



TUGAS AKHIR- MO184804

ANALISIS PERBANDINGAN JARAK PEMASANGAN *STOPPER* PADA  
PENGELASAN *BUTT JOINT* PELAT BAJA A36 TERHADAP DISTORSI  
*ANGULAR* MENGGUNAKAN PEMODELAN NUMERIK DAN EKSPERIMEN

Aulia Muhammad Rabbani Payapo  
NRP. 0431154000087

Dosen Pembimbing:  
Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.  
Ir. Handyanu, M.Sc., Ph.D.

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



FINAL PROJECT- MO184804

A COMPARATIVE ANALYSIS OF STOPPER DISTANCE VARIATION AT  
A36 STEEL PLATE BUTT JOINT WELDING ON ANGULAR DISTORTION  
USING NUMERICAL MODELING AND EXPERIMENT

Aulia Muhammad Rabbani Payapo  
NRP. 0431154000087

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

DEPARTEMENT OF OCEAN ENGINEERING  
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2019

ANALISIS PERBANDINGAN JARAK PEMASANGAN *STOPPER* PADA  
PENGELASAN *BUTT JOINT* PELAT BAJA A36 TERHADAP DISTORSI  
*ANGULAR* MENGGUNAKAN PEMODELAN NUMERIK DAN  
EKSPERIMEN

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

Oleh:

Aulia Muhammad Rabbani Pavapo

NRP. 0431154000087

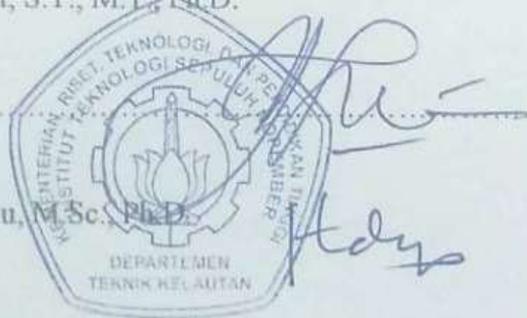
Disetujui oleh:

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

2. Ir. Handayani, 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 PERBANDINGAN JARAK PEMASANGAN *STOPPER* PADA  
PENGELASAN *BUTT JOINT* PELAT BAJA A36 TERHADAP DISTORSI  
*ANGULAR* MENGGUNAKAN PEMODELAN NUMERIK DAN  
EKSPERIMEN**

**Nama Mahasiswa : Aulia Muhammad Rabbani Payapo**

**NRP : 04311540000087**

**Departemen : Teknik Kelautan FTK – ITS**

**Dosen Pembimbing : Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.**

**Ir. Handyanu, M.Sc, Ph.D.**

**ABSTRAK**

Penelitian ini dilatar belakangi oleh kondisi lapangan pada proses fabrikasi bangunan kapal, struktur maupun bejana tekan yang menggunakan alat bantu berupa *stopper*. Dimana *stopper* berfungsi untuk meminimalisir adanya distorsi pada suatu sambungan las. Yang mana distorsi terjadi karena kontraksi pada logam pengisi las saat terjadi fusi dengan material induk yang dapat menarik/mendorong selama proses pengelasan. Namun pada praktiknya, penempatan *stopper* masih terkesan acak dan kurang diperhatikannya jarak yang efisien antar *stopper* yang dipasang. Oleh karena itu, perlu adanya analisis mengenai jarak *stopper* yang efektif untuk meminimalisir adanya distorsi. Dalam penelitian ini dilakukan pemodelan numerik dan eksperimen mengenai pengaruh variasi jarak *stopper* terhadap distorsi *angular*. Dimana hasil analisis numerik akan dibandingkan dengan hasil perubahan distorsi pada eksperimen. Dari hasil perbandingan diperoleh pendekatan antara pengukuran eksperimen dengan numerik, kemudian akan diperoleh nilai rata-rata distorsi paling minimum. Diketahui rata-rata distorsi sudut paling minimum berdasar eksperimen pengelasan terdapat pada variasi jarak *stopper* 100 mm sebesar 1.26 mm. Sama halnya dengan hasil pemodelan numerik, variasi jarak stopper 100 mm memiliki rata-rata distorsi *angular* terkecil.

*Kata Kunci – Baja A36, distorsi angular, SMAW, stopper*

**A COMPARATIVE ANALYSIS OF STOPPER DISTANCE VARIATION  
AT A36 STEEL PLATE BUTT JOINT WELDING ON ANGULAR  
DISTORTION USING NUMERICAL MODELING AND EXPERIMENT**

**Name** : Aulia Muhammad Rabbani Payapo  
**NRP** : 0431154000087  
**Departement** : Ocean Engineering FTK – ITS  
**Supervisor** : Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.  
Ir. Handayanu, M.Sc, Ph.D.

**ABSTRACT**

This research is motivated by the field conditions in the fabrication process of ships, structures and pressure vessels using a tool in the form of a stopper. Where the stopper functions to minimize the distortion in a welded joint. Which is where distortion occurs due to contraction in the weld fill metal during fusion with the parent material which can be pulled/pushed during the welding process. But in practice, the placement of the stopper still seems random and less attention is paid to the efficient distance between the installed stopper. Therefore, there is a need for an analysis of the effective stopper distance to minimize distortion. In this study numerical modeling and experiments were conducted on the effect of variations in stopper distance on angular distortion. Where the results of numerical analysis will be validated with the results of changes in distortion in the experiment. From the results of the validation, the approach between numerical and experimental measurements is obtained, then the minimum minimum distortion value will be obtained. It is known that the average minimum angle distortion based on welding experiments is found in variations of the 100 mm stopper distance of 1.26 mm. As with the results of numerical modeling, the variation of the 100 mm stopper distance has the smallest average angular distortion.

*Keywords – A36 steel, angular distortion, SMAW, stopper*

## KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb.

Alhamdulillah, puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik dan sesuai dengan waktu yang telah ditentukan. Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan studi Sarjana (S-1) di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan (FTK), Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS).

Tugas Akhir ini berjudul “ANALISIS PERBANDINGAN JARAK PEMASANGAN *STOPPER* PADA PENGELASAN *BUTT JOINT* PELAT BAJA A36 TERHADAP DISTORSI *ANGULAR* MENGGUNAKAN PEMODELAN NUMERIK DAN EKSPERIMEN” yang menjelaskan tentang pengaruh jarak pemasangan *stopper* terhadap distorsi sudut akibat sebaran temperatur tinggi dari pengelasan menggunakan pemodelan numerik dan eksperimen fisik.

Penulis telah berusaha untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan sebaik-baiknya. Namun, penulis sadar bahwa Tugas Akhir ini jauh dari kesempurnaan, sehingga saran dan kritik yang bersifat membangun sangat diperlukan sebagai bahan penyempurnaan penelitian selanjutnya. Semoga penelitian ini dapat bermanfaat bagi berbagai pihak untuk perkembangan teknologi kelautan.

Wassalamualaikum Wr. Wb.

Surabaya, Juli 2019

Aulia Muhammad R. Payapo

## UCAPAN TERIMA KASIH

Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan baik tidak lepas dari bantuan dan dukungan moral maupun material dari berbagai pihak, baik secara langsung maupun tidak langsung. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu dan Ayah serta ketiga adik penulis yang senantiasa memberikan dukungan dan doa dengan ikhlas untuk kelancaran pembuatan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D. dan Bapak Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir ini yang senantiasa membimbing dan memberikan pengetahuan serta dukungan kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
3. Bapak Sujantoko, S.T., M.T. selaku dosen wali penulis selama menempuh perkuliahan di Departemen Teknik Kelautan FTK ITS.
4. Rekan-rekan Tugas Akhir bimbingan Bapak Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D. yang selalu memberi dukungan untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
5. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Kelautan FTK ITS atas ilmu yang telah diberikan dan bantuan serta fasilitas selama penulis menjalani perkuliahan.
6. Bapak Sigit sebagai pembimbing penelitian dan Mas Geas sebagai juru las di PT PAL Indonesia (Persero), Cak No dan Mas Doni yang membimbing dalam persiapan material di laboratorium Dinamika Struktur Laut Teknik Kelautan FTK ITS, Pak Pardi sebagai juru las di laboratorium Produksi Teknik Perkapalan FTK ITS dan Pak Eko yang telah memfasilitasi pengukuran di laboratorium Reparasi Mesin PPNS.
7. Teman-teman Tritonus P55 L33 Teknik Kelautan 2015 yang memberi dukungan selama menjalani masa perkuliahan.

Semoga seluruh bantuan yang telah diberikan kepada penulis mendapat balasan yang baik dari Allah SWT dan menjadi bekal di masa depan bagi penulis.

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	i
ABSTRAK .....	ii
ABSTRACT .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
UCAPAN TERIMA KASIH .....	v
DAFTAR ISI .....	vi
DAFTAR GAMBAR .....	viii
DAFTAR TABEL .....	x
<b>BAB I</b> .....	1
<b>1.1 Latar Belakang</b> .....	1
<b>1.2 Rumusan Masalah</b> .....	2
<b>1.3 Tujuan</b> .....	3
<b>1.4 Manfaat</b> .....	3
<b>1.5 Batasan Masalah</b> .....	3
<b>1.6 Sistematika Penulisan</b> .....	4
<b>BAB II</b> .....	5
<b>2.1 Tinjauan Pustaka</b> .....	5
<b>2.2 Dasar Teori</b> .....	7
<b>2.2.1 Baja</b> .....	7
<b>2.2.2 Sambungan Las</b> .....	9
<b>2.2.3 SMAW</b> .....	12
<b>2.2.4 Panas pada Pengelasan</b> .....	13
<b>2.2.5 Distribusi Panas</b> .....	15
<b>2.2.6 Deformasi</b> .....	17
<b>2.2.7 Tegangan Sisa</b> .....	19
<b>2.2.8 Pengaruh Pemasangan Pengekang terhadap Tegangan Sisa</b> .....	22
<b>2.2.9 Stopper</b> .....	22
<b>2.2.10 Metode Elemen Hingga</b> .....	23
<b>BAB III</b> .....	29
<b>3.1 Skema Diagram Alir</b> .....	29

3.2 Penjelasan Diagram Alir.....	30
<b>BAB IV .....</b>	<b>39</b>
4.1 Parameter Pengelasan.....	39
4.2 Proses Pengelasan.....	40
4.3 Pengukuran Distorsi <i>Angular</i> .....	40
4.4 Pemodelan Pelat Baja A36.....	44
4.4.1 Perhitungan <i>Heat Input</i> .....	45
4.4.2 Perhitungan <i>Heat Flux</i> .....	45
4.4.3 Koefisien Konveksi dan <i>Film Coefficient</i> .....	46
4.4.4 Geometri Pemodelan .....	47
4.4.5 Pemodelan <i>Transient Thermal</i> .....	47
4.4.6 Pemodelan <i>Transient Structural</i> .....	51
4.4.7 Perbandingan Hasil Eksperimen dan Pemodelan .....	57
4.4.8 Analisis Hasil.....	58
<b>BAB V.....</b>	<b>61</b>
5.1 Kesimpulan .....	61
5.2 Saran.....	62
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>63</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> Sambungan Tumpul.....	9
<b>Gambar 2.2</b> Sambungan Bentuk T .....	10
<b>Gambar 2.3</b> Sambungan Sudut .....	11
<b>Gambar 2.4</b> Sambungan Tumpang .....	11
<b>Gambar 2.5</b> Sambungan Sisi .....	12
<b>Gambar 2.6</b> Skema rangkaian peralatan SMAW ( <i>Shielded Metal Arc Welding</i> )	12
<b>Gambar 2.7</b> Skema proses SMAW.....	13
<b>Gambar 2.8</b> Volume kontrol konduksi panas satu dimensi.....	16
<b>Gambar 2.9</b> Macam-macam distorsi dalam pengelasan .....	18
<b>Gambar 2.10</b> Distribusi tegangan sisa .....	20
<b>Gambar 2.11</b> Pembentukan tegangan sisa .....	20
<b>Gambar 2.12</b> Grafik derajat pengekangan.....	22
<b>Gambar 2.13</b> Contoh bentuk <i>stopper</i> .....	23
<b>Gambar 2.14</b> Contoh meshing pada sambungan T <i>joint</i> .....	24
<b>Gambar 2.15</b> Geometri elemen dengan 8 <i>node</i> .....	25
<b>Gambar 2.16</b> Geometri elemen dengan 20 <i>node</i> .....	25
<b>Gambar 3.1</b> Skema diagram alir penelitian .....	29
<b>Gambar 3.2</b> Benda kerja berupa pelat dasar yang disambung dan <i>stopper</i> .....	31
<b>Gambar 3.3</b> Variasi jarak 2 <i>stopper</i> sejauh 200 mm .....	31
<b>Gambar 3.4</b> Variasi jarak 2 <i>stopper</i> sejauh 150 mm .....	32
<b>Gambar 3.5</b> Variasi jarak 2 <i>stopper</i> sejauh 100 mm .....	32
<b>Gambar 3.6</b> Proses membuat kampuh las dengan gerinda .....	33
<b>Gambar 3.7</b> WPS untuk pengelasan SMAW dengan ketebalan pelat 8mm.....	33
<b>Gambar 3.8</b> Proses <i>fitting</i> pada masing-masing variasi jarak <i>stopper</i> (dari kiri variasi jarak <i>stopper</i> 200 mm, 150 mm dan 100 mm) .....	34
<b>Gambar 3.9</b> Tampak atas setelah proses pengelasan (dari kiri variasi jarak <i>stopper</i> 200 mm, 150 mm dan 100 mm).....	34
<b>Gambar 3.10</b> Objek pembanding berupa sambungan pelat tanpa <i>stopper</i> .....	35
<b>Gambar 3.11</b> Pengukuran dengan dial <i>gauge</i> .....	35

<b>Gambar 3.12</b> Titik titik pengukuran distorsi sudut.....	36
<b>Gambar 4.1</b> Tampak depan hasil pengelasan pelat baja A36 (dari kiri variasi jarak <i>stopper</i> 200mm, 150mm dan 100mm) .....	40
<b>Gambar 4.2</b> Titik pengukuran tampak atas pelat baja A36 .....	41
<b>Gambar 4.3</b> Grafik distorsi <i>angular</i> melintang pada variasi <i>stopper</i> 100mm.....	43
<b>Gambar 4.4</b> Grafik distorsi <i>angular</i> melintang pada variasi <i>stopper</i> 150mm.....	43
<b>Gambar 4.5</b> Grafik distorsi <i>angular</i> melintang pada variasi <i>stopper</i> 200mm.....	44
<b>Gambar 4.6</b> Grafik distorsi <i>angular</i> melintang pada variasi tanpa <i>stopper</i> .....	44
<b>Gambar 4.7</b> Hasil pemodelan geometri pada Autodesk Inventor.....	47
<b>Gambar 4.8</b> Hasil input geometri ke ANSYS .....	48
<b>Gambar 4.9</b> Hasil <i>meshing</i> tetrahedral .....	48
<b>Gambar 4.10</b> Pemodelan saat melakukan <i>input</i> beban panas.....	49
<b>Gambar 4.11</b> Hasil pemodelan <i>transient thermal</i> pada variasi <i>stopper</i> 100mm .	49
<b>Gambar 4.12</b> Hasil pemodelan <i>transient thermal</i> pada variasi <i>stopper</i> 150mm .	50
<b>Gambar 4.13</b> Hasil pemodelan <i>transient thermal</i> pada variasi <i>stopper</i> 200mm .	50
<b>Gambar 4.14</b> Hasil pemodelan <i>transient thermal</i> pada pelat tanpa <i>stopper</i> .....	51
<b>Gambar 4.15</b> Grafik <i>meshing sensitivity</i> .....	52
<b>Gambar 4.16</b> Pemodelan <i>boundary condition</i> pada <i>stopper</i> dan <i>weld bead</i> .....	53
<b>Gambar 4.17</b> Hasil pemodelan <i>transient structural</i> pada variasi <i>stopper</i> 100mm .....	53
<b>Gambar 4.18</b> Hasil pemodelan <i>transient structural</i> pada variasi <i>stopper</i> 150mm .....	54
<b>Gambar 4.19</b> Hasil pemodelan <i>transient structural</i> pada variasi <i>stopper</i> 200mm .....	54
<b>Gambar 4.20</b> Hasil pemodelan <i>transient structural</i> pada pelat tanpa <i>stopper</i> ....	55
<b>Gambar 4.21</b> Grafik distorsi <i>angular</i> pada variasi <i>stopper</i> 100mm (numerik)...	55
<b>Gambar 4.22</b> Grafik distorsi <i>angular</i> pada variasi <i>stopper</i> 150mm (numerik)...	56
<b>Gambar 4.23</b> Grafik distorsi <i>angular</i> pada variasi <i>stopper</i> 200mm (numerik)...	56
<b>Gambar 4.24</b> Grafik distorsi <i>angular</i> pada variasi tanpa <i>stopper</i> (numerik).....	56
<b>Gambar 4.25</b> Titik-titik diantara <i>stopper</i> yang ditinjau.....	57

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Koefisien efisiensi dari setiap metode pengelasan .....	14
<b>Tabel 4.1</b> Data hasil pengelasan .....	39
<b>Tabel 4.2</b> Hasil pengukuran distorsi <i>angular</i> pada variasi jarak <i>stopper</i> 100mm	41
<b>Tabel 4.3</b> Hasil pengukuran distorsi <i>angular</i> pada variasi jarak <i>stopper</i> 150mm	42
<b>Tabel 4.4</b> Hasil pengukuran distorsi <i>angular</i> pada variasi jarak <i>stopper</i> 200mm	42
<b>Tabel 4.5</b> Hasil pengukuran distorsi <i>angular</i> pada pelat tanpa <i>stopper</i> .....	42
<b>Tabel 4.6</b> Analisis <i>meshing sensitivity</i> .....	52
<b>Tabel 4.7</b> Perbandingan hasil eksperimen dan pemodelan terhadap distorsi <i>angular</i> .....	57
<b>Tabel 4.8</b> Rata-rata distorsi <i>angular</i> eksperimen dan numerik .....	58

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Perkembangan teknologi produksi dan bahan baku logam tidak dapat dipisahkan dari pemanfaatan teknologi pengelasan, sehingga boleh dikatakan hampir tidak ada logam yang tidak dapat dilas. Dalam industri fabrikasi, pengelasan merupakan aspek penting dalam pembuatan dan perbaikan suatu produk fabrikasi misalnya kapal, struktur lepas pantai maupun perpipaan. Dari berbagai manfaat dari penggunaan proses pengelasan tersebut, pengelasan dapat diartikan sebagai teknik penyambungan logam dengan cara mencairkan sebagian logam induk dan logam pengisi dengan atau tanpa tekanan dan dengan atau tanpa panas dan dengan atau tanpa tambahan logam yang menghasilkan sambungan yang kontinu (Sonawan & Sutratman, 2006).

Berbagai faktor yang dapat berpengaruh pada hasil pengelasan, seperti konstruksi las yang sesuai dengan rencana dan spesifikasi. Perencanaan dan spesifikasi pengelasan yang dimaksud melingkupi proses pembuatan, alat dan material yang diperlukan, urutan pelaksanaan, persiapan pengelasan. Sehingga jika beberapa faktor tersebut dilaksanakan dengan baik, akan didapatkan efisiensi pada suatu sambungan pengelasan. Namun, hal yang tidak dapat dihindarkan dari sebuah proses pengelasan adalah temperatur tinggi yang tidak seragam yang dapat menghasilkan distorsi dan tegangan sisa. Dimana tegangan sisa merupakan tegangan akibat pemanasan lokal dan pendinginan yang cepat. Pada penerapan di lapangan, tegangan sisa dapat dikurangi dengan penempatan dan pemanasan di awal dan akhir proses pengelasan. Akan tetapi pada beberapa konstruksi dan metode pengurangan tegangan sisa terkadang sulit dilakukan, sehingga diperlukan pemilihan metode dan persiapan pengelasan yang tepat dengan memprediksi besarnya distorsi dan tegangan sisa untuk meningkatkan efisiensi dan kekuatan sambungan las.

Tahap persiapan pada tiap proses pengelasan dapat berupa persiapan prosedur pengelasan, persiapan material dan persiapan penempatan. Pada persiapan penempatan, biasanya digunakan *jig* (tanggem) atau *stopper* sebagai penahan yang bertujuan untuk meminimalisir terjadinya deformasi maupun perubahan posisi pada material yang akan dilas. Pada praktiknya dilapangan, penggunaan *stopper* berupa tambahan pelat sementara sangatlah lumrah dijumpai karena relatif lebih efektif dalam segi ekonomis, cepat dalam persiapannya dan dapat diterapkan pada area yang relatif rumit dibandingkan penggunaan *jig* atau tanggem penjepit yang bersifat *fixed*.

Pada penerapannya *stopper* memang efektif dalam meminimalisir terjadinya deformasi, namun penahanan yang berlebihan akan menimbulkan tegangan sisa yang dapat menyebabkan retak atau *crack* pada area hasil pengelasan. Begitupula dengan ketebalan pelat yang dilas, semakin tebal pelat maka akan kecil kemungkinan terjadinya deformasi namun menimbulkan tegangan sisa yang besar. Sehingga pemilihan tebal pelat dan penggunaan *stopper* yang tepat tidak akan menimbulkan besarnya tegangan sisa dan deformasi yang terjadi.

Oleh karena itu dalam penelitian ini, penulis melakukan analisa pemodelan numerik dan eksperimen pada pelat baja A36 dengan memvariasikan pengaruh *stopper* terhadap distorsi *angular* akibat dari tegangan sisa dan deformasi pada area hasil pengelasan. Dari pemodelan numerik menggunakan simulasi elemen hingga dengan *software* ANSYS tersebut bertujuan untuk mendapat hasil berupa besarnya distorsi *angular* yang terjadi pada pelat baja A36 yang nantinya dibandingkan dengan hasil eksperimen. Sehingga dapat diketahui pada jenis variasi manakah distorsi *angular* terkecil terjadi.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Rumusan masalah yang akan diselesaikann dalam penelitian ini adalah:

1. Berapa besar distorsi *angular* akibat pengaruh jarak pemasangan dan jumlah *stopper* pada pelat baja A36 pada eksperimen dengan pengelasan SMAW dan dengan menggunakan pemodelan numerik?

2. Variasi jarak pemasangan dan jumlah *stopper* manakah yang menghasilkan distorsi *angular* terkecil?

### 1.3 Tujuan

Tujuan yang akan dicapai dalam penelitian ini adalah:

1. Mengukur dan menganalisa besarnya distorsi *angular* akibat pengaruh jarak pemasangan dan jumlah *stopper* pada pelat baja A36 dengan pengelasan SMAW dan dengan pemodelan numerik.
2. Menentukan variasi jarak pemasangan dan jumlah *stopper* yang menghasilkan distorsi *angular* terkecil.

### 1.4 Manfaat

Adapun manfaat dari penelitian ini antara lain:

1. Memberikan informasi mengenai perubahan distorsi *angular* akibat pengaruh jarak pemasangan dan jumlah *stopper* pada pelat baja A36.
2. Memberikan pengetahuan tentang hasil yang paling optimum dari variasi jarak pemasangan dan jumlah *stopper* yang mempengaruhi terjadinya distorsi *angular*.
3. Diharapkan dapat menjadi acuan dalam penelitian lainnya yang memvariasikan penggunaan *stopper* pada sambungan pengelasan.

### 1.5 Batasan Masalah

Agar lebih memudahkan analisis, maka perlu diberikan batasan-batasan sebagai berikut:

1. Pengelasan menggunakan metode SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*).
2. Posisi pengelasan adalah 1G (datar) dengan jenis sambungan *butt joint*.
3. Pengelasan dilakukan tanpa adanya *pre-heating* dan *post-heating*.
4. Jenis *stopper* berupa pelat yang sejenis dengan pelat dasar yang disambungkan dengan *tack weld* dan diletakkan pada sisi *root*.

5. Seluruh material uji dianggap rata dan homogen sebelum dilakukan eksperimen.
6. Tidak dilakukan pelepasan *stopper* setelah proses pengelasan.
7. Jenis material yang digunakan pada pemodelan numerik adalah material *linear-elastic*.

## **1.6 Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut

### **1. BAB I PENDAHULUAN**

Bab ini berisi beberapa hal, antara lain

- 1.1. Latar Belakang
- 1.2. Perumusan Masalah
- 1.3. Tujuan
- 1.4. Manfaat
- 1.5. Batasan Masalah
- 1.6. Sistematika Penulisan

### **2. BAB II DASAR TEORI**

Bab ini berisi mengenai teori-teori pendukung yang digunakan dalam menyelesaikan permasalahan pada penelitian ini.

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

Bab ini menguraikan alur penelitian dari awal hingga menghasilkan suatu kesimpulan.

### **4. BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN**

Bab ini berisi mengenai jabaran permasalahan yang terjadi dan solusi dalam menyelesaikan analisis.

### **5. BAB V PENUTUP**

Bab ini berisi simpulan dari analisis dan saran yang bermanfaat.

## BAB II DASAR TEORI

### 2.1 Tinjauan Pustaka

Pengelasan merupakan salah satu teknik penyambungan logam dengan cara mencairkan sebagian logam induk dan logam pengisi dengan atau tanpa tekanan dan dengan atau tanpa panas dan dengan atau tanpa tambahan logam yang menghasilkan sambungan yang kontinu (Sonawan & Sutratman, 2006). Dalam pekerjaan suatu proyek konstruksi proses pengelasan sangat populer digunakan, namun pengelasan tidak luput dari berbagai kekurangan yang dimilikinya. Akibat dari pengelasan yang merugikan yaitu adanya tegangan sisa dan distorsi yang menyebabkan perubahan struktur akibat kenaikan maupun penurunan temperatur yang signifikan. Sehingga tegangan sisa dan distorsi menjadi dua faktor utama permasalahan yang perlu dikaji lebih lanjut agar dapat dikurangi dampak negatifnya. Panas yang terjadi sejak proses pengelasan dimulai hingga berhenti menghasilkan siklus panas yang dapat mengubah struktur mikro pada area yang terpapar panas (HAZ). Pada daerah tersebutlah bagian pada logam induk menjadi rentan terjadi perubahan bentuk akibat pemuaihan oleh panas dan itulah yang disebut distorsi. Sehingga tidak menutup kemungkinan untuk terjadinya kelengkungan dan tertariknya sebagian sisi benda kerja.

Peneliti sebelumnya, Anggit Akbar Anggoro (2018) telah melakukan penelitian mengenai pengaruh stopper model baut terhadap tegangan sisa dan deformasi. Dengan membandingkan antara *stopper* baut dengan *stopper* konvensional menggunakan metode elemen hingga. *Stopper* dimodelkan dengan software elemen hingga dengan variasi jarak pemasangan *stopper*, tebal *stopper* dan ukuran baut. Dari hasil pemodelan dan analisis, *stopper* model baut memiliki nilai deformasi maksimum dan nilai tegangan sisa lebih besar dari *stopper* konvensional. Sehingga penggunaan *stopper* konvensional memberikan dampak yang lebih baik dibandingkan *stopper* model baut ditinjau dari besarnya deformasi dan tegangan sisa yang ditimbulkan.

Peneliti lainnya, Rafid Buana Putra (2017) melakukan penelitian mengenai deformasi dan tegangan sisa dengan variasi ukuran *stopper*. Penelitian ini membandingkan lima jenis variasi ukuran *stopper* dan variasi bentuk kampuh. Analisis ini hanya dilakukan dengan membuat pemodelan pengelasan pelat baja yang dipasang *stopper*, tidak dengan eksperimen. Dari hasil pemodelan dan analisis, dapat disimpulkan bahwa deformasi dan tegangan sisa semakin kecil jika *stopper* yang dipasang semakin panjang. Dari hasil analisis tegangan sisa didapatkan bahwa *stopper* dengan panjang 200 mm masih di bawah *yield stress*, sehingga *stopper* 200 mm menjadi yang paling optimum dibanding lainnya.

Kemudian penelitian yang dilakukan oleh Prayoga Relanda Pratama (2016) yang mengangkat permasalahan mengenai pengaruh *stopper* terhadap tegangan sisa dan deformasi pada sambungan *butt weld* pada pelat datar. Dengan membuat pemodelan secara numerik menggunakan *software* ANSYS yang nantinya divalidasi dengan uji konvergensi tanpa adanya uji eksperimen. Penelitian ini memvariasikan pengelasan pelat datar yang dipasang *stopper* memvariasikan tebal pelat dasar, tebal *stopper* dan jarak pemasangan *stopper*. Dan hasil dari uji numerik tersebut didapatkan bahwa nilai deformasi akan bertambah besar jika jarak pemasangan *stopper* besar dan tebal *stopper* yang digunakan kecil. Deformasi terjadi pada daerah pelat dasar yang letaknya jauh dari *stopper* sedangkan tegangan sisa tersebar banyak pada daerah pelat dasar yang letaknya berdekatan dengan *stopper*.

Dari beberapa penelitian yang ditemukan, ketiganya membahas tentang variasi yang berbeda-beda terhadap distorsi dan tegangan sisa pada pelat datar. Variasi yang telah dilakukan, antara lain adalah variasi mengenai jumlah *stopper*, ukuran *stopper*, jarak *stopper*, ukuran pelat dasar yang dilas, alur pengelasan, jenis pengelasan, hingga jenis material yang dipakai. Sehingga berdasarkan semua penelitian tersebut, peneliti akan membahas tentang variasi jarak *stopper* terhadap distorsi *angular* pada pelat datar yang dianalisis dengan pemodelan numerik dan eksperimen.

## 2.2 Dasar Teori

### 2.2.1 Baja

Baja pada dasarnya adalah paduan besi dan karbon. Selain terdiri dari besi dan karbon, baja juga mengandung unsur lain. Sebagian berasal dari potongan bijih besi (misalnya belerang dan fosfor) yang biasanya kadarnya ditekan serendah mungkin. Sebagian lagi unsur yang digunakan pada proses pembuatan baja (misalnya silikon dan mangan). Selain itu, sering kali juga sejumlah unsur paduan sengaja ditambahkan untuk memperoleh sifat tertentu sehingga jenis baja akan beragam (Zakharov, 1962).

Karena penggunaannya yang sangat luas, maka berbagai pihak sering membuat klasifikasi menurut kebutuhan masing-masing. Ada beberapa cara mengklasifikasikan baja, diantaranya:

- Menurut penggunaannya: baja konstruksi, baja mesin, baja pegas, baja ketel, baja perkakas dan lainnya..
- Menurut kekuatannya: baja lunak, baja berkekuatan tinggi.
- Menurut struktur mikronya: baja *eutectoid*, baja *hypoeutectoid*, baja *hypereutectoid*, baja feritik dan lainnya.
- Menurut komposisinya: baja karbon, baja paduan rendah, baja paduan tinggi dan lainnya.

Menurut komposisi kimianya, baja dapat digolongkan menjadi dua, yaitu baja karbon (baja tanpa paduan) dan baja paduan. 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.

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.

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.

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.

#### **2.2.1.1 Baja ASTM A36**

Baja ASTM A36 merupakan salah satu jenis baja yang dikategorikan sebagai baja karbon rendah dengan nilai *density* 7.85 g/cm<sup>3</sup>. Baja ini sangat cocok untuk proses *grinding*, *bending*, *drilling* dan *machining* karena memiliki karakter yang ulet (AZoM, 2012).

ASTM A36 juga memiliki sifat pengelasan yang sangat baik sehingga dapat digunakan untuk proses pengelasan dengan berbagai metode. Dari sekian banyak metode pengelasan, umumnya baja ASTM A36 menghasilkan kualitas sambungan yang baik. Sehingga jenis baja ini sering diaplikasikan pada konstruksi jembatan, bangunan maupun oil rig yang disambung dengan baut, keling maupun dengan pengelasan.

Terdapat juga berbagai baja rendah karbon yang karakteristiknya hampir sama dengan ASTM A36, yaitu SS400, JIS 3101 dan AISI C1018. Dari berbagai macam baja karbon rendah tersebut, ASTM A36 memiliki *yield strength* lebih rendah sehingga mudah untuk dilakukannya *bending*.

### 2.2.2 Sambungan Las

ASME section IX (2013), dalam *rules* dan *codenya* menjelaskan bahwa proses pengelasan pada dasarnya memiliki tujuh macam sambungan, yaitu: *butt joint*, *backing joint*, *T joint*, *cross joint*, *overlap joint*, *corner joint* dan *edge joint*. Namun jenis sambungan utama pada pengelasan yaitu sambungan tumpul (*butt joint*), sambungan bentuk T (*T joint*), sambungan sudut (*corner joint*), sambungan tumpang (*lap joint*) dan sambungan sisi (*edge joint*). Sambungan-sambungan tersebut memiliki karakteristik masing-masing tergantung kondisi material yang dikerjakan. Pada bentuk sambungan pengelasan mempengaruhi kekuatan dan ketangguhan suatu konstruksi.

#### a. Sambungan Tumpul

Sambungan tumpul atau butt joint adalah jenis sambungan yang paling sering digunakan karena paling sederhana dibanding sambungan lainnya.

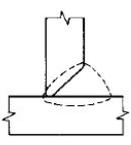
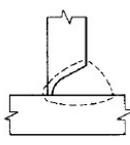
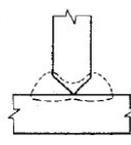
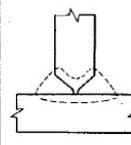
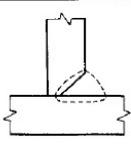
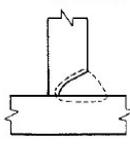
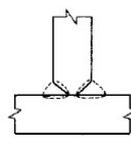
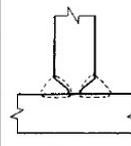
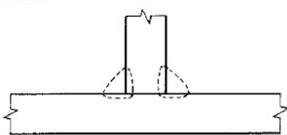
Jenis lasan Jenis alur	Lasan dengan alur		
	Lasan Penetrasi penuh tanpa pelat penahan	Lasan penetrasi penuh dengan pelat penahan	Lasan penetrasi sebagian
Persegi (I)			
V tunggal (V)			
Tirus tunggal (V)			
U tunggal (U)		—	
V ganda (X)		—	
Tirus ganda (K)		—	
U ganda (H) (DU)		—	
J tunggal (J)		—	
J ganda (DJ)		—	

**Gambar 2.1** Sambungan Tumpul (Wirjosumarto & Okumura, 2000)

Sambungan ini dibagi menjadi dua jenis yang dikenal dengan CJP (*Complete Joint Penetration*) atau sambungan pengelasan dengan penetrasi penuh sampai terdapat root pada bagian bawah dari material yang dilas. Dan PJP (*Partial Joint Penetration*) atau sambungan dengan penetrasi sebagian atau tidak menyeluruh sedalam ketebalan material. Macam sambungan tumpul dapat dilihat pada Gambar 2.1.

b. Sambungan bentuk T

Pada sambungan bentuk T seperti pada Gambar 2.2 mempertimbangkan dua metode dalam penyambungannya, yaitu dengan pengelasan alur dan dengan pengelasan sudut. Dan jenis penetrasi yang dijelaskan pada sambungan tumpul juga berlaku pada sambungan ini. Sambungan ini sering kali ditemui pada profil *frame* maupun struktur *frame* yang digunakan pada industri mesin maupun sipil.

Lasan dengan alur	Lasan penetrasi penuh					
	Lasan penetrasi sebagian					—
Las sudut						

**Gambar 2.2** Sambungan Bentuk T (Wiryosumarto & Okumura, 2000)

c. Sambungan Sudut

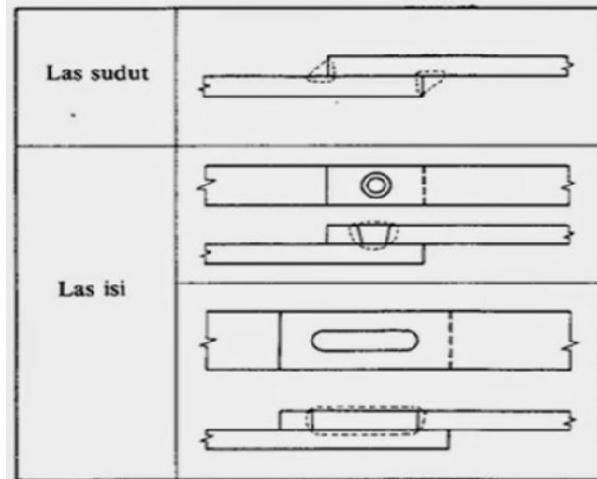
Dalam sambungan ini dapat terjadi penyusutan dalam arah tebal pelat yang dapat menyebabkan terjadinya retak, hal ini dapat dihindari dengan membuat alur pada pelat tegak. Seperti yang terlihat pada Gambar 2.3, dimana pelaksanaannya dapat dilakukan dengan pengelasan tembus atau pengelasan dengan pelat pembantu.

Lasan dengan alur	Lasan penetrasi penuh									
	Lasan penetrasi sebagian									—
Gabungan lasan dengan alur dan las sudut		las sudut	las sudut		las sudut		las sudut		—	—
Las sudut										

**Gambar 2.3** Sambungan Sudut (Wiryosumarto & Okumura, 2000)

d. Sambungan Tumpang

Sambungan tumpang pada Gambar 2.4 dibagi dalam 3 jenis. Karena sambungan ini efisiensinya rendah maka jarang sekali digunakan untuk pelaksanaan penyambungan konstruksi utama. Sambungan tumpang biasanya dilaksanakan dengan las sudut, dan las isi.

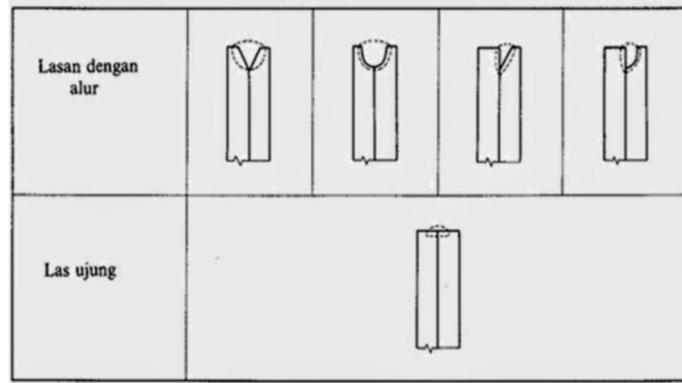


**Gambar 2.4** Sambungan Tumpang (Wiryosumarto & Okumura, 2000)

e. Sambungan Sisi

Sambungan sisi dibagi dalam sambungan las dengan alur dan sambungan las ujung, dapat dilihat pada Gambar 2.5. Untuk jenis yang pertama pada pelatnya harus dibuat alur sedangkan pada jenis kedua pengelasan dilakukan pada ujung pelat tanpa ada alur. Jenis kedua ini

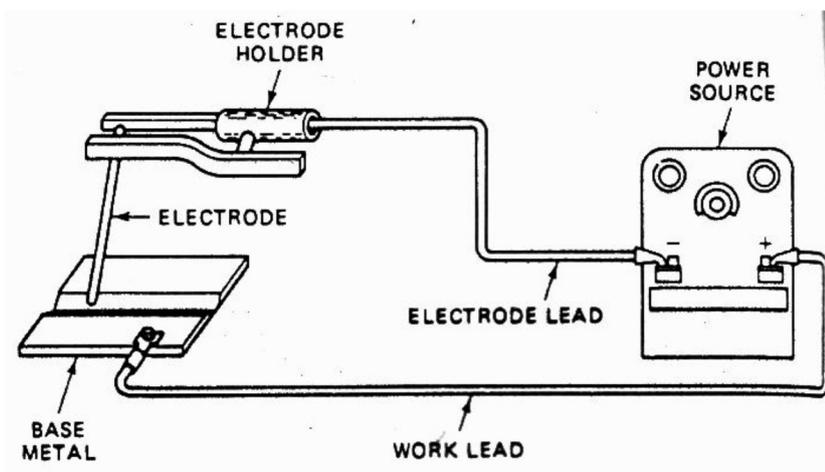
biasanya hasilnya kurang memuaskan kecuali bila pengelasannya dilakukan dalam posisi datar dengan aliran listrik yang tinggi.



**Gambar 2.5** Sambungan Sisi (Wiryosumarto & Okumura, 2000)

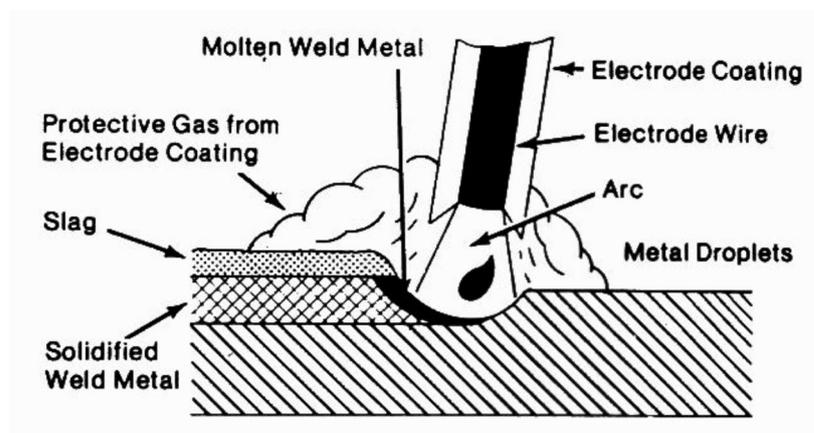
### 2.2.3 SMAW

Pengelasan SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) merupakan salah satu metode yang umum digunakan pada industri fabrikasi. Metode pengelasan ini menggunakan busur listrik sebagai sumber panas dan menggunakan elektroda kawat logam yang dibungkus dengan fluks. Busur listrik akan menimbulkan panas jika terjadi kontak antara elektroda dengan logam induk, sehingga dapat mencairkan ujung elektroda dan logam yang menyebabkan terjadinya paduan yang membentuk deposit pengelasan (*weld metal*). Skema rangkaian peralatan pada pengelasan SMAW dapat dilihat pada Gambar 2.6.



**Gambar 2.6** Skema rangkaian peralatan SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*)  
(Cary, 1994)

Adanya perlindungan pada pengelasan SMAW sangat mempengaruhi hasil pengelasan, karena memadukan logam memerlukan lingkungan yang mendukung. Salah satu dari perlindungan pada SMAW berupa terak atau *slag*. Terak terjadi akibat terbakarnya fluks yang memiliki masa jenis yang lebih rendah dari weld metal, sehingga terak dapat melapisi bagian atas dari *weld metal* dengan menimbulkan lapisan baru yang harus dibersihkan saat mengering. Perlindungan kedua yaitu berupa gas yang berfungsi melindungi cairan logam las dari pengaruh atmosfer, dapat dilihat pada Gambar 2.7.



**Gambar 2.7** Skema proses SMAW (DeGarmo, Black, & Kosher, 1988)

#### 2.2.4 Panas pada Pengelasan

Pada semua proses pengelasan, hampir seluruhnya dilakukan dengan melakukan pemanasan lokal. Masukan panas yang diberikan saat pengelasan menyebabkan peningkatan temperatur material yang terkena busur las sampai pada temperatur lebur. Perubahan temperatur yang signifikan pada daerah yang mengalami kontak langsung dengan busur las terjadi dengan sangat cepat sehingga menciptakan perbedaan temperatur dengan daerah disekitarnya. Sehingga panas mulai mengalir ke sekitar wilayah sekitar alur las hingga panas yang terdistribusi mengalami penurunan temperatur pada wilayah yang relatif jauh dari alur pengelasan.

Distribusi temperatur yang terjadi pada saat proses pemanasan maupun pendinginan tidak merata pada seluruh material. Distribusi yang tidak merata inilah

yang menjadi penyebab timbulnya deformasi pada struktur las. Sehingga untuk dapat menyelesaikan berbagai persoalan tegangan dan deformasi pengelasan harus diketahui dahulu bagaimana distribusi dari temperatur yang dihasilkan terhadap material las.

Pada proses pengelasan tidak semua energi digunakan untuk memanaskan elektroda dan logam las. Sebagian energi terserap ke lingkungan karena adanya kontak dengan udara lingkungan sekitar. Sehingga energi efektif yang digunakan dalam pengelasan dapat dirumuskan pada Persamaan 2.1 sebagai berikut:

$$Q = \eta U I / v \quad (2.1)$$

Dimana :

Q = Net heat input (W)

$\eta$  = Koefisien efisien busur

U = Daya busur (V)

I = Arus Busur (A)

Dimana harga koefisien efisiensi untuk tiap jenis pengelasan berbeda-beda, untuk pengelasan SMAW yaitu antara 0.66 sampai dengan 0.85 seperti pada Tabel 2.1.

**Tabel 2.1** Koefisien efisiensi dari setiap metode pengelasan (Pilipenko, 2001)

<i>Welding process</i>	SAW	SMAW	GMAW		GTAW		
	<i>steel</i>	<i>steel</i>	CO2- <i>steel</i>	Ar- <i>steel</i>	Ar- <i>steel</i>	He- <i>steel</i>	Ar-Al
$\eta$	0.91- 0.99	0.66- 0.85	0.75- 0.93	0.66- 0.70	0.25- 0.75	0.55- 0.80	0.22- 0.46

Sedangkan besarnya *heat flux* yang dikenakan pada material ditentukan dengan Persamaan 2.2 sebagai berikut:

$$q_1 = q_e \frac{A_1}{A_f} \quad (2.2)$$

Dimana :

$q_1$  = *Heat flux* pada elemen (J/mm<sup>2</sup>)

$q_e$  = *Heat flux* yang dihasilkan elektrode (J/mm<sup>2</sup>)

$A_1$  = Luasan elemen yang terkena beban *heat flux* (mm<sup>2</sup>)

$A_f$  = Luasan *flux* yang dihasilkan elektrode (mm<sup>2</sup>)

Dan luasan *flux* yang dihasilkan elektrode ditentukan dengan Persamaan 2.3 sebagai berikut:

$$A_f = b v t \quad (2.3)$$

Dimana :

$b$  = panjang kaki las (mm)

$v$  = kecepatan pengelasan (mm/s)

$t$  = waktu yang diperlukan pada satu elemen (s)

Heat flux yang dihasilkan elektroda didapatkan dari Persamaan 2.4 sebagai berikut:

$$q = \frac{Q}{A} \quad (2.4)$$

Dimana :

$q$  = *Heat flux*

$Q$  = *Heat input* bersih (watt)

$A$  = Luasan elemen yang terkena beban *heat flux* (mm<sup>2</sup>)

### 2.2.5 Distribusi Panas

Sebaran panas pada suatu proses pengelasan terjadi akibat material yang menerima pemanasan dengan gradien temperatur yang tajam, berawal ketika

temperatur awal material hingga temperatur saat pemanasan las terjadi. Dalam proses pengelasan, perpindahan panas yang terjadi ke seluruh bagian material merupakan proses konduksi. Dimana proses konduksi terjadi pada satu medium pemanasan atau material yang sama. Panas yang mengalir dari bagian material yang panas menuju bagian yang lebih dingin dimana kerapatan aliran panas atau *heat flow density* bergantung dari gradien temperatur yang dikalikan dengan faktor koefisien konduktivitas panas yang dirumuskan dengan hukum Fourier pada Persamaan 2.5 sebagai berikut:

$$q_x = -K_{xx} \frac{dT}{dx} \quad (2.5)$$

Dimana:

$q_x$  = Konduksi panas ( $W/m^2$ )

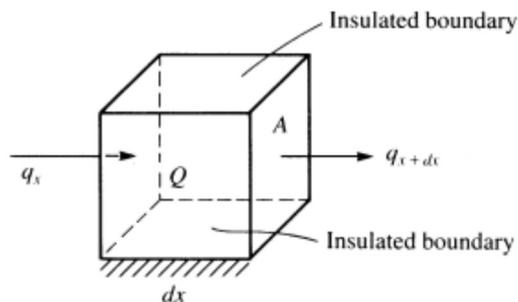
$K_{xx}$  = Konduktivitas termal arah-x ( $W/mK$ )

$\frac{dT}{dx}$  = Gradien temperatur ( $K/m$ )

Perbedaan temperatur dengan nilai konduktivitas tinggi akan menambah heat flux tiap waktunya. Pada material isotropik, nilai konduktivitas termal untuk sumbu y dan z sama. Untuk panas yang berada di luar kontrol volume, misal pada permukaan  $x + dx$  seperti pada Gambar 2.8 dirumuskan pada Persamaan 2.6 sebagai berikut:

$$q_{x+dx} = -K_{xx} \frac{dT}{dx} \Big|_{x+dx} \quad (2.6)$$

Dimana gradien temperatur pada persamaan diatas berada pada  $x + dx$ .



**Gambar 2.8** Volume kontrol konduksi panas satu dimensi (Logan, 2000)

Dalam tiap proses pengelasan dengan berbagai macam material tidaklah sama distribusi panasnya. Distribusi panas ini dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti sifat konduktivitas dari material, besarnya massa logam yang berada di sekitar daerah las, teknik pengelasan dan alur yang digunakan.

Salah satu faktor yang menentukan besarnya panas yang diserap oleh material adalah alur pengelasan dan jenis sambungan, sehingga berdasar jumlah alur dapat memudahkan panas untuk mengalir. Sambungan tumpang akan lebih cepat menarik panas dari daerah las bila dibandingkan dengan sambungan sisi. Hal ini disebabkan karena pada sambungan tumpang menyediakan dua arah penyebaran panas.

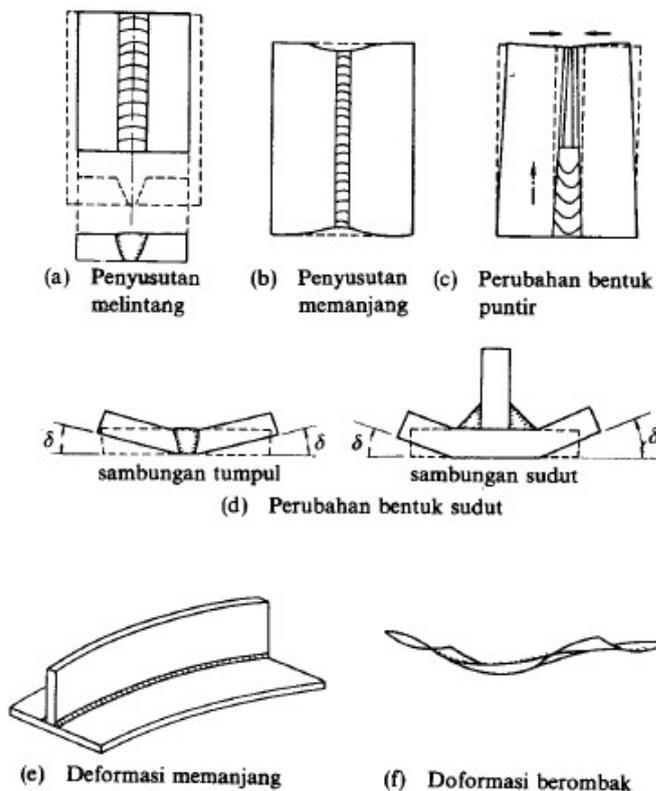
Berbagai macam teknik pada pengelasan juga berpengaruh pada distribusi panas. Seperti ketika adanya gerakan mengayun (*weaving*) dan gerakan masuk atau keluarnya elektroda pada genangan *weld metal* dengan pola yang teratur saat pengelasan berlangsung. Hal tersebut diterapkan untuk mengontrol temperatur, menyebarkan panas dan memperoleh alur las yang lebih lebar untuk gerakan mengayun.

### **2.2.6 Deformasi**

Deformasi atau biasa disebut distorsi merupakan terjadinya perubahan bentuk pada suatu benda baik karena tekanan dari suatu beban maupun panas. Segala proses yang melibatkan panas atau temperatur yang tinggi pada benda kerja berupa logam maupun non-logam sangat memungkinkan untuk terjadinya deformasi. Sehingga pada penerapannya di lapangan terdapat beberapa perubahan bentuk dasar terjadinya distorsi yaitu penyusutan melintang tegak lurus terhadap arah pengelasan, penyusutan memanjang dan perubahan bentuk secara rotasional terhadap jalur las (*distorsi angular*). Namun selain tiga jenis perubahan bentuk diatas, terdapat beberapa macam distorsi lainnya seperti pada Gambar 2.9 yaitu:

- a. *Longitudinal shrinkage*: penyusutan material yang searah atau sejajar dengan garis las. Umumnya besarnya penyusutan sekitar 1/1000 dari panjang sambungan las, sehingga penyusutan ini dianggap jarang terjadi.

- b. *Transversal shrinkage*: penyusutan tegak lurus atau melintang terhadap garis las yang disebabkan oleh perubahan bentuk puntir dan akibat besarnya derajat pengekanan yang terjadi.
- c. *Buckling distortion*: fenomena yang berkaitan dengan kompresi yang berkenaan dengan panas dan menyebabkan ketidakstabilan ketika material kerja relatif tipis.
- d. *Angular distortion & rotational shrinkage*: yaitu adanya distribusi panas yang tidak merata pada kedalaman material sehingga menyebabkan perubahan sudut.
- e. *Longitudinal distortion*: yaitu distorsi dalam bidang yang melalui garis las dan tegak lurus terhadap pelat.



**Gambar 2.9** Macam-macam distorsi dalam pengelasan (Wiryosumarto & Okumura, 2000)

Dalam menanggapi rentan terjadinya distorsi pada proses pengelasan, terdapat beberapa pendekatan yang sesuai untuk menyelesaikan masalah distorsi. Hal pertama yang penting yaitu pengembangan proses pengelasan dan prosedur

fabrikasi untuk meminimalisir terjadinya distorsi. Kemudian diperlukannya pembuatan standar perbandingan mengenai toleransi minimal pada distorsi pengelasan. Dan teknik berupa upaya menghilangkan distorsi setelah distorsi tersebut muncul. Namun dalam penerapannya, cara berupa meminimalisir lebih mudah daripada menghilangkan distorsi setelah pengelasan. Beberapa faktor yang perlu diperhatikan dalam pengelasan agar distorsi dapat dihindari antara lain:

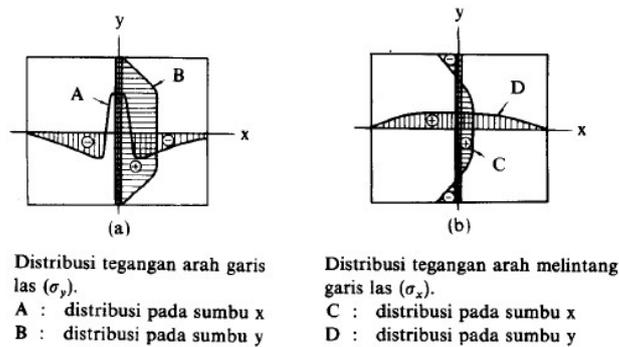
- a. Jumlah *welding pass*: semakin banyak jumlah *welding pass* yang digunakan akan meningkatkan risiko terjadinya deformasi.
- b. Urutan pengelasan: melakukan proses pengelasan dengan urutan tertentu untuk meminimalkan masukan panas pada material.
- c. Derajat pengekanan: menentukan besar tahanan untuk mempertahankan posisi benda kerja. Penggunaan penahan (*jig*) akan meminimalkan pergerakan/pergeseran material, namun ketika penahan dilepas akan menimbulkan tegangan sisa.
- d. Detail sambungan: bentuk geometri sambungan dan jenis kampuh mempengaruhi jenis distorsi yang akan terjadi.

### **2.2.7 Tegangan Sisa**

Tegangan sisa akan timbul apabila sebuah material terkena perubahan temperatur yang tidak seragam, tegangan ini juga disebut dengan tegangan termal. Distribusi regangan plastis yang tidak merata pada material juga dapat menimbulkan tegangan sisa. Terdapat beberapa kondisi yang menyebabkan terjadinya tegangan sisa selama proses produksi seperti proses *casting, forging, roll, bending, grinding, machining* dan pada proses fabrikasi yaitu pengelasan.

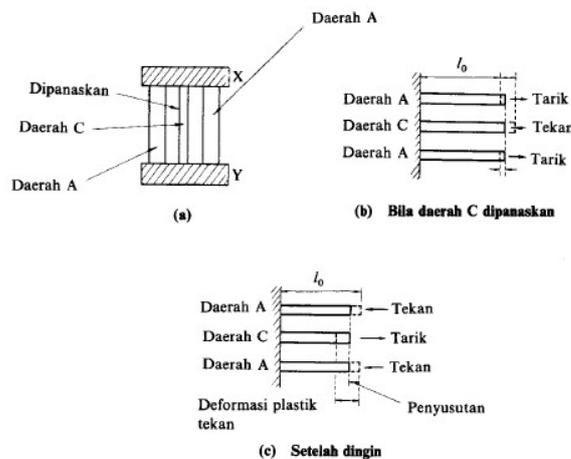
Faktor yang mempengaruhi pembentukan tegangan sisa adalah batas transformasi dan batas luluh beban, temperatur pemanasan tertinggi, laju pendinginan, tahanan luar dan pemanasan awal. Ketika material menerima panas secara merata akan terjadi tegangan juga, namun tegangan sisa juga akan terjadi ketika regangan yang didistribusikan tidak merata seperti regangan plastis.

Distribusi tegangan sisa dipengaruhi oleh jenis dan bentuk konfigurasi hasil pengelasan, seperti pada Gambar 2.10. Pada *butt weld*, garis lasan arah memanjang akan mencapai batas kekuatan luluh pada garis las dan kemudian menurun dan mencapai nol pada ujung pelat. Sedangkan pada arah melintang garis las, terjadi keseimbangan antara tegangan tarik dan tegangan tekan.



**Gambar 2.10** Distribusi tegangan sisa (Wiryosumarto & Okumura, 2000)

Proses terjadinya tegangan sisa pada Gambar 2.11, dimana mengembangnya daerah yang mengalami pemanasan akibat pengelasan (daerah C). Pada daerah yang mengalami pengembangan ditahan oleh daerah disekitarnya yang relatif jauh dari area yang terkena panas (daerah A). Sehingga pada kedua daerah tersebut terjadi tegangan, dimana daerah C mengalami tegangan tekan dan daerah A mengalami tegangan tarik. Tetapi jika luas dari daerah A lebih besar dari C, maka daerah C tidak mengalami perubahan bentuk namun daerah A mengalami perubahan bentuk elastik.



**Gambar 2.11** Pembentukan tegangan sisa (Wiryosumarto & Okumura, 2000)

Disaat proses pendinginan setelah pengelasan, daerah C menyusut secara signifikan di area samping akibat pendinginan dan tegangan tekan. Daerah A menahan penyusutan pada daerah C, sehingga terjadi tegangan tarik yang diimbangi tegangan tekan pada daerah A.

Tegangan sisa dapat diketahui besarnya dengan menghitung regangan sisa yang terjadi pada material dengan menggunakan hukum Hooke. Sedangkan besar regangan dapat diukur dari perubahan antara batang sebelum dipotong dan setelah dipotong, yaitu ukuran yang digambarkan pada bagian yang akan ditentukan tegangan sisanya dan ukuran sebenarnya yang didapat setelah bagian yang akan diuji dipotong. Dari hukum Hooke menjelaskan bahwa perubahan ukuran disebabkan adanya tegangan, karena itu besarnya tegangan dapat dihitung. Besar tegangan satu arah dapat dihitung dengan Persamaan 2.7 sebagai berikut:

$$\sigma = E \frac{\Delta l}{l} \quad (2.7)$$

Dimana:

$\sigma$  = tegangan sisa yang terjadi

E = modulus elastisitas

l = panjang awal

$\Delta l$  = perubahan panjang awal dan akhir

Sedangkan untuk tegangan sisa dalam dua dimensi dapat dilakukan perhitungan dengan Persamaan 2.8 dan 2.9 sebagai berikut:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y) \quad (2.8)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_y + \nu \varepsilon_x) \quad (2.9)$$

Dimana:

$\sigma_x$  = tegangan tegak lurus garis las

$\sigma_y$  = tegangan searah garis las

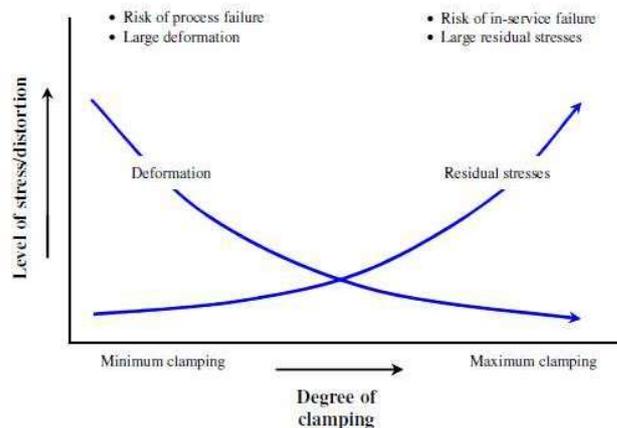
$\varepsilon_x$  = regangan tegak lurus garis las

$\varepsilon_y$  = regangan searah garis las

$\nu$  = rasio Poisson

### 2.2.8 Pengaruh Pemasangan Pengekang terhadap Tegangan Sisa

Jumlah pemasangan pengekang berupa *jig* ataupun *stopper* dalam membantu proses pengelasan akan berpengaruh pada besarnya deformasi dan tegangan sisa yang terjadi. Jika pengekangan yang dilakukan cukup banyak, maka mengakibatkan semakin besarnya tegangan sisa yang terjadi meskipun di sisi lain deformasi semakin kecil seperti pada grafik derajat pengekangan pada Gambar 2.12.



**Gambar 2.12** Grafik derajat pengekangan (Pinninti, 2014)

Pengekangan pada proses pengelasan akan menghasilkan keseimbangan antara deformasi dan tegangan sisa. Pada kondisi pengekangan yang ekstrim, kecenderungan hasil pengelasan akan terjadi cacat retak yang harus dihindari. Besar derajat pengekangan merupakan fungsi dari jenis sambungan, kekuatan struktur, jarak pemasangan pengekang (*jig* atau *stopper*) dan tebal pelat.

### 2.2.9 Stopper

Salah satu alat yang membantu dalam meminimalisir distorsi pada pengelasan yaitu *stopper* seperti pada Gambar 2.13. Biasanya, *stopper* terbuat dari pelat dan dipasang dengan sudut tertentu terhadap garis las. Pelat tersebut berfungsi

untuk menahan benda kerja berupa dua pelat yang akan disambungkan dengan pengelasan, sehingga kedua permukaan pelat diharapkan selalu pada posisi yang tetap dan rata satu sama lain. Jika *stopper* dipasang terlalu banyak akan menimbulkan *crack* akibat besarnya tegangan sisa pada benda kerja. Menurut penelitian yang telah dilakukan, pemasangan *stopper* yang baik berada pada sudut  $60^{\circ}$ - $70^{\circ}$  terhadap alur las. Pemasangan *stopper* dapat mengurangi terjadinya deformasi, namun juga menyebabkan terjadinya tegangan sisa. (Anggoro, 2018).



**Gambar 2.13** Contoh bentuk *stopper* (Putra, 2017)

### 2.2.10 Metode Elemen Hingga

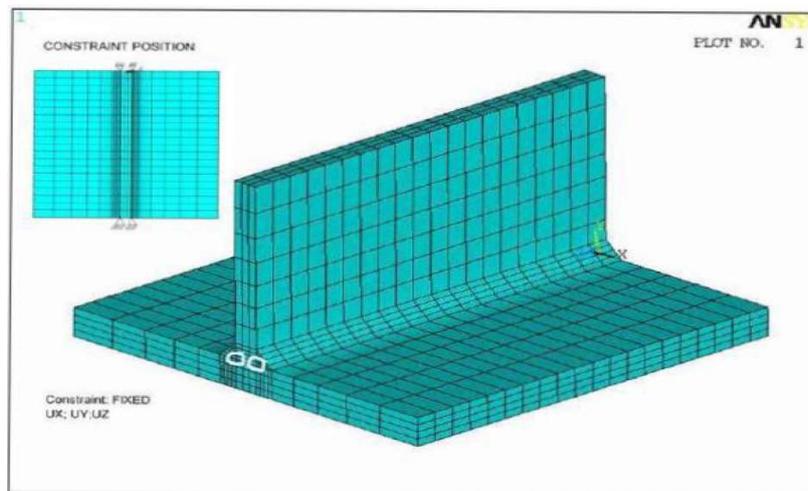
*Finite element method* atau metode elemen hingga merupakan salah metode yang digunakan dalam menyelesaikan suatu permasalahan di bidang rekayasa seperti pembebanan, geometri, struktural, termal, elektromagnetik dan sifat suatu material yang rumit. Karena tidak memungkinkannya menyelesaikan masalah yang rumit dengan analisis matematis, maka analisis numerik menjadi solusi permasalahan tersebut. Metode elemen hingga menggunakan pendekatan dengan informasi pada titik simpul (*node*) yang ditentukan dengan pendiskreditan (*discretization*). Dimana pendiskreditan merupakan pembagian suatu sistem menjadi bagian-bagian yang lebih kecil, kemudian pada penyelesaiannya dilakukan penggabungan untuk mendapatkan solusi secara keseluruhan (Morna, 2012).

Prosedur elemen hingga mengurangi variabel yang tidak diketahui menjadi sejumlah berhingga dengan membagi daerah penyelesaian menjadi bagian kecil

yang disebut elemen dan dinyatakan sebagai variabel medan yang tidak diketahui, dalam istilah dianggap sebagai fungsi pendekatan (*approximation functions/interpolation functions/shape functions*) dalam setiap elemen. Fungsi pendekatan didefinisikan sebagai medan variabel dari titik-titik tertentu yang disebut node. Variabel medan dapat ditentukan pada beberapa titik menggunakan fungsi interpolasi. Setelah memilih elemen dan variabel titik yang tidak diketahui, selanjutnya menyusun sifat bahan (*properties*) elemen untuk setiap elemen. Secara umum tahapan dalam perumusan metode elemen hingga adalah sebagai berikut:

1. Pendiskretan dan pemilihan jenis elemen.

Tahap ini, struktur dibuat menjadi sebuah sistem yang ekuivalen yang terdiri dari elemen-elemen hingga yang saling berhubungan dengan simpul atau disebut dengan proses *meshing* seperti pada Gambar 2.14. Pemilihan jenis elemen harus tepat sesuai dengan permasalahan yang ingin diselesaikan.



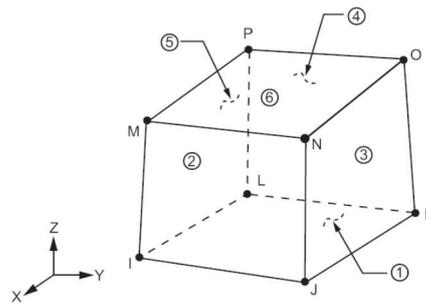
**Gambar 2.14** Contoh meshing pada sambungan T *joint* (Syahroni & Hidayat, 2012)

Untuk mendapatkan pendekatan yang baik, ukuran *meshing* harus dapat mewakili kondisi struktur yang sebenarnya. Elemen-elemen kecil yang digunakan untuk kondisi yang berubahannya drastis, sedangkan elemen berukuran besar digunakan ditempat dimana besaran yang ingin dicari berubahannya relatif konstan. Ukuran *meshing* tidak harus sekecil mungkin, karena membutuhkan kapasitas *hard disc* dan memori yang sangat besar. Dari ukuran meshing yang ada dipilih ukuran yang

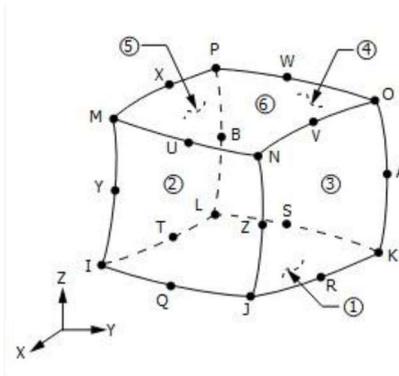
memberikan hasil rasio perubahan yang kecil dibanding dengan ukuran meshing yang lebih besar.

Pada analisis termal, elemen yang digunakan adalah SOLID70 dan SOLID90 seperti pada Gambar 2.15 dan Gambar 2.16. Elemen SOLID70 memiliki 8 *node* dengan tiap *node* memiliki memiliki satu derajat kebebasan dan temperatur. Sedangkan pada elemen SOLID90 memiliki 20 *node* dan memiliki kemampuan yang sama dengan SOLID70.

Untuk analisis struktural, elemen yang digunakan yaitu SOLID185 dan SOLID186 yang hanya memiliki perbedaan pada jumlah *node* seperti pada Gambar 2.15 dan Gambar 2.16. Dimana elemen SOLID185 memiliki 8 *node* dan SOLID186 20 *node* dengan tiga derajat kebebasan yang bertranslasi ke arah sumbu x dan y. Elemen ini memiliki kemampuan plastisitas, elastisitas yang tinggi, defleksi dan regangan yang besar.



**Gambar 2.15** Geometri elemen dengan 8 *node* (ANSYS, 1999)



**Gambar 2.16** Geometri elemen dengan 20 *node* (ANSYS, 1999)

## 2. Pemilihan fungsi displasemen

Dalam pemilihan fungsi displasemen, elemen didefinisikan menggunakan nilai parameter pada tiap *node* elemen seperti pada

persamaan 2.10. Fungsi yang digunakan yaitu fungsi polinomial, linear kuadratik, kubik, atau deret trigonometri.

$$\{w\} = [N]\{u\} \quad (2.10)$$

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

Hubungan antara regangan displasemen dan antara tegangan regangan dalam proses penurunan persamaan untuk masing-masing elemen hingga. Kemampuan untuk mendefinisikan kelakuan atau sifat material secara tepat adalah hal yang sangat penting untuk mendapatkan hasil yang dapat diterima. Hubungan tegangan dan regangan nantinya digunakan dalam penurunan persamaan tiap elemen seperti Persamaan 2.11 dan 2.12 sebagai berikut:

$$\sigma = D\varepsilon^{el} \quad (2.11)$$

$$\varepsilon = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{th} \quad (2.12)$$

Dimana :

$\varepsilon$  = regangan total

$\varepsilon^{el}$  = regangan elastis

$\varepsilon^{th}$  = regangan termal

D = kekakuan material

*Vector thermal strain* untuk isotropik medium dengan suhu yang tergantung pada koefisien ekspansi termal, yang dirumuskan pada persamaan 2.13.

$$\varepsilon^{th} = \Delta T\alpha(T) \quad (2.13)$$

Dimana :

$\Delta T$  = perbedaan antara temperatur aktual dan temperatur referensi

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

Metode yang sering digunakan dalam penurunan matriks kekakuan elemen dan persamaan elemen adalah metode keseimbangan langsung, seperti pada Persamaan 2.14. Dan metode ini cocok untuk elemen satu dimensi dan metode energi dengan prinsip energi potensial minimum.

$$\frac{kA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{Bmatrix} \text{ atau } k^{(e)}\theta^{(e)} = q^{(e)} \quad (2.14)$$

5. Penggabungan persamaan elemen dan 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

Untuk mendapatkan besaran yang belum diketahui digunakan metode eliminasi atau metode iterasi.

7. Menentukan regangan dan tegangan elemen

Besaran yang didapat pada tahap 6 (misal displasemen) digunakan untuk menentukan regangan dan tegangan di elemen.

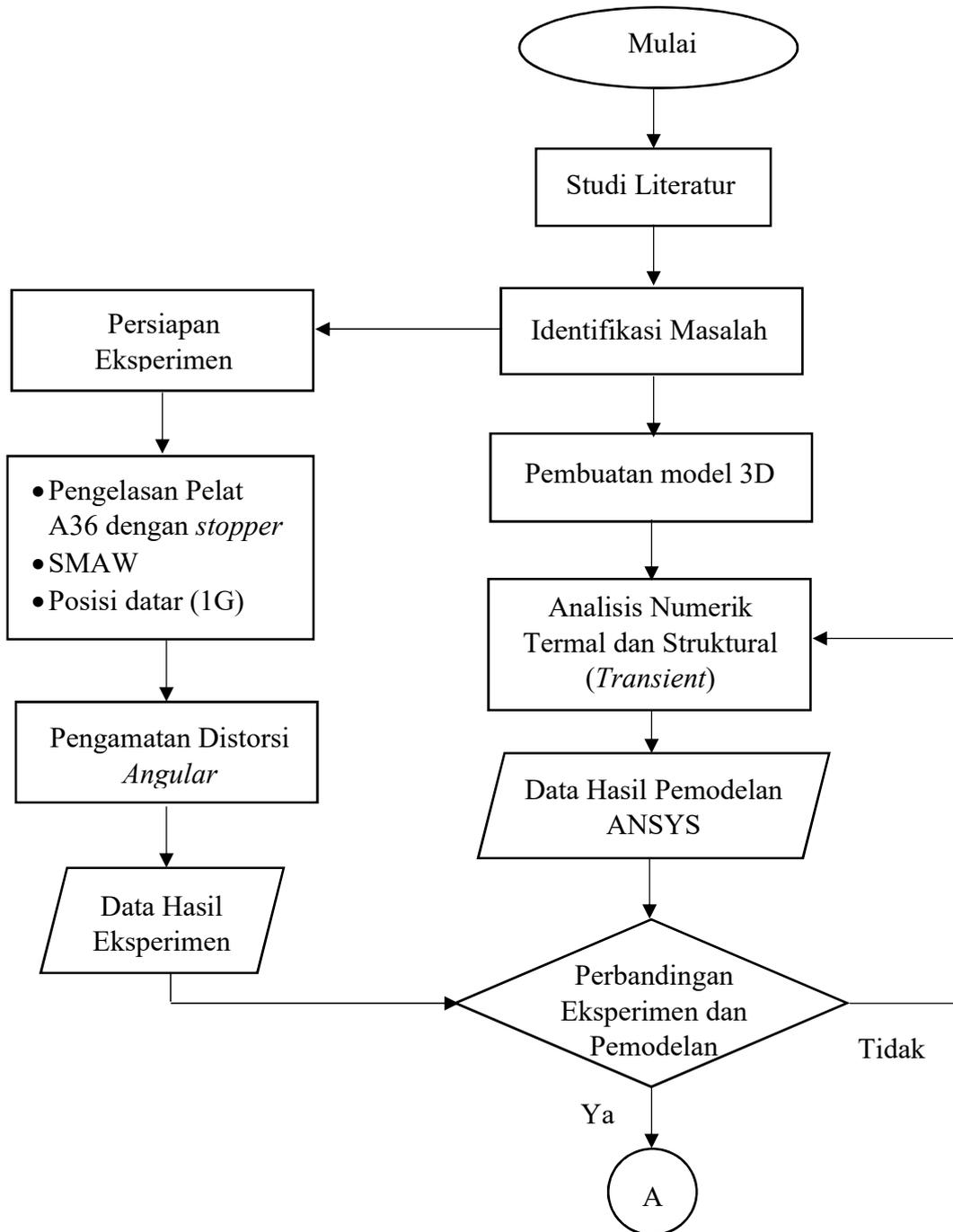
8. Interpretasi hasil

Hasil yang diperoleh dapat ditampilkan dalam bentuk grafis oleh program computer *post processor*.

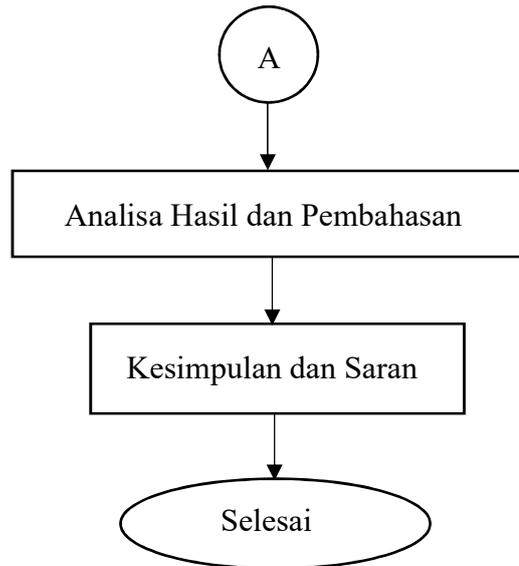
**(HALAMAN SENGAJA DIKOSONGKAN)**

**BAB III**  
**METODOLOGI PENELITIAN**

**3.1 Skema Diagram Alir**



**Gambar 3.1** Skema diagram alir penelitian



**Gambar 3.1** Skema diagram alir penelitian (lanjutan)

### 3.2 Penjelasan Diagram Alir

#### 1. Studi Literatur

Tahap ini merupakan aktivitas mengumpulkan sumber-sumber referensi terkait pengerjaan. Literatur yang digunakan bisa berupa buku maupun publikasi-publikasi yang terbit di waktu sebelumnya yang membahas hal yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan.

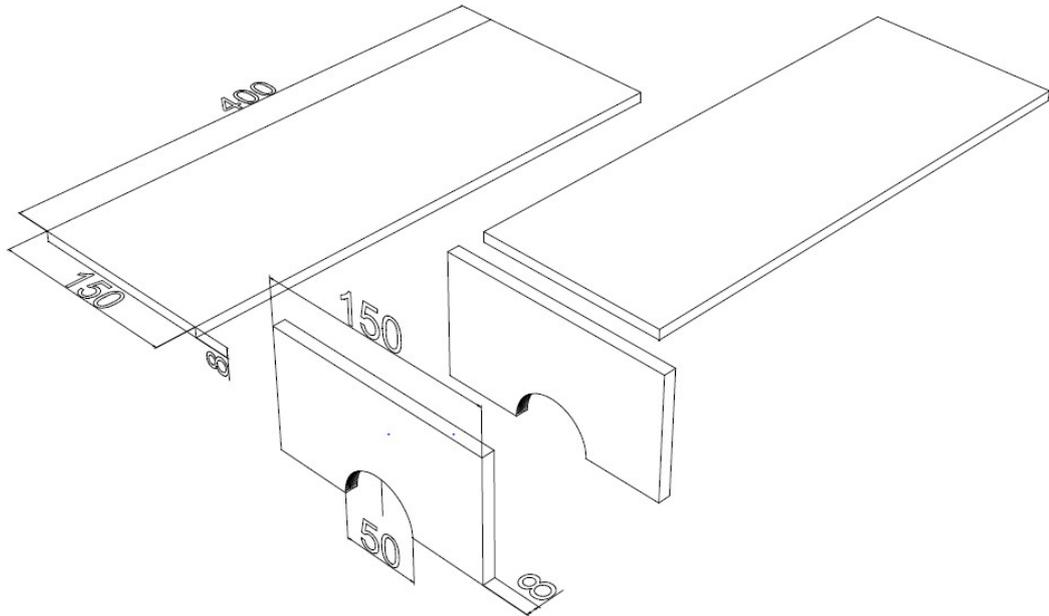
#### 2. Identifikasi Masalah

Permasalahan yang ditemui di lapangan diidentifikasi, ditemukan penyebab masalah tersebut dan rencana penyelesaian masalah yang telah ditemukan.

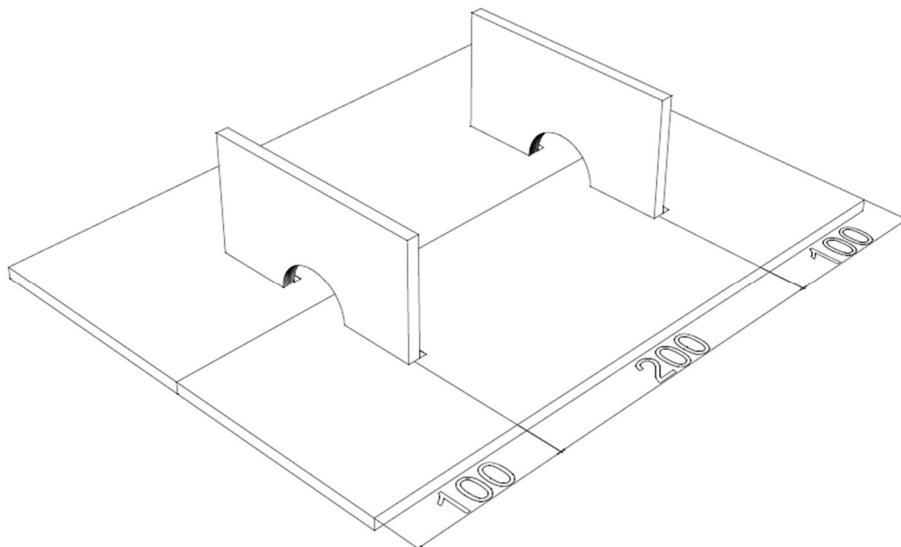
#### 3. Persiapan Eksperimen

Eksperimen atau percobaan dilakukan untuk mendapatkan hasil yang ingin diketahui. Sebelum dilakukannya eksperimen, dilakukan persiapan berupa material baja A36 sebanyak 4 buah pelat untuk satu spesimen. Terdapat dua pelat dasar yang akan disambung yang masing-masing memiliki dimensi 150 mm x 400 mm x 8 mm dan dua pelat *stopper*

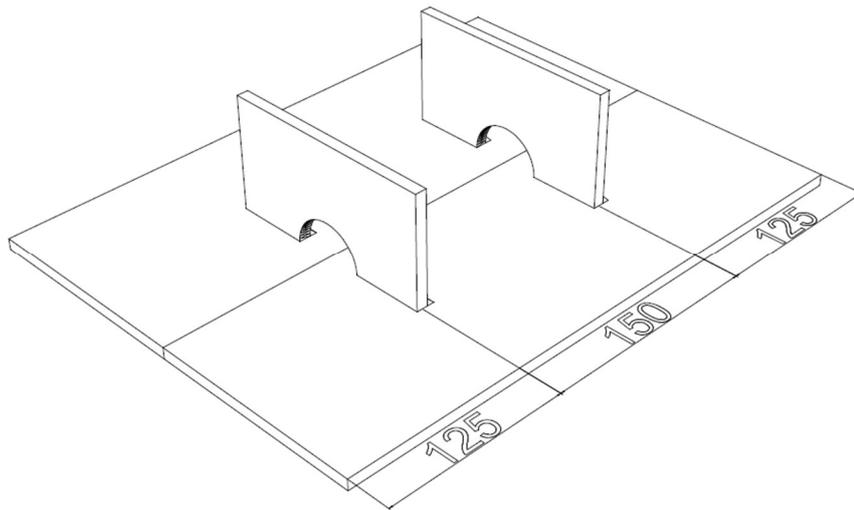
yang masing-masing memiliki dimensi 150 mm x 80 mm x 8 mm dengan rongga pada sambungan las berupa setengah lingkaran dengan jari-jari 25 mm seperti pada Gambar 3.2. Kemudian sketsa tiap variasi jarak *stopper* dapat dilihat pada Gambar 3.3 sampai dengan Gambar 3.5.



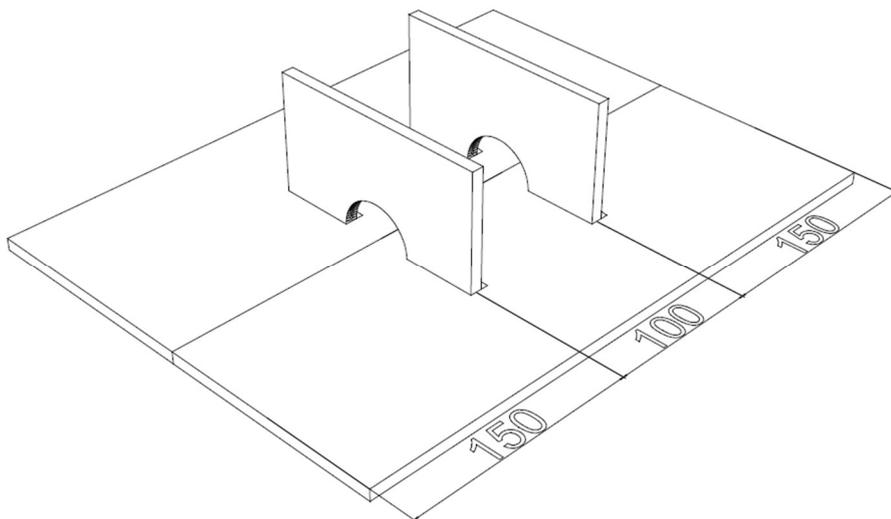
**Gambar 3.2** Benda kerja berupa pelat dasar yang disambung dan *stopper*



**Gambar 3.3** Variasi jarak 2 *stopper* sejauh 200 mm



**Gambar 3.4** Variasi jarak 2 *stopper* sejauh 150 mm



**Gambar 3.5** Variasi jarak 2 *stopper* sejauh 100 mm

Sebelum dilakukan pengelasan, perlu adanya proses penggerindaan untuk membuat kampuh atau *bevel* seperti pada Gambar 3.6. Kampuh nantinya menjadi bagian pada material dasar dimana terisi *weld metal*. Besar sudut pada kampuh las yang telah ditentukan adalah  $40^\circ$  menurut WPS dari PT PAL Indonesia (Persero) untuk pengelasan SMAW dengan ketebalan plat 8 mm pada Gambar 3.7.



Gambar 3.6 Proses membuat kampuh las dengan gerinda

INDONESIA

**WELDING PROCEDURE SPECIFICATION**

PREQUALIFIED       QUALIFIED BY TESTING

Company Name : PT. PAL INDONESIA		Revision No. : 0	
WPS No. : PAL GE-168-WPS		Date : August 9, 2014	
Welding Process(es) : SMAW+FAW		Type : Manual <input checked="" type="checkbox"/> Semi-Automatic <input checked="" type="checkbox"/>	
Supporting PQR No.(s) : PAL GE-168-PQR		Machine : Automatic <input type="checkbox"/>	
Applicable Code : AWS D1.1 / D1.1M : 2010			

<b>JOINT DESIGN USED</b> Type : TYK connection branch member and Fillet Single <input checked="" type="checkbox"/> Double Weld <input type="checkbox"/> Backing : Yes <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/> Backing Material : _____ Root Opening : min. 3 mm Root Face Dimension : max. 1 mm Groove Angle : 37.5° (+10°, -0°) Back Gouging : Yes <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/> Method : _____		<b>POSITION</b> Position of Groove : All Position Fillet : All Position Vertical Progression : Uphill <input checked="" type="checkbox"/> Downhill <input type="checkbox"/>	
<b>BASE METALS</b> Material Spec. : All material as specified in AWS D1.1 table 3.1 group II or equivalent Thickness : Groove 3 - 12 (Non Impact) Fillet 6 - 12 (Impact) Diameter ( Pipe ) : Any Size 4" (100 mm) and Over		<b>ELECTRICAL CHARACTERISTICS</b> Current : AC <input type="checkbox"/> DCEP <input checked="" type="checkbox"/> DCEN <input type="checkbox"/> Transfer Mode : Spray Arc	
<b>FILLER METALS</b> AWS Specification : A5.1 ; A5.20 A No. : 1 ; 4 F No. : 4 ; 6 AWS Classification : E 7016 ; E 71T-9C-J Brand Name : LB-52U (Kobe) or Equivalent ; Dual Shield II 71H1 (ESAB) or Equivalent		<b>TECHNIQUE</b> Stringer or Weave Bead : Stringer and Weave Multipass or Single Pass (per side) : Multipass Number of Electrodes : Single Electrode	
<b>SHIELDING</b> 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		Note : 1. Maximum weaving shall not exceed 3 times of electrode core diameter or 12 mm whichever is least (for SMAW) 2. NDT should be conducted 48 hours after welding completion 3. Preheat for permanent tack weld shall be 50° C higher than specified in WPS which maximum 300° C 4. Welding of each weld shall be continuous. In the case that welding must be discontinued, this shall not take place before at least a half of the final weld thickness is achieved.	
<b>PREHEAT</b> Preheat Temp., Min. : Ambient ( T 3 to 20 mm ) 55° 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		<b>POST WELD HEAT TREATMENT</b> Temp : None Time : None	
<b>JOINT DETAILS</b> 		<b>TYPICAL WELDING SEQUENCES</b> 	

WELDING PARAMETERS										
Pass or Weld Layer(s)	Process	Filler Metals		Current		Volts (V)	Travel Speed (m/min)	Heat Input (Kj/mm)	Shielding Gas	
		Class	Dia (mm)	Type & Polarity	Ampe (A)				Type	Flow Rate (LPM)
1st	SMAW	E7016	2.6	DCEP	80 - 80	15 - 23	35 - 55	1.0 - 2.3	-	-
2nd	FAW	E71T-9C-J	1.2	DCEP	180 - 200	16 - 26	90 - 130	1.5 - 2.8	CO2	10 - 25
Cap	FAW	E71T-9C-J	1.2	DCEP	150 - 190	17 - 25	85 - 125	1.6 - 2.9	CO2	10 - 25

Certified by,

**BAMBANG HARI ROESSANTOSO**  
WELDING ENGINEER

Approved by Migus

**Bambang Hari Roessantoso**  
Welding Engineer

Gambar 3.7 WPS untuk pengelasan SMAW dengan ketebalan pelat 8mm

#### 4. Proses Pengelasan

Untuk penyambungan *stopper* dilakukan dengan metode *tack weld* pada sisi *root* di pelat dasar pada Gambar 3.8. Dan untuk proses pengelasan pada pelat dasar, dilakukan dengan posisi datar 1G atau *butt joint* seperti pada Gambar 3.9. Pengelasan pada seluruh spesimen menggunakan metode SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) dengan prosedur pengelasan (WPS) dari PT PAL Indonesia (Persero).



**Gambar 3.8** Proses *fitting* pada masing-masing variasi jarak *stopper* (dari kiri variasi jarak *stopper* 200 mm, 150 mm dan 100 mm)



**Gambar 3.9** Tampak atas setelah proses pengelasan (dari kiri variasi jarak *stopper* 200 mm, 150 mm dan 100 mm)

Kemudian dibuat juga material pembanding berupa pelat dasar yang disambung tanpa menggunakan *stopper* seperti pada Gambar 3.10. Objek pembanding tersebut dibuat guna mengetahui bagaimana pengaruh penggunaan *stopper* dan tanpa *stopper* terhadap distorsi.



**Gambar 3.10** Objek pembanding berupa sambungan pelat tanpa *stopper*

#### 5. Pengamatan Distorsi *Angular*

Dalam eksperimen kali ini uji visual menggunakan mata secara langsung dibantu dengan alat bantu ukur berupa *dial gauge* seperti pada Gambar 3.11 untuk mengetahui besarnya distorsi *angular* yang terjadi. Pengukuran distorsi *angular* dapat dilakukan dengan cara meletakkan material uji di atas pelat datar kemudian dilakukan pengukuran menggunakan *dial gauge*.



**Gambar 3.11** Pengukuran dengan *dial gauge* (Kusdiyarto, 2018)

Pengukuran diawali dengan melakukan kalibrasi *dial gauge* dengan meletakkan spindel pada daerah dekat lasan. Dimana daerah tersebut merupakan bagian yang memiliki distorsi sudut terkecil sehingga dapat diasumsikan tidak ada distorsi. Kemudian dilakukan pengukuran pada 36 titik yang telah ditentukan seperti pada Gambar 3.12.



**Gambar 3.12** Titik titik pengukuran distorsi sudut

## 6. Pembuatan Model 3D

*Input* dari pemodelan numerik salah satunya merupakan geometri dari benda kerja. Objek geometri dibuat menggunakan *software modeling* seperti SolidWorks dan Adobe Inventor.

## 7. Analisis Numerik

### a. Pemodelan *Transient Thermal*

Analisis termal dengan *software* berbasis elemen hingga bertujuan untuk mengetahui distribusi panas yang terjadi saat proses pengelasan. *Transient* termal disini berfungsi untuk menentukan sebaran panas yang bervariasi dari waktu ke waktu. Variasi pada distribusi panas dapat diterapkan di berbagai macam hal sebagai contohnya hasil distribusinya dapat digunakan untuk menentukan

penyebab dari kegagalan suatu struktur. Hasil dari *transient* termal juga berfungsi sebagai *input* untuk analisis struktural.

*b. Pemodelan Transient Structural*

Analisis *transient* menurut definisi melibatkan muatan yang merupakan fungsi waktu. Analisis struktural berfungsi untuk mengetahui respon dinamis dari suatu struktur terhadap aksi dari setiap beban tiap waktunya. *Transient* struktural juga digunakan untuk menentukan perpindahan, regangan, tegangan dan gaya yang berbeda-beda.

8. Perbandingan Hasil Eksperimen dan Pemodelan Numerik

Tahap dimana telah didapatkannya hasil dari percobaan pengelasan menggunakan variasi *stopper* yang kemudian deformasinya diukur dengan *dial gauge*. Dan hasil pemodelan numerik dengan *software* ANSYS menggunakan analisis struktural yang telah mendapatkan nilai besarnya deformasi yang terjadi dibandingkan. Kemudian perbandingan dilakukan pada titik-titik yang telah ditentukan sebelumnya.

9. Analisa dan Pembahasan

Analisis hasil didapatkan setelah mendapatkan data hasil pemodelan. Akan didapatkan hasil distorsi *angular* yang minimum dalam perbandingan pengaruh jarak *stopper* terhadap distorsi *angular*. Perbandingan dilakukan pada area-area yang telah ditentukan, sehingga dapat diketahui variasi jarak *stopper* manakah yang menghasilkan deformasi terkecil.

10. Kesimpulan dan saran

Pada tahap ini ditarik kesimpulan dari analisa yang telah dilaksanakan dan pemberian saran dilakukan untuk agar proses ini dapat menjadi acuan yang lebih baik kedepannya.

**(HALAMAN SENGAJA DIKOSONGKAN)**

## BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Parameter Pengelasan

Eksperimen pengelasan yang dilakukan pada material baja A36 sepanjang 400 mm dengan parameter pengelasan sebagai berikut:

Proses	: SMAW
Kampuh	: <i>Single V groove</i>
Arus	: 80 A
Voltase	: 20 V
Elektrode	: E7016
Diameter Elektroda	: 2.6 mm
Jumlah Lapisan	: 3 lapis
<i>Welder</i>	: Geas Taka ( <i>Welder</i> PT PAL Indonesia)

Dari proses pengelasan yang telah dilakukan, didapatkan data berupa lama waktu pengelasan seperti pada Tabel 4.1.

**Tabel 4.1** Data hasil pengelasan

No	Variasi Jarak Stopper (mm)	Panjang las (mm)	Voltase (V)	Arus (V)	Lapisan	Waktu (sec)	Laju las (mm/s)
1	200	400	20	76-80	<i>Root</i>	294	1.361
				86-90	<i>Filler</i>	317	1.262
				81-85	<i>Caping</i>	272	1.471
2	150	400	20	76-80	<i>Root</i>	301	1.329
				86-90	<i>Filler</i>	308	1.299
				81-85	<i>Caping</i>	296	1.342
3	100	400	20	76-80	<i>Root</i>	314	1.278
				86-90	<i>Filler</i>	323	1.238
				81-85	<i>Caping</i>	305	1.311

## 4.2 Proses Pengelasan

Pengelasan dilakukan pada tiga sambungan *butt joint* dengan dimensi material yang sama. Dengan memvariasikan jarak pemasangan antar dua *stopper* sejumlah tiga variasi, yaitu berjarak 200 mm, 150 mm dan 100 mm. Hasil pengelasan dapat dilihat pada Gambar 4.1.



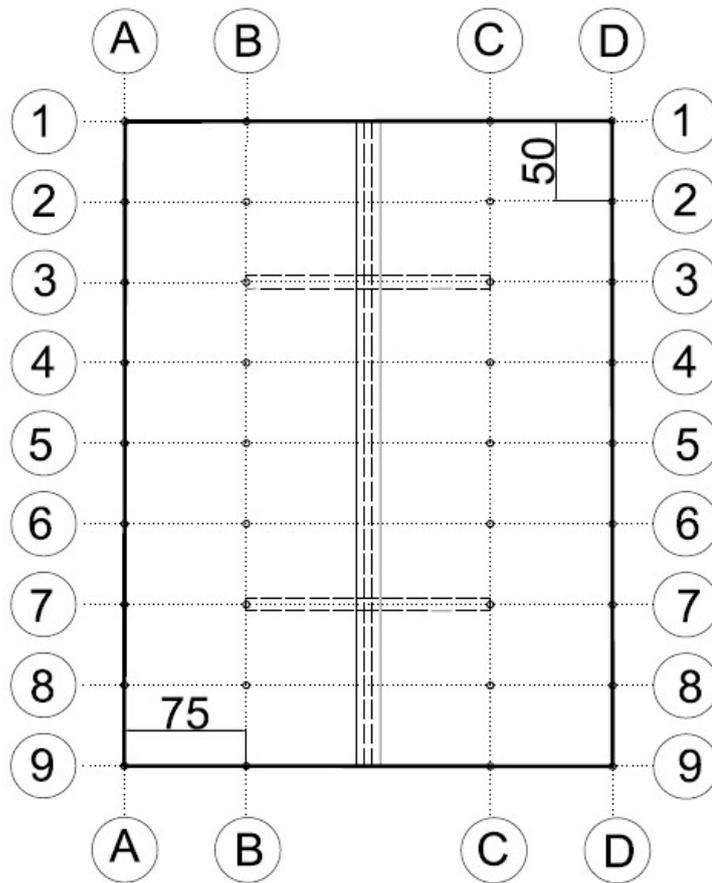
**Gambar 4.1** Tampak depan hasil pengelasan pelat baja A36 (dari kiri variasi jarak *stopper* 200mm, 150mm dan 100mm)

Dari hasil pengelasan tersebut didapatkan distorsi *angular* namun sangat tidak kasat mata. Sehingga harus dilakukan pengukuran dengan bantuan alat berupa *dial gauge* yang dapat membaca besarnya distorsi dua angka dibelakang nol dengan satuan milimeter.

## 4.3 Pengukuran Distorsi *Angular*

Pengukuran distorsi *angular* atau sudut dapat dilakukan dengan alat *dial gauge*. Dalam penelitian ini perhitungan distorsi yang diukur hanya searah sumbu Y (tegak lurus dengan permukaan pelat) karena hasilnya lebih menunjukkan perubahan distorsi sudut, sedangkan arah sumbu X diabaikan karena hasilnya sangatlah kecil.

Panel baja A36, alas datar, *waterpass*, penggaris, kapur dan *dial gauge* dipersiapkan untuk dilakukan pengukuran. Material uji diletakkan di atas pelat datar kemudian dilakukan pengukuran menggunakan *dial gauge*. Pengukuran dilakukan dengan cara menentukan titik pengukuran terlebih dahulu. Titik pengukuran dapat dilihat dalam ilustrasi Gambar 4.2.



**Gambar 4.2** Titik pengukuran tampak atas pelat baja A36

Setelah menentukan titik pengukuran sesuai dengan Gambar 4.2, maka proses pengukuran distorsi sudut dapat dilakukan. Pengukuran distorsi sudut dilakukan dengan cara yang sudah dijelaskan. Adapun data pengukuran distorsi *angular* dapat dilihat dalam Tabel 4.2 sampai 4.5.

**Tabel 4.2** Hasil pengukuran distorsi *angular* pada variasi jarak *stopper* 100mm

Titik Pengukuran (mm)	A	B	C	D
1	2.72	1.72	1.21	2.59
2	2.69	1.66	1.24	2.48
3	2.51	1.42	1.17	2.65
4	1.87	1.01	0.90	1.71
5	1.51	1.39	1.05	1.41
6	1.44	0.92	0.86	1.07
7	2.43	1.58	1.35	2.39
8	2.31	1.68	1.08	1.59
9	2.46	1.56	1.33	1.93

**Tabel 4.3** Hasil pengukuran distorsi *angular* pada variasi jarak *stopper* 150mm

Titik Pengukuran (mm)	A	B	C	D
1	2.29	1.64	1.82	2.15
2	2.31	1.82	1.85	2.26
3	1.93	1.57	1.49	1.80
4	1.48	1.11	0.98	1.51
5	1.50	1.29	1.34	1.46
6	1.37	1.05	0.89	1.27
7	1.81	1.43	1.33	1.79
8	2.09	1.52	1.66	2.11
9	2.25	1.73	1.64	2.05

**Tabel 4.4** Hasil pengukuran distorsi *angular* pada variasi jarak *stopper* 200mm

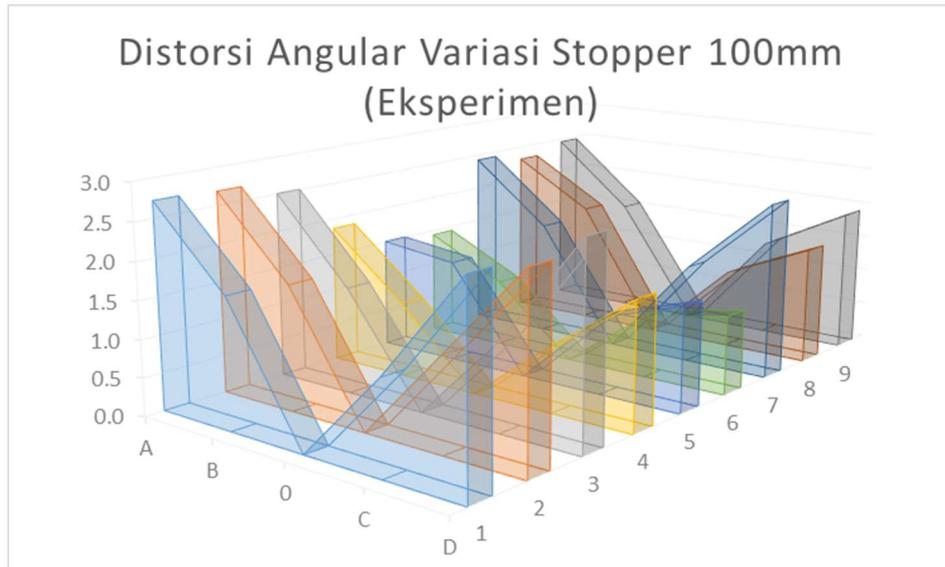
Titik Pengukuran (mm)	A	B	C	D
1	2.66	1.93	2.02	2.54
2	2.39	1.71	2.01	2.27
3	2.30	0.62	0.89	2.03
4	1.47	0.91	0.78	1.22
5	1.22	1.17	1.23	1.08
6	1.64	1.16	1.14	1.63
7	1.92	0.94	1.21	1.50
8	2.54	1.36	1.40	2.19
9	2.41	1.63	1.81	2.06

**Tabel 4.5** Hasil pengukuran distorsi *angular* pada pelat tanpa *stopper*

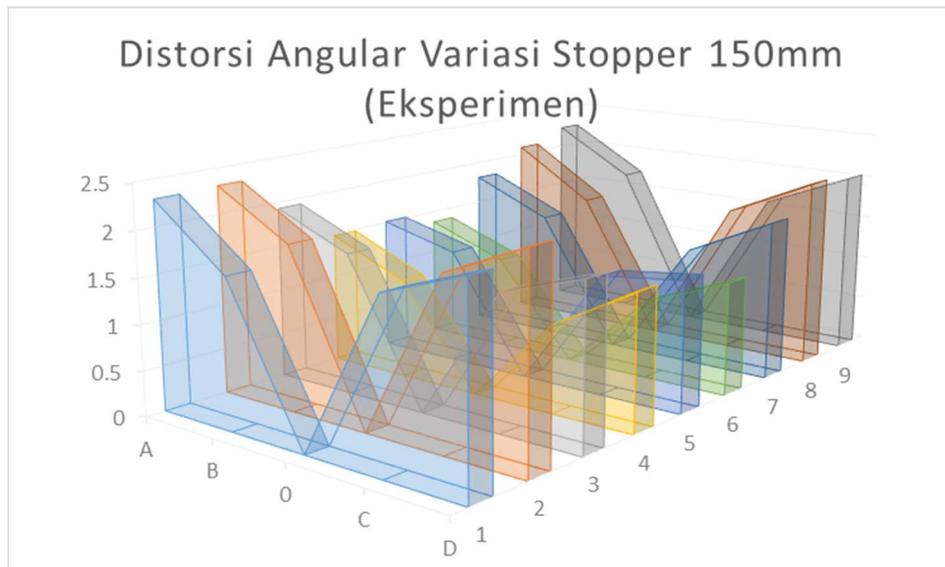
Titik Pengukuran (mm)	A	B	C	D
1	9.86	5.67	3.33	8.62
2	9.35	5.50	4.36	5.22
3	8.02	4.26	2.65	5.58
4	5.24	1.78	2.67	6.29
5	6.05	2.08	1.89	7.23
6	6.88	2.87	2.06	6.27
7	8.64	4.11	3.37	8.20
8	10.04	5.98	4.21	8.06
9	10.27	6.19	4.11	8.22

Sehingga dari data sebaran distorsi *angular* tersebut didapatkan grafik berdasar tiap variasi jarak *stopper*. Dari tiap variasi, disajikan dengan

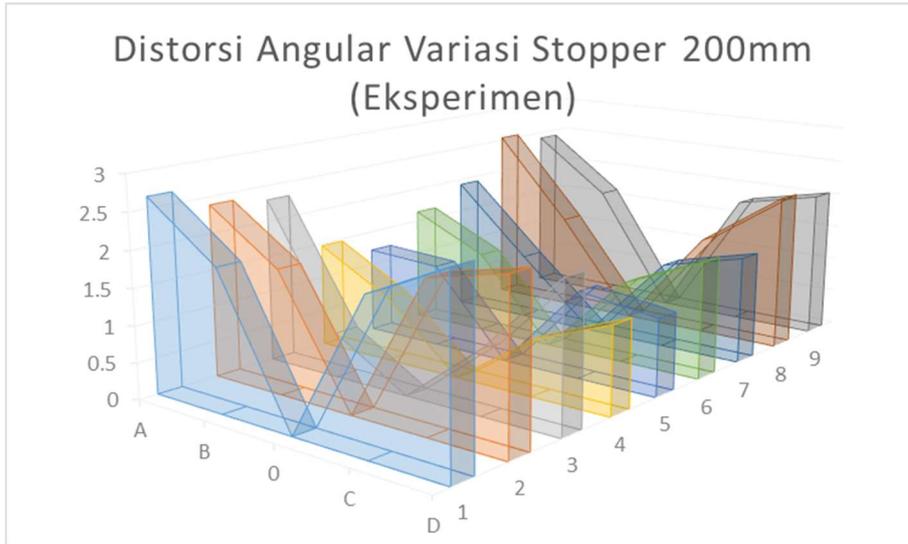
menggambarkan tiap potongan melintang dari potongan 1 hingga potongan 9 seperti pada Gambar 4.3 sampai dengan Gambar 4.6.



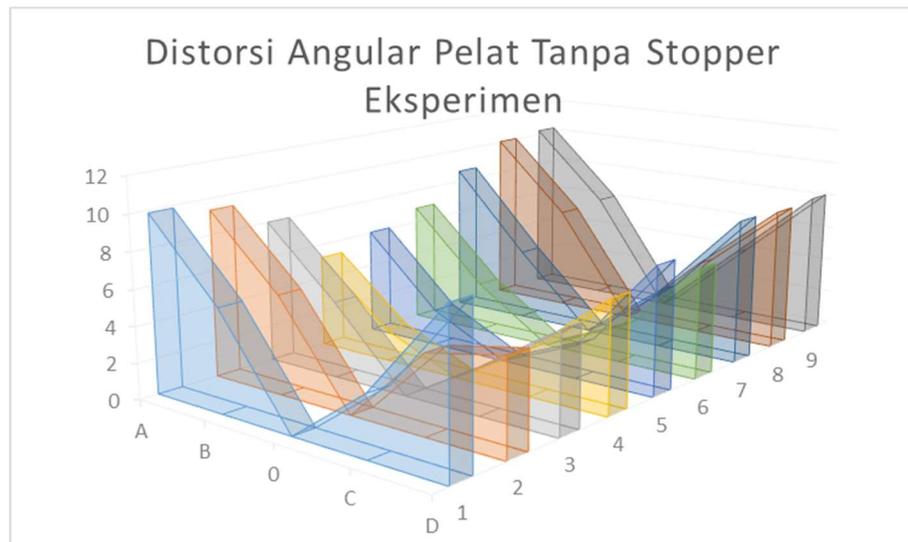
**Gambar 4.3** Grafik distorsi *angular* melintang pada variasi *stopper* 100mm



**Gambar 4.4** Grafik distorsi *angular* melintang pada variasi *stopper* 150mm



**Gambar 4.5** Grafik distorsi *angular* melintang pada variasi *stopper* 200mm



**Gambar 4.6** Grafik distorsi *angular* melintang pada variasi tanpa *stopper*

#### 4.4 Pemodelan Pelat Baja A36

Pembuatan model panel baja A36 ini menggunakan *software* berbasis elemen hingga. Pada penelitian tugas akhir ini *software* berbasis elemen hingga menggunakan *software* ANSYS 16.0. Proses permodelan memiliki beberapa tahap pengerjaan. Tahap pengerjaannya dimulai dari mempersiapkan data yang dibutuhkan. Kemudian dilanjutkan dengan memasukkan data kedalam analisis

*Transient Thermal*. Tahapan berikutnya setelah melakukan analisa *Transient Structural*.

#### 4.4.1 Perhitungan *Heat Input*

Dari data hasil eksperimen berupa lama waktu pengelasan, dapat diketahui laju pengelasannya. Kemudian dari laju pengelasan dapat dihitung besar dari masing-masing *heat input* untuk tiap pengelasan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$Q = \eta \cdot V \cdot I / v \text{ (Watt)} \quad (4.1)$$

Dimana:

Q = *heat input* (Watt)

$\eta$  = *thermal efficiency* SMAW (75 %)

V = tegangan busur las (V)

I = arus listrik las (A)

v = laju pengelasan (mm/s)

Perhitungan *heat input* dengan persamaan 4.1 dengan efisiensi termal 75%, tegangan 20 V, arus 80 I dan lahu pengelasan 2.5 mm/s adalah sebagai berikut:

$$Q = 0.75 \times 20 \text{ A} \times 80 \text{ V} / 2.5 \text{ mm/s}$$

$$Q = 480 \text{ Watt}$$

#### 4.4.2 Perhitungan *Heat Flux*

Pada *software* ANSYS sumber panas yang digunakan adalah *heat flux*. Begitu pula dengan proses pengelasan, beban yang diterima oleh material dasar adalah beban *heat flux*. *Heat flux* sendiri dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya adalah besarnya arus listrik, tegangan dan kecepatan pengelasan.

Permodelan yang dilakukan dalam penelitian ini kampuh las dibuatkan model dan geometri yang mendekati kondisi aktual. Geometri kampuh las pada penelitian ini yang diberikan beban termal. Untuk menghitung *heat flux* diperlukan beberapa parameter yang harus ditentukan dengan cara seperti dibawah ini.

Spesifikasi kampuh las:

- Lebar permukaan las = 15.967 mm
- Total elemen = 20 elemen
- Panjang elemen = 20 mm
- Laju pengelasan = 2.5 mm/s
- Waktu las per elemen = panjang elemen (mm) / laju las (mm/s) = 8 mm/s
- Luas fluks elektroda = panjang elemen (mm) x panjang las per sekon (mm/s) x waktu las per elemen (s) = 400 mm<sup>2</sup>
- Luas elemen dalam satu detik ( $A_{wb}$ ) = lebar las x panjang las per sekon = 39.9175 mm<sup>2</sup>

Sehingga didapat nilai *heat flux* yang didapat dari *heat input* dibagi dengan luasan elemen yang terkena beban panas selama satu detik, seperti pada persamaan 4.2.

$$q = \frac{Q}{A_{wb}} \text{ (Watt/mm}^2\text{)} \quad (4.2)$$

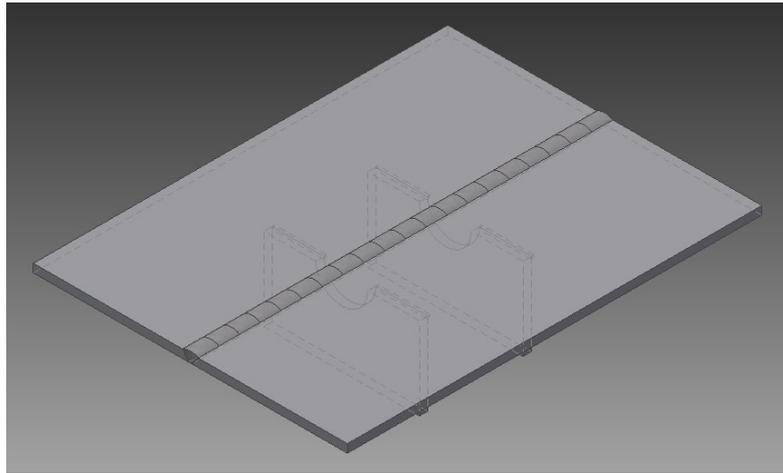
$$q = \frac{480 \text{ Watt}}{39.9175 \text{ mm}^2} = 12.0248 \text{ Watt/mm}^2$$

#### 4.4.3 Koefisien Konveksi dan *Film Coefficient*

Pada pemodelan termal diperlukan adanya faktor pendinginan setelah beban panas diberikan. Faktor pendinginan yang digunakan yaitu proses yang telah disederhanakan hanya dengan proses konveksi. Dimana hanya dengan menentukan temperatur lingkungan yaitu 25°C dan menentukan nilai *film coefficient* yaitu 15 watt/mm<sup>2</sup> atau sama dengan 1.5e-005 watt/m<sup>2</sup>.

#### 4.4.4 Geometri Pemodelan

Sebelum melakukan pemodelan numerik menggunakan *software* ANSYS, diperlukan *input* berupa geometri yang dibuat dengan *software* pemodelan 3D yaitu Autodesk Inventor atau SolidWorks. Pemodelan geometri tersebut dibuat menyerupai kondisi aktual dengan tiga variasi jarak *stopper* dan pembagian menjadi 20 bagian (elemen) pada *weld bead* seperti pada Gambar 4.7.

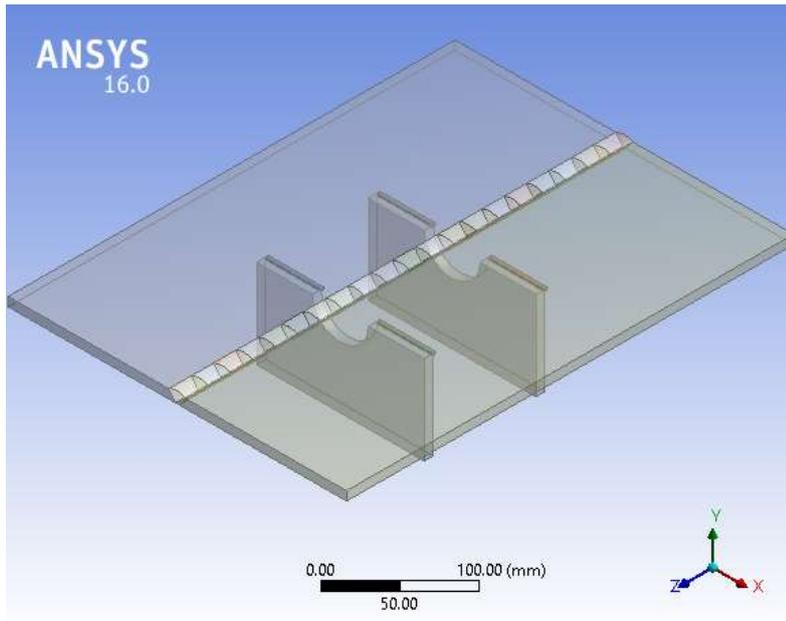


**Gambar 4.7** Hasil pemodelan geometri pada Autodesk Inventor

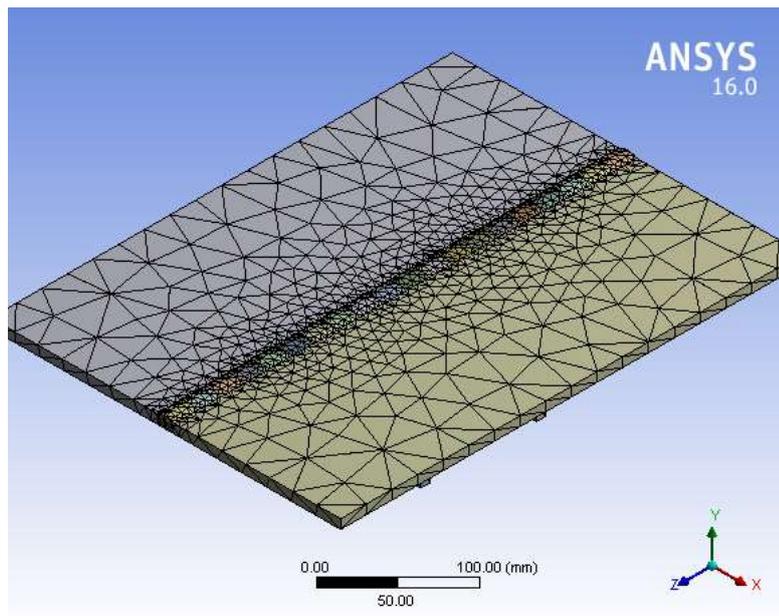
#### 4.4.5 Pemodelan *Transient Thermal*

Analisis termal yang digunakan pada pemodelan ini adalah *transient thermal*. Dimana *transient thermal* berfungsi untuk memodelkan sebaran panas maupun berbagai parameter termal yang dinamis atau memiliki variasi terhadap waktu. Pada tahap ini difokuskan pada hasil berupa sebaran panas yang dapat mengakibatkan perubahan bentuk dari suatu material. Hasil berupa sebaran panas itulah yang akan menjadi *input* pada analisis struktural.

Analisis *transient thermal* diawali dengan melakukan impor geometri yang telah dimodelkan pada Gambar 4.8. Kemudian dilanjutkan dengan melakukan *input* karakteristik material dan dilanjutkan *meshing*. Pada proses *meshing*, jenis *mesh* yang digunakan adalah tetrahedral, dapat dilihat pada Gambar 4.9.

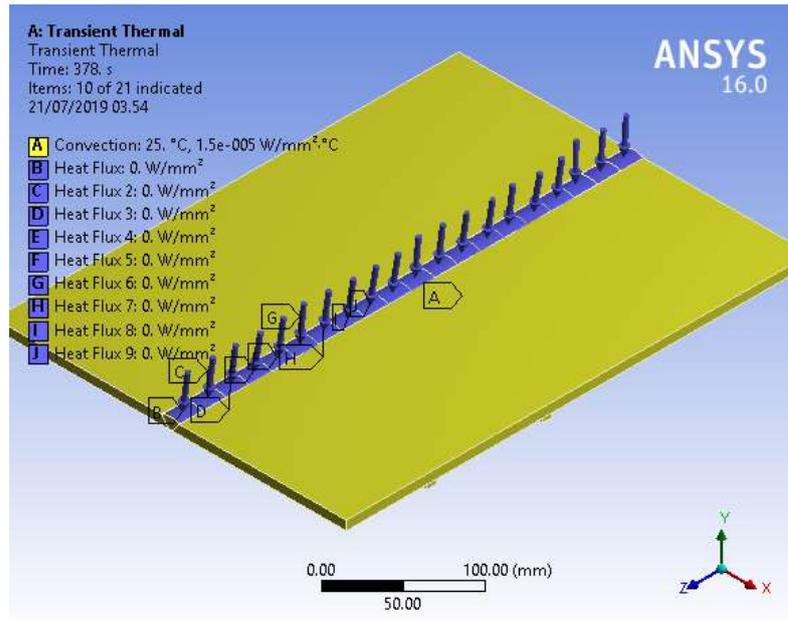


**Gambar 4.8** Hasil input geometri ke ANSYS



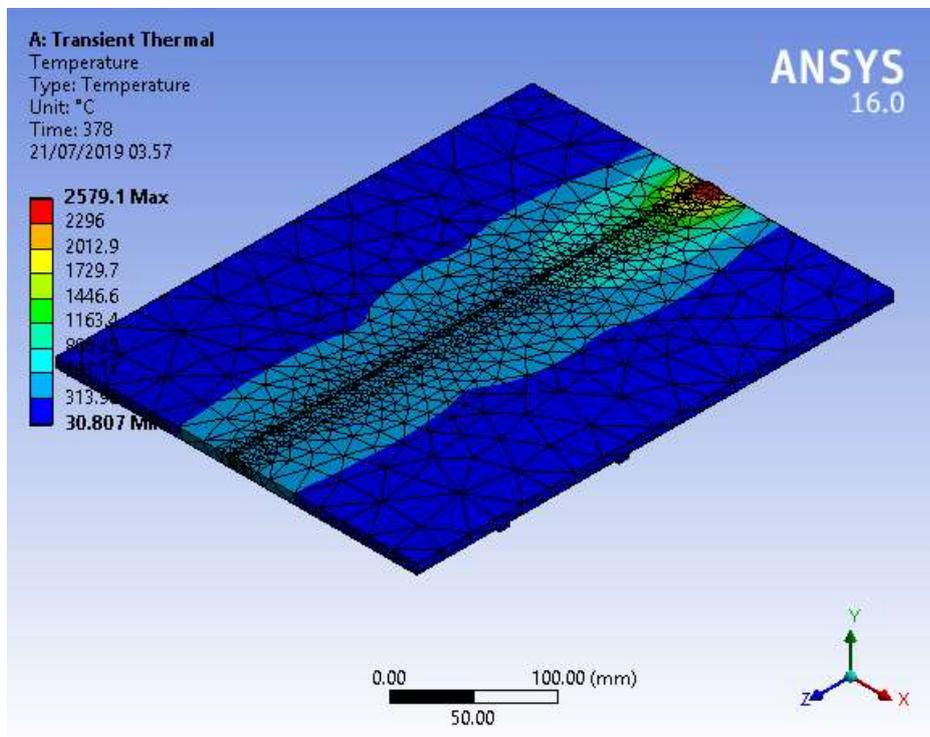
**Gambar 4.9** Hasil *meshing* tetrahedral

Setelah proses *meshing* selesai, dilanjutkan pada proses *input step end time* pada *analysis setting*. Lalu melakukan *input* beban panas berupa konveksi dan *heat flux* yang telah dihitung dengan persamaan 4.2 dan dapat dilihat pada Gambar 4.10.

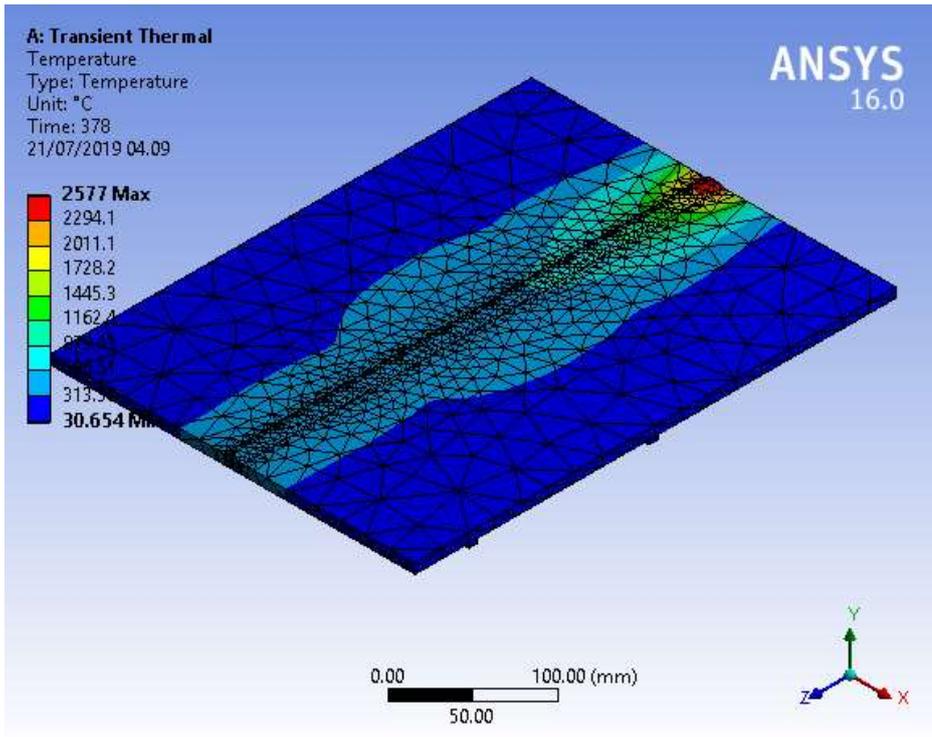


**Gambar 4.10** Pemodelan saat melakukan *input* beban panas

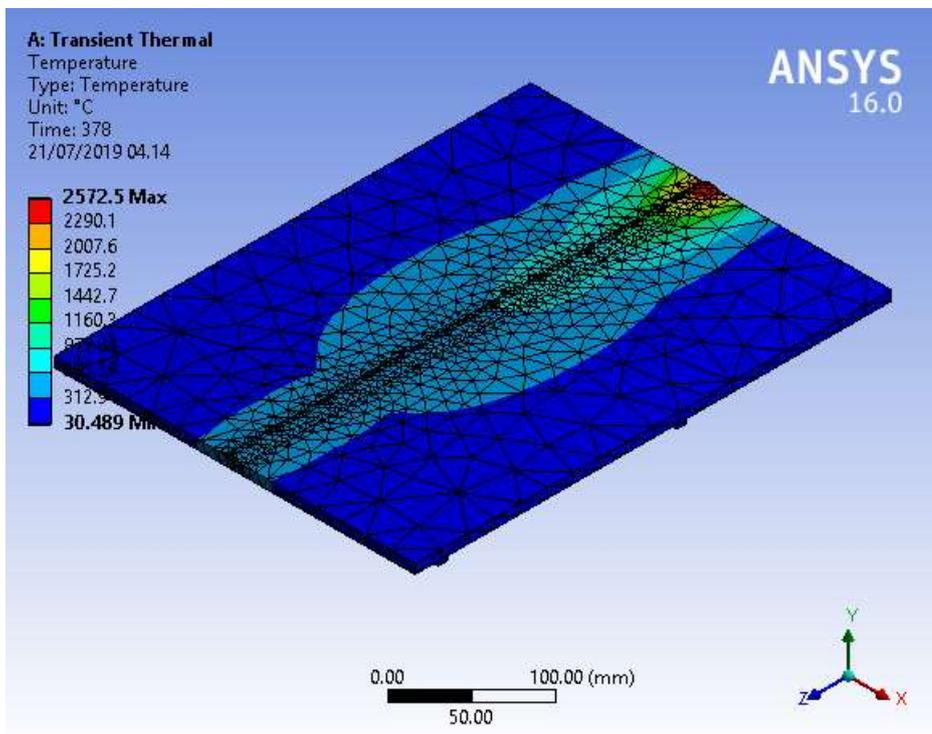
Setelah semua beban panas diberikan maka dilakukan *running* untuk mendapatkan hasil sebaran panas berupa temperatur yang terjadi selama proses pengelasan seperti pada Gambar 4.11 sampai dengan Gambar 4.14.



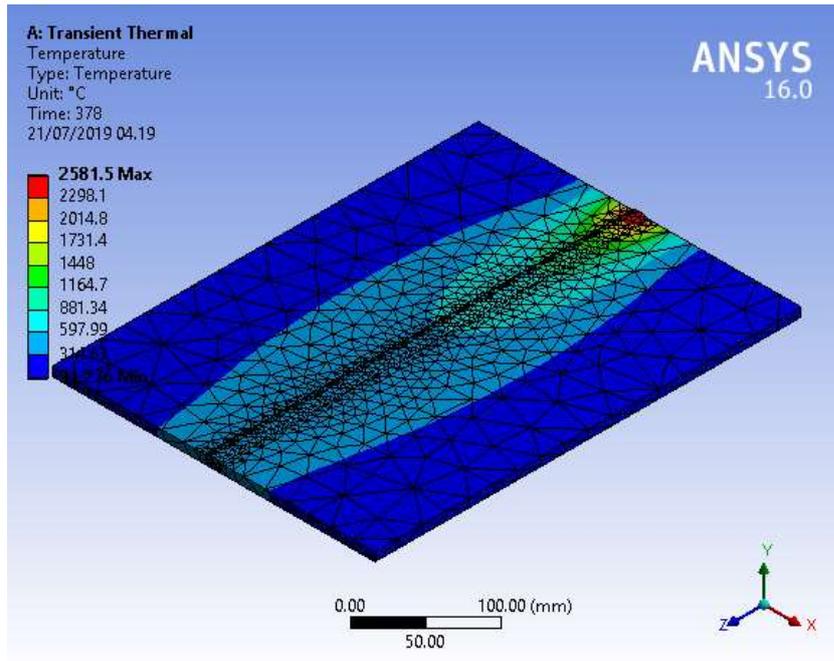
**Gambar 4.11** Hasil pemodelan *transient thermal* pada variasi *stopper* 100mm



**Gambar 4.12** Hasil pemodelan *transient thermal* pada variasi *stopper* 150mm



**Gambar 4.13** Hasil pemodelan *transient thermal* pada variasi *stopper* 200mm



**Gambar 4.14** Hasil pemodelan *transient thermal* pada pelat tanpa *stopper*

#### 4.4.6 Pemodelan *Transient Structural*

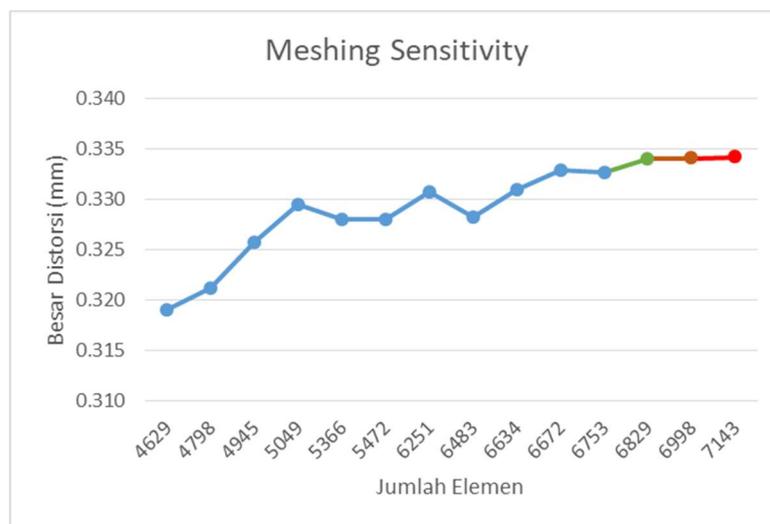
Pada analisis struktural terdapat beberapa jenis analisis yang umum digunakan, yaitu *static structural* dan *transient structural*. Pada penelitian ini jenis analisis yang digunakan adalah *transient structural*, karena *transient structural* berfungsi untuk memperoleh respon dinamis dari suatu struktur. Respon dinamis tersebut terjadi akibat adanya beban yang memiliki variasi terhadap waktu. Beban yang menjadi *input* dari analisis ini yaitu sebaran panas hasil dari analisis *transient thermal*.

Proses analisis *transient structural* dimulai dengan melakukan impor geometri dan hasil dari analisis *transient thermal*, lalu dilanjutkan dengan proses *meshing*. *Meshing* yang digunakan pada analisis struktural berbeda dengan *meshing* pada analisis termal, dikarenakan *meshing* untuk menghasilkan respon struktural yang baik adalah jenis *mesh* yang sensitif. Maka diperlukan adanya proses konvergensi atau *meshing sensitivity*, dimana memvariasikan ukuran *meshing* hingga didapatkan nilai respon struktur yang cenderung konstan. Sehingga dengan

jumlah elemen pada *mesh* yang tepat dapat meminimalisir kesalahan berupa deviasi nilai respon struktural yang terlalu jauh seperti pada Tabel 4.6 dan Gambar 4.15.

**Tabel 4.6** Analisis *meshing sensitivity*

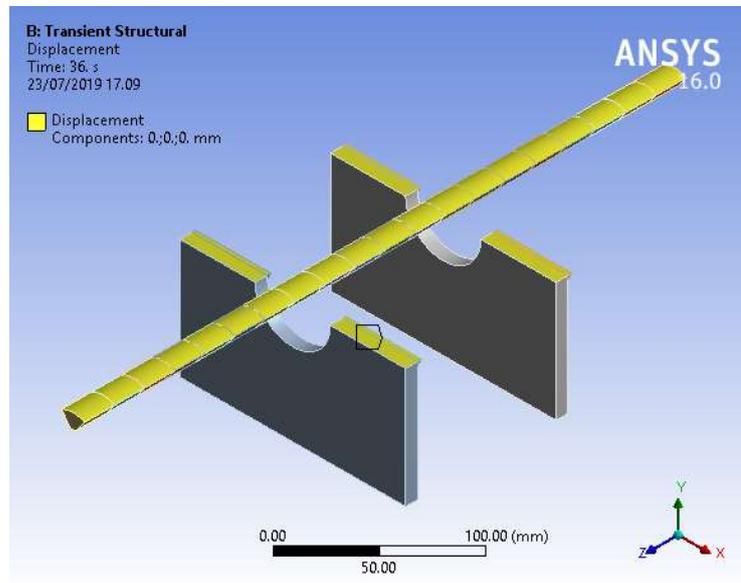
Jumlah Elemen	Distorsi (mm)
4629	0.31905
4798	0.32122
4945	0.32582
5049	0.32954
5366	0.32811
5472	0.32806
6251	0.33076
6483	0.3283
6634	0.33101
6672	0.33294
6753	0.33272
6829	0.33408
6998	0.33413
7143	0.33421



**Gambar 4.15** Grafik *meshing sensitivity*

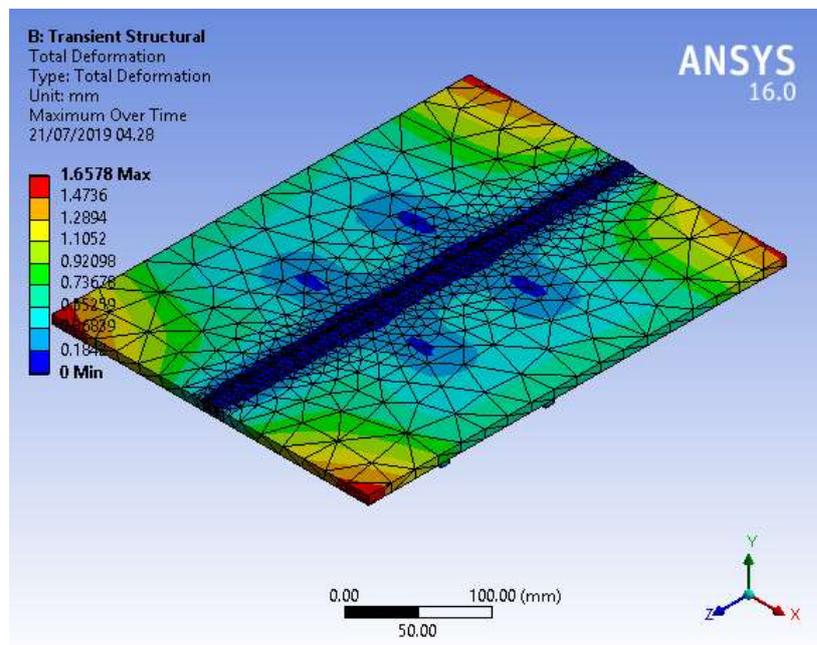
Kemudian dilanjutkan dengan melakukan impor beban panas yang telah dihasilkan oleh analisis *transient thermal*. Selanjutnya melakukan input kondisi batas berupa *displacement* yang berfungsi untuk menentukan bagian-bagian mana yang tidak mengalami perubahan struktural. Penempatan *displacement* dapat dilihat pada Gambar 4.16, yang memperlihatkan bagian *stopper* yang menempel pada pelat

dasar dan pada *weld bead* yang dianggap tidak mengalami perubahan bentuk maupun perpindahan posisi.

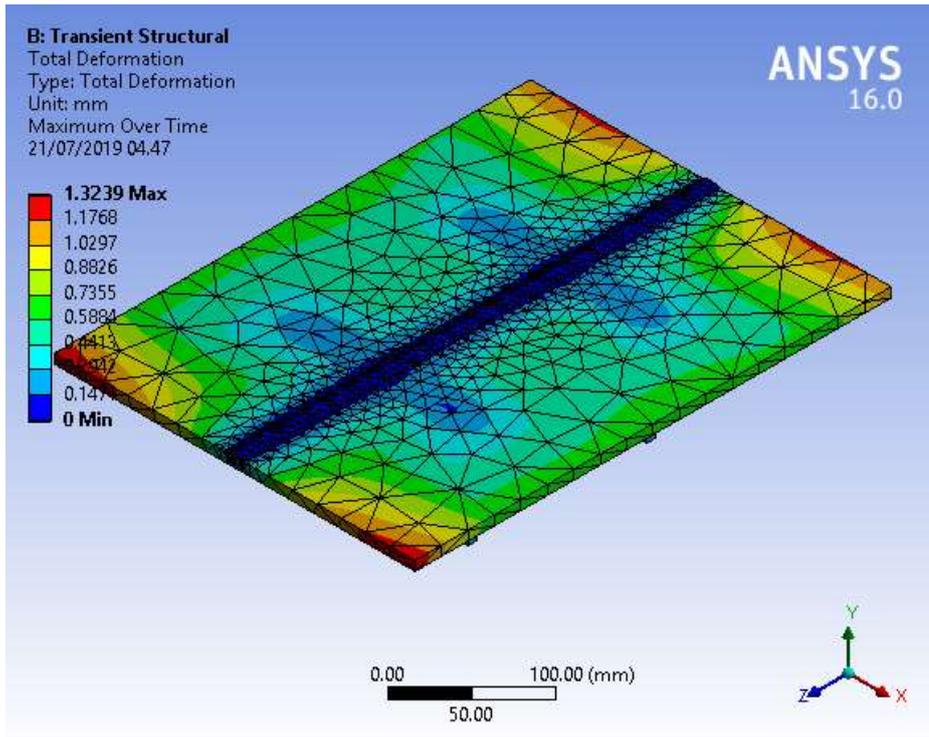


**Gambar 4.16** Pemodelan *boundary condition* pada *stopper* dan *weld bead*

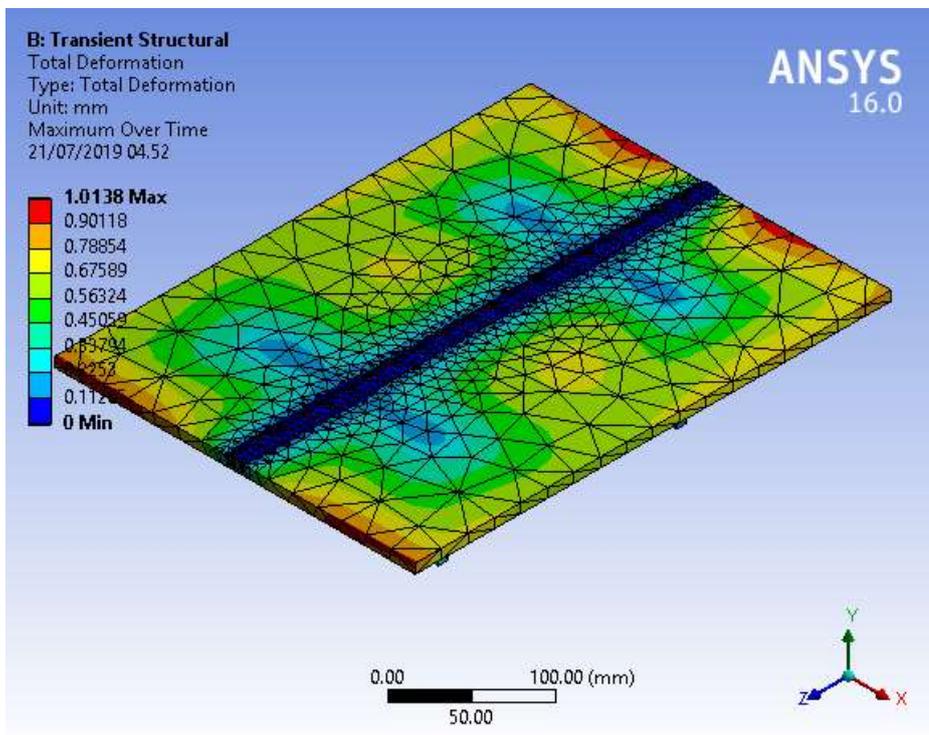
Setelah semua data input masuk, maka dilakukan *running* untuk mendapatkan respon dinamis struktural berupa deformasi total yang terjadi pada pemodelan seperti pada Gambar 4.17 sampai dengan Gambar 4.20.



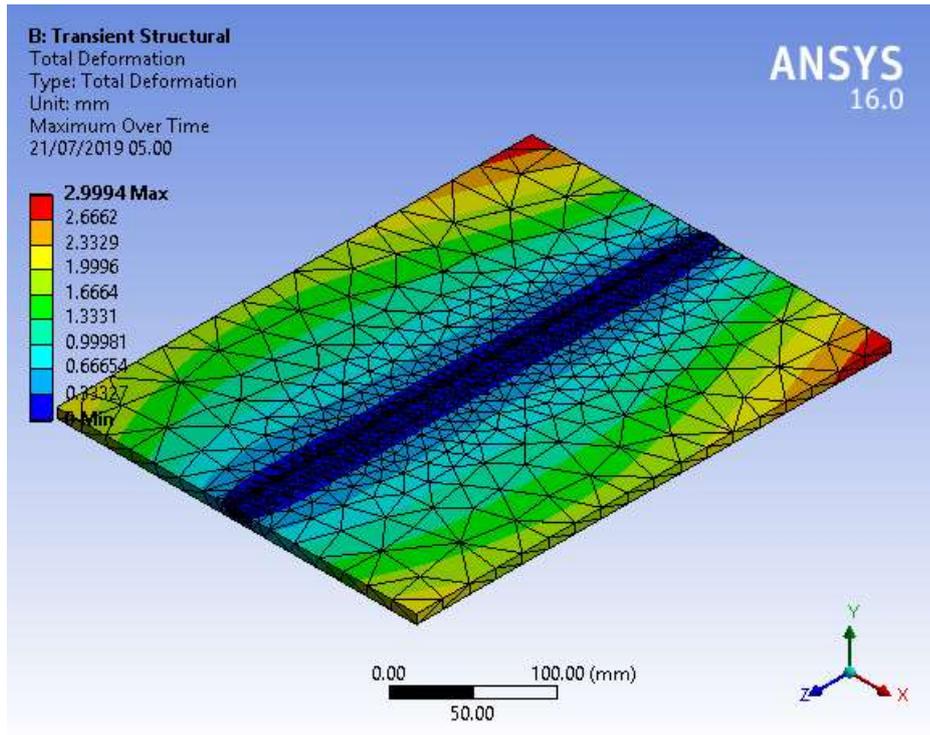
**Gambar 4.17** Hasil pemodelan *transient structural* pada variasi *stopper* 100mm



**Gambar 4.18** Hasil pemodelan *transient structural* pada variasi *stopper* 150mm

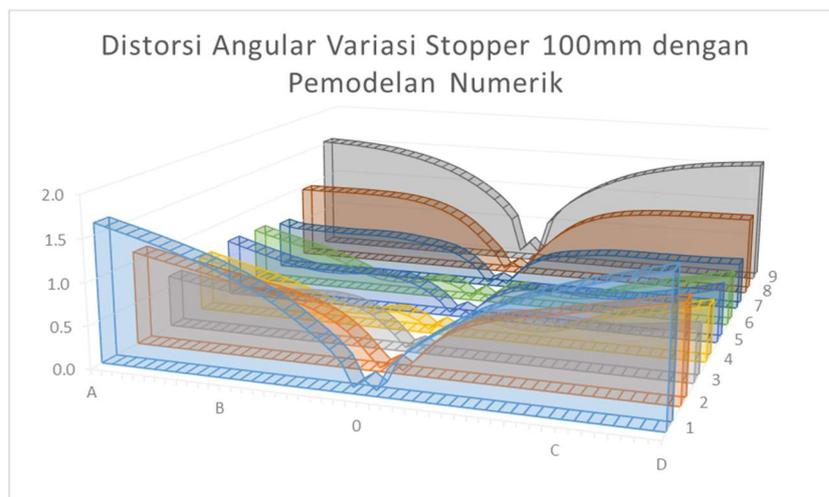


**Gambar 4.19** Hasil pemodelan *transient structural* pada variasi *stopper* 200mm

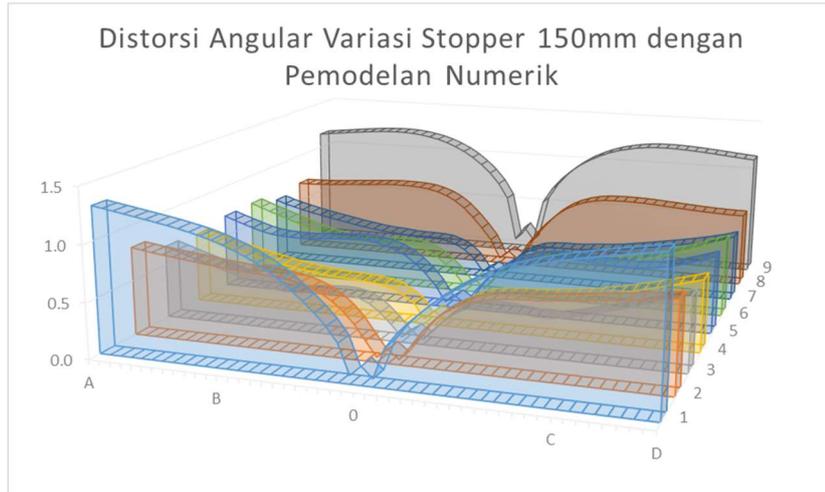


**Gambar 4.20** Hasil pemodelan *transient structural* pada pelat tanpa *stopper*

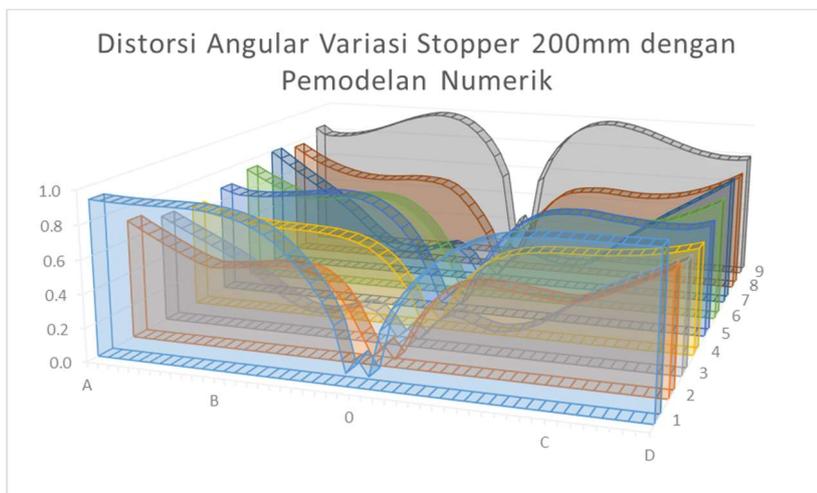
Dari hasil analisis struktural di atas, diketahui sebaran distorsi *angular* yang dapat digambarkan dengan grafik. Sehingga dari tiap variasi, disajikan dengan menggambarkan tiap potongan melintang dari potongan 1 hingga potongan 9 seperti pada Gambar 4.21 sampai dengan Gambar 4.24.



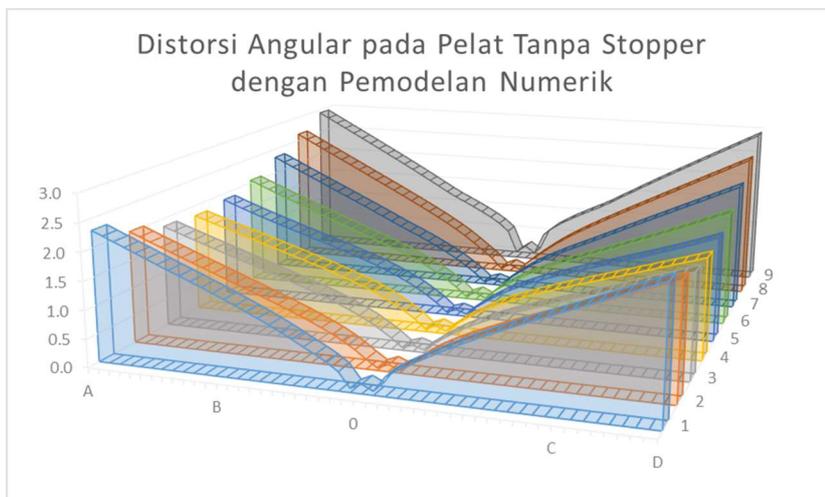
**Gambar 4.21** Grafik distorsi *angular* pada variasi *stopper* 100mm (numerik)



**Gambar 4.22** Grafik distorsi *angular* pada variasi *stopper* 150mm (numerik)



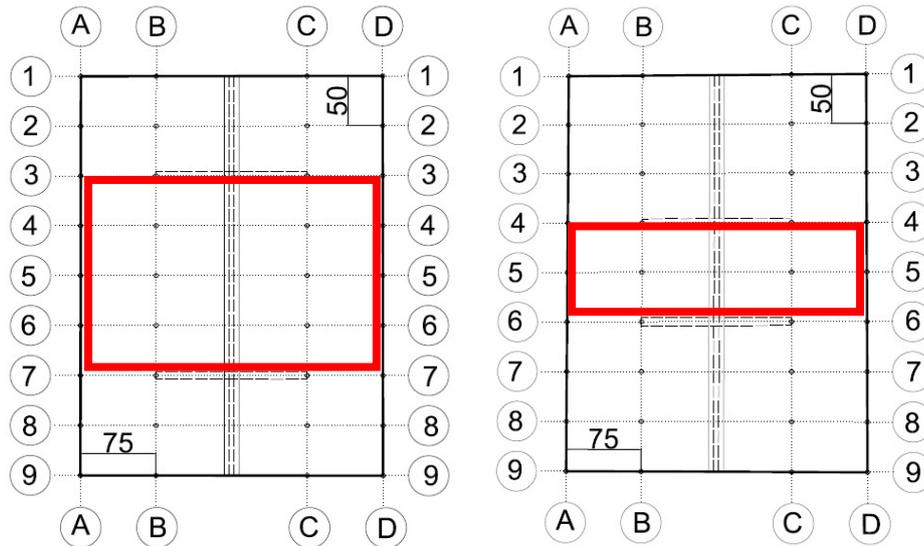
**Gambar 4.23** Grafik distorsi *angular* pada variasi *stopper* 200mm (numerik)



**Gambar 4.24** Grafik distorsi *angular* pada variasi tanpa *stopper* (numerik)

#### 4.4.7 Perbandingan Hasil Eksperimen dan Pemodelan

Setelah eksperimen dan pemodelan berhasil dilakukan, didapatkan hasil yang nantinya akan dibandingkan keduanya. Yang diperhatikan dari perbandingan ini yaitu distorsi sudut yang terjadi di beberapa titik pada pelat baja A36 yang telah ditentukan seperti pada Gambar 4.25. Lalu unttuk hasil perbandingan dapat dilihat pada Tabel 4.7.



**Gambar 4.25** Titik-titik diantara *stopper* yang ditinjau

**Tabel 4.7** Perbandingan hasil eksperimen dan pemodelan terhadap distorsi angular

	Variasi (mm)							
	100 mm		150 mm		200 mm		Tanpa <i>Stopper</i>	
Titik	Eks	Num	Eks	Num	Eks	Num	Eks	Num
A3	-	-	-	-	2.3	0.66	8.02	1.85
A4	1.87	0.68	1.48	0.65	1.47	0.64	5.24	1.81
A5	1.51	0.71	1.5	0.70	1.22	0.68	6.05	1.88
A6	1.44	0.69	1.37	0.71	1.64	0.74	6.88	2.05
A7	-	-	-	-	1.92	0.80	8.64	2.33
B3	-	-	-	-	0.62	0.23	4.26	1.09
B4	1.01	0.24	1.11	0.39	0.91	0.54	1.78	1.09
B5	1.39	0.42	1.29	0.57	1.17	0.70	2.08	1.11
B6	0.92	0.23	1.05	0.41	1.16	0.60	2.87	1.15
B7	-	-	-	-	0.94	0.24	4.11	1.26

**Tabel 4.7** Perbandingan hasil eksperimen dan pemodelan terhadap distorsi *angular* (lanjutan)

	Variasi (mm)							
	100 mm		150 mm		200 mm		Tanpa <i>Stopper</i>	
Titik	Eks	Num	Eks	Num	Eks	Num	Eks	Num
C3	-	-	-	-	0.89	0.23	2.65	1.09
C4	0.9	0.24	0.98	0.39	0.78	0.54	2.67	1.10
C5	1.05	0.41	1.34	0.57	1.23	0.69	1.89	1.11
C6	0.86	0.23	0.89	0.41	1.14	0.59	2.06	1.15
C7	-	-	-	-	1.21	0.25	3.37	1.26
D3	-	-	-	-	2.03	0.66	5.58	1.87
D4	1.71	0.66	1.51	0.65	1.22	0.64	6.29	1.82
D5	1.41	0.66	1.46	0.71	1.08	0.68	7.23	1.90
D6	1.07	0.61	1.27	0.72	1.63	0.74	6.27	2.08
D7	-	-	-	-	1.5	0.79	8.2	2.35

Kemudian data panjang distorsi berdasar eksperimen dan pemodelan numerik dirata-rata agar dapat ditentukan variasi mana yang memiliki distorsi *angular* terkecil. Perbandingan ditunjukkan pada Tabel 4.8.

**Tabel 4.8** Rata-rata distorsi *angular* eksperimen dan numerik

Variasi	Rata-rata (mm)	
	Eksperimen	Numerik
100 mm	1.2617	0.4828
150 mm	1.2708	0.5749
200 mm	1.3030	0.5827
Tanpa <i>Stopper</i>	4.8070	1.5670

Sehingga dapat diketahui bahwa variasi jarak pemasangan *stopper* 100 mm memiliki nilai distorsi *angular* terkecil daripada variasi lainnya.

#### 4.4.8 Analisis Hasil

Tahap analisis hasil didapatkan setelah dilakukannya perbandingan data eksperimen dengan data pemodelan numerik. Sehingga dapat diketahui hasil

distorsi minimum dalam studi pengaruh variasi jarak *stopper* terhadap distorsi pada pelat baja A36. Hasil distorsi minimum diperoleh dari pengukuran pada beberapa titik di antara dua buah *stopper* yang telah ditentukan seperti pada Gambar 4.25.

Berdasar hasil pengukuran pada eksperimen pengelasan, didapatkan data distorsi rata-rata sebesar 1.26 mm pada variasi jarak *stopper* 100 mm. Pada variasi jarak *stopper* 150 mm didapatkan distorsi rata-rata sebesar 1.27 mm. Pada variasi jarak *stopper* 200 mm didapatkan distorsi rata-rata sebesar 1.30 mm. Pada variasi tanpa *stopper* didapatkan distorsi rata-rata sebesar 4.81 mm. Jika dilihat dari hasil eksperimen, maka variasi jarak *stopper* 100 mm dapat ditarik kesimpulan sebagai variasi urutan pengelasan yang paling kecil rata-rata distorsinya seperti pada Tabel 4.8.

Kemudian untuk memastikan kembali hasil tersebut dilakukan permodelan menggunakan *software* berbasis elemen hingga. Pada permodelan didapatkan hasil pada variasi jarak *stopper* 100 mm distorsi rata-rata sebesar 0.48 mm. Pada variasi jarak *stopper* 150 mm memiliki distorsi rata-rata sebesar 0.57 mm. Pada variasi jarak *stopper* 200 mm memiliki distorsi rata-rata sebesar 0.58 mm. Pada variasi tanpa *stopper* memiliki distorsi rata-rata sebesar 1.57 mm. Sehingga dapat ditentukan variasi yang memiliki distorsi rata-rata terkecil berdasar pemodelan numerik yaitu variasi jarak *stopper* 100 mm.

Berdasarkan hasil dari perbandingan data eksperimen dan permodelan numerik, maka variasi jarak *stopper* 100 mm memiliki distorsi rata-rata terkecil. Hal tersebut dapat terjadi dikarenakan *stopper* yang jaraknya rapat dengan *stopper* lain dapat meredam distorsi akibat panas yang menyebar pada saat proses pengelasan. Namun jika dibandingkan dengan rata-rata distorsi yang terjadi pada variasi jarak 150 mm dan 200 mm, perbedaan antara ketiganya tidak seberapa signifikan atau dapat dikatakan cenderung sangat kecil dibandingkan dengan variasi sambungan tanpa *stopper*.

**(HALAMAN SENGAJA DIKOSONGKAN)**

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasar analisis dan eksperimen yang telah dilakukan pada penelitian ini didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Diperoleh distorsi *angular* rata-rata dari setiap variasi jarak *stopper* sebagai berikut:
  - Pada variasi jarak *stopper* 100 mm didapatkan rata-rata distorsi sebesar 1.26 mm dari eksperimen dan 0.48 mm dari pemodelan numerik.
  - Pada variasi jarak *stopper* 150 mm didapatkan rata-rata distorsi sebesar 1.27 mm dari eksperimen dan 0.57 mm dari pemodelan numerik.
  - Pada variasi jarak *stopper* 200 mm didapatkan rata-rata distorsi sebesar 1.30 mm dari eksperimen dan 0.58 mm dari pemodelan numerik.
  - Pada variasi tanpa *stopper* mm didapatkan rata-rata distorsi sebesar 4.81 mm dari eksperimen dan 1.57 mm dari pemodelan numerik.

Dari hasil di atas, asumsi material *linear-elastic* di dalam pemodelan numerik menyebabkan perbedaan hasil yang cukup besar dengan eksperimen.

2. Berdasarkan hasil perbandingan eksperimen dengan pemodelan numerik, variasi jarak *stopper* 100 mm memiliki keunggulan dari variasi jarak *stopper* lainnya. Hal tersebut dikarenakan jarak *stopper* yang relatif dekat dapat meminimalisir distorsi *angular* lebih baik.

## 5.2 Saran

Karena masih kurang sempurnanya penelitian ini, diperlukan tahap-tahap tambahan yang dapat menyempurnakan penelitian ini. Sebagai tindak lanjutnya jika topik ini diteliti lagi, ada beberapa saran yang diberikan penulis sebagai berikut :

1. Melakukan pengukuran material uji saat sebelum dilakukan pengelasan.
2. Memperbesar material uji dikarenakan hasil variasi jarak *stopper* jika terlalu sempit maka hasil distorsi yang didapatkan sangat acak dan tidak seberapa memperlihatkan perbedaan antar variasi.
3. Menggunakan material *elastic-plastic* dalam pemodelan numerik agar hasil analisis numerik dapat mendekati eksperimen.
4. Melakukan pemodelan *cooling rate* agar analisis numerik sesuai dengan kondisi lapangan.
5. Membuat *timeline* yang teratur untuk pengerjaan tugas akhir topik ini, agar mampu melakukan analisis dengan waktu yang terjadwal sehingga mampu mendapatkan hasil yang maksimal.

## DAFTAR PUSTAKA

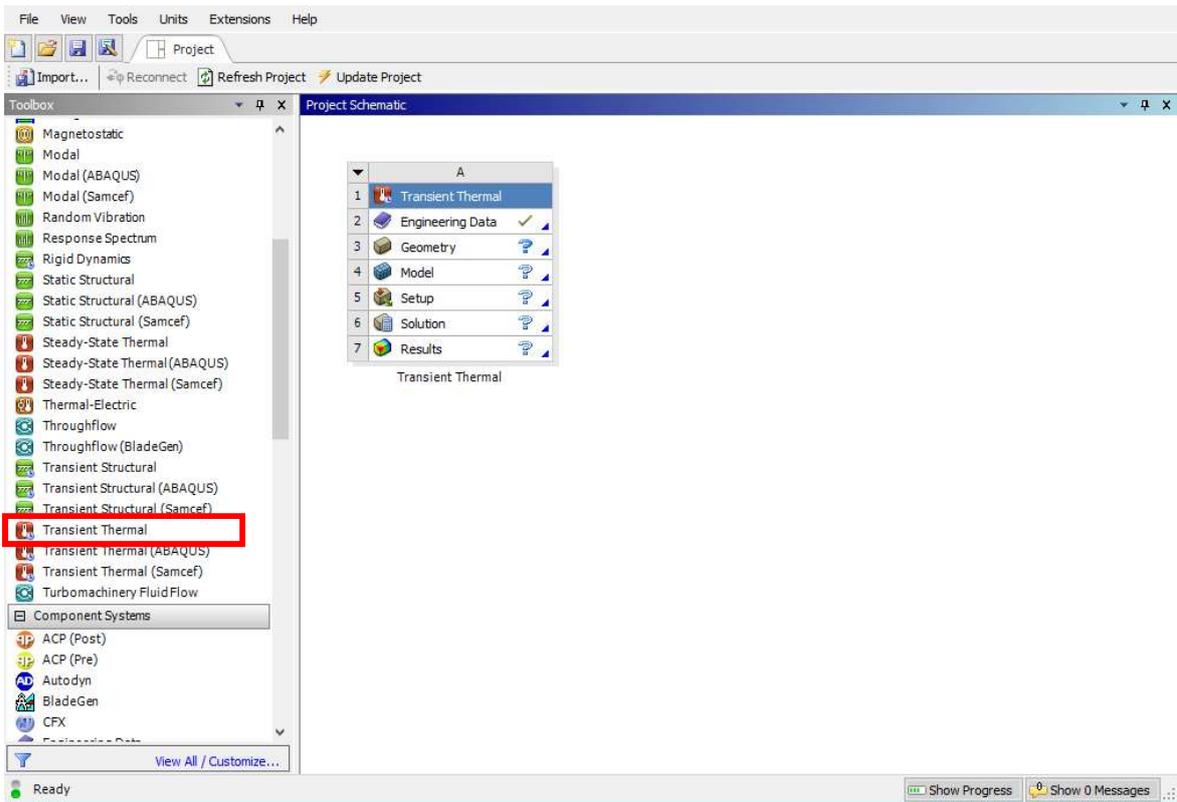
- Anggoro, A. A. (2018). *Analisis Perbandingan Pengeruh Stopper Model Baut dengan Konvensional terhadap Tegangan Sisa dan Deformasi menggunakan Metode Elemen Hingga*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- ANSYS. (1999). *Theory Reference Relesase 5.6*. Canonsburg: ANSYS Inc.
- ASME Section IX. (2013). *Welding, Brazing, and Fusing Qualifications*. New York: The American Society of Mechanical Engineers.
- AZoM. (2012, July 5). *ASTM A36 Mild/Low Carbon Steel*. Retrieved from AZO Materials: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6117>
- Cary, H. B. (1994). *Modern Welding Technology 3rd Edition*. New Jersey: Prentice Hall.
- DeGarmo, E. P., Black, J. T., & Kosher, R. A. (1988). *Materials and Process in Manufacturing 7th Edition*. New York: Macmillan.
- Kusdiyarto, P. (2018). Analisis Variasi Included Angle terhadap Distorsi Pada Sambungan Las SMAW. *Dinamika Vokasional Teknik Mesin*, 12-18.
- Lincoln Electric Company. (1973). *The Procedure Hanbook of Arc Welding*. Cleveland: The Lincoln Electric Company.
- Logan, D. L. (2000). *A First Course in The Finite Element Method*. Stamford: Global Engineering.
- Morna, M. Z. (2012). *Analisa Terbentuknya Tegangan Sisa dan Deformasi pada Pengelasan Pipa Beda Jenis menggunakan Metode Elemen Hingga*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Pilipenko, A. (2001). Computer Simulation of Residual Stress and Distortion. *Machine Design and Materials Technology*, 16.
- Pinninti, R. R. (2014). *Simulation of TIG Welding Process*. Saarbrücken: Lap Lambert.

- Pratama, P. R. (2016). *Pengaruh Stopper Terhadap Tegangan Sisa dan Deformasi pada Sambungan Butt Weld Pelat Datar menggunakan Metode Elemen Hingga*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Putra, R. B. (2017). *Analisis Pengaruh Ukuran Stopper pada Sambungan Pelat Kapal terhadap Tegangan Sisa dan Deformasi menggunakan Metode Elemen Hingga*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sonawan, H., & Sutratman, R. (2006). *Pengantar untuk Memahami Pengelasan Logam*. Bandung: Alfa Beta.
- Syahroni, N., & Hidayat, M. I. (2012). *3D Finite Element Simulation of T-Joint Fillet Weld: Effect of Various Welding Sequences on the Residual Stresses and Distortions*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Wirjosumarto, H., & Okumura, T. (2000). *Teknologi Pengelasan Logam*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Zakharov, B. (1962). *Heat Treatment of Metal*. Moscow: Peace Publisher.

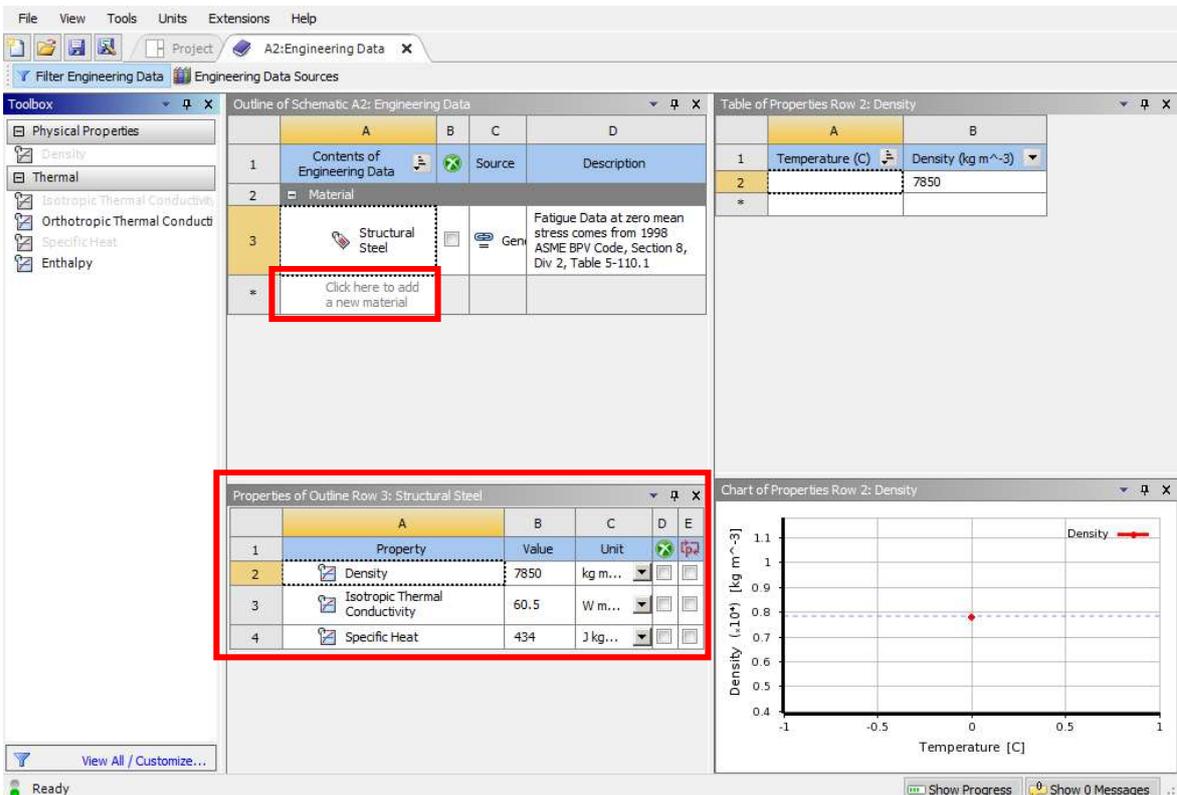
# **LAMPIRAN A**

## ***Analisis Transient Thermal***

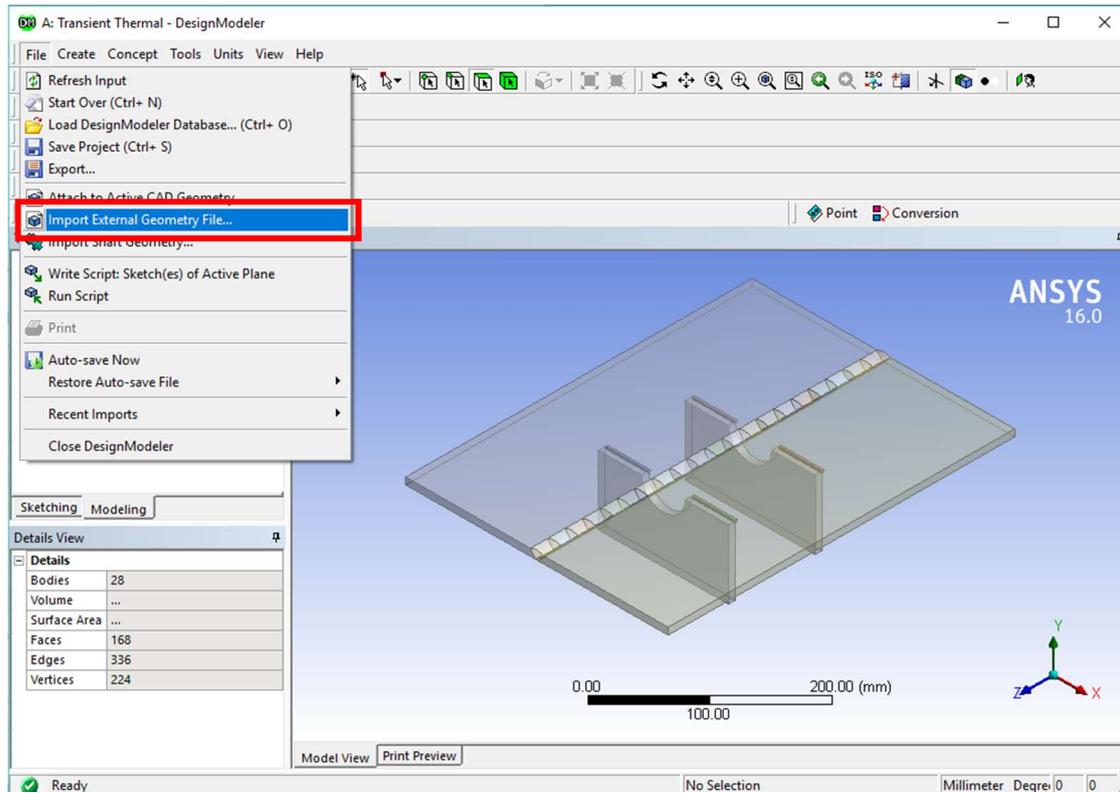
1. Memilih jenis analisis “*Transient Thermal*” pada *toolbox* ANSYS *Workbench* 16.0.



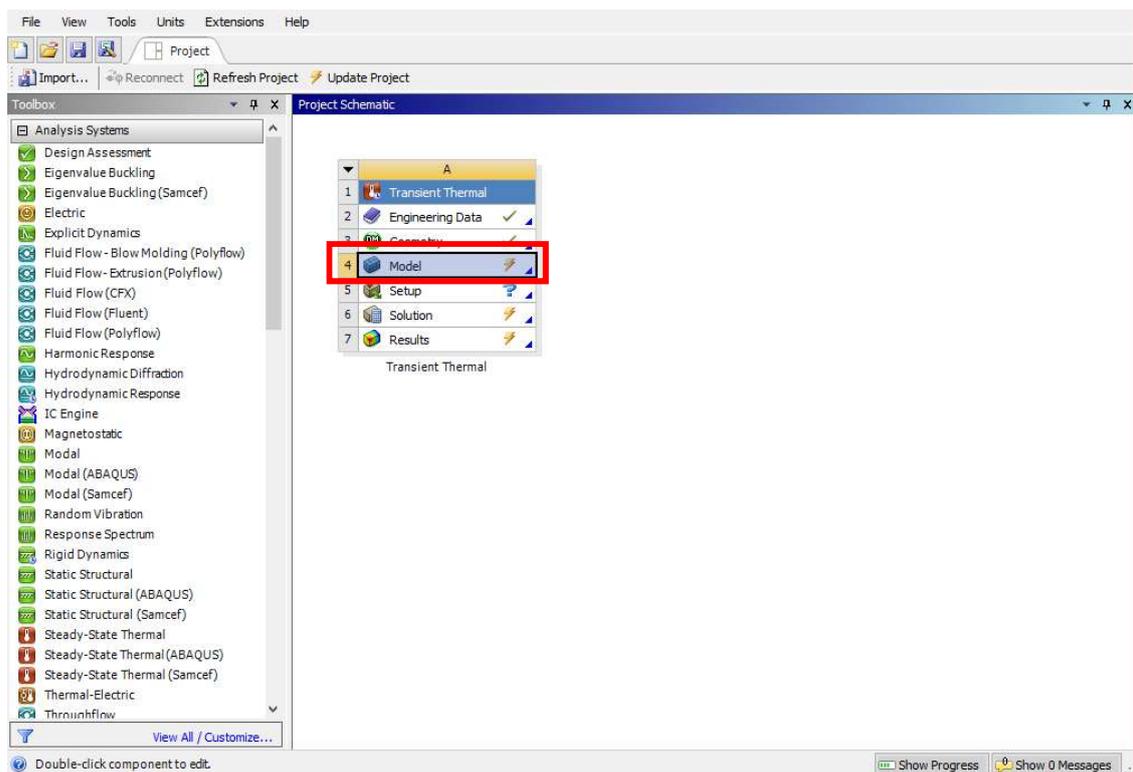
2. Melakukan *input "Engineering Data"* sesuai karakteristik material yang akan digunakan pada *add new material*. Kemudian *input density, iso thermal conductivity* dan *specific heat*.



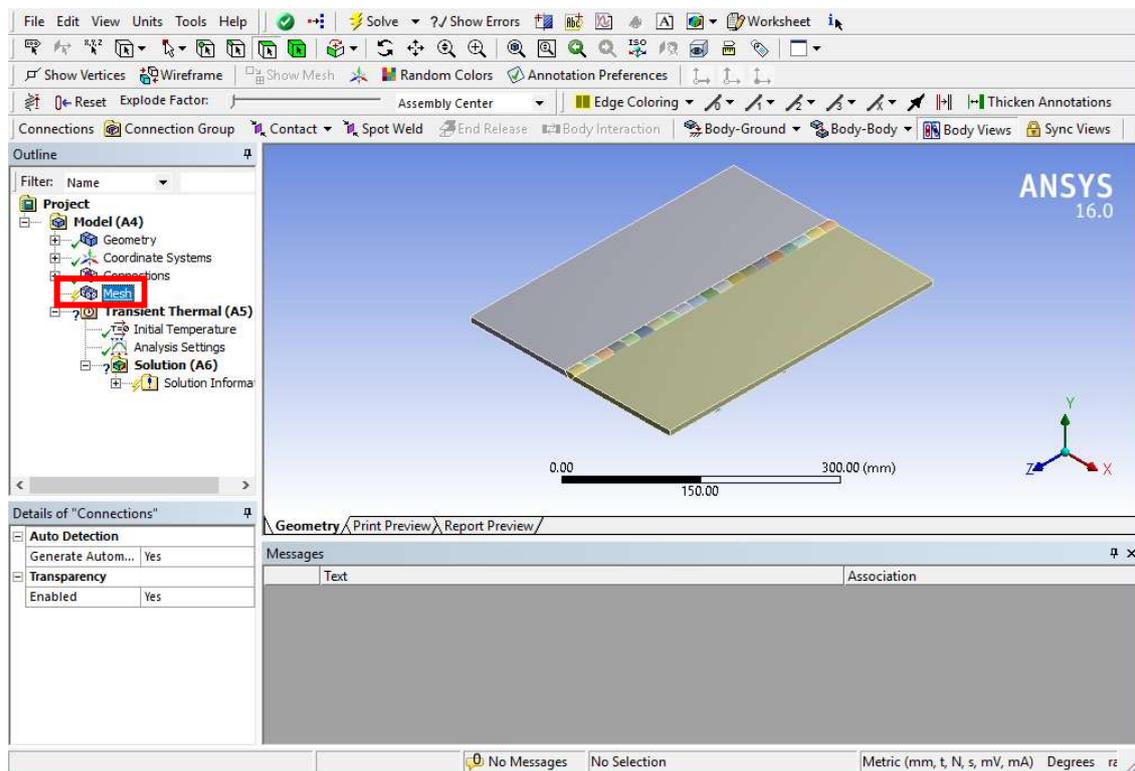
3. Melakukan import geometri dengan format .igs yang telah dibuat di Autodesk *Inventor* lalu *generate*.



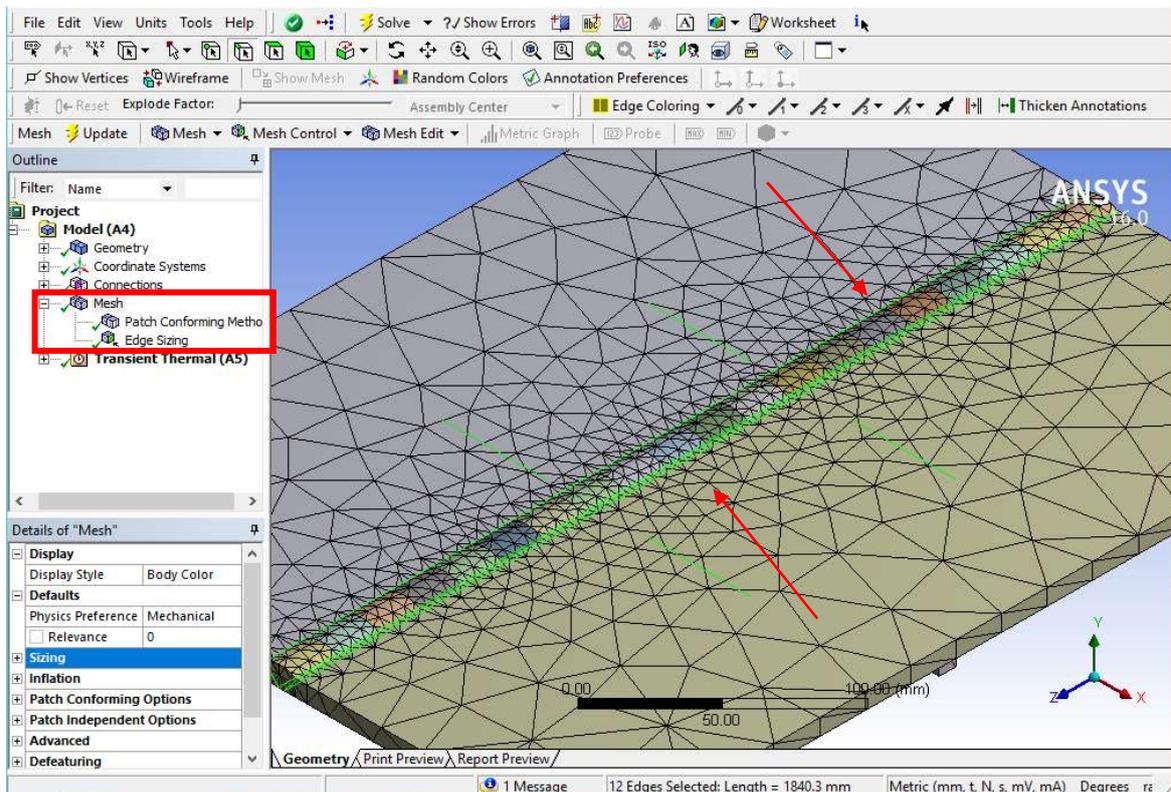
4. Tampilan pada "*Project Schematic*" setelah melakukan *import* geometri, kemudian seleksi pada "*Model*".



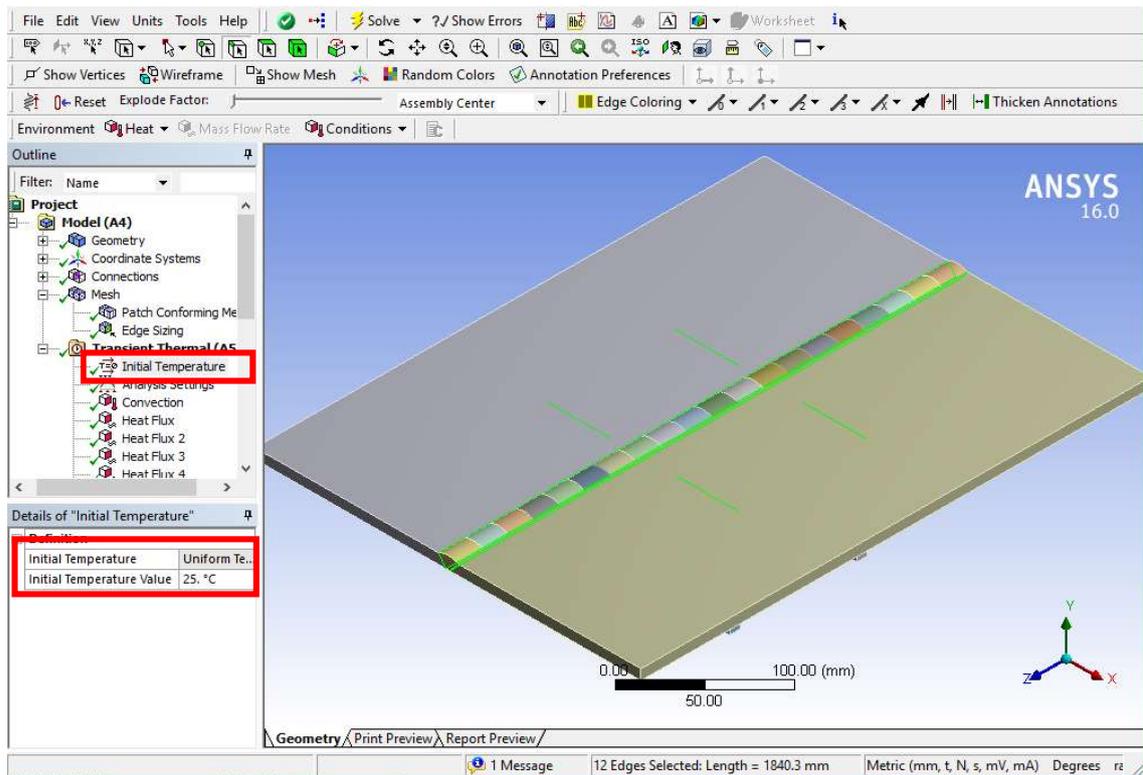
5. Tampilan pada ANSYS *Mechanical*. Kemudian dilanjutkan dengan *Meshing*.



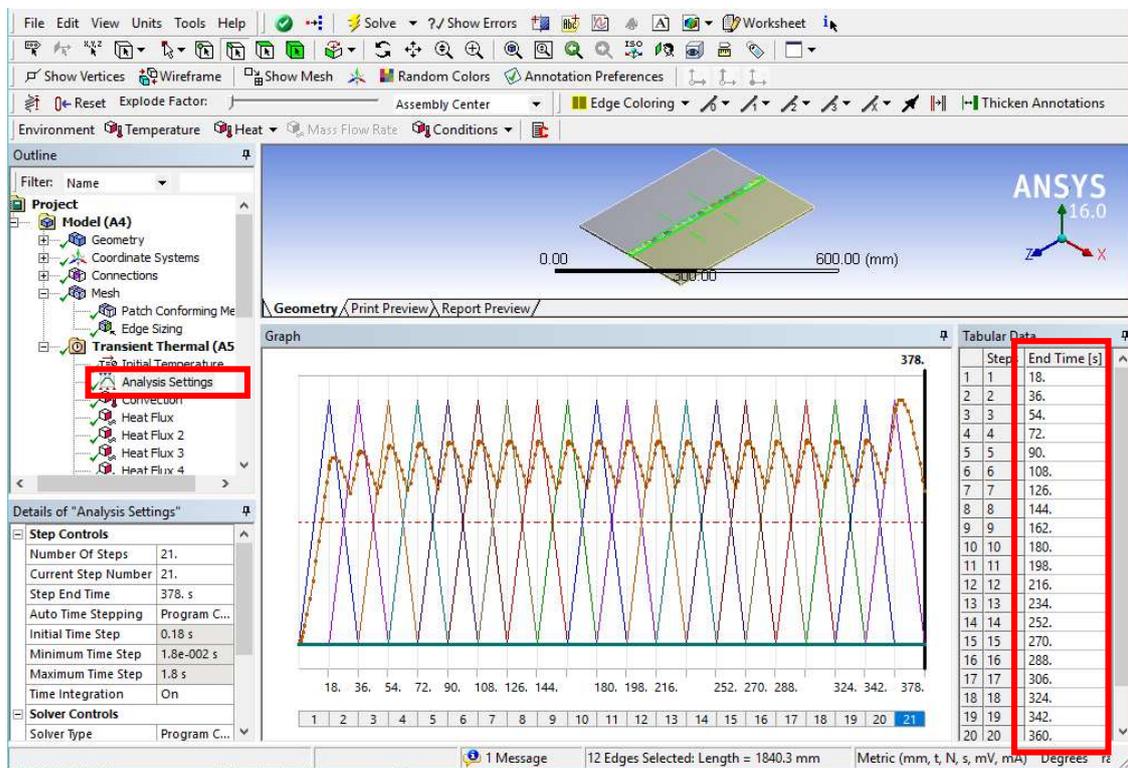
6. Melakukan insert *Tetrahedral "Method"* pada seluruh *body* dan menentukan "*Edge Sizing*" dengan besar elemen yang diinginkan sepanjang ujung pelat dekat daerah pengelasan.



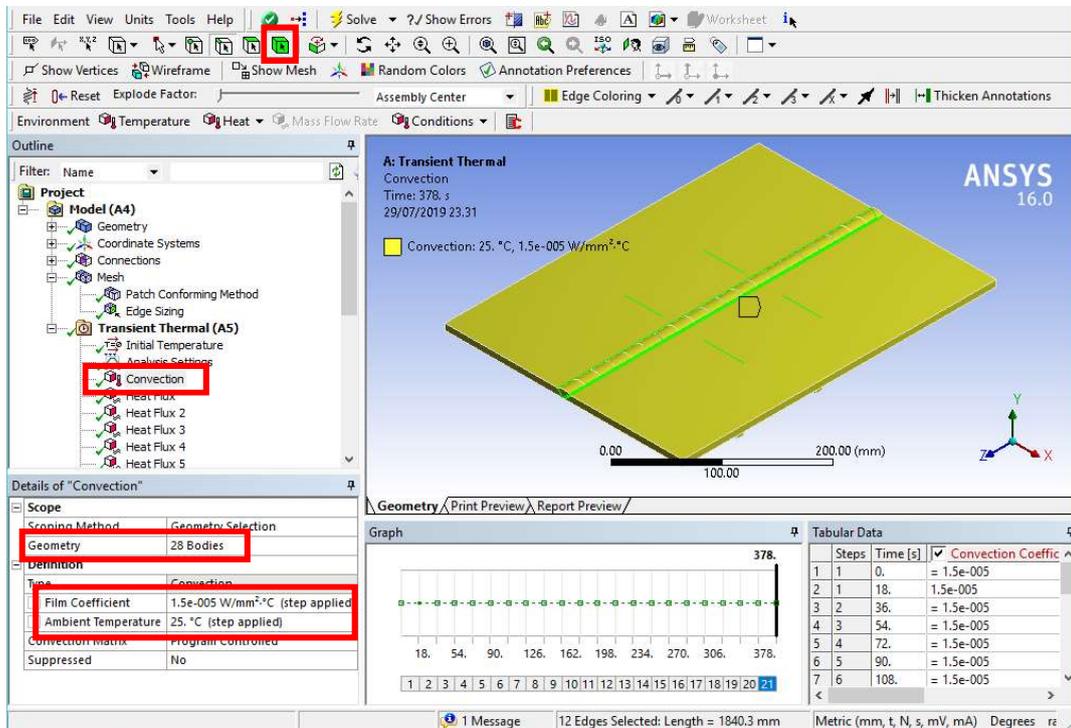
7. Dilanjutkan dengan meng-input "Initial Temperature" sesuai suhu lingkungan.



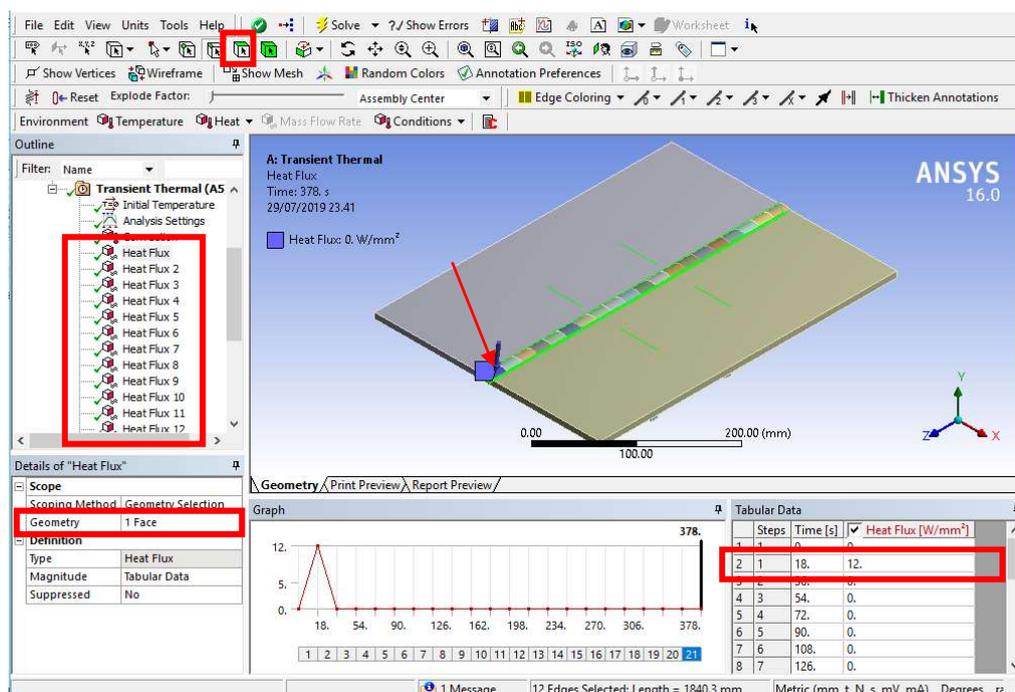
8. Kemudian meng-input data End Time pada "Analysis Settings" berdasar waktu pengelasan setiap step yang telah dihitung dengan excel.



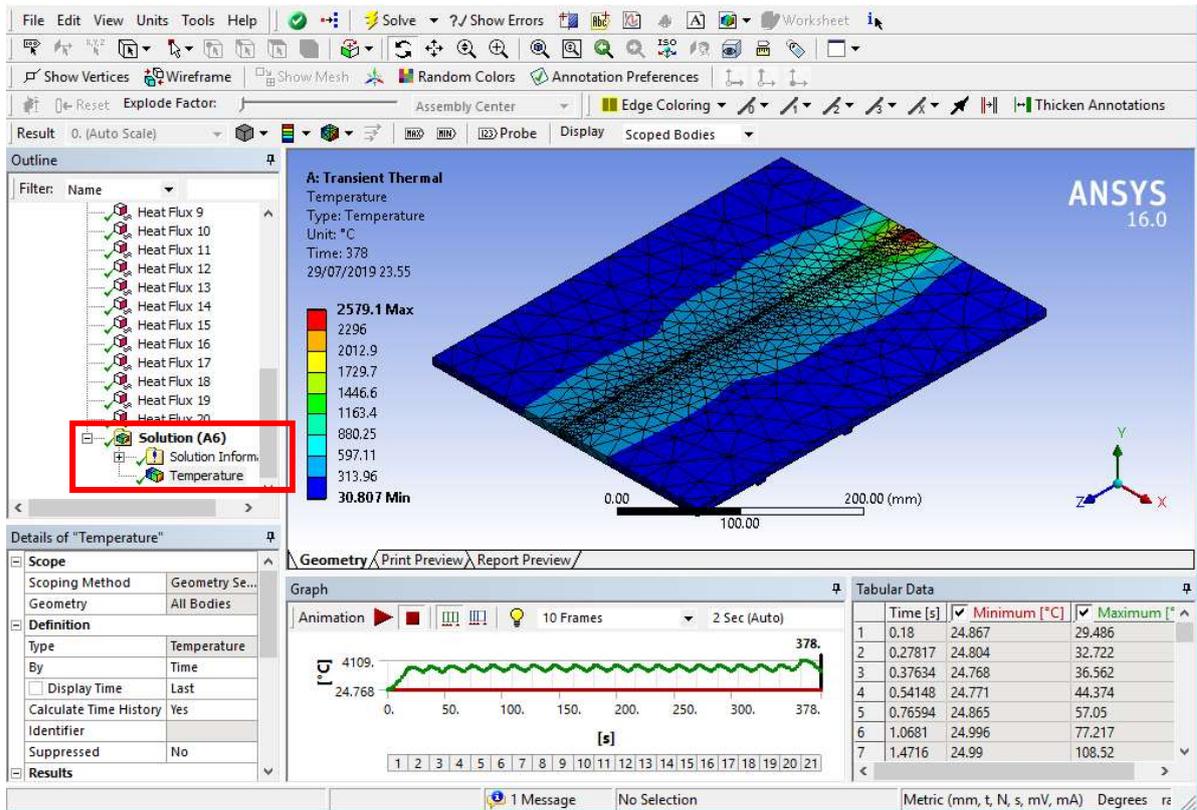
9. Dilanjutkan dengan melakukan *insert* “Convection” pada outline “Transient Thermal” dan meng-input pada *film coefficient* sebesar  $1.5e-005 \text{ W/mm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  dan *ambient temperature* sesuai pada “Initial Temperature”. Dan “Convection” menggunakan seleksi *body* pada geometri.



10. Melakukan insert “Heat Flux” berdasar perhitungan dengan persamaan *Heat Input* yang dibagi dengan luasan *step* yang terlewati tiap detik. Dan nilai *Heat Flux* di-input pada tiap *time step* dengan seleksi geometri *face*, dimana pada analisis ini terdapat 20 *step*.



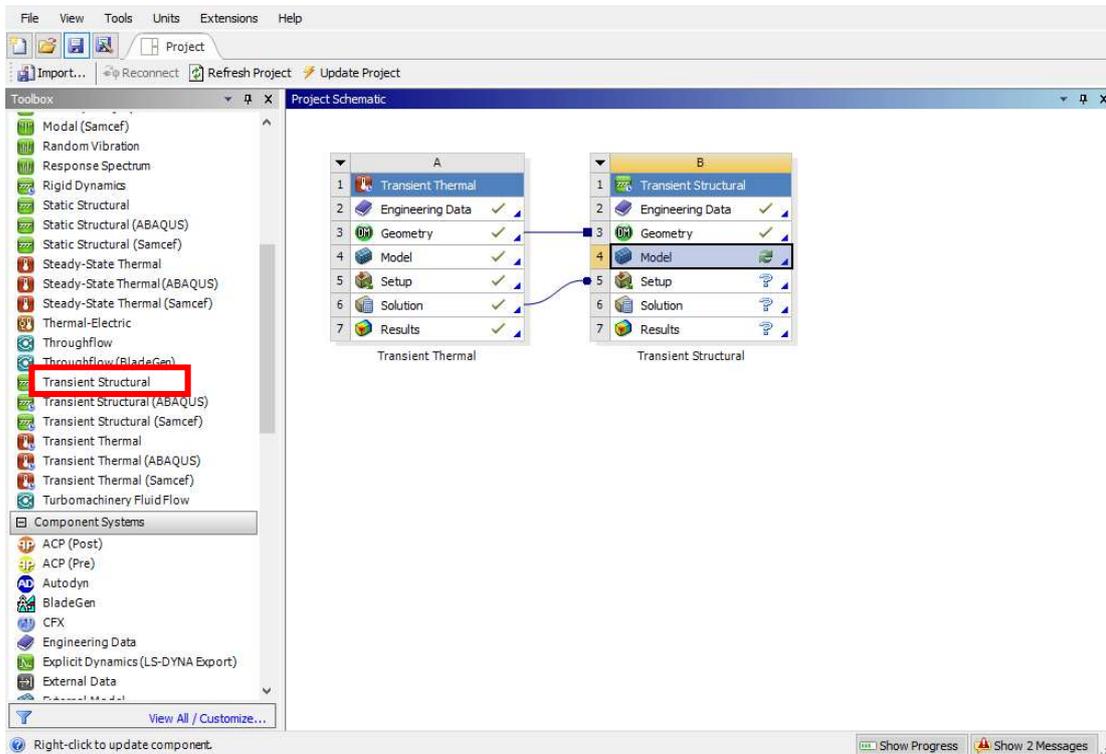
11. Setelah semua data telah di-input, dilanjutkan dengan insert “Temperature” pada outline “Solution”. Sehingga solusi yang akan didapatkan yaitu sebaran temperatur tiap waktunya.



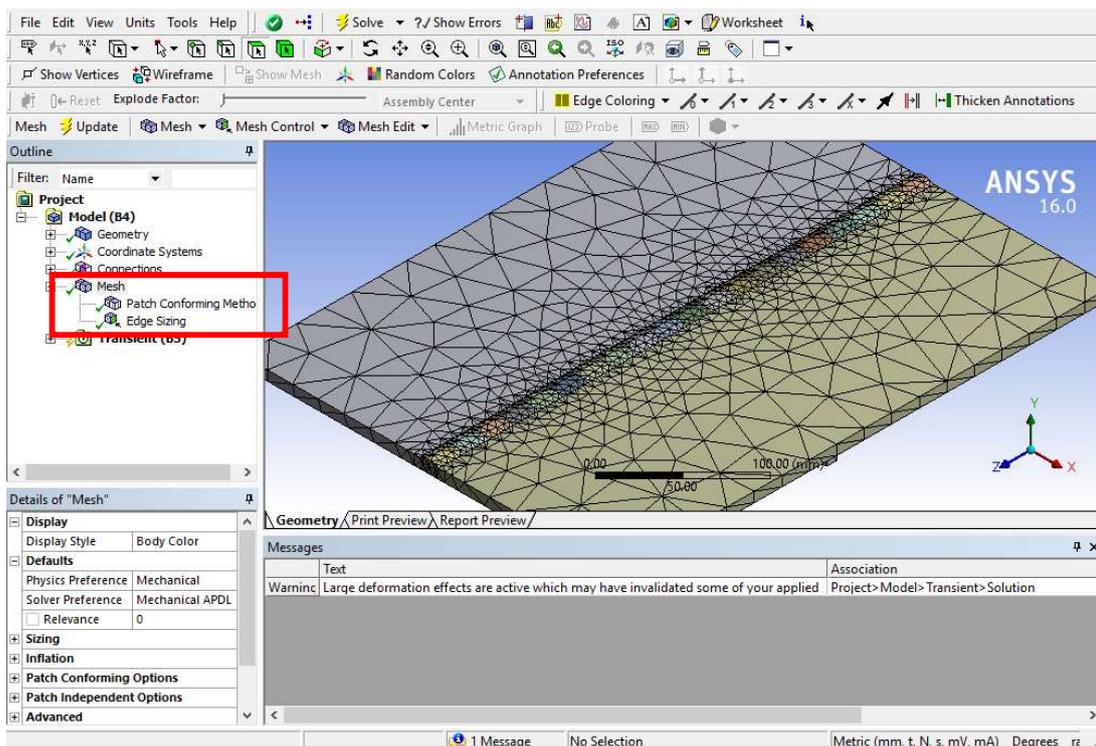
# **LAMPIRAN B**

## ***Analisis Transient Structural***

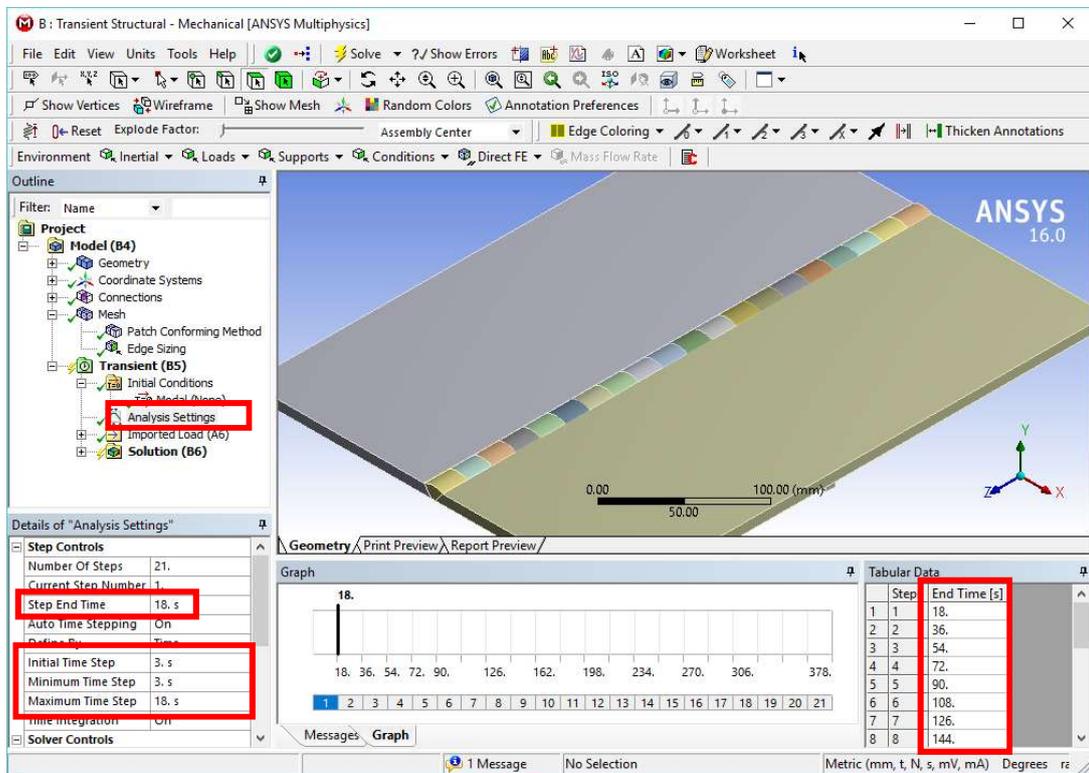
1. Menghubungkan data hasil *Transient Thermal* menuju *Transient Structural*, yaitu “*Geometry*” menuju “*Geometry*” karena menggunakan geometri yang sama dan “*Solution*” menuju “*Setup*” dimana hasil termal menjadi *input* struktural.



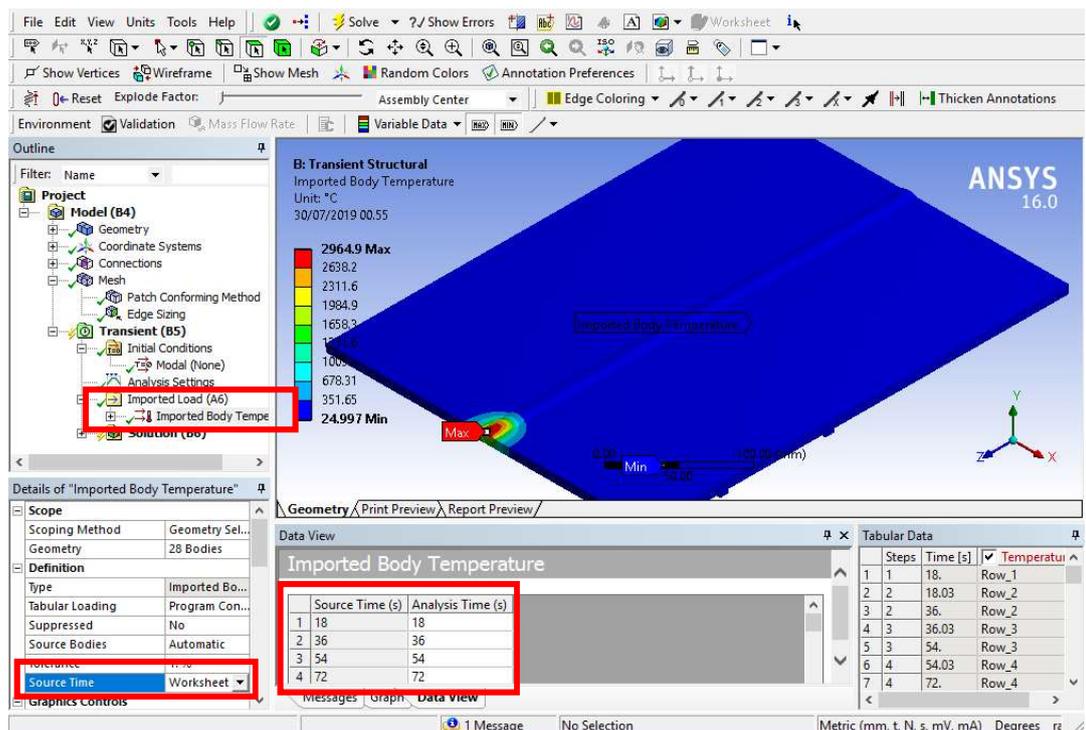
2. Setelah masuk ke interface ANSYS Mechanical, hal pertama yang dilakukan yaitu *meshing* dengan langkah seperti pada analisis termal.



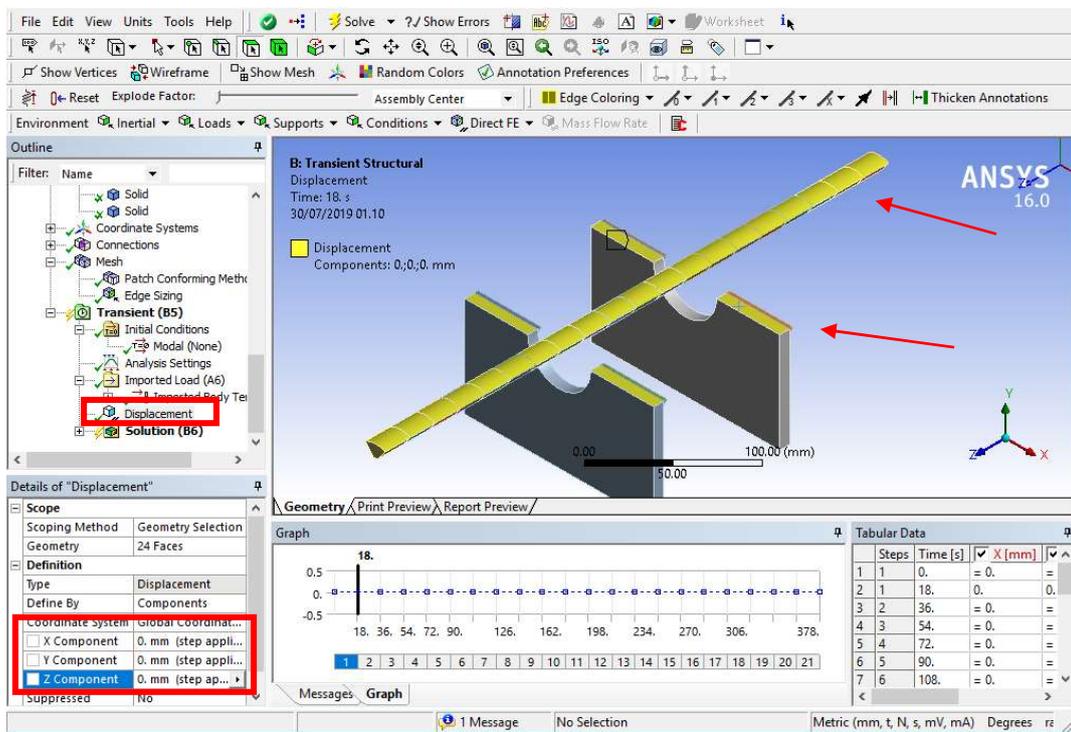
3. Kemudian *input data load step* pada “*Analysis Setting*” berupa *step end time* pada *tabular data*, *initial time step* sebagai *kelipatan load step* yang dianalisis, *minimum time step* sebagai *load step* terkecil dan *maximum time step* sebagai *load step* terbesar pada tiap *step end time*.



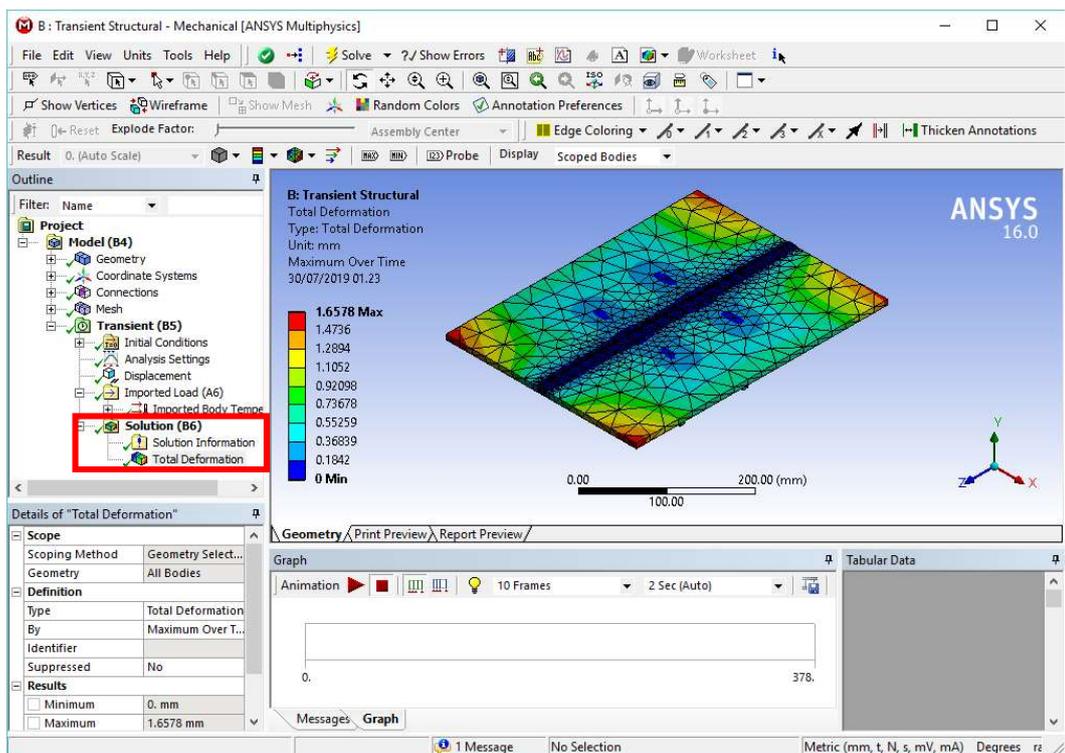
4. Lalu mengimpor beban panas berdasar hasil *Transient Thermal* pada outline “*Imported Load*”. Dengan seleksi *source time* yaitu *worksheet* yang di-*input* sesuai *step end time*.



5. Memberikan *boundary condition* berupa “*Displacement*” dengan X, Y dan Z component 0 mm pada bagian-bagian yang dianggap tidak berpindah posisi selama proses pengelasan terjadi. Seperti pada *weld bead* dan sisi *stopper* yang menempel pada pelat dasar.



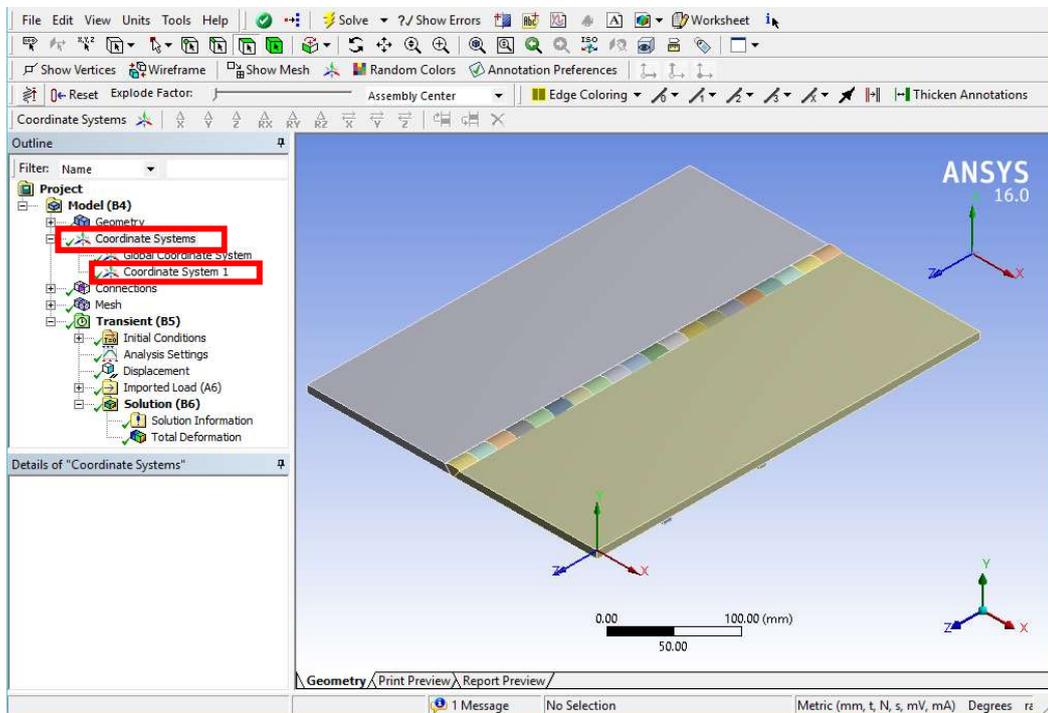
6. Setelah semua data telah di-input, dilanjutkan dengan insert “*Total Deformation*” pada *outline* “*Solution*”. Sehingga solusi yang akan didapatkan yaitu sebaran perubahan bentuk tiap waktunya.



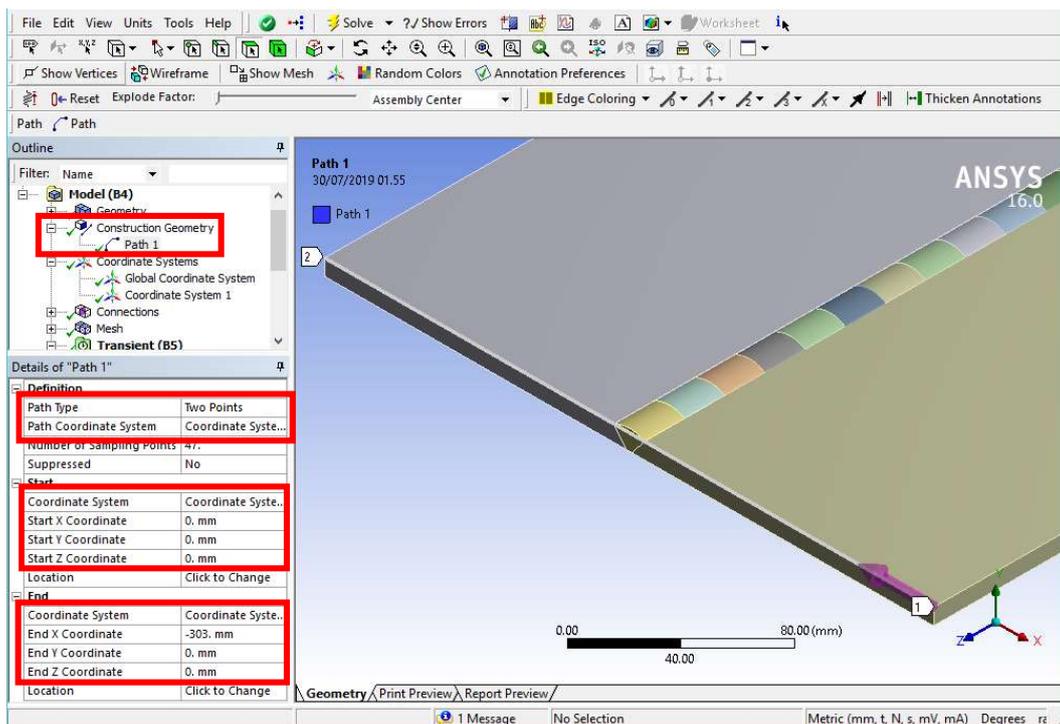
# **LAMPIRAN C**

**Pengukuran dengan *Line Path***

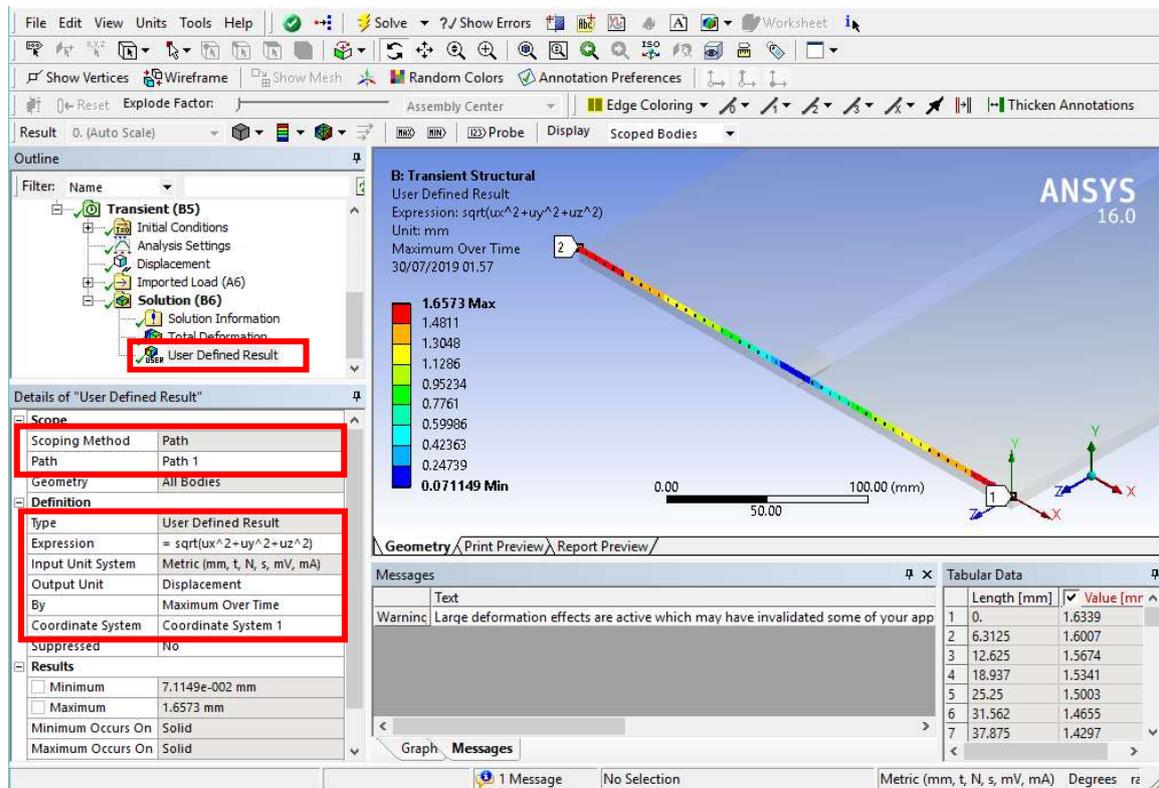
1. Pengukuran menggunakan *line path* dilakukan setelah hasil “*Total Deformation*” didapatkan pada analisis *Transient Structural*. Lalu langkah awal yaitu menentukan “*Coordinat System*” sesuai titik 0 pada pengukuran eksperimen.



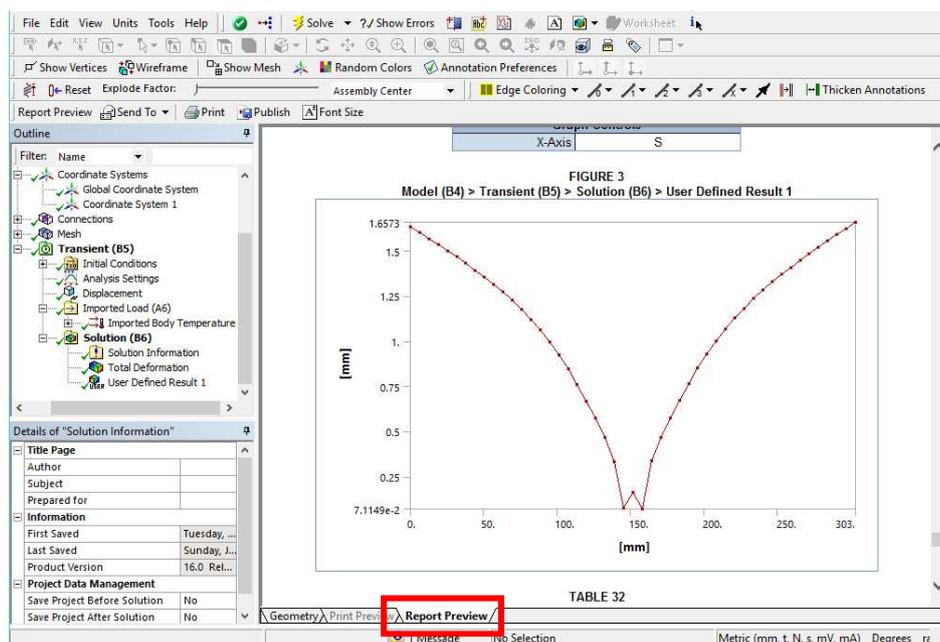
2. Melakukan *insert* “*Construction Geometry*” kemudian *insert* “*Path*”. Pada *path coordinat system* seluruhnya diubah menjadi *Coordinat System 1* yang telah dibuat sebelumnya. Kemudian tentukan titik mulai dan berakhirnya garis *path* yang akan diukur.



3. Kemudian insert “User Defined Result” pada outline “Solution” untuk mengetahui perubahan distorsi sepanjang path yang telah ditentukan. Dan menentukan *expression* berupa  $\sqrt{u_x^2+u_y^2+u_z^2}$  dan *output unit* berupa *displacement* untuk menampilkan *total deformation* yang terjadi pada path tersebut.



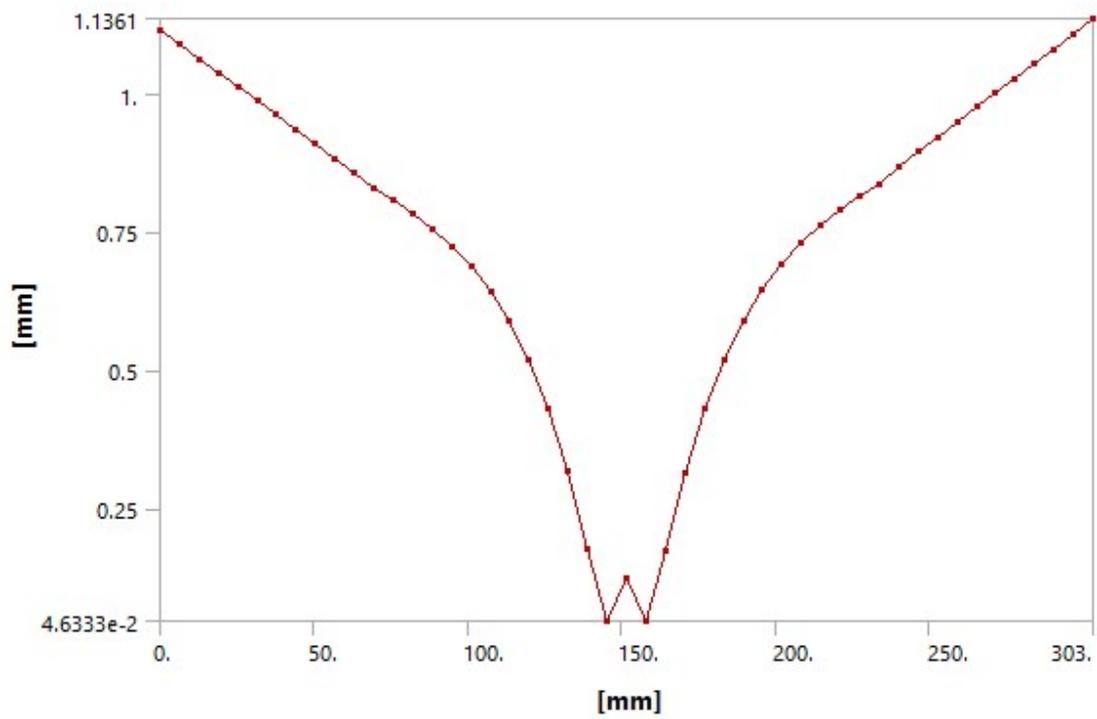
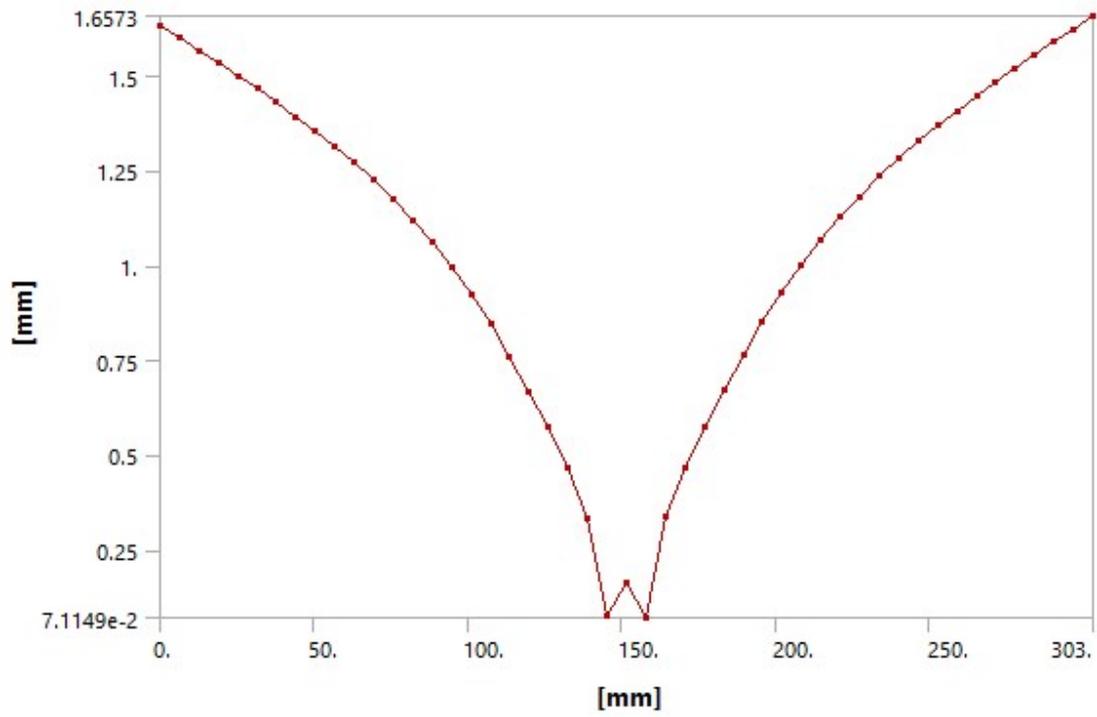
4. Lalu didapatkan grafik sebaran deformasi total yang dapat dilihat pada *Report Preview* yang nantinya akan menjadi input pada excel untuk dibuat grafik sebaran distorsi *angular* pada tiap variasi pengelasan. Sehingga proses ini terus diulang pada tiap potongan yang akan ditinjau.

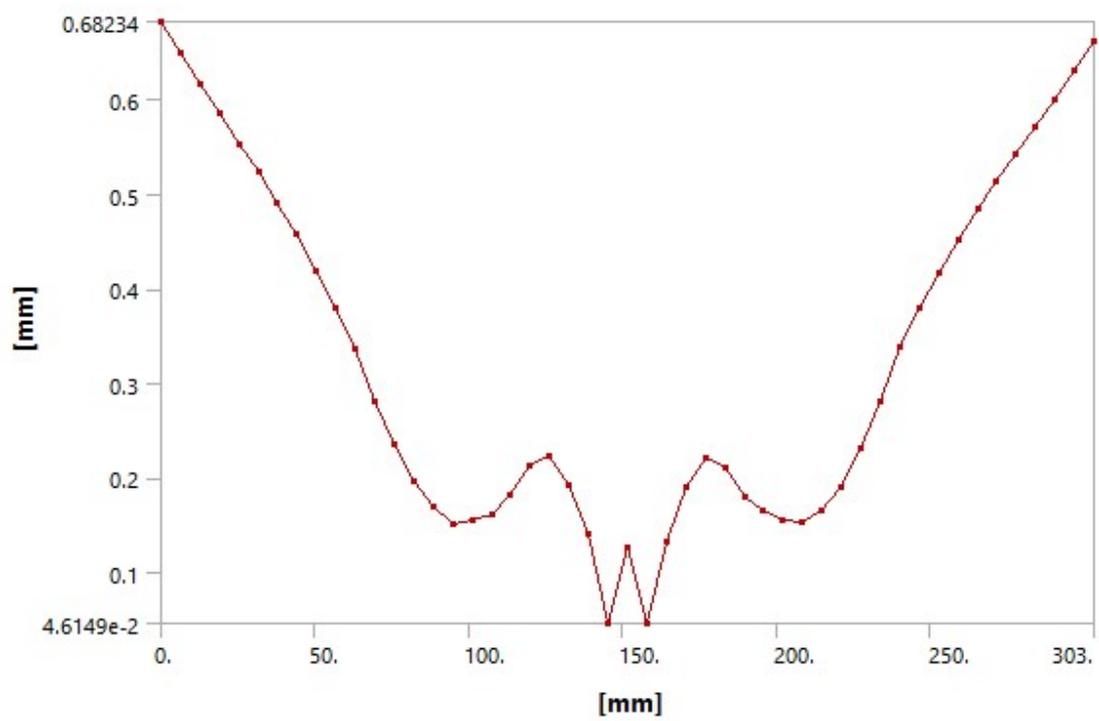
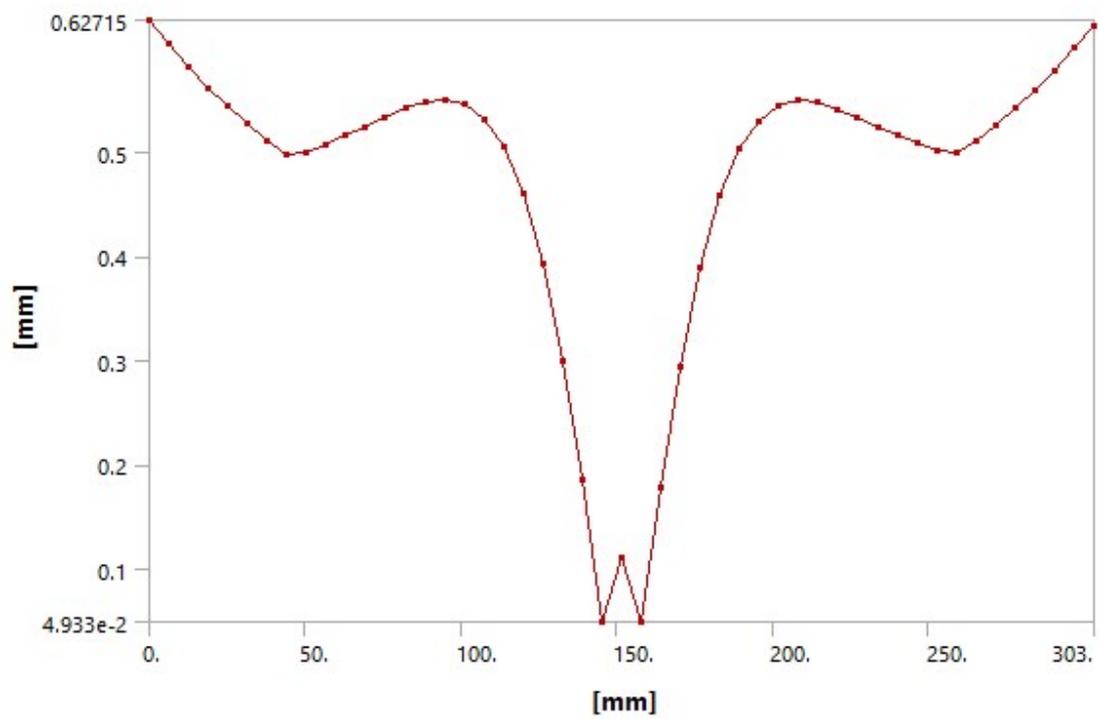


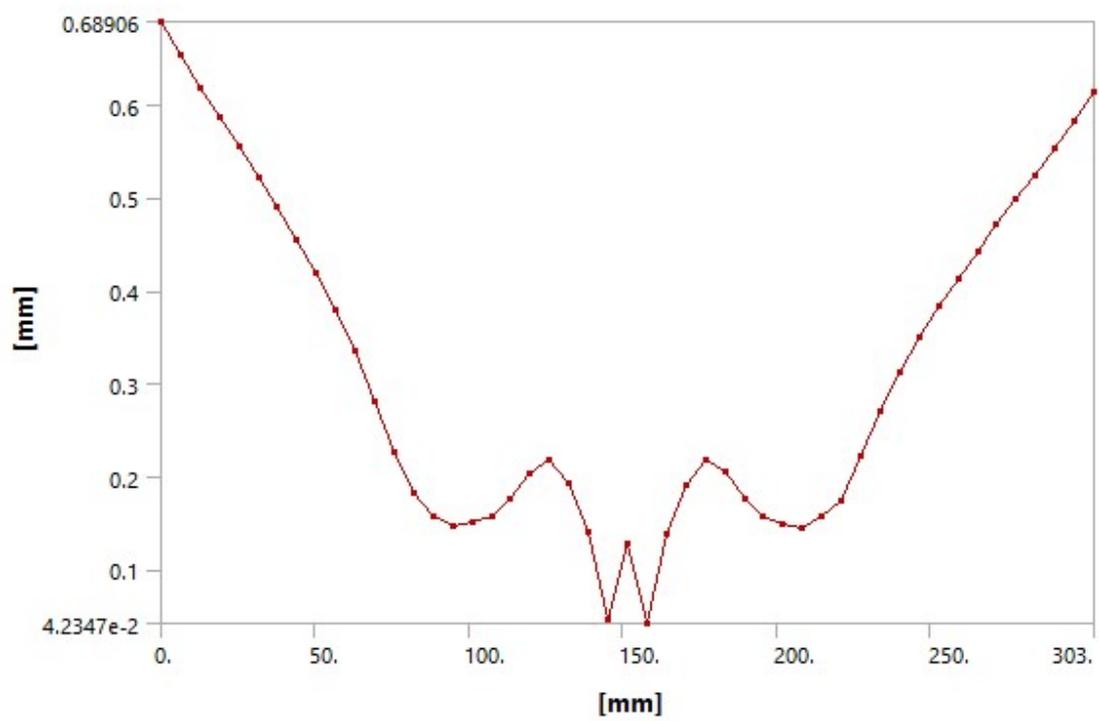
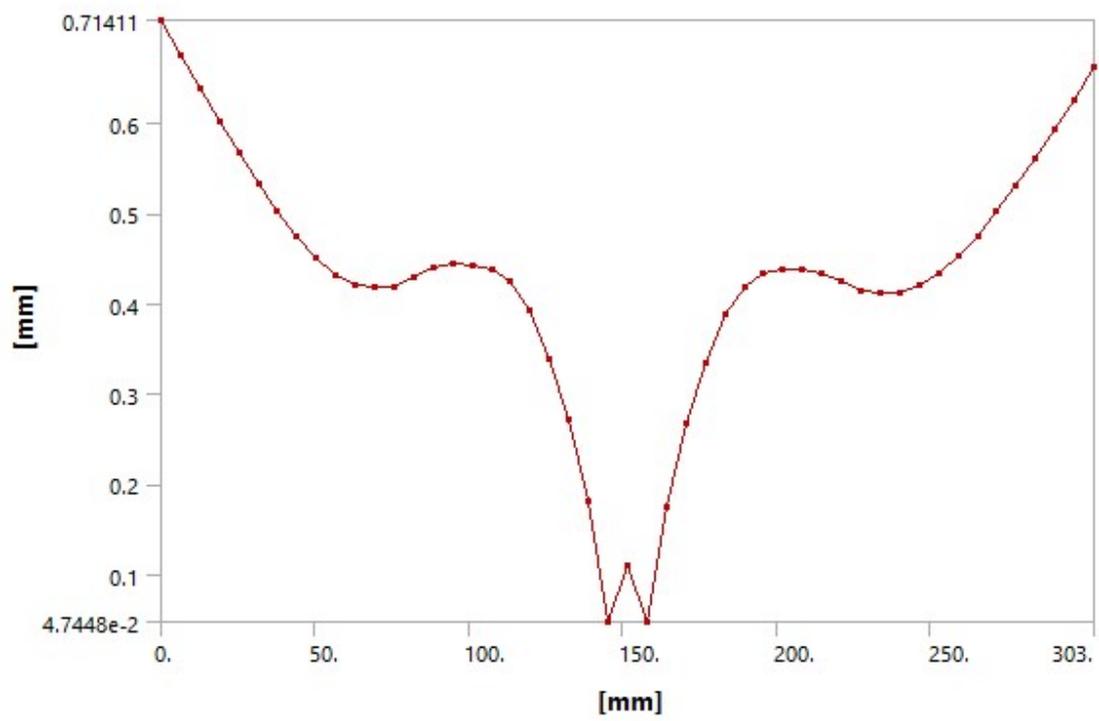
# **LAMPIRAN D**

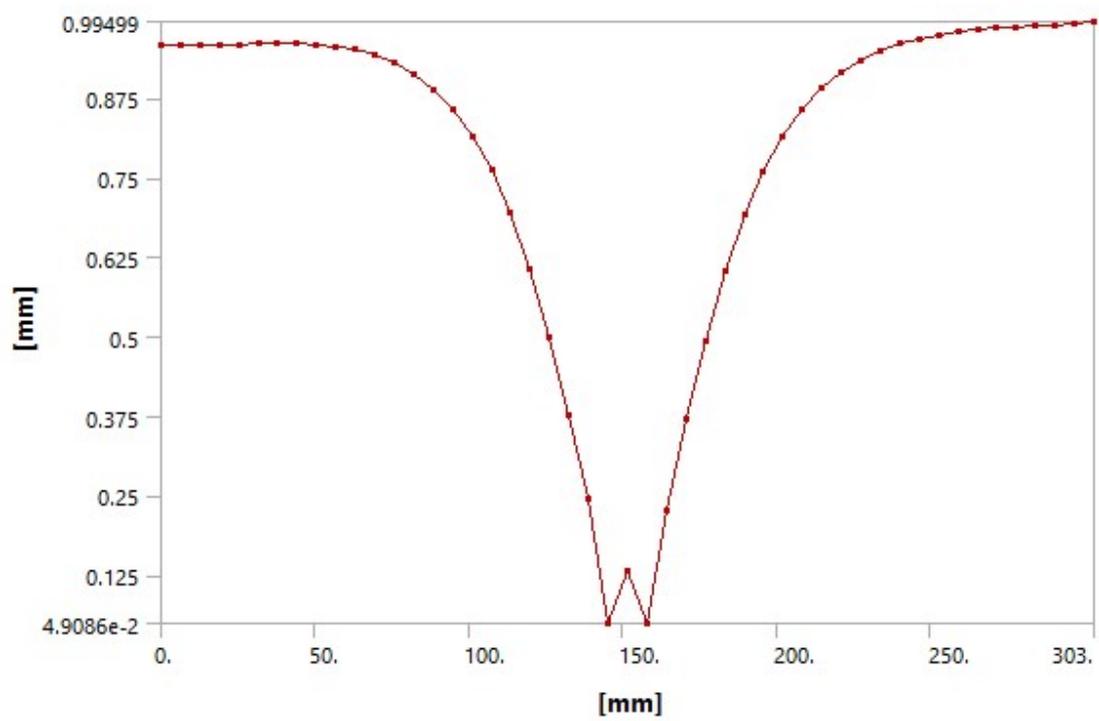
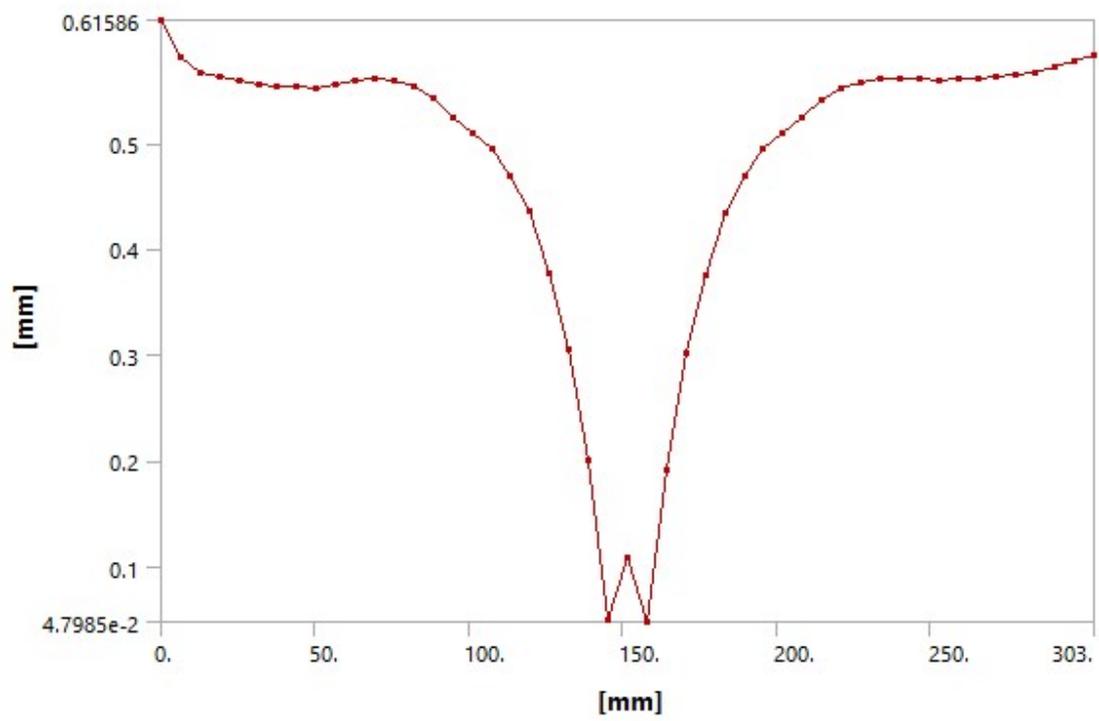
## **Grafik *Line Path***

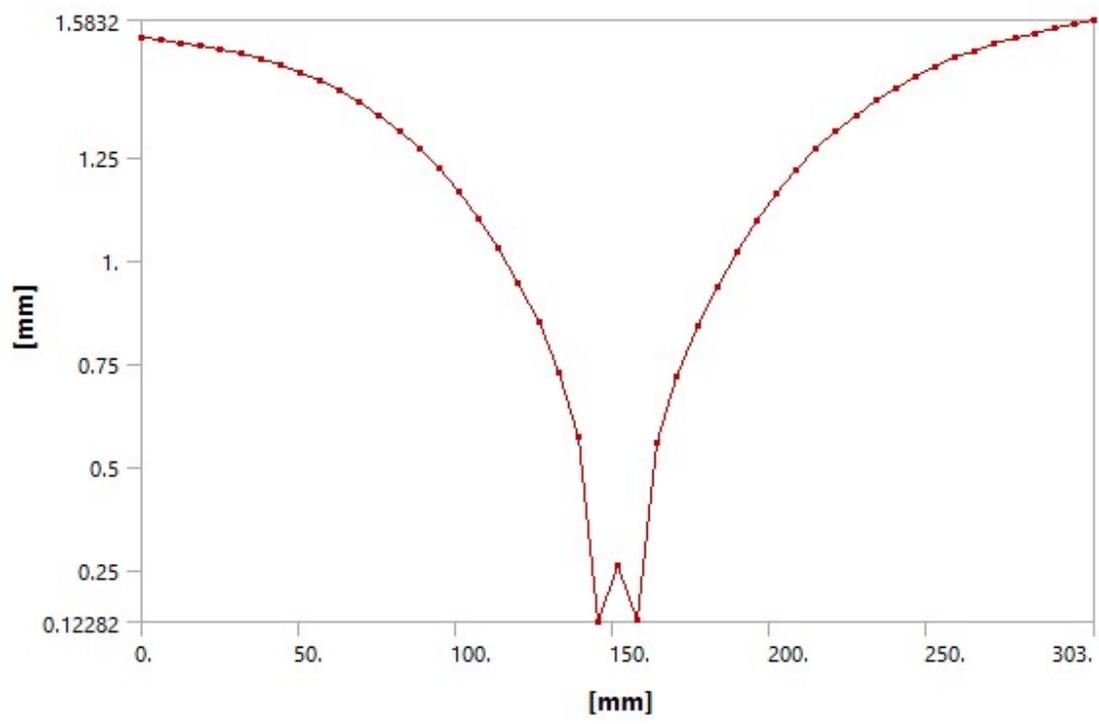
1. Grafik *Line Path* potongan 1 sampai potongan 9 variasi *stopper* 100 mm.



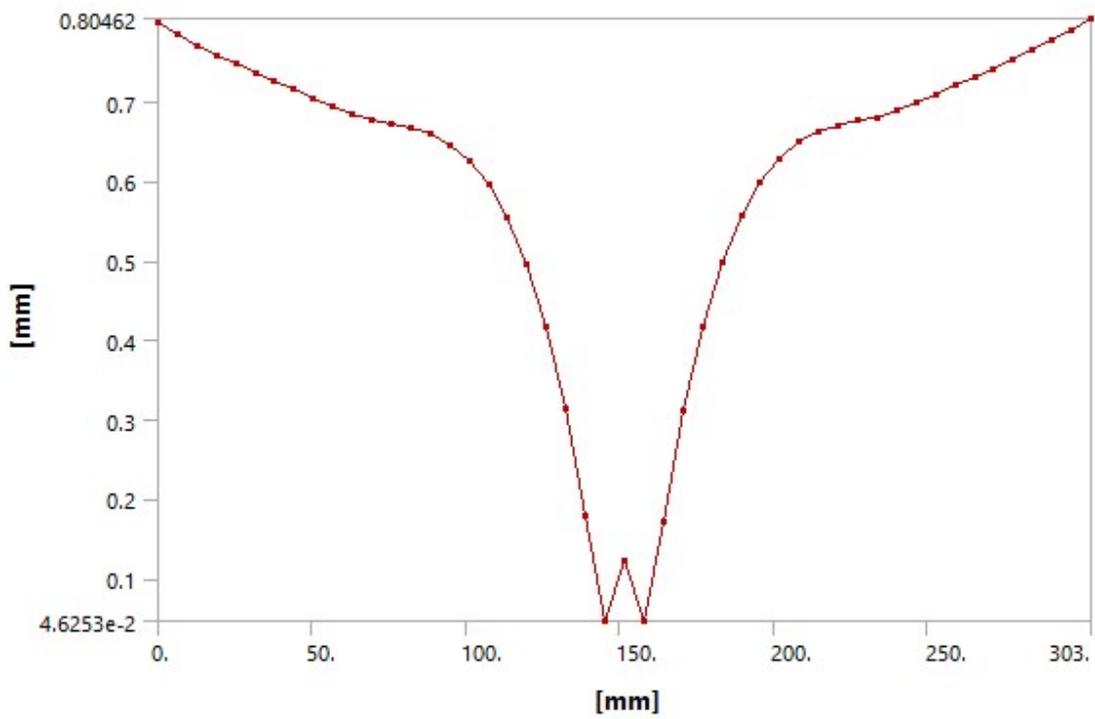
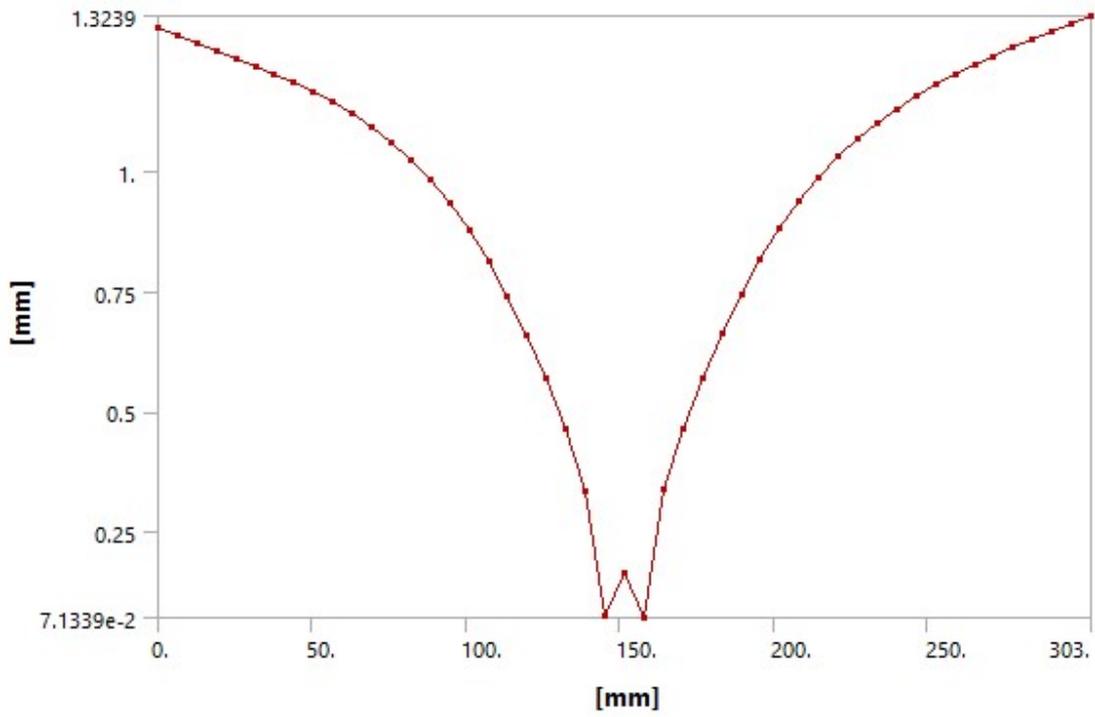


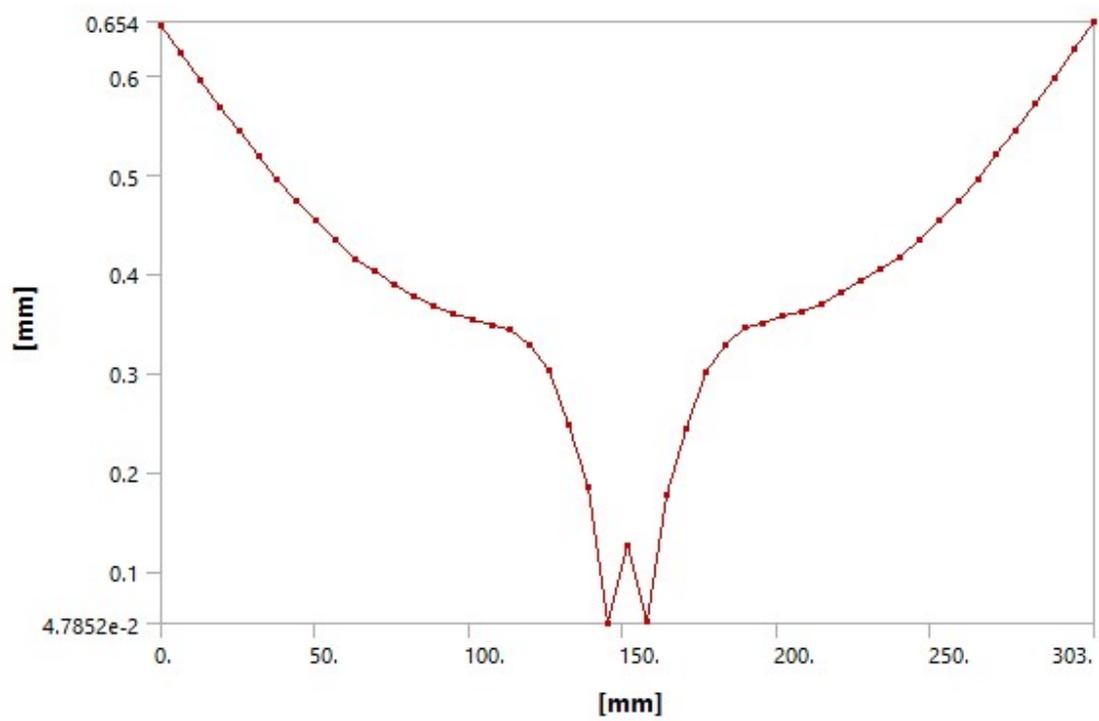
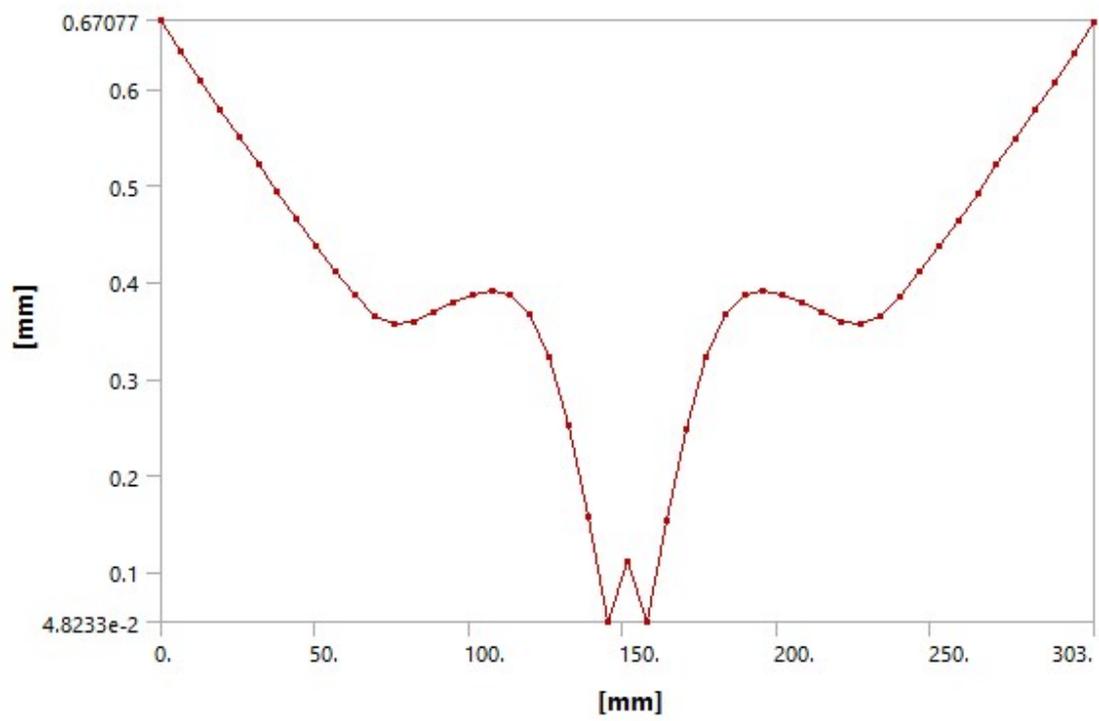


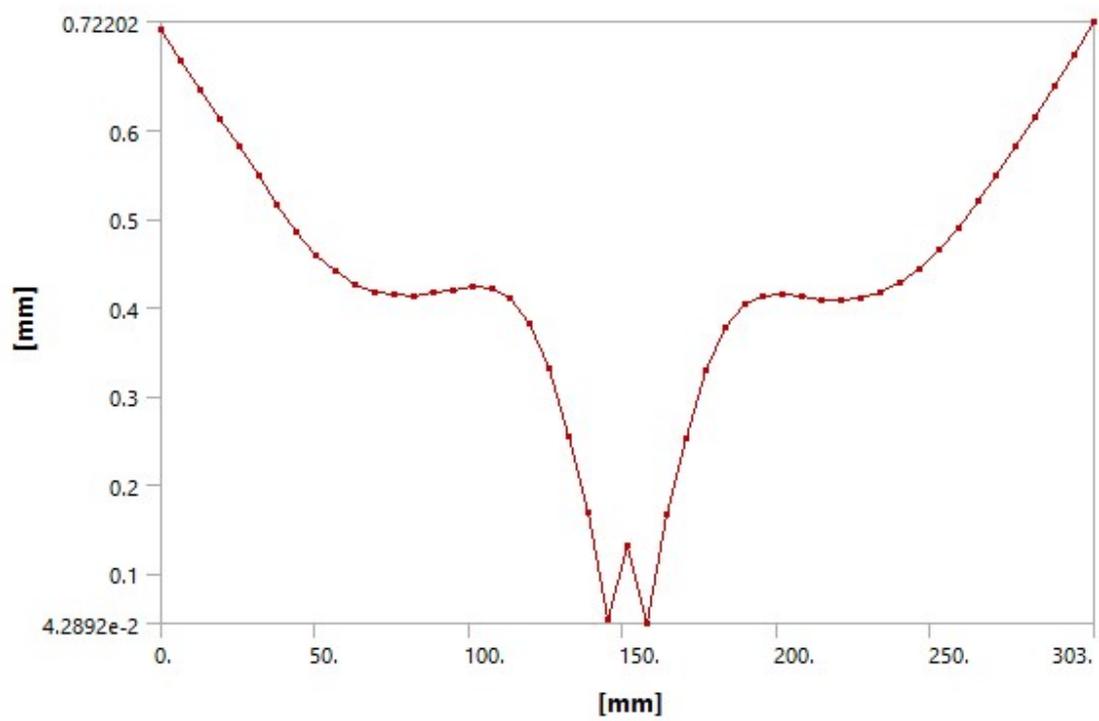
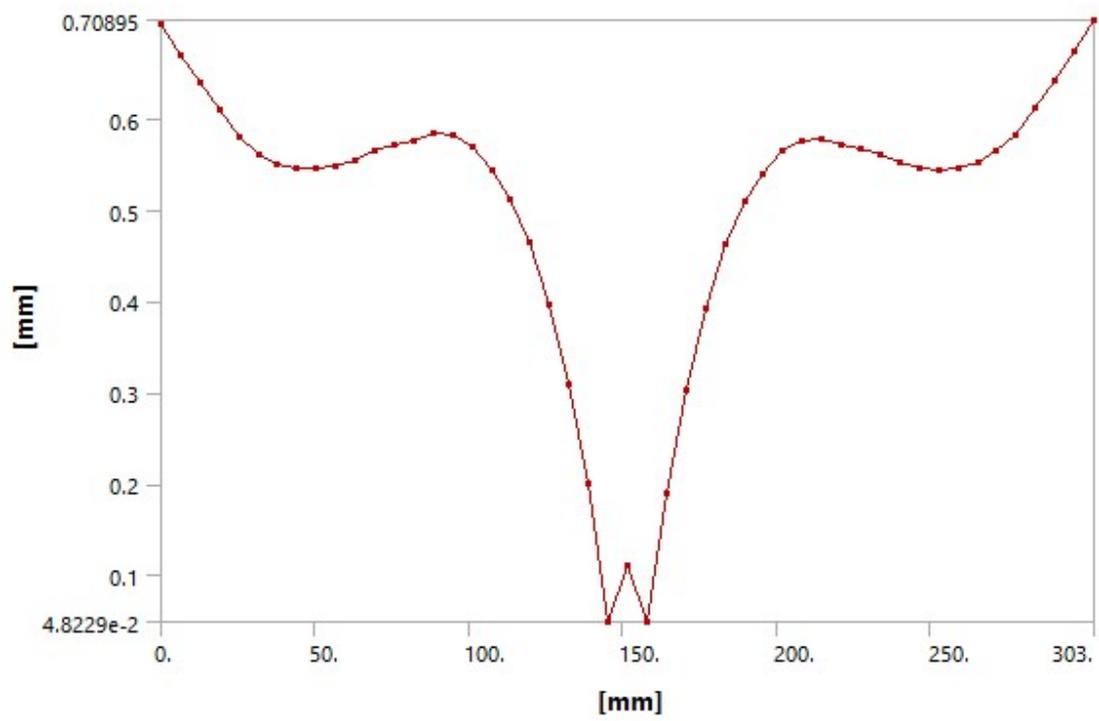


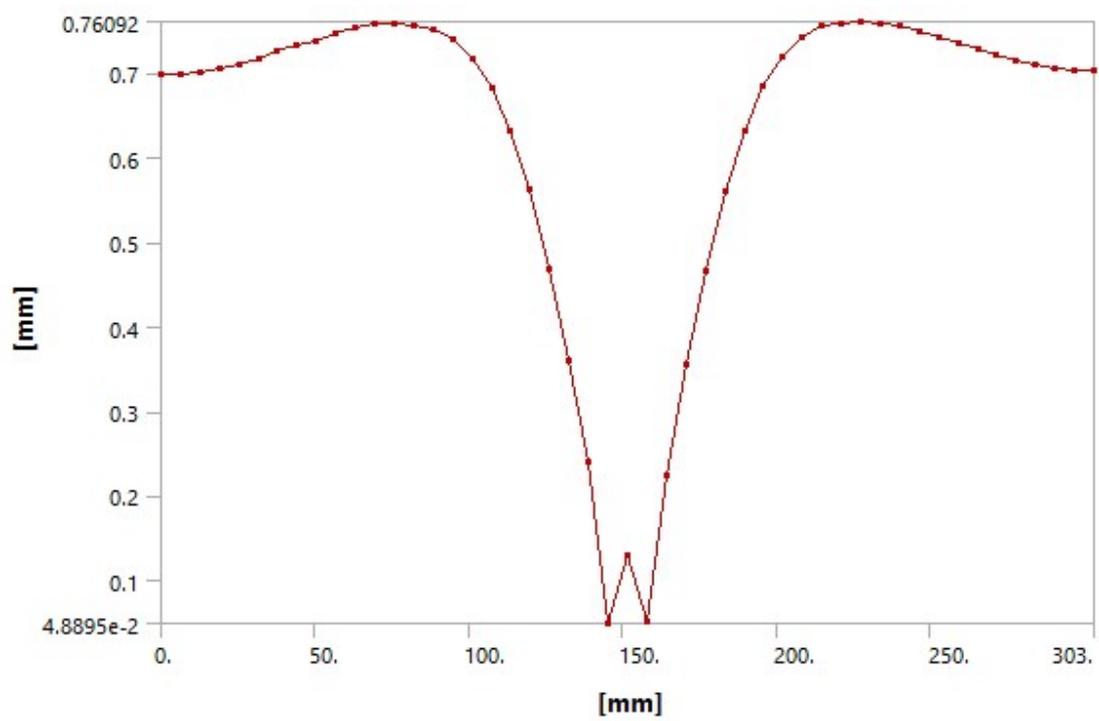
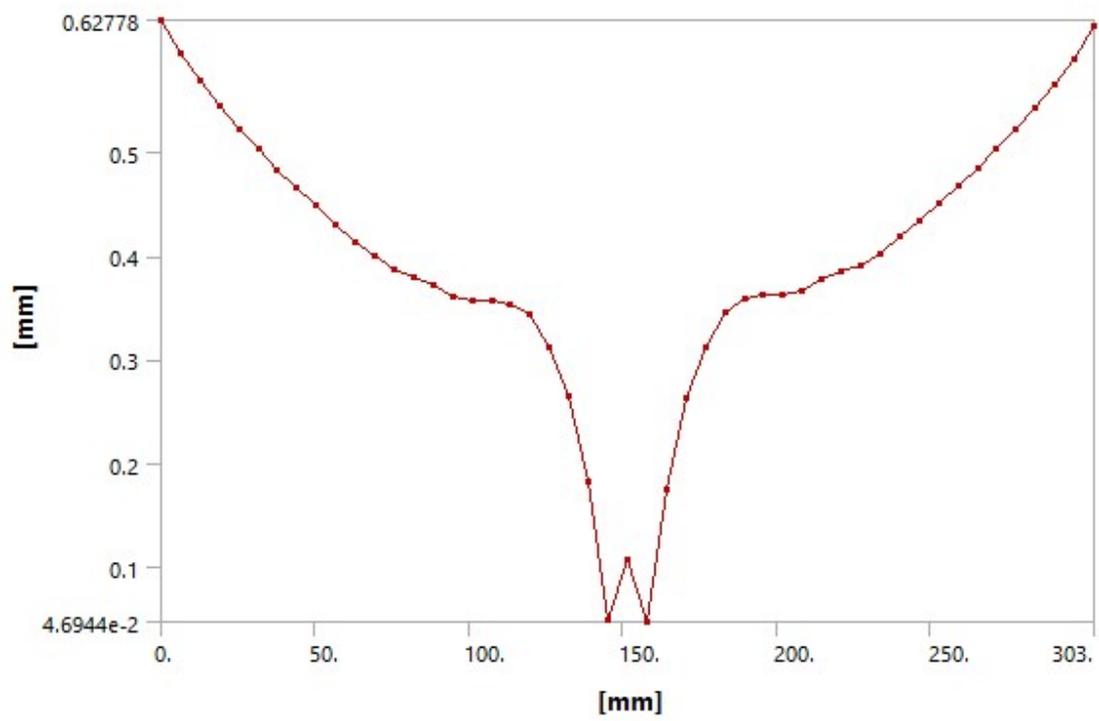


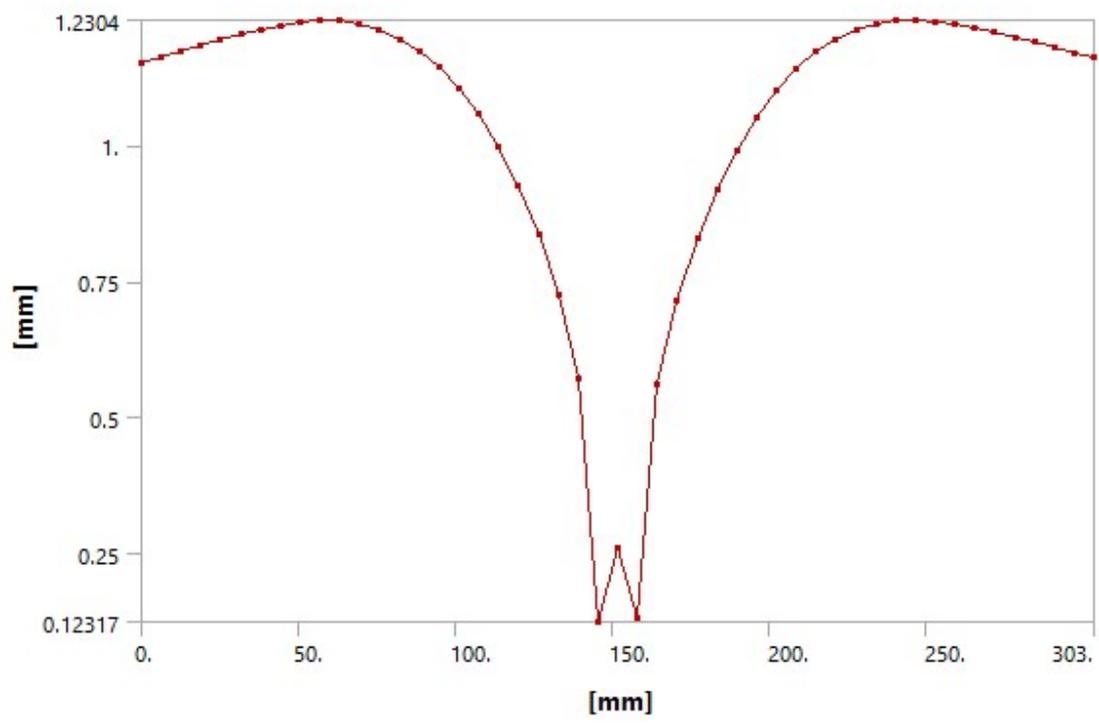
2. Grafik *Line Path* potongan 1 sampai potongan 9 variasi *stopper* 150 mm.



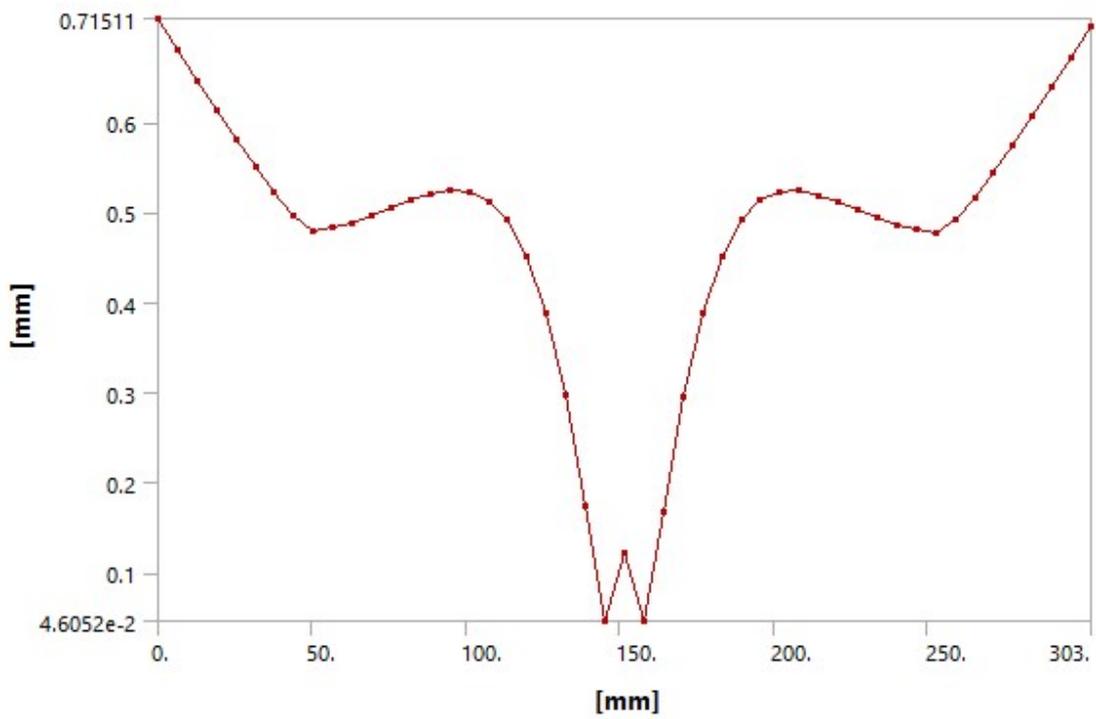
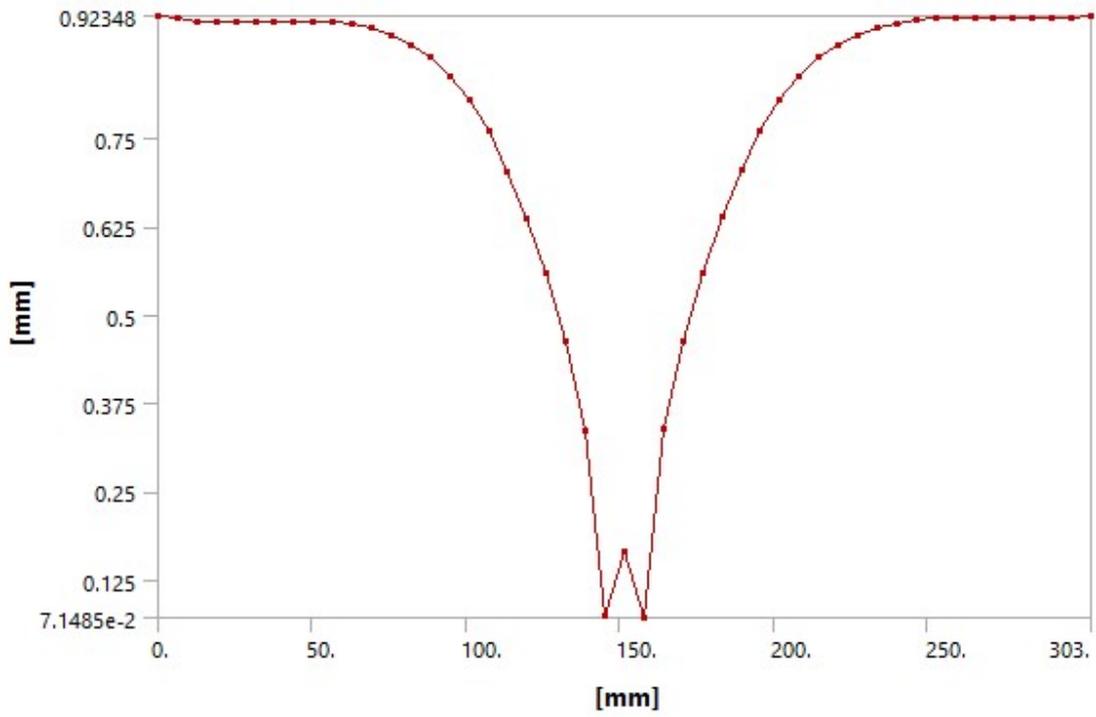


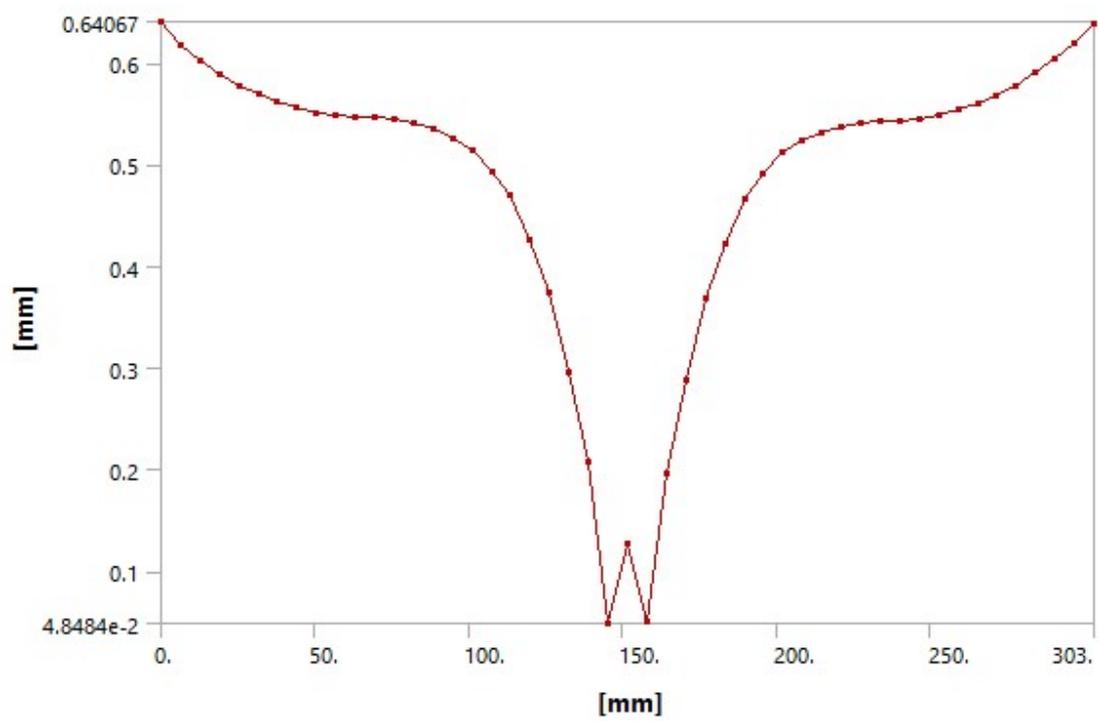
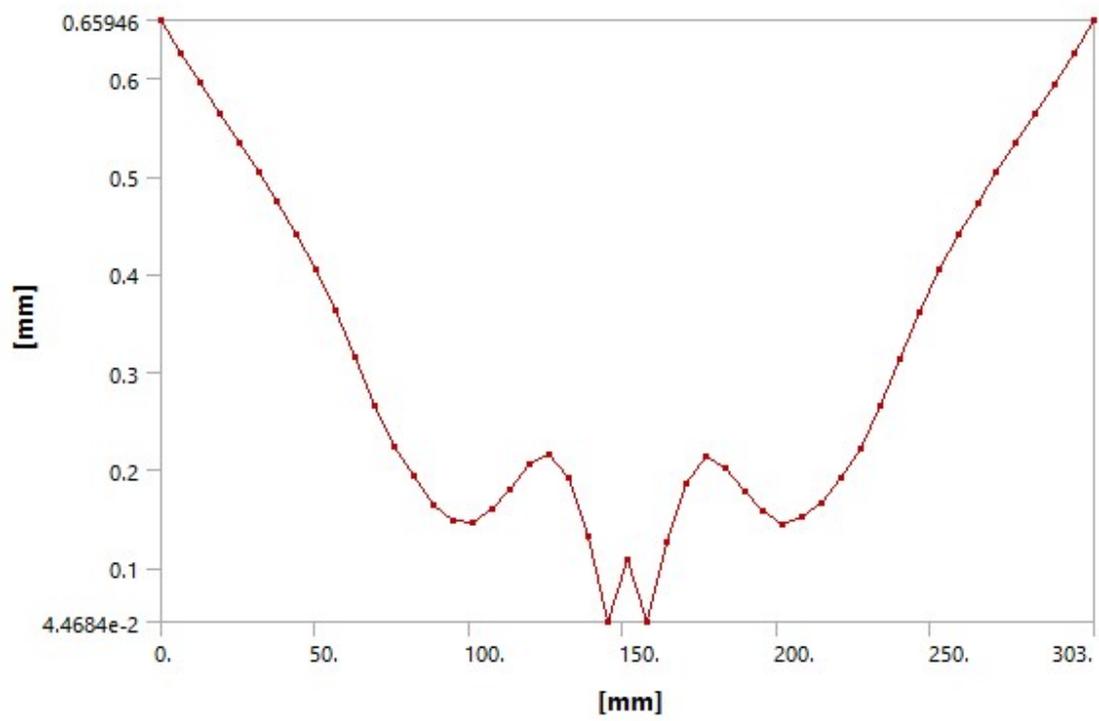


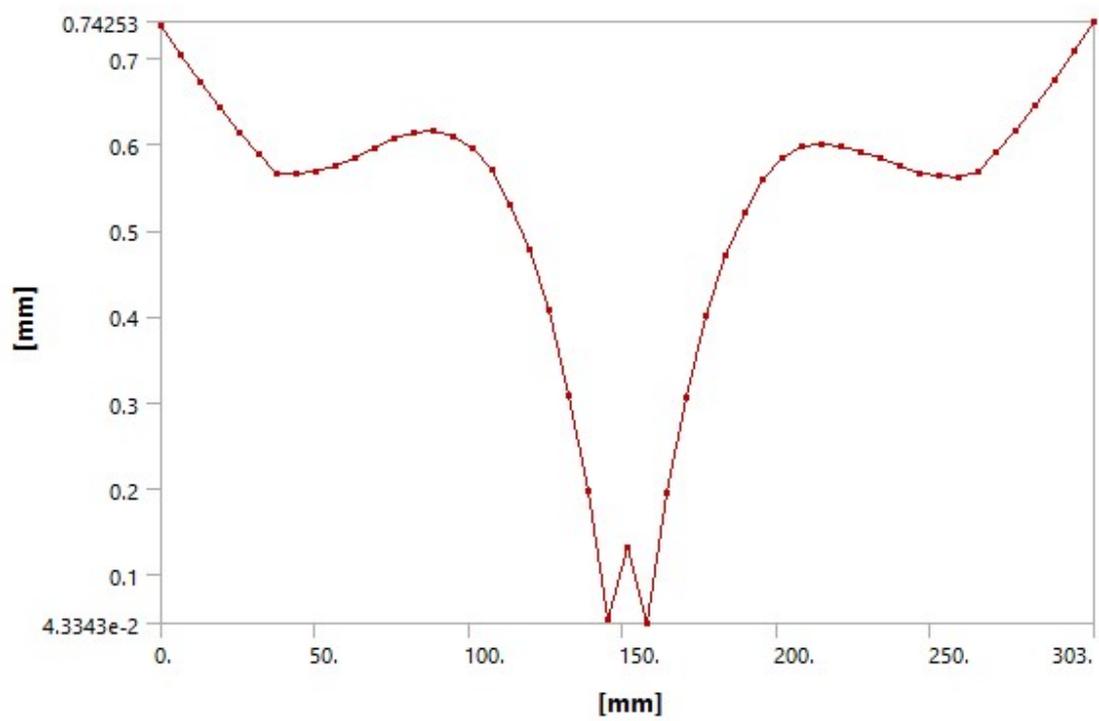
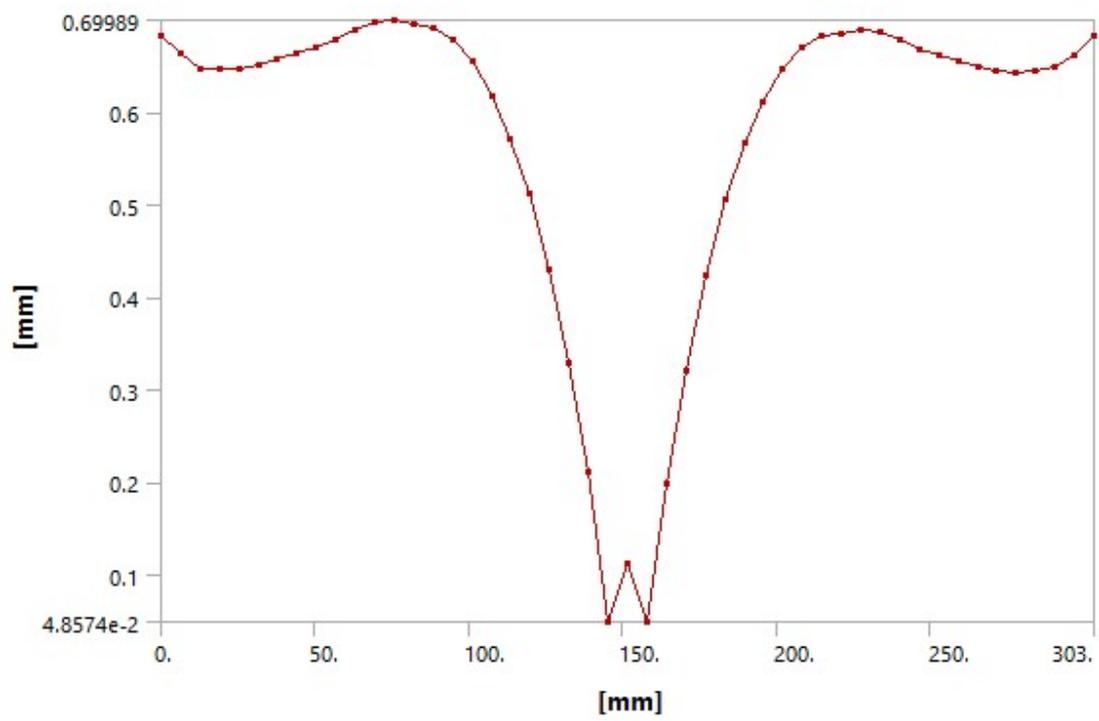


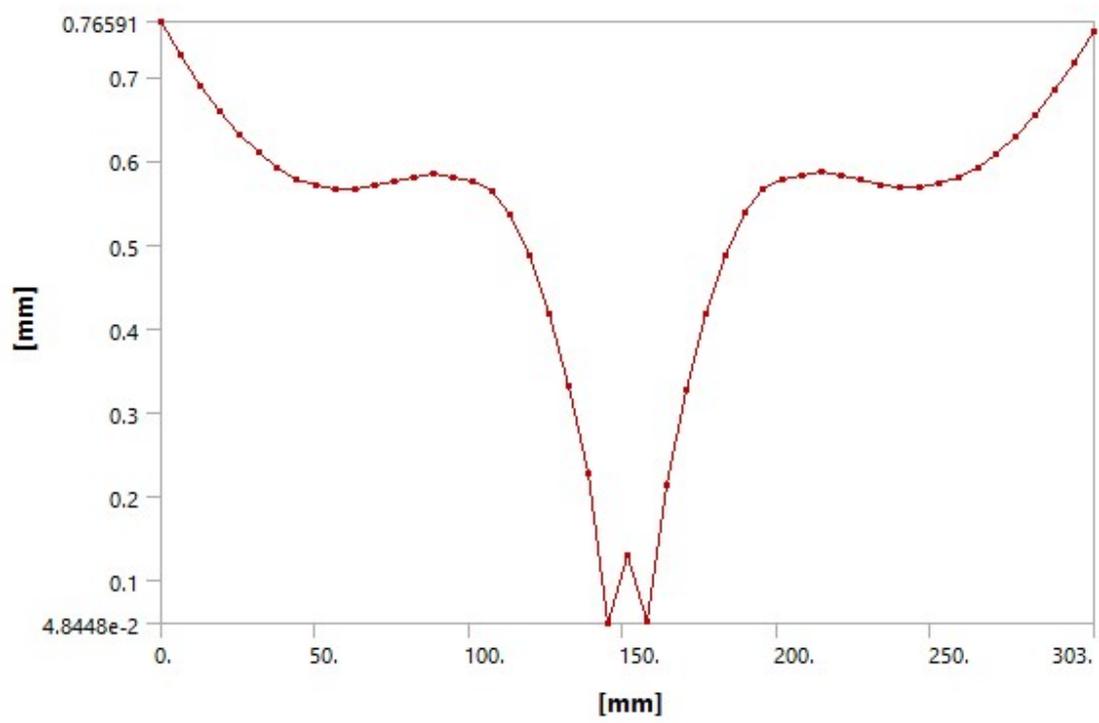
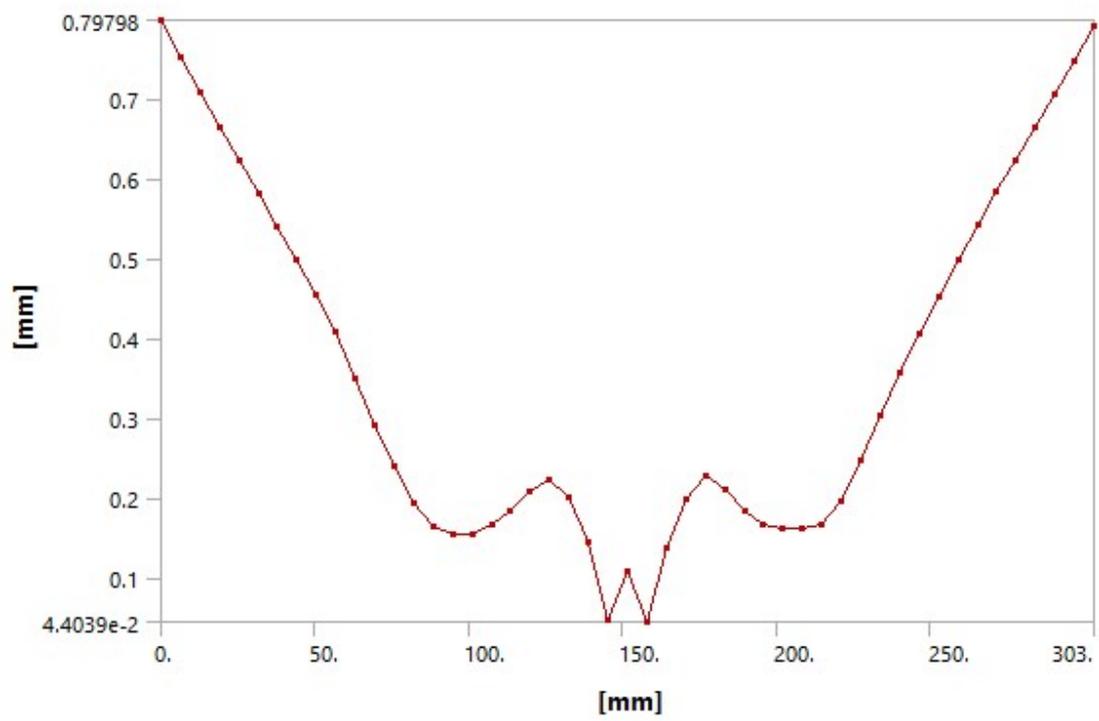


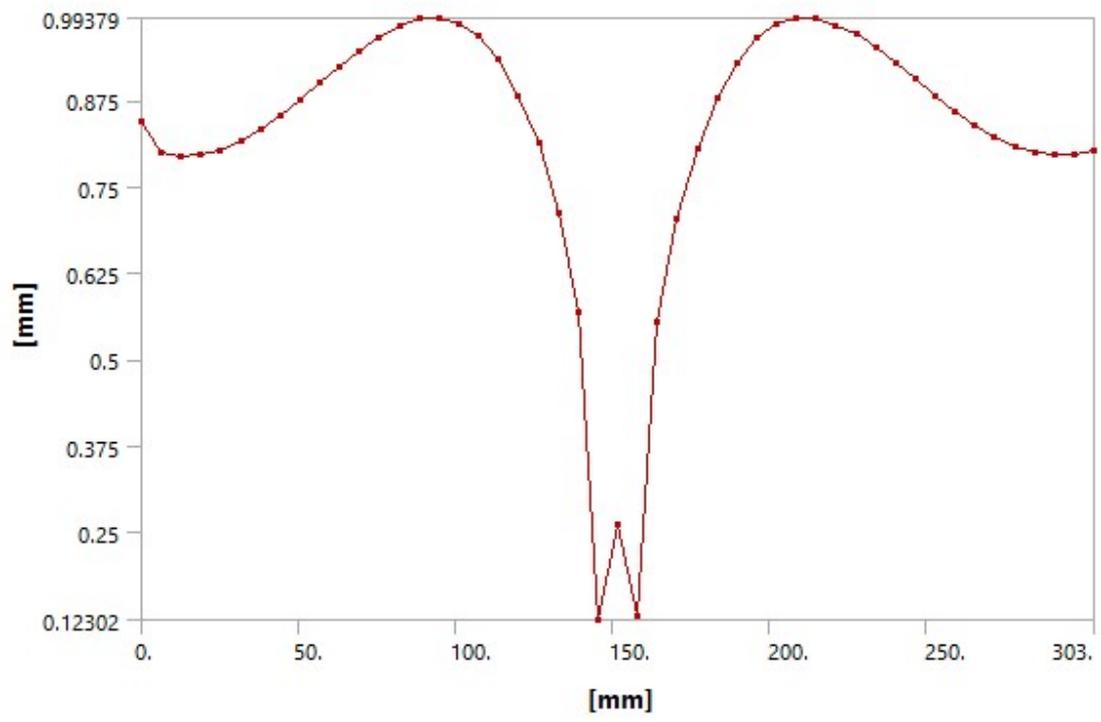
3. Grafik *Line Path* potongan 1 sampai potongan 9 variasi *stopper* 200 mm.



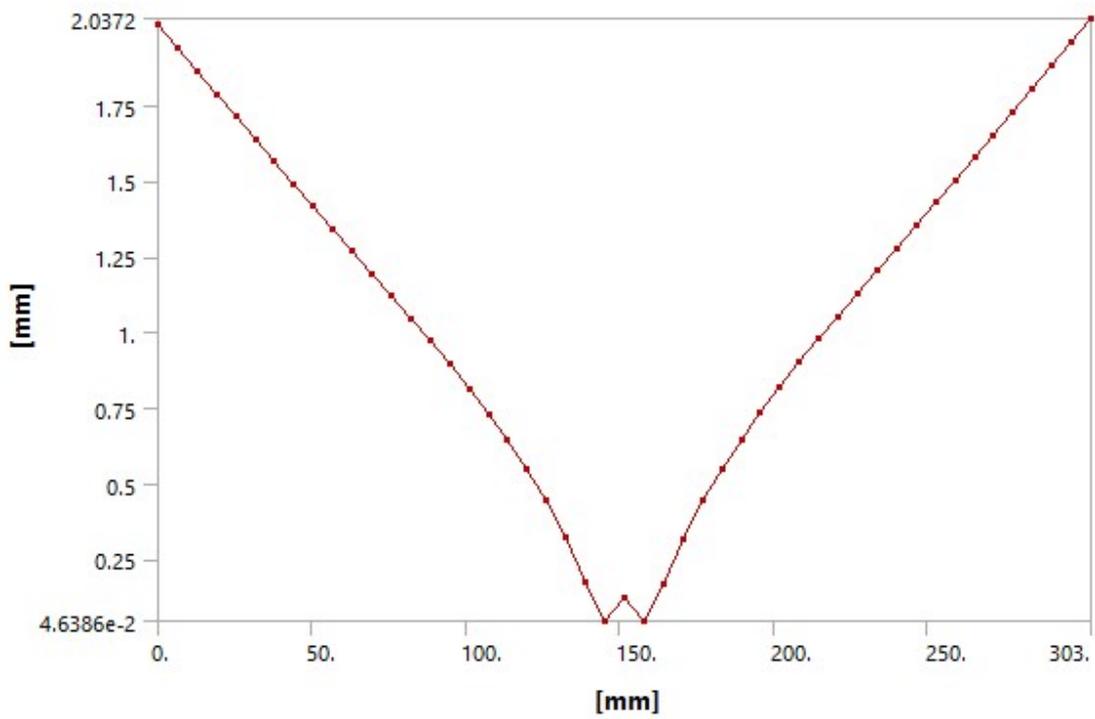
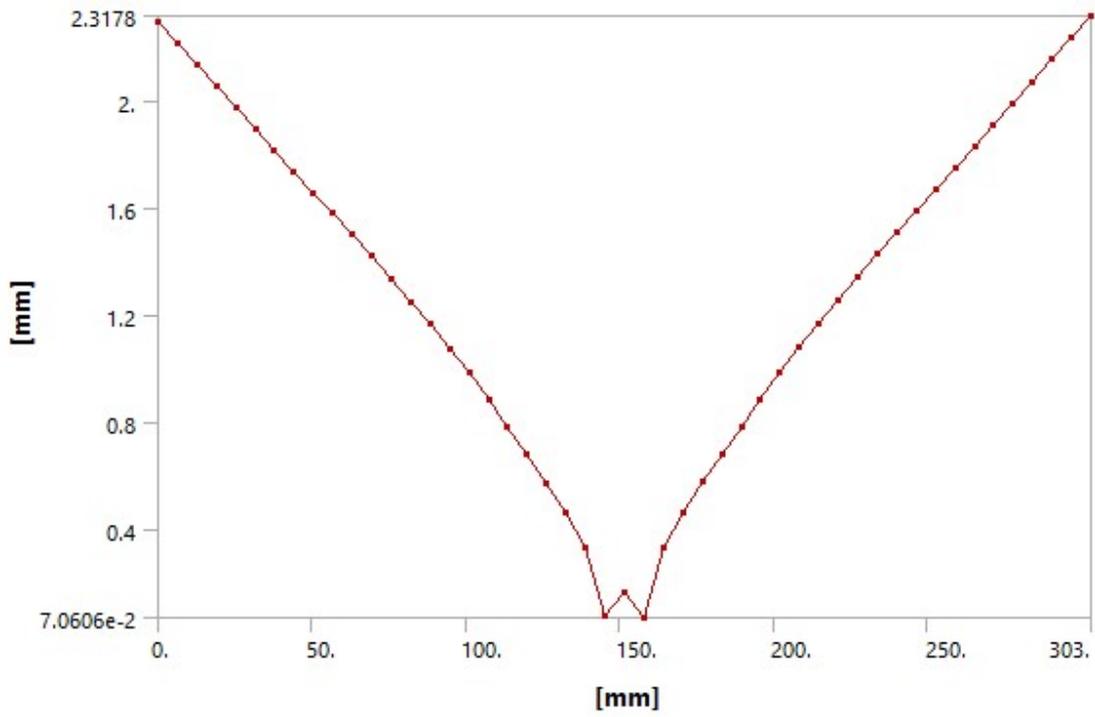


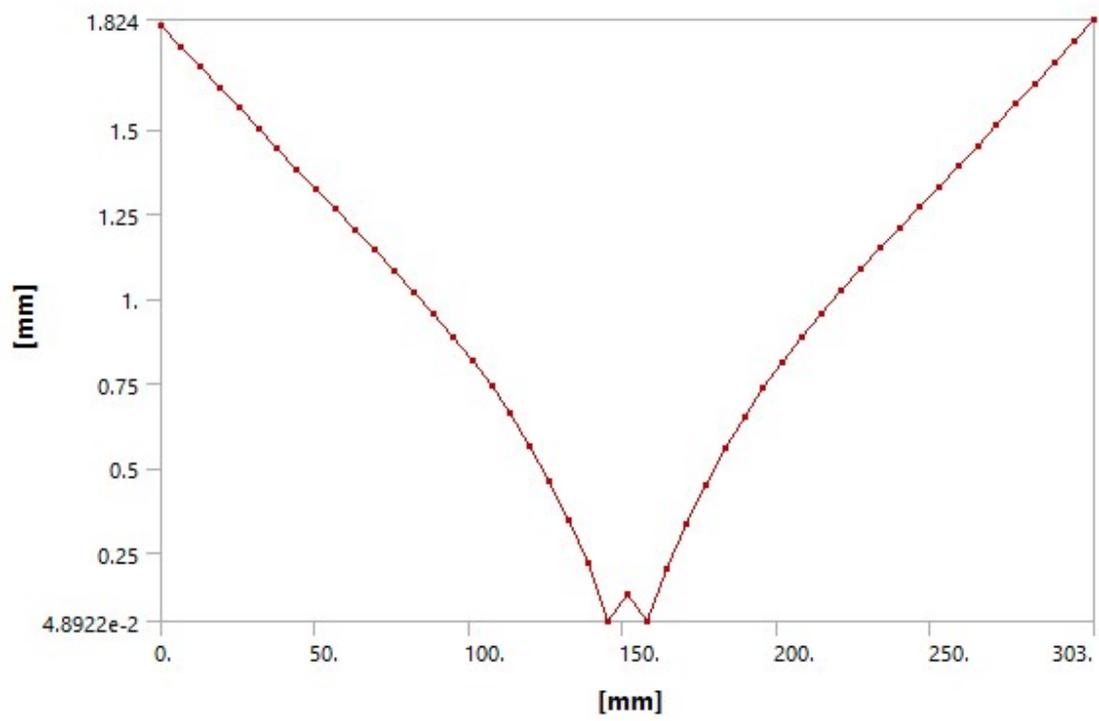
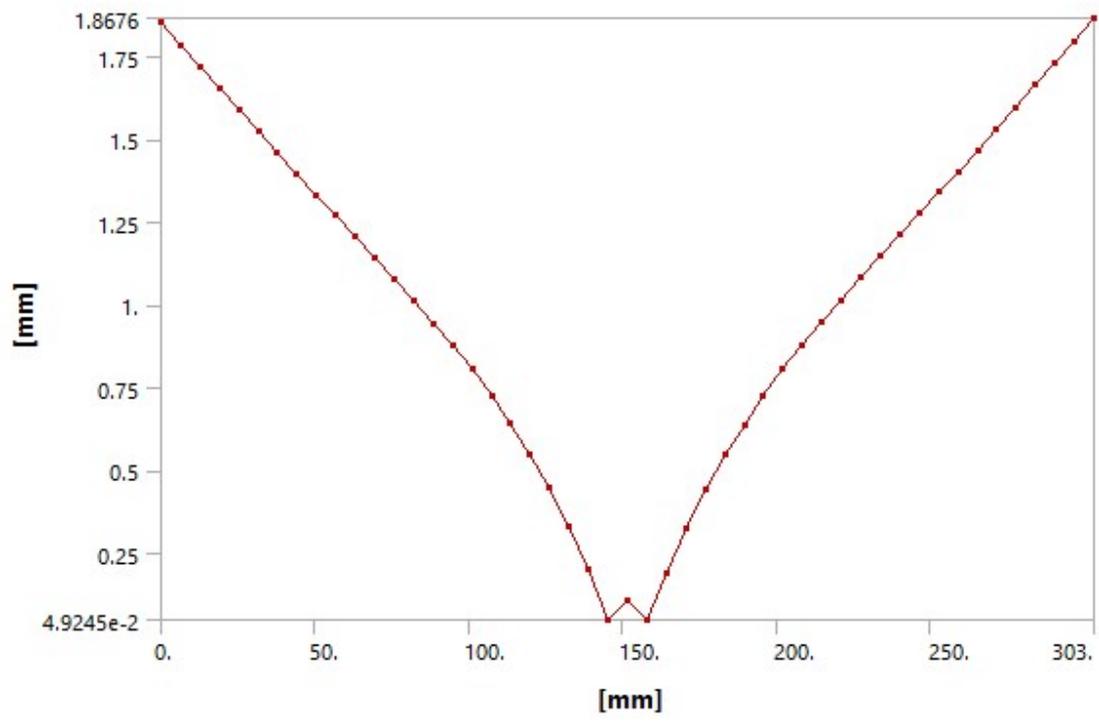


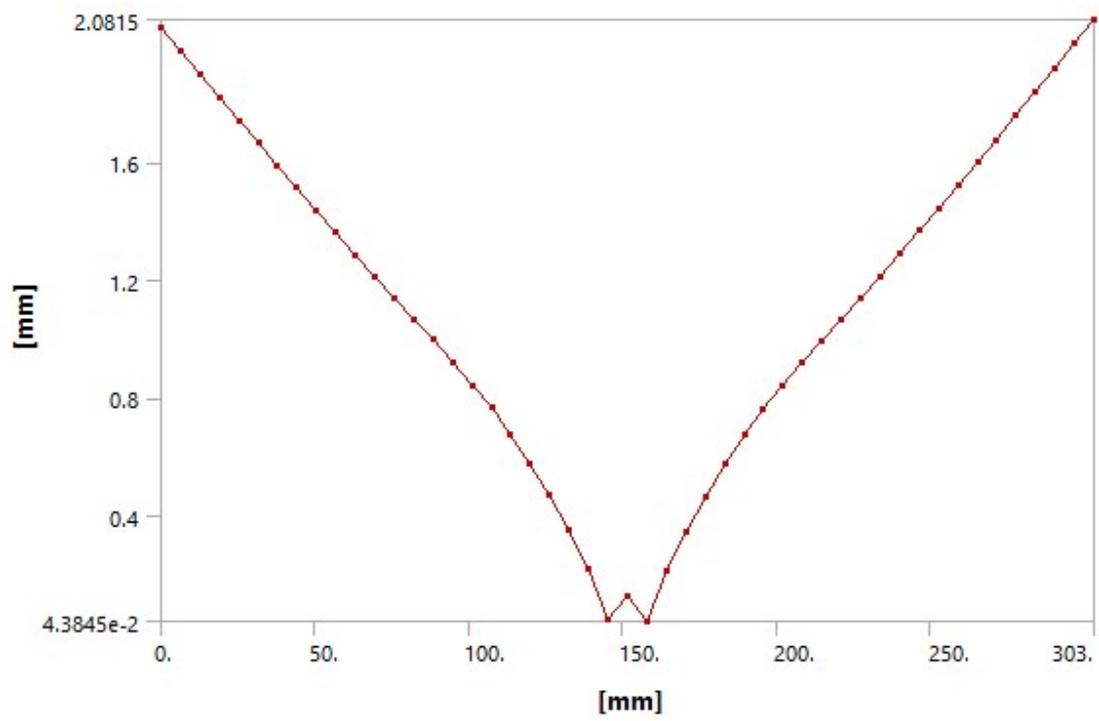
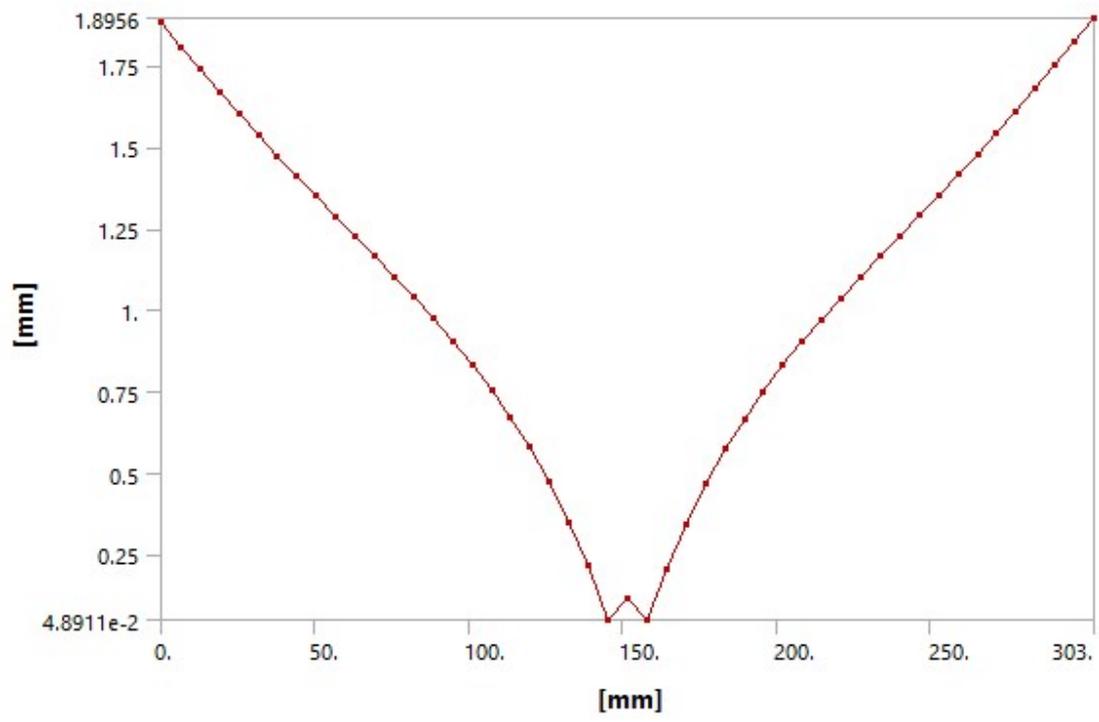


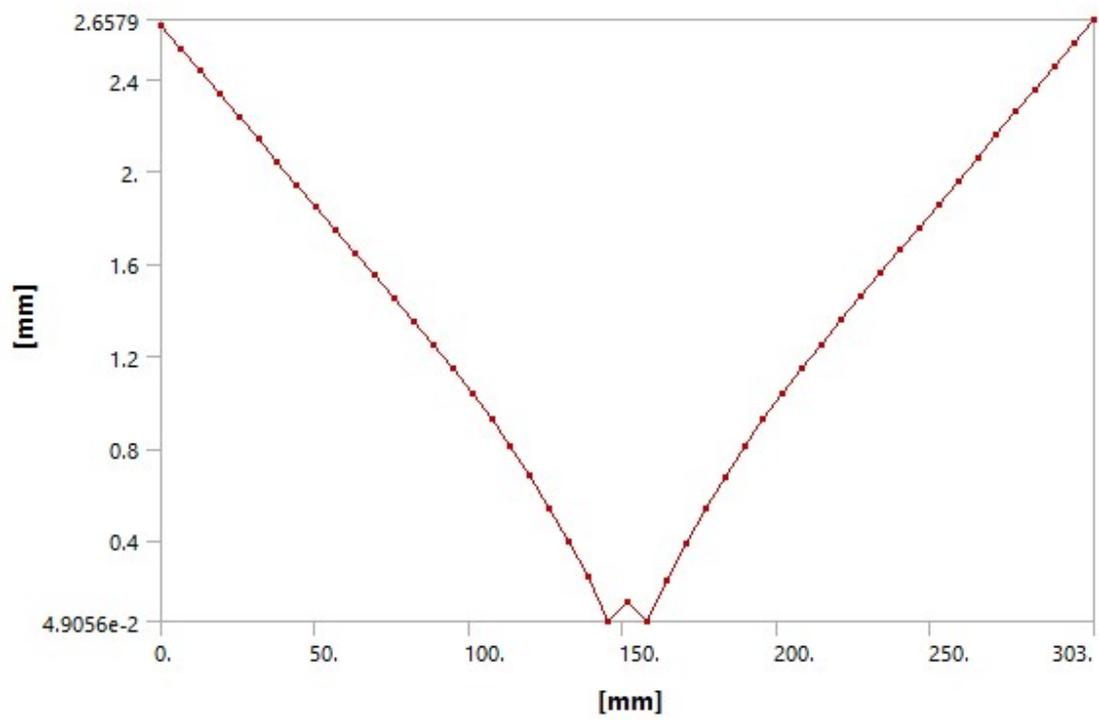
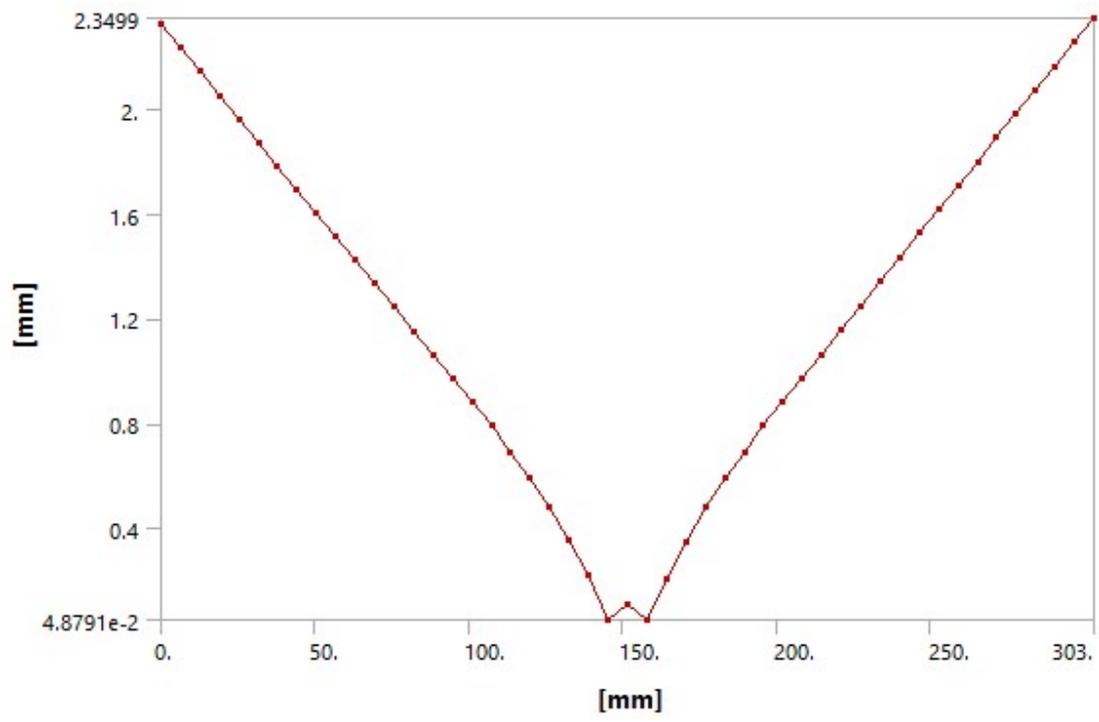


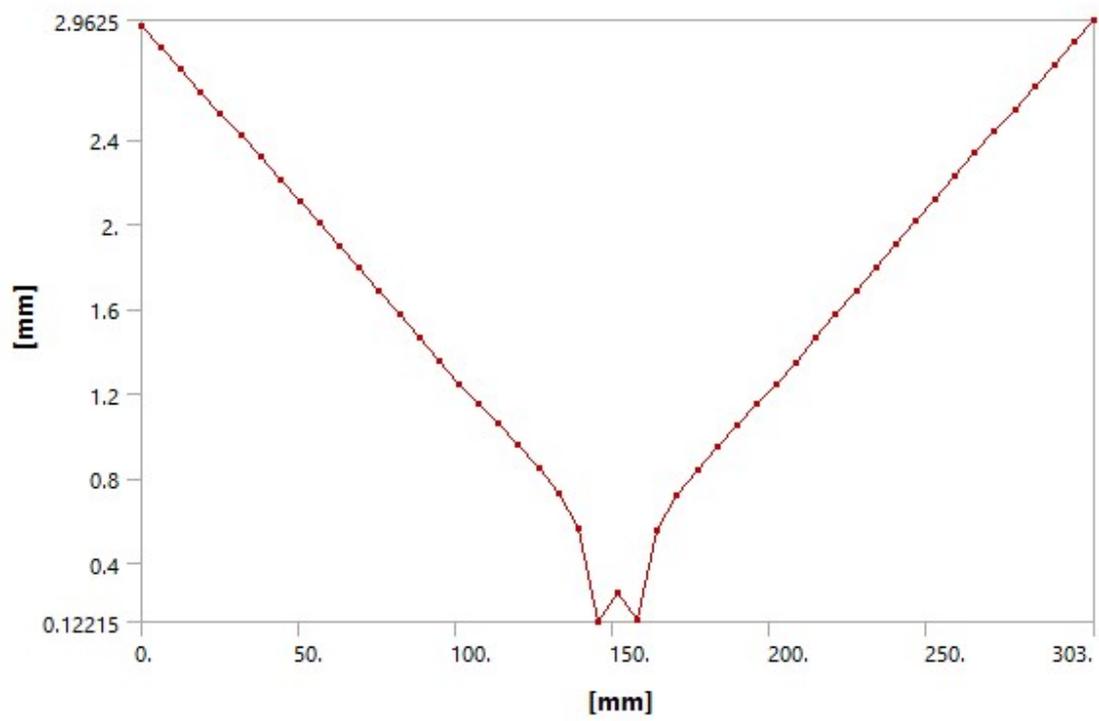
4. Grafik *Line Path* potongan 1 sampai potongan 9 variasi tanpa *stopper*.











## BIODATA PENULIS



Aulia Muhammad Rabbani Payapo, anak pertama dari empat bersaudara, lahir pada tanggal 11 Oktober 1996 di Gresik. Penulis menyelesaikan jenjang pendidikan dasar selama 6 tahun di SD Muhammadiyah 1 Sidoarjo pada tahun 2009. Dan menyelesaikan pendidikan di SMP Negeri 1 Sidoarjo pada tahun 2012. Setelah itu melanjutkan pendidikan menengah atas di SMA Negeri 1 Sidoarjo dan lulus pada tahun 2015. Kemudian penulis mengikuti serangkaian ujian seleksi masuk PTN (Perguruan Tinggi Negeri) yang pada akhirnya diterima di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama menempuh masa perkuliahan, penulis aktif di Himpunan Mahasiswa Teknik Kelautan sebagai staff Departemen Kajian Strategis periode 2016-2017 dan pada periode berikutnya penulis diberikan amanah untuk menjadi staff ahli Divisi Oceanic Departemen Kewirausahaan Himpunan Mahasiswa Teknik Kelautan FTK ITS periode 2017-2018. Selama menjadi staff ahli KWU Himatekla, penulis menjadi pionir yang merilis desain *hoodie* Ocean Engineering untuk pertama kalinya di HIMATEKLA. Selama masa perkuliahan, penulis aktif mengikuti kegiatan akademis maupun non-akademis. Penulis juga diberikan kesempatan untuk menyelesaikan Kerja Praktik selama dua bulan di PT PAL Indonesia (Persero) dan penulis ditempatkan di Divisi *Quality Assurance* sebagai mahasiswa OJT (On Job Training) untuk membantu analisis numerik untuk penentuan *welding sequences* pada *struktur frame*.

Kontak Penulis

E-mail : [yayak005@gmail.com](mailto:yayak005@gmail.com)