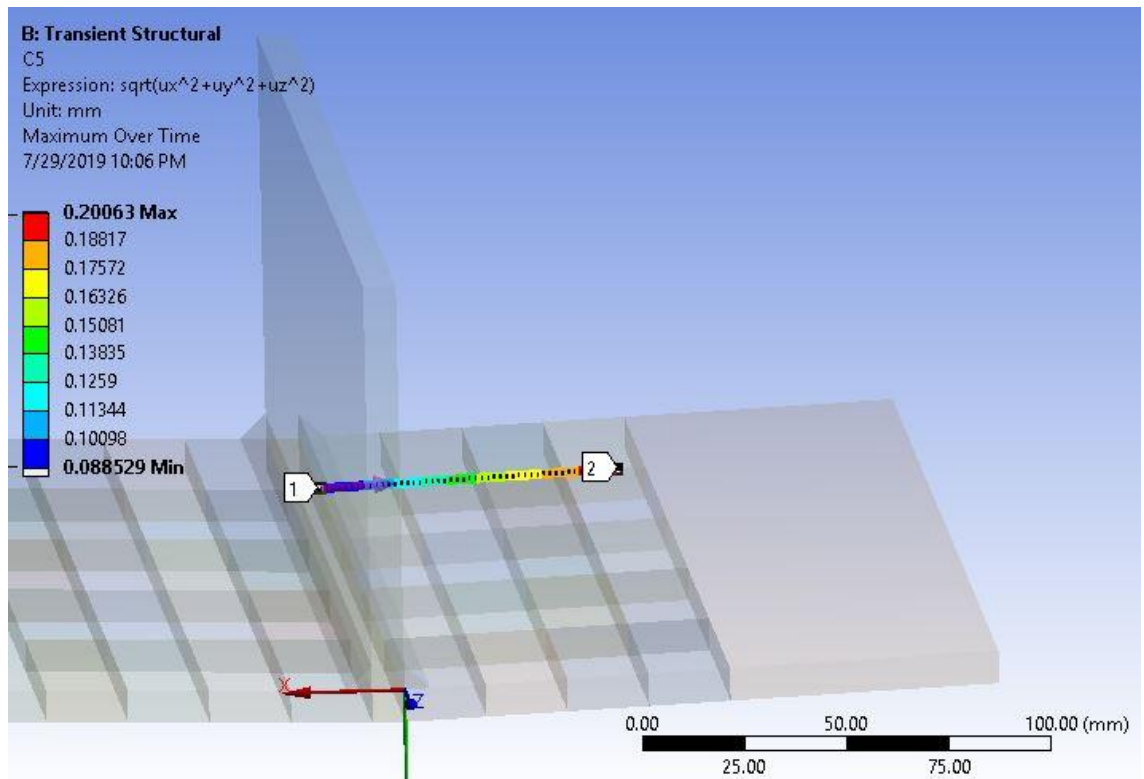
**Gambar VI.14** Line path titik C2 line heating variasi 3



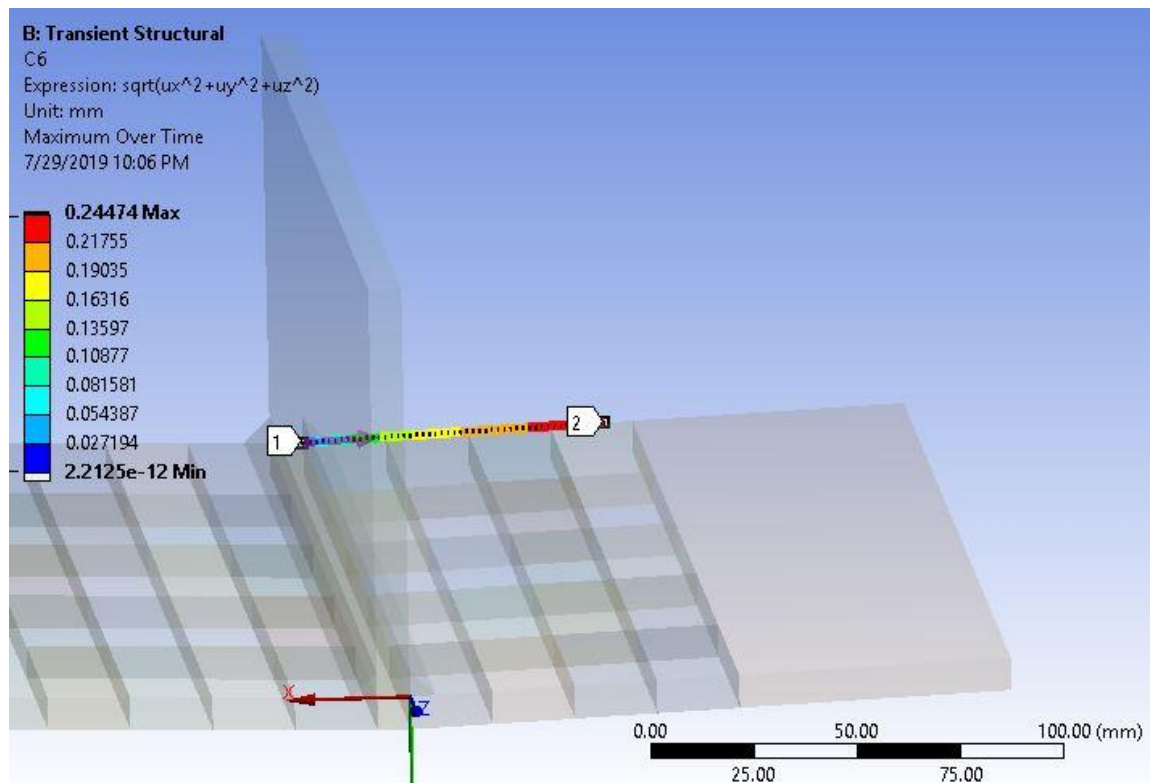
**Gambar VI.15** Line path titik C3 line heating variasi 3



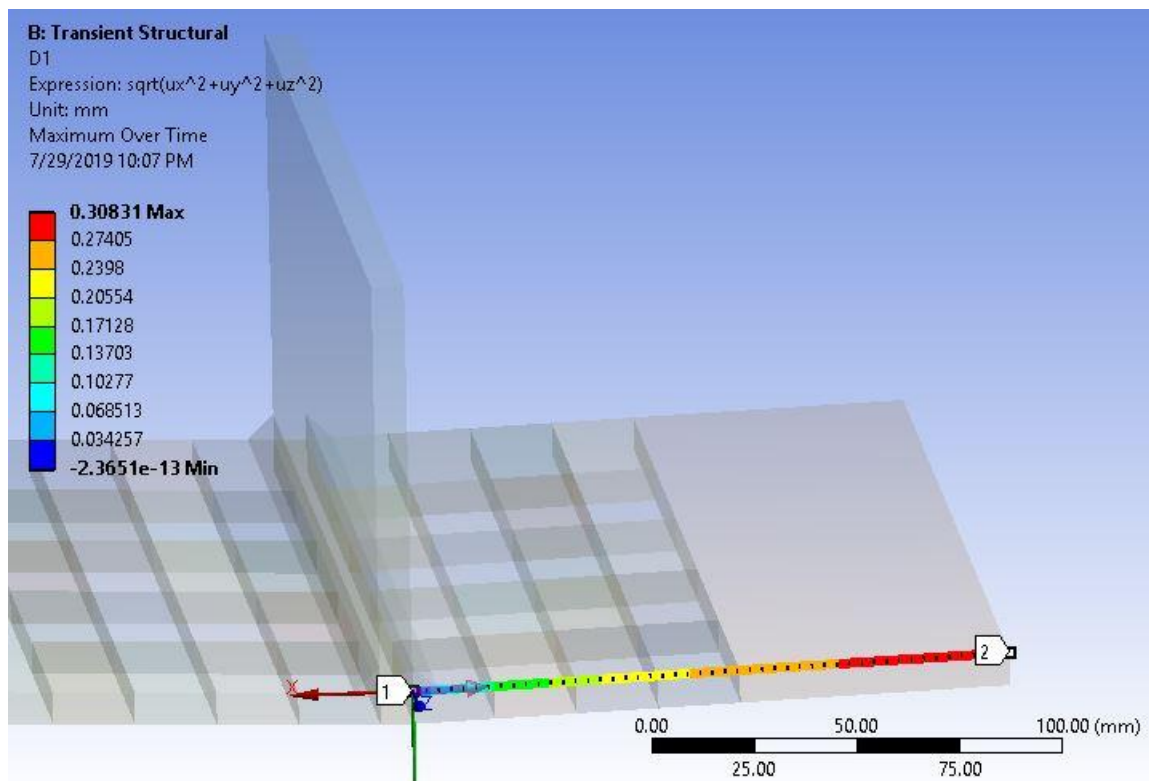
**Gambar VI.16** Line path titik C4 line heating variasi 3



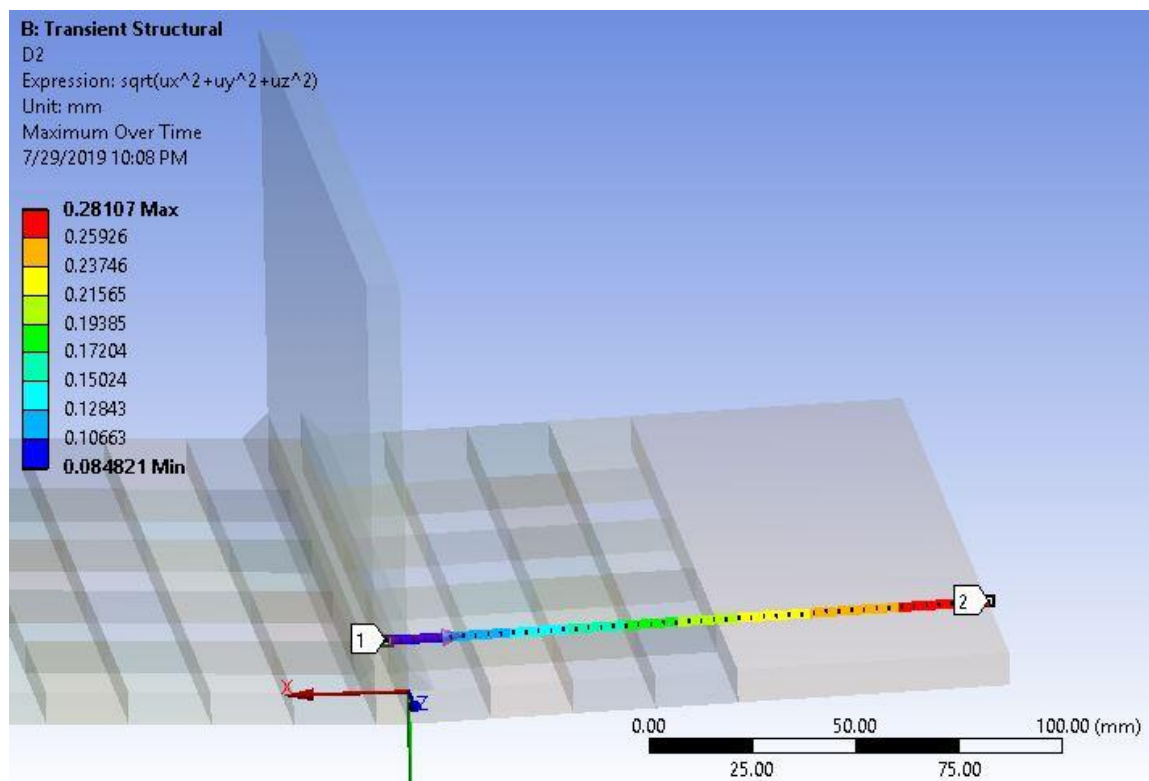
**Gambar VI.17** Line path titik C5 line heating variasi 3



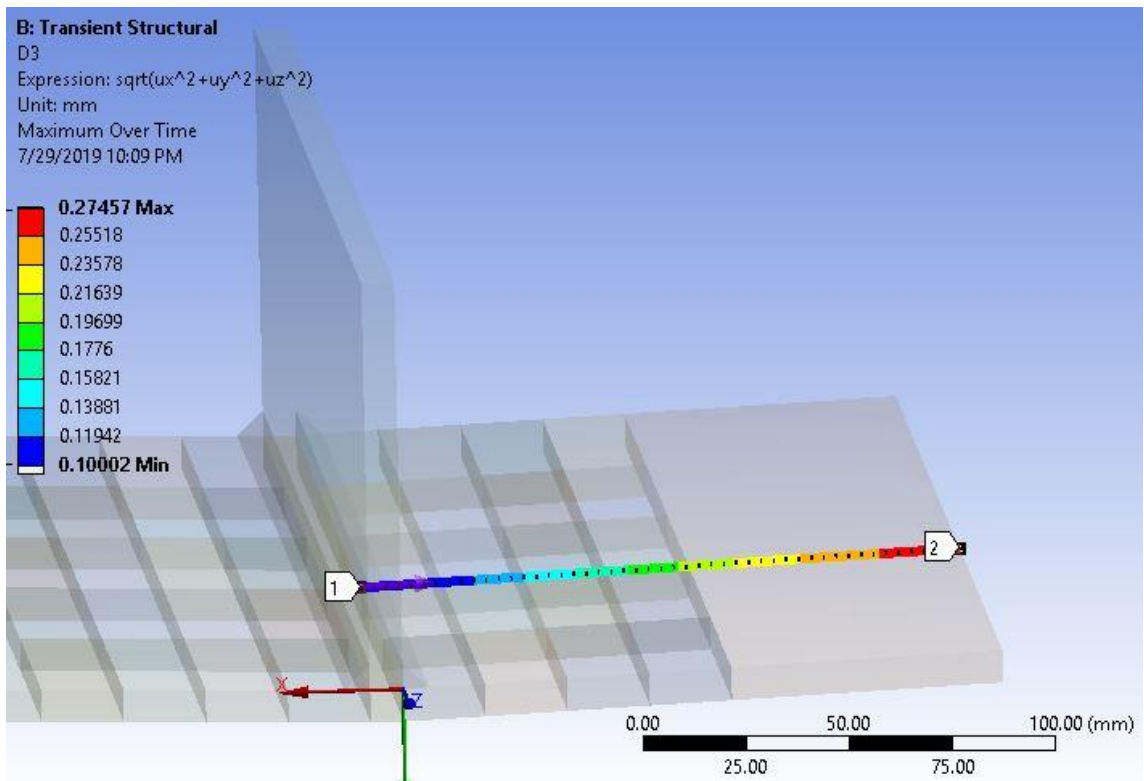
**Gambar VI.18** Line path titik C6 line heating variasi 3



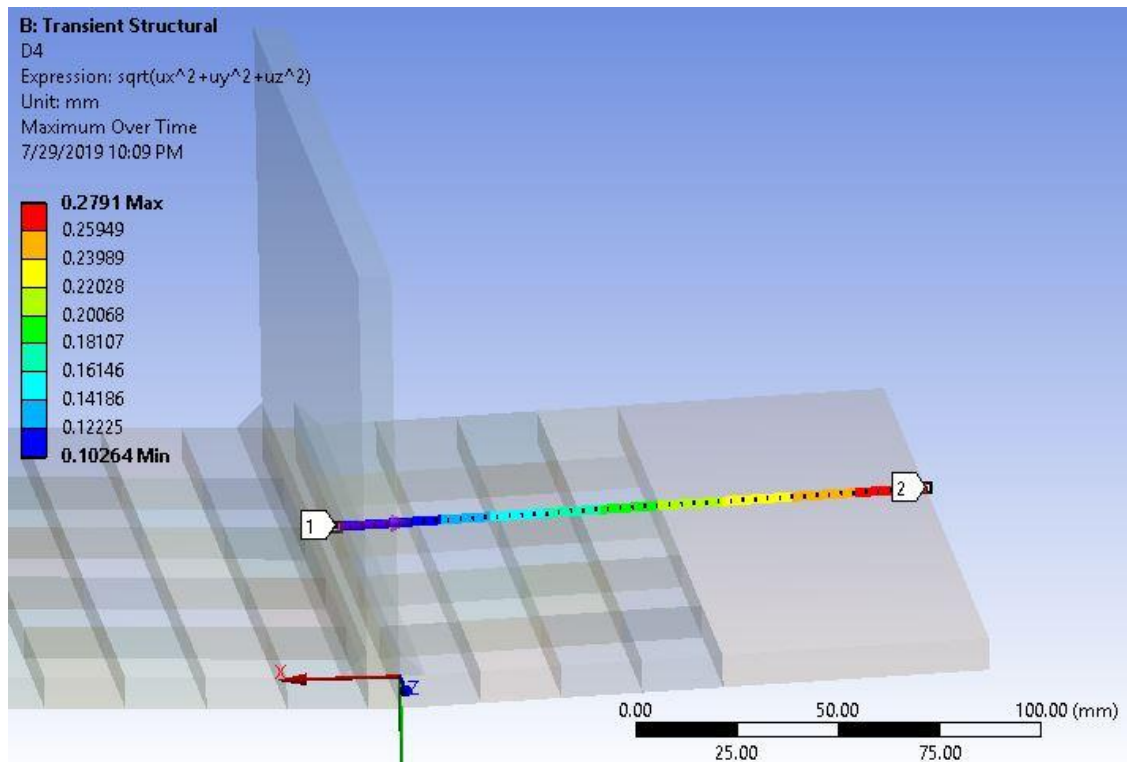
**Gambar VI.19** Line path titik D1 line heating variasi 3



**Gambar VI.20** Line path titik D2 line heating variasi 3

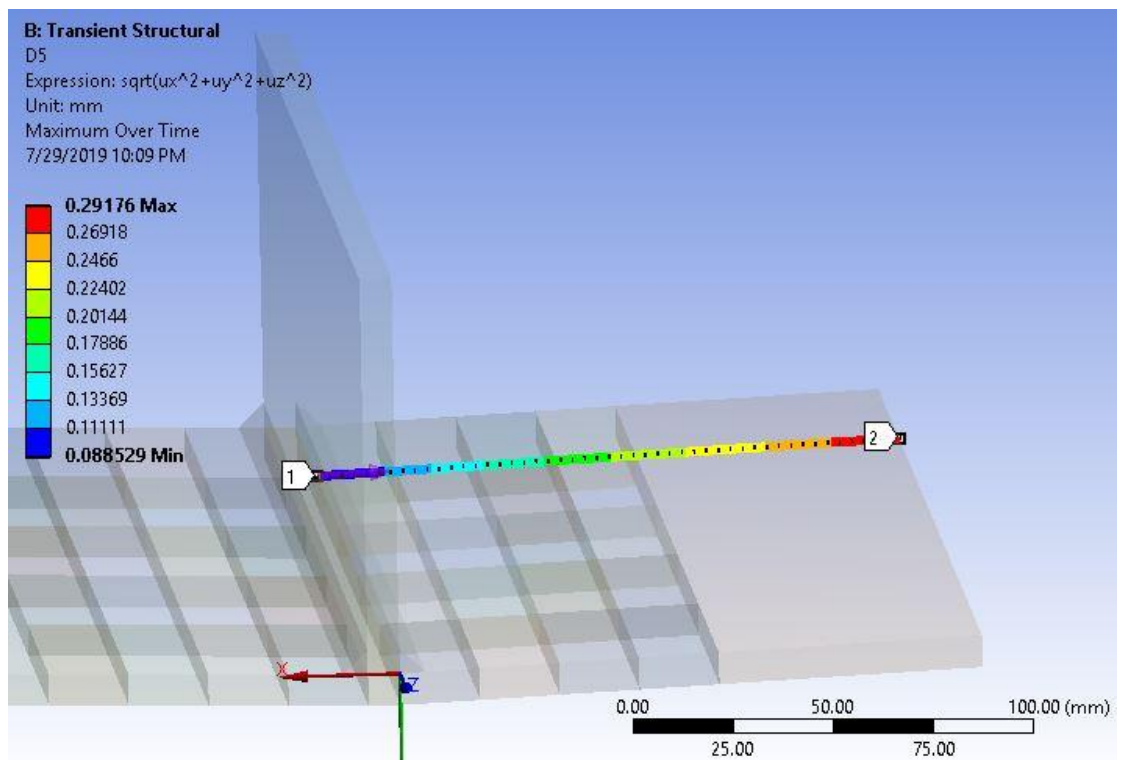


**Gambar VI.21** Line path titik D3 line heating variasi 3

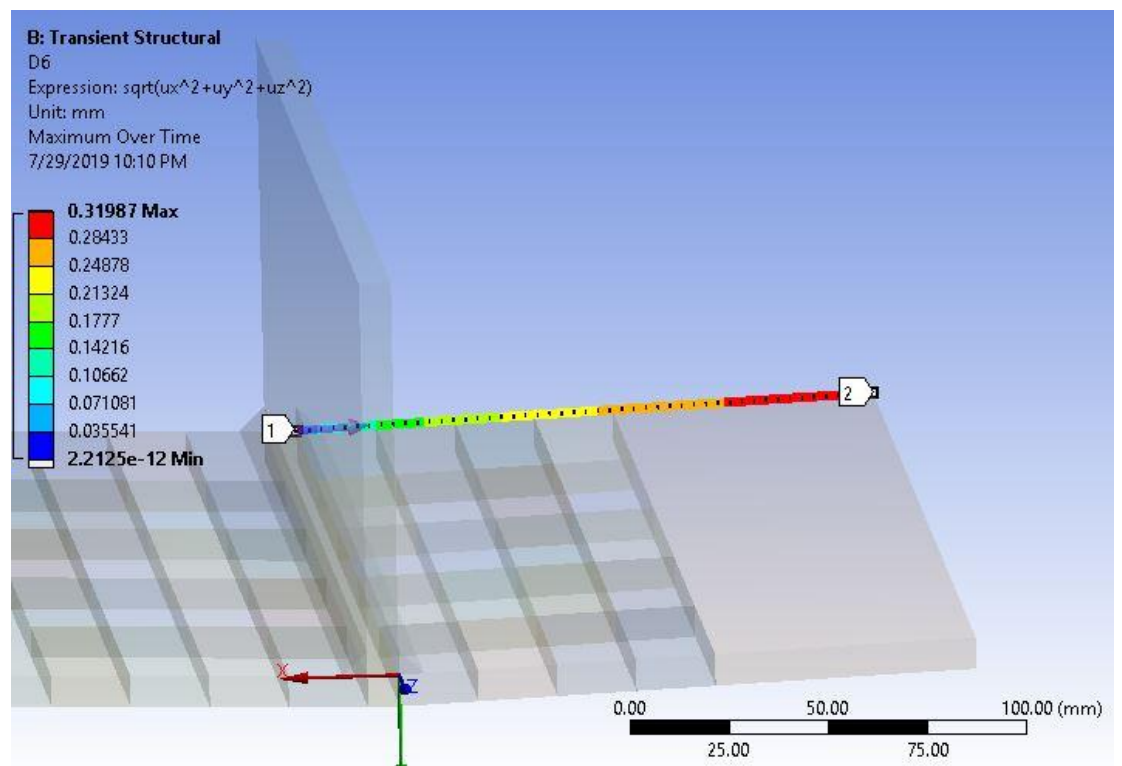


**Gambar VI.22** Line path titik D4 line heating variasi 3





**Gambar VI.23** *Line path* titik D5 *line heating* variasi 3



**Gambar VI.24** *Line path* titik D6 *line heating* variasi 3

Untuk spesimen *line heating* variasi 1, *line heating* variasi 2, dan pengelasan menggunakan cara dan koordinat titik yang sama dengan seluruh titik *line path* diatas.

# **BIODATA PENULIS**

## **BIODATA PENULIS**



Muhammad Bilal Teguh, anak pertama dari tiga bersaudara ini lahir di Bekasi pada tanggal 24 November 1997. Pendidikan formal penulis dimulai dengan menyelesaikan jenjang Pendidikan Dasar di SDN Klampis Ngasem 1 Surabaya pada tahun 2009 dan SMP Negeri 30 Surabaya pada tahun 2012. Penulis menyelesaikan Pendidikan Menengah di SMA Negeri 1 Surabaya pada tahun 2015. Setelah lulus SMA, penulis melanjutkan ke jenjang Pendidikan Tinggi Strata 1 di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Surabaya. Selama masa perkuliahan penulis melakukan banyak kegiatan baik akademis maupun non-akademis. Pada tahun pertama masa perkuliahan, penulis berhasil membawa nama ITS sebagai juara pada turnamen nasional Flag Football College Bowl II yang diselenggarakan di Yogyakarta. Selain itu penulis juga mendapatkan amanah sebagai Staff dan Kepala Divisi di Himpunan Mahasiswa Teknik Kelautan Departemen Minat dan Bakat. Penulis juga diberikan kesempatan untuk melaksanakan Kerja Praktek selama 2 bulan dengan PT. Dharma Kreasi Nusantara yang memiliki proyek pembangunan Kapal Ferry Roro 1500 GT yang berlokasi di galangan PT. Dumas Tanjung Perak Shipyard. Pada kegiatan Kerja Praktek tersebut, penulis mempelajari lebih banyak tentang teknologi pengelasan di lapangan dan memulai untuk mengerjakan Tugas Akhir mengenai perbaikan distorsi akibat dari proses pengelasan.

### **Kontak Penulis**

*E-mail* : bilal.teguh.bt@gmail.com

*Mobile Phone* : 081232157327