



TUGAS AKHIR - MO184804

**STUDI NUMERIK DAN EKSPERIMEN PENGARUH URUTAN PENGELASAN
TERHADAP DISTORSI SUDUT PADA PANEL BAJA ASTM A36 DENGAN
PENGELASAN FCAW (*FLUX CORE ARC WELDING*)**

Muhammad Satrio Tuhu Nugroho
NRP. 0431154000050

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

**NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF WELDING SEQUENCE
EFFECT ON ANGULAR DISTORTION IN ASTM A36 STEEL PANEL WITH
FCAW WELDING (FLUX CORE ARC WELDING)**

**Muhammad Satrio Tuhu Nugroho
NRP. 0431154000050**

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

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

**STUDI NUMERIK DAN EKSPERIMEN PENGARUH
URUTAN PENGELASAN TERHADAP DISTORSI SUDUT
PADA PANEL BAJA ASTM A36 DENGAN PENGELASAN
FCAW (FLUX CORE ARC WELDING)**

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:

MUHAMMAD SATRIO TUHU NUGROHO

NRP. 0431154000050

Disetujui oleh:

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

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

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

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

SURABAYA, JULI 2019

**STUDI NUMERIK DAN EKSPERIMEN PENGARUH
URUTAN PENGELASAN TERHADAP DISTORSI SUDUT
PADA PANEL BAJA ASTM A36 DENGAN PENGELASAN
FCAW (*FLUX CORE ARC WELDING*)**

Nama Mahasiswa : Muhammad Satrio Tuhu Nugroho
NRP : 0431154000050
Departemen : Teknik Kelautan FTK-ITS
Dosen Pembimbing : Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.
Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.

ABSTRAK

Baja umumnya digunakan sebagai bahan untuk bangunan laut terapung seperti kapal dan bangunan pengeboran minyak lepas pantai. Pada fabrikasi bangunan laut tersebut digunakan pengelasan untuk menyambungkan baja yang merupakan material utama dalam konstruksinya. Proses pengelasan yang umum digunakan pada fabrikasi bangunan laut adalah FCAW (*Flux Core Arc Welding*). Hal tersebut karena FCAW cocok untuk pengelasan semua posisi dan berbagai konfigurasi. Namun pada pengelasan kerap ditemui cacat las seperti distorsi sudut. Distorsi sudut disebabkan regangan termal antara logam las dan logam induk yang menghasilkan tegangan sehingga menyebabkan gaya dalam. Kontrol distorsi sudut yang dapat dilakukan adalah dengan memilih urutan pengelasan yang tepat. Pada penelitian Tugas Akhir ini, dilakukan analisis numerik dan eksperimen pengaruh urutan pengelasan terhadap distorsi sudut pada panel baja ASTM A36 dengan pengelasan FCAW. Dari hasil penelitian diketahui bahwa variasi urutan pengelasan 2 secara simetri menghasilkan rata-rata distorsi sudut yang terkecil dikarenakan temperatur puncak yang lebih rendah dibandingkan variasi urutan pengelasan 1 secara lurus dan variasi urutan pengelasan 3 secara loncat. Selain itu, adanya *stiffener* yang besimpangan juga memperkecil distorsi sudut.

Kata Kunci - Analisis Numerik, Eksperimen, FCAW (*Flux Core Arc Welding*),
Urutan Pengelasan, Distorsi Sudut.

**NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF
WELDING SEQUENCE EFFECT ON ANGULAR DISTORTION IN
ASTM A36 STEEL PANEL WITH FCAW WELDING
(FLUX CORE ARC WELDING)**

Name : Muhammad Satrio Tuhu Nugroho
NRP : 0431154000050
Department : Ocean Engineering FTK-ITS
Supervisor : Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.
Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.

ABSTRACT

Steel is common material used in floating marine buildings such as ships and offshore oil rig. In fabrication of marine building, welding is used to connect steel which is the main material in its construction. The welding process commonly used in fabricating marine buildings is FCAW (Flux Core Arc Welding). This is because FCAW is suitable for welding all positions and various configurations. However, in welding often finds welding defects such as angular distortion. Angular distortion is caused by thermal strain between weld metal and parent metal which produces a stress which causes an internal force. Control of angular distortion that can be done is to choose the right welding sequence. In this Final Project research, numerical and experimental study is used to know the welding sequences effect on angular distortion in ASTM A36 steel panels with FCAW welding. From the results of study it is known that the variation of welding sequence 2 by symmetry produces smallest average angular distortion due to lower peak temperatures compared to the variation of welding sequence 1 in a straight manner and the variation of welding sequence 3 by jump. In addition, intersection of stiffener also minimizes angular distortion.

Keywords - *Numerical Analysis, Experimental, FCAW (Flux Core Arc Welding), Welding Sequence, Angular Distortion.*

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Puji dan syukur senantiasa penulis sampaikan kehadiran Allah SWT atas berkat rahmat, hidayah, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian Tugas Akhir ini dengan baik. Tugas Akhir ini berjudul “Studi Numerik dan Eksperimen Pengaruh Urutan Pengelasan Terhadap Distorsi Sudut pada Panel Baja ASTM A36 dengan Pengelasan FCAW (*Flux Core Arc Welding*)”.

Tugas Akhir ini disusun guna menjadi persyaratan dalam menyelesaikan Program Studi S-1 Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Penelitian ini diharapkan menjadi sumbangsih akademik oleh penulis untuk dapat dijadikan acuan dalam proses pengelasan FCAW pada panel baja ASTM A36 serta diharapkan dapat menjadi rujukan pustaka jika dilakukan penelitian serupa.

Penulis menyadari bahwa masih banyak ketidaksempurnaan dalam penelitian ini. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun diperlukan penulis untuk dapat menjadi lebih baik. Selain itu, penulis berharap semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi perkembangan dunia teknologi kelautan.

Surabaya, Juli 2019

Penulis

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini, penulis tidak terlepas dari bantuan dari berbagai pihak, baik secara langsung maupun tidak langsung. Penulis berterima kasih banyak kepada semua pihak yang telah membantu. Pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Ibu, Bapak, serta Adik yang senantiasa mendoakan, mendukung, dan memberikan semangat kepada penulis dalam menempuh pendidikan ini.
2. Bapak Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D. dan bapak Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing penulis yang telah membimbing dan memberikan banyak dukungan untuk menyelesaikan penelitian ini.
3. Bapak R. Haryo Dwito Armono, S.T., M.Eng., Ph.D. selaku dosen wali penulis selama menempuh studi di Departemen Teknik Kelautan, FTK-ITS.
4. Bapak Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T. selaku kepala Departemen Teknik Kelautan, FTK-ITS.
5. Seluruh dosen, tenaga pendidik, dan staff Departemen Teknik Kelautan, FTK-ITS.
6. Bapak Sigit Raharjo, S.T., dan bapak Adib Mansyur, S.T. dari PT PAL Indonesia (Persero) selaku pembimbing kerja praktik penulis yang banyak membantu dalam pelaksanaan eksperimen.
7. PT PAL Indoensia (Persero), khususnya seluruh anggota Bengkel Pipa Divisi Kapal Niaga yang telah memberi material, tempat dan kesempatan bagi penulis untuk melaksanakan eksperimen.
8. Bapak Eko Laboratorium Reparasi Mesin, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya yang telah meminjamkan alat kepada penulis.
9. Teman-teman Pusat Studi Kelautan bimbingan pak Roni (Yayak, Bilal, Tedja, Ari, Fadel, Caesar, Jeremi, dan Mora) yang banyak membantu dalam diskusi, belajar, dan canda tawanya.
10. Keluarga besar Teknik Kelautan Angkatan 2015 (Tritonus P55-L33) atas kebersamaan, susah, dan senang yang telah dilalui bersama.
11. Serta semua pihak yang turut membantu dan tidak bisa penulis sampaikan satu per satu disini.

Semoga bantuan yang telah diberikan kepada penulis mendapatkan balasan yang baik dari Allah SWT. Serta menjadi bekal di masa mendatang bagi penulis.

Surabaya, Juli 2019

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
KATA PENGANTAR	vi
UCAPAN TERIMA KASIH	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Manfaat	3
1.5 Batasan Masalah	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	5
2.1 Tinjauan Pustaka	5
2.2 Dasar Teori	7
2.2.1 Pengelasan FCAW (<i>Flux Core Arc Welding</i>)	7
2.2.2 Material Baja ASTM A36	8
2.2.3 Sambungan Las	9
2.2.4 Distribusi Temperatur	13
2.2.4.1 <i>Heat Input</i>	13
2.2.4.2 <i>Heat Transfer</i>	14
2.2.5 Tegangan Sisa	17
2.2.5.1 Proses Terjadinya Tegangan Sisa	18
2.2.5.2 Distribusi Tegangan Sisa	19

2.2.5.3 Pengukuran Besarnya Tegangan Sisa	19
2.2.6 Distorsi Pada Pengelasan	20
2.2.6.1 Jenis-jenis Distorsi	21
2.2.7 Metode Elemen Hingga	21
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	29
3.1 Skema Diagram Alir	29
3.2 Penjelasan Diagram Alir	30
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	39
4.1 Parameter Pengelasan	39
4.2 Eksperimen	39
4.2.1 Pengelasan	39
4.2.2 Pengukuran Distorsi Sudut	40
4.3 Pemodelan Numerik	42
4.3.1 Perhitungan <i>Heat Input</i> dan <i>Heat Flux</i>	42
4.3.2 Input Hasil Geometri dari SolidWorks ke ANSYS	48
4.3.3 Lokasi Pembebanan <i>Heat Flux</i>	48
4.3.4 <i>Boundary Condition</i>	49
4.3.5 <i>Meshing</i> dan Tipe Elemen	49
4.3.6 Analisis <i>Transient Thermal</i>	51
4.3.6.1 Hasil <i>Transient Thermal</i> Variasi Urutan Pengelasan 1 (Lurus)	52
4.3.6.2 Hasil <i>Transient Thermal</i> Variasi Urutan Pengelasan 2 (Simetri)	53
4.3.6.1 Hasil <i>Transient Thermal</i> Variasi Urutan Pengelasan 1 (Loncat)	55
4.3.7 Analisis <i>Transient Structural</i>	56
4.3.7.1 Hasil <i>Transient Structural</i> Variasi Urutan Pengelasan 1 (Lurus)	56
4.3.7.2 Hasil <i>Transient Structural</i> Variasi Urutan Pengelasan 1 (Simetri)	59
4.3.7.3 Hasil <i>Transient Structural</i> Variasi Urutan Pengelasan 1 (Loncat)	61
4.4 Validasi Hasil Eksperimen dan Pemodelan Numerik	64
4.5 Analisis Hasil	68
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	71

5.1 Kesimpulan	71
5.2 Saran	71
DAFTAR PUSTAKA	73
LAMPIRAN	75
BIODATA PENULIS	125

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Proses FCAW (Unitor, 2005)	7
Gambar 2.2 Skema Proses Pengelasan FCAW (Unitor, 2005)	8
Gambar 2.3 Alur Sambungan Las Tumpul (Wiryosumarto dan Okumura, - 2000)	9
Gambar 2.4 Sambungan T (Wiryosumarto dan Okumura, 2000)	10
Gambar 2.5 Macam-macam Sambungan Sudut (Wiryosumarto dan Okumura, 2000)	11
Gambar 2.6 Sambungan Tumpang (Wiryosumarto dan Okumura, 2000)	12
Gambar 2.7 Sambungan Sisi Sambungan Tumpang (Wiryosumarto dan - Okumura, 2000)	12
Gambar 2.8 Volume Kontrol untuk Konduksi Panas Satu Dimensi (Logan, 2010)	15
Gambar 2.9 Model Ilustrasi Aliran Panas secara Konveksi (anak panah pada <i>surface</i> S ₃ mengindikasikan transfer panas secara konveksi) - (Logan, 2010)	16
Gambar 2.10 Pembentukan Tegangan Sisa (Wiryosumarto dan Okumura, - 2000)	18
Gambar 2.11 Skema Distribusi Tegangan Sisa dalam Sambungan Las Tumpul - (Wiryosumarto dan Okumura, 2000)	19
Gambar 2.12 Hubungan antara Tegangan Sisa dan Distorsi (Syahroni dan - Hidayat, 2012)	20
Gambar 2.13 Distorsi atau Perubahan Bentuk pada Lasan (Wiryosumarto dan - Okumura, 2000)	21
Gambar 2.14 <i>Meshing</i> pada T-joint Fillet Weld (Syahroni dan Hidayat, 2012). 23	
Gambar 2.15 Geometri elemen SOLID70 (ANSYS <i>Mechanical</i> APDL - <i>Element Reference</i>)	23
Gambar 2.16 Geometri elemen SOLID90 (ANSYS <i>Mechanical</i> APDL -	

<i>Element Reference</i>)	24
Gambar 2.17 Geometri elemen SOLID185 (ANSYS <i>Mechanical APDL -</i> <i>Element Reference</i>)	24
Gambar 2.18 Geometri elemen SOLID186 (ANSYS <i>Mechanical APDL -</i> <i>Element Reference</i>)	25
Gambar 2.19 Vektor tegangan (ANSYS <i>Mechanical APDL Element -</i> Reference)	26
Gambar 3.1 Skema Diagram Alir Analisis	29
Gambar 3.2 Mesin FCAW (<i>Flux Core Arc Welding</i>)	31
Gambar 3.3 <i>Wire Feeder</i>	31
Gambar 3.4 FCAW <i>Welding Gun</i>	32
Gambar 3.5 <i>Work Clamp</i>	32
Gambar 3.6 <i>Wire Electrode</i> CHT711	32
Gambar 3.7 <i>Portable Blower</i>	33
Gambar 3.8 Gerinda	33
Gambar 3.9 Meter Ukur <i>Roll</i>	33
Gambar 3.10 Siku Ukur	34
Gambar 3.11 Kapur Besi	34
Gambar 3.12 <i>Welding Chipping</i>	34
Gambar 3.13 <i>Wire Brush</i>	34
Gambar 3.14 Bentuk dan Dimensi Spesimen Uji (Satuan dalam mm)	35
Gambar 3.15 (a) Proses <i>Tack Welding</i> ; (b) Proses Pengelasan	35
Gambar 3.16 Variasi Urutan Pengelasan 1 (lurus)	36
Gambar 3.17 Variasi Urutan Pengelasan 2 (simetri)	36
Gambar 3.18 Variasi Urutan Pengelasan 3 (loncat)	36
Gambar 3.19 <i>Dial Indicator</i> beserta Meja Perata	37
Gambar 4.1 Hasil Pengelasan (a) Variasi Urutan Pengelasan 1 (lurus); - (b) Variasi Urutan Pengelasan 2 (simetri); (c) Variasi Urutan Pengelasan 3 (loncat)	40

Gambar 4.2 Titik Pengukuran Distorsi Sudut	41
Gambar 4.3 Pembagian Step untuk Simulasi Proses Pengelasan	43
Gambar 4.4 Bentuk dan Dimensi (a) <i>Transfersal Weld Bead</i> ; (b) <i>Longitudinal Weld Bead</i>	43
Gambar 4.5 Hasil Impor Geometri	48
Gambar 4.6 Lokasi Pembebanan pada Analisis <i>Transient Thermal</i>	48
Gambar 4.7 <i>Boundary Condition</i> pada Analisis <i>Transient Structural</i>	49
Gambar 4.8 Titik Pengukuran Distorsi Sudut Pada <i>Meshing Sensitivity</i> , - (a) Tampak Isometri; (b) Tampak Samping Kanan	50
Gambar 4.9 Grafik <i>Meshing Sensitivity</i>	51
Gambar 4.10 Hasil Analisis <i>Transient Thermal</i> Tampak Isometri Variasi 1	52
Gambar 4.11 Hasil Analisis <i>Transient Thermal</i> Tampak Atas Variasi 1	52
Gambar 4.12 Grafik Temperatur Tiap Satuan Waktu pada Variasi 1 (Lurus) ...	53
Gambar 4.13 Hasil Analisis <i>Transient Thermal</i> Tampak Isometri Variasi 2	53
Gambar 4.14 Hasil Analisis <i>Transient Thermal</i> Tampak Atas Variasi 2	54
Gambar 4.15 Grafik Temperatur Tiap Satuan Waktu pada Variasi 2 (Simetri) ..	54
Gambar 4.16 Hasil Analisis <i>Transient Thermal</i> Tampak Isometri Variasi 3	55
Gambar 4.17 Hasil Analisis <i>Transient Thermal</i> Tampak Atas Variasi 3	55
Gambar 4.18 Grafik Temperatur Tiap Satuan Waktu pada Variasi 3 (Loncat) .	56
Gambar 4.19 Hasil Analisis <i>Transient Structural</i> Tampak Isometri Variasi 1 ..	56
Gambar 4.20 Hasil Analisis <i>Transient Structural</i> Tampak Atas Variasi 1	57
Gambar 4.21 Hasil Analisis <i>Transient Structural</i> Tampak Depan Variasi 1	57
Gambar 4.22 Hasil Analisis <i>Transient Structural</i> Tampak Belakang Variasi 1 ..	57
Gambar 4.23 Hasil Analisis <i>Transient Structural</i> Tampak Sisi Kanan Variasi 1 ..	58
Gambar 4.24 Hasil Analisis <i>Transient Structural</i> Tampak Sisi Kiri Variasi 1 ..	58

Gambar 4.25 Hasil Analisis <i>Transient Structural</i> Tampak Isometri Variasi 2 ..	59
Gambar 4.26 Hasil Analisis <i>Transient Structural</i> Tampak Atas Variasi 2	59
Gambar 4.27 Hasil Analisis <i>Transient Structural</i> Tampak Depan Variasi 2	60
Gambar 4.28 Hasil Analisis <i>Transient Structural</i> Tampak Belakang Variasi 2 ..	60
Gambar 4.29 Hasil Analisis <i>Transient Structural</i> Tampak Sisi Kanan Variasi 2 ..	60
Gambar 4.30 Hasil Analisis <i>Transient Structural</i> Tampak Sisi Kiri Variasi 2 ..	61
Gambar 4.31 Hasil Analisis <i>Transient Structural</i> Tampak Isometri Variasi 3 ..	62
Gambar 4.32 Hasil Analisis <i>Transient Structural</i> Tampak Atas Variasi 3	62
Gambar 4.33 Hasil Analisis <i>Transient Structural</i> Tampak Depan Variasi 3	62
Gambar 4.34 Hasil Analisis <i>Transient Structural</i> Tampak Belakang Variasi 3 ..	63
Gambar 4.35 Hasil Analisis <i>Transient Structural</i> Tampak Sisi Kanan Variasi 3 ..	63
Gambar 4.36 Hasil Analisis <i>Transient Structural</i> Tampak Sisi Kiri Variasi 3 ..	63
Gambar 4.37 Grafik Pengukuran Distorsi Sudut pada Variasi Urutan - Pengelasan 1 (Lurus); (a) Eksperimen, (b) Pemodelan Numerik ..	66
Gambar 4.38 Grafik Pengukuran Distorsi Sudut pada Variasi Urutan - Pengelasan 2 (Simetri); (a) Eksperimen, (b) Pemodelan Numerik ..	67
Gambar 4.39 Grafik Pengukuran Distorsi Sudut pada Variasi Urutan - Pengelasan 3 (Loncat); (a) Eksperimen, (b) Pemodelan Numerik ..	68

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi Kimia Baja ASTM A36 (ASTM, 1999)	8
Tabel 2.2 Kekuatan Mekanis Baja ASTM A36 (ASTM, 1999)	9
Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Distorsi Sudut pada Panel Baja ASTM A36 dengan FCAW	42
Tabel 4.2 Data Hasil Eksperimen pada Panel Bagian <i>Transfersal Stiffener</i>	44
Tabel 4.3 Data Hasil Eksperimen pada Panel Bagian <i>Longitudinal Stiffener</i>	44
Tabel 4.4 Panjang Weld Bead per Sekon dan <i>Travel Speed</i> Untuk Satu <i>Transfersal Stiffener Weld Bead</i> Tiap Variasi Urutan Pengelasan	45
Tabel 4.5 Panjang Weld Bead per Sekon dan <i>Travel Speed</i> Untuk Satu <i>Longitudinal Stiffener Weld Bead</i> Tiap Variasi Urutan Pengelasan ..	45
Tabel 4.6 Hasil Perhitungan Luasan <i>Weld Bead</i> (A_{wb}) yang Dilalui Selama 1 detik	46
Tabel 4.7 Perhitungan <i>Heat Input</i>	47
Tabel 4.8 Hasil Perhitungan <i>Heat Flux</i>	47
Tabel 4.9 Analisis <i>Meshing Sensitivity</i>	51
Tabel 4.10 Hasil Pengukuran Distorsi Sudut Variasi 1 (mm)	58
Tabel 4.11 Hasil Pengukuran Distorsi Sudut Variasi 2 (mm)	61
Tabel 4.12 Hasil Pengukuran Distorsi Sudut Variasi 3 (mm)	64
Tabel 4.13 Perbandingan Hasil Pengukuran Distorsi Sudut pada Pemodelan - Numerik dan Eksperimen	64

Tabel 4.14 Perbandingan Rata-rata dan Selisih Hasil Eksperimen dan	
Pemodelan Numerik	65

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A WPS (<i>WELDING PROCEDURE SPECIFICATION</i>)	75
LAMPIRAN B LANGKAH PEMODELAN NUMERIK	77
B.1 Pemodelan Numerik Analisis <i>Transient Thermal</i>	78
B.2 Pemodelan Numerik Analisis <i>Transient Structural</i>	85
LAMPIRAN C HASIL <i>MESHING SENSITIVITY</i>	93
LAMPIRAN D HASIL PENGUKURAN PADA ANALISIS NUMERIK	98
D.1 Pengukuran Deformasi Sudut Pada Variasi Urutan Pengelasan 1 (Lurus)	99
D.2 Pengukuran Deformasi Sudut Pada Variasi Urutan Pengelasan 2 (Simetri)	106
D.3 Pengukuran Deformasi Sudut Pada Variasi Urutan Pengelasan 3 (Loncat)	113
LAMPIRAN E DOKUMENTASI HASIL EKSPERIMEN	120
E.1 Dokumentasi Hasil Eksperimen Variasi Urutan Pengelasan 1 (Lurus)	121
E.2 Dokumentasi Hasil Eksperimen Variasi Urutan Pengelasan 2 (Simetri)	122
E.3 Dokumentasi Hasil Eksperimen Variasi Urutan Pengelasan 3 (Loncat)	123

BAB I

PENDHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri maritim erat kaitannya dengan dengan bangunan terapung yang menggunakan material baja seperti kapal dan bangunan pengeboran minyak lepas pantai. Dalam proses fabrikasi bangunan laut tersebut digunakan proses pengelasan yang merupakan cara efektif untuk menyambungkan material yang akan digunakan sebagai konstruksinya. Pengelasan merupakan metode yang populer digunakan untuk menyambungkan material baja dikarenakan kepraktisan dan efisiensinya. Pengetahuan yang memadai harus dimiliki personil yang terlibat dalam proses pengelasan seperti juru las, inspektor pengelasan, dan *welding engineer*. Kualifikasi personil pengelasan sangat dibutuhkan guna memperoleh hasil las yang baik.

Dalam aplikasinya, pengelasan memiliki beberapa proses yang umum digunakan, salah satunya adalah FCAW (*Flux Core Arc Welding*). Pengelasan FCAW memiliki laju pengisian yang lebih tinggi dibandingkan SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*), selain itu banyak tersedia jenis elektroda atau *filler metal* yang dijual di pasaran, dan cocok untuk pengelasan semua posisi menjadikan FCAW banyak digunakan dalam proses fabrikasi bangunan apung. FCAW dapat digunakan untuk menyambungkan material baja dengan berbagai konfigurasi seperti konfigurasi sambungan antar pelat, antar pipa, dan pelat dengan pipa. Konfigurasi konstruksi yang akan disambung juga menentukan proses pengelasan yang akan digunakan. Hal tersebut mempunyai dampak juga pada hasil pengelasan yang akan didapatkan.

Pengelasan sering dianggap sebagai proses yang sederhana, walaupun kenyataannya memiliki kompleksitas yang cukup tinggi seperti perlunya pengetahuan tentang ilmu bahan, teknologi mekanik, mekanika teknik, *code* dan standar yang berlaku, serta lain sebagainya. Pada pelaksanaannya, setelah pengelasan kerap ditemui perubahan bentuk setelah proses pengelasan seperti

distorsi. *Crack* atau retak dapat muncul akibat konsentrasi tegangan yang berlebih pada bagian tertentu yang biasanya diawali dengan adanya distorsi yang terjadi karena kontraksi logam selama proses pengelasan. Tegangan sisa juga berperan penting pada proses terbentuknya *crack* karena gaya tekan dan tarik akibat panas pengelasan yang tidak merata.

Merujuk pada masalah di atas, maka dalam penelitian Tugas Akhir ini dilakukan analisis numerik menggunakan metode elemen hingga dan eksperimen pengaruh *welding sequence* atau urutan pengelasan pada struktur berkonfigurasi panel dengan material baja ASTM A36 yang disambungkan melalui proses FCAW (*Flux Core Arc Welding*) untuk mengetahui besarnya distorsi sudut yang terjadi. Baja ASTM A36 dipilih karena banyak digunakan dalam konstruksi teknik seperti pelat dasar pada dek kapal, selain itu juga karena memiliki kemampuan yang baik. Hasil dari penelitian diharapkan dapat menjadi acuan dalam proses fabrikasi struktur panel baja ASTM A36 yang diproses dengan FCAW sehingga lebih efektif.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah di atas, rumusan masalah yang akan diselesaikan dalam penelitian Tugas Akhir ini adalah:

1. Berapa besar distorsi sudut akibat pengaruh urutan pengelasan pada panel baja ASTM A36 dengan pengelasan FCAW menggunakan analisis numerik dan eksperimen?
2. Urutan pengelasan manakah yang menghasilkan distorsi sudut terkecil pada pengelasan panel baja ASTM A36 dengan FCAW?

1.3 Tujuan

Adapun tujuan yang akan dicapai dalam penelitian Tugas Akhir ini adalah:

1. Mengukur besar distorsi sudut akibat pengaruh urutan pengelasan pada panel baja ASTM A36 dengan pengelasan FCAW menggunakan analisis numerik dan eksperimen.

2. Menentukan urutan pengelasan yang menghasilkan distorsi sudut terkecil pada pengelasan panel baja ASTM A36 dengan FCAW.

1.4 Manfaat

Manfaat dari penelitian Tugas Akhir ini diharapkan dapat dijadikan dasar dalam penentuan urutan pengelasan pada pengelasan panel baja ASTM A36 dengan proses FCAW. Selain itu, diharapkan dapat memberikan informasi jika ada penelitian serupa atau jika akan dilakukan penelitian lebih lanjut.

1.5 Batasan Masalah

Dikarenakan keterbatasan selama melakukan penelitian dan untuk memudahkan analisis sehingga tujuan penelitian dapat dicapai, maka berikut batasan masalah yang digunakan:

1. Material yang digunakan adalah baja ASTM A36.
2. Pada pemodelan numerik, material dianggap sebagai linear-elastis.
3. Metode pengelasan menggunakan FCAW (*Flux Core Arc Welding*).
4. Sambungan pengelasan berupa sambungan T.
5. Parameter yang diubah adalah urutan pengelasan atau *welding sequence*.
6. Pengukuran distorsi dilakukan secara visual menggunakan *dial indicator* atau *dial gauge*.

(Halaman ini Sengaja Dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

AWS (*American Welding Society*) menjelaskan definisi pengelasan yaitu proses penyambungan antar metal maupun non-metal yang menghasilkan satu bagian yang menyatu, dengan memanaskan material yang akan disambung sampai pada suhu pengelasan tertentu, dengan atau tanpa penekanan, dan dengan atau tanpa logam pengisi. Pengelasan menggantikan metode penyambungan material seperti *Rivet* atau Keling yang memiliki tingkat efisiensi lebih rendah jika dibandingkan dengan pengelasan. Namun, pengelasan masih memiliki kelemahan seperti perubahan struktur akibat timbulnya tegangan sisa dan distorsi. Dengan berkembangnya ilmu penelitian, maka turut dikembangkan metode dan upaya untuk mengurangi perubahan struktur akibat pengelasan.

Tegangan sisa dan distorsi dapat diukur secara eksperimental maupun menggunakan metode elemen hingga. Gannon, dkk (2010) telah melakukan penelitian efek dari urutan pengelasan terhadap tegangan sisa dan distorsi pada struktur pelat berpenegar dengan menggunakan metode elemen hingga. Dalam penelitian tersebut dilakukan analisis secara 3 dimensi dengan menggunakan proses pengelasan GMAW (*Gas Metal Arc Welding*). Menurutnya dalam kebanyakan kasus, analisis menggunakan metode elemen hingga dapat dilakukan sebagai berikut,

1. Analisis *thermal-transient* yaitu distribusi temperatur bergantung pada waktu yang telah ditentukan.
2. Analisis struktur *nonlinier* menggunakan hasil analisis *thermal-transient* sebagai rangkaian beban yang memberikan tegangan sisa dan distorsi pada bidang tiga dimensi.

Penelitian yang dilakukan oleh Bima Arif Wibowo (2016) berjudul “Analisis Numerik Tegangan Sisa dan Distorsi pada Struktur Pelat Berpenegar Jamak dengan Variasi Urutan Pengelasan” bertujuan untuk mendapatkan distribusi panas, tegangan sisa dan distorsi, serta urutan pengelasan yang efektif untuk digunakan pada struktur pelat berpenegar yang terbentuk setelah proses pengelasan.

Dari penelitian tersebut didapatkan kesimpulan bahwa temperatur puncak terus melewati batas titik lebur dari material yaitu sebesar 1800 °K (1526.85 °C). Dan variasi urutan pengelasan memberikan efek yang berbeda terhadap tegangan sisa dan distorsi yaitu urutan pengelasan tidak terlalu berpengaruh signifikan terhadap hasil tegangan sisa longitudinal serta arah pengelasan yang menuju *transverse stiffener* mempunyai nilai distorsi yang lebih kecil dibandingkan arah pengelasan yang menuju ke ujung bebas (*free edge*).

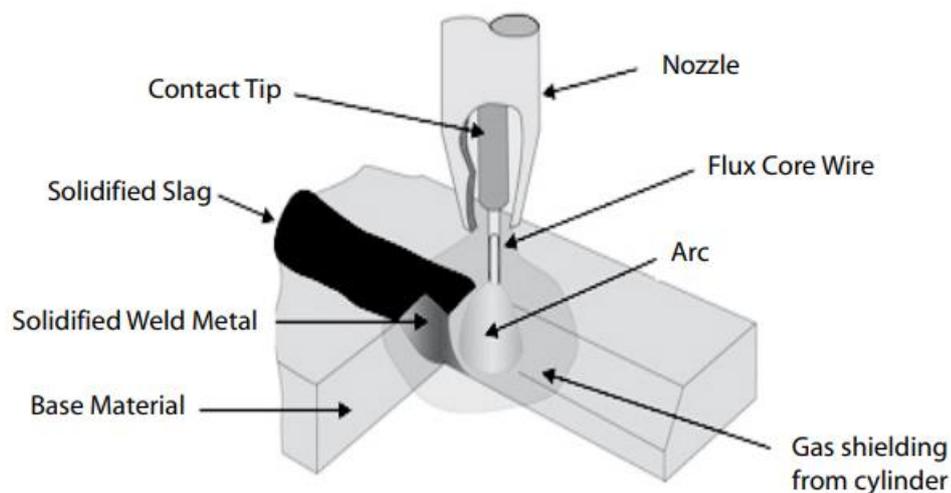
Kemudian Baitul Obbi Bachri Wibisono (2017) dengan penelitiannya melakukan simulasi tegangan sisa dan distorsi yang terjadi pada sambungan *fillet weld joint* hasil pengelasan dengan elemen *solid* dan *shell* untuk mengetahui tegangan sisa dan distorsi yang akurat dengan *running time* yang paling cepat. Penelitian tersebut menghasilkan kesimpulan bahwa perbandingan distribusi panas dari pemodelan memiliki nilai suhu tertinggi sudah melewati titik lebur baja. Alur pengelasan yang paling efektif adalah yang mendekati *transverse stiffener* atau variasi 1. Dan *running time* yang paling efektif adalah menggunakan elemen *shell* yaitu pada analisis *thermal* sebesar 13 menit 23 detik dan analisis *structural* memerlukan waktu 7 menit 53 detik dibandingkan menggunakan elemen *solid* yaitu pada analisis *thermal* sebesar 1 jam 43 menit dan analisis *structural* memerlukan waktu 30 menit 34 detik.

Penelitian selanjutnya dilakukan oleh Aviciena Giovanni Sutekat (2018) yang melakukan analisis eksperimen dan numerik pengaruh variasi urutan pengelasan terhadap distorsi sudut pada struktur panel baja A36 dengan dua *stiffener* sejajar menggunakan SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*). Tujuan dari penelitian tersebut adalah untuk mengetahui total distorsi sudut akibat urutan pengelasan lurus, simetri, dan loncat pada panel baja A36 dengan dua *stiffener* sejajar sehingga dapat diketahui urutan pengelasan yang menghasilkan distorsi sudut paling kecil. Dari hasil penelitian diketahui bahwa berdasarkan hasil validasi eksperimen dengan pemodelan, variasi urutan pengelasan loncat memiliki keunggulan dibandingkan dengan variasi lain. Hasil tersebut karena pengelasan loncat memiliki distorsi sudut yang paling kecil dibandingkan yang lain.

2.2 Dasar Teori

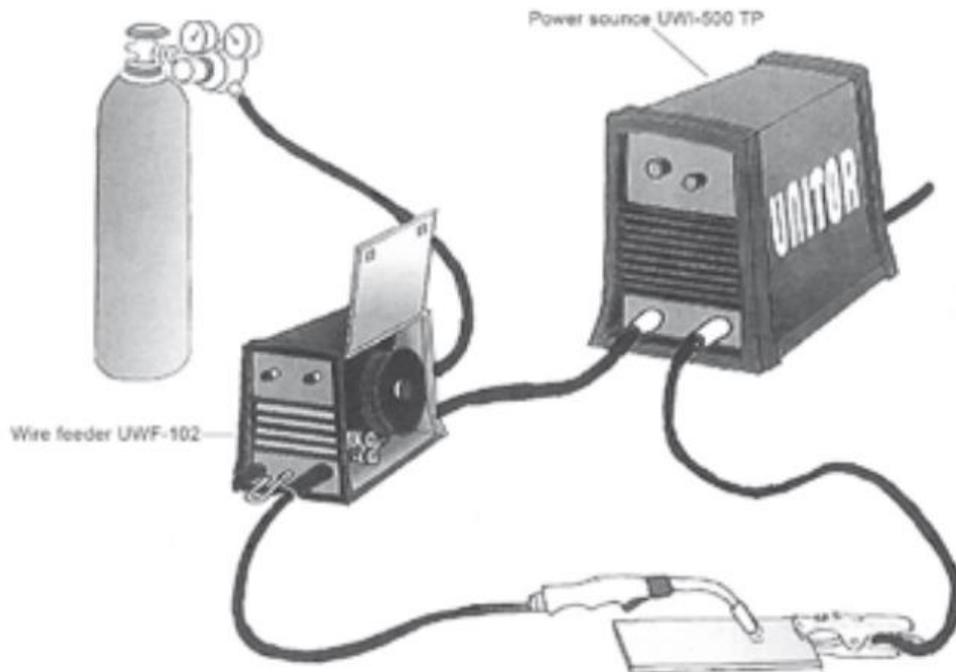
2.2.1 Pengelasan FCAW (*Flux Core Arc Welding*)

Pada proses fabrikasi suatu konstruksi baja, umum menggunakan metode pengelasan untuk menyambungkan material. FCAW (*Flux Core Arc Welding*) merupakan salah satu metode pengelasan yang umum digunakan. Dalam metode FCAW, panas busur listrik terjadi akibat tersentunya ujung elektroda kontinyu berinti fluks dengan benda kerja seperti dijelaskan pada Gambar 2.1. Gas pelindung yang terjadi diperoleh dari terbakarnya fluks yang ada dalam elektrode.



Gambar 2.1 Proses FCAW (Unitor, 2005)

Proses pengelasan FCAW menghasilkan mutu las yang baik namun dengan harga yang relatif murah. FCAW tidak memerlukan keterampilan yang tinggi seperti pada proses pengelasan SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*). Proses ini dapat digunakan secara semi-otomatis, otomatis atau mekanis, namun tidak bisa dilakukan dengan manual. Selain itu proses las ini mampu digunakan pada semua posisi pengelasan tergantung pada ukuran elektrode. FCAW terdapat dua jenis, yaitu FCAW *Self Shielded* jika tidak menggunakan gas tambahan dan FCAW *Gas Shielded* jika menggunakan gas luar untuk pelindung busur las. Skema proses pengelasan dengan FCAW dapat dilihat pada Gambar 2.2 berikut. Prinsip elektrode inti fluks ini mempunyai fungsi hampir sama dengan elektrode terbungkus atau SMAW. Bedanya adalah pada lapisan fluks yang berada di dalam elektrode, pada FCAW kontaminasi dengan udara lebih dapat dihindari.



Gambar 2.2 Skema Proses Pengelasan FCAW (Unitor, 2005)

2.2.2 Material Baja ASTM A36

Material spesimen uji berupa baja ASTM A36 yang merupakan jenis material baja yang sering digunakan dalam bidang perkapalan dan kosntruksi teknik lain. Selain itu, baja ASTM A36 juga memiliki kemampulasan yang baik serta memiliki ketahanan yang baik terhadap *fatigue*. Ketebalan spesimen uji sebesar 8 mm. Baja ASTM A36 merupakan material baja yang telah disertifikasi oleh ASTM (*American Standard Testing and Material*). Komposisi kimia dan kekuatan mekanis ASTM A36 berdasarkan ASTM *Standard Specification for Structural Steel* dijelaskan pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2 berikut.

Tabel 2.1 Komposisi Kimia Baja ASTM A36 (ASTM, 1999)

Unsur	Kadar Maksimum (%)
C	0,25
P	0,04
S	0,05
Si	0,04
Cu	0,2

Tabel 2.2 Kekuatan Mekanis Baja ASTM A36 (ASTM, 1999)

Sifat Mekanis Tarik	
<i>Yield Strength (YS)</i>	250 MPa
<i>Tensile Strength (TS)</i>	400 MPa

2.2.3 Sambungan Las

a. Sambungan Tumpul

Pada dasarnya sambungan tumpul dapat dibagi menjadi dua, yaitu sambungan penetrasi penuh dan sambungan penetrasi sebagian. Alur dalam sambungan tumpul akan mempengaruhi efisiensi pengerjaan dan efisiensi sambungan. Alur pada sambungan tumpul dapat dilihat pada Gambar 2.3 berikut.

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)		—	

Gambar 2.3 Alur Sambungan Las Tumpul (Wiryo Sumarto dan Okumura, 2000)

Tirus ganda (K)		—	
U ganda (H) (DU)		—	
J tunggal (J)		—	
J ganda (DJ)		—	

Gambar 2.3 Alur Sambungan Las Tumpul (Wiryosumarto dan Okumura, 2000)
(lanjutan)

b. Sambungan T

Berdasarkan jenisnya, sambungan ini dapat dibagi kedalam dua jenis, yaitu lasan dengan alur dan lasan dengan sudut seperti dijelaskan pada Gambar 2.4. Hal yang telah dijelaskan dalam sambungan tumpul juga berlaku pada sambungan T.

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

Gambar 2.4 Sambungan T (Wiryosumarto dan Okumura, 2000)

c. Sambungan Sudut

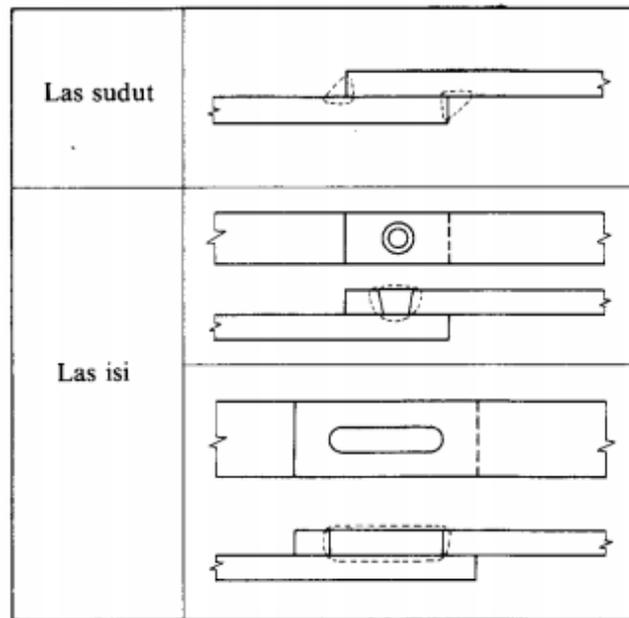
Pada sambungan ini berkemungkinan terjadi retak atau *crack*. Jika ruang untuk pengelasan sempit, maka dapat dilakukan pengelasan tembus atau pengelasan dengan pelat pembantu. Sambungan sudut terdapat jenis lasan dengan alur, las sudut, dan gabungan lasan dengan alur dan las sudut seperti pada Gambar 2.5 berikut.

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

Gambar 2.5 Macam-macam Sambungan Sudut (Wiryo Sumarto dan Okumura, 2000)

d. Sambungan Tumpang

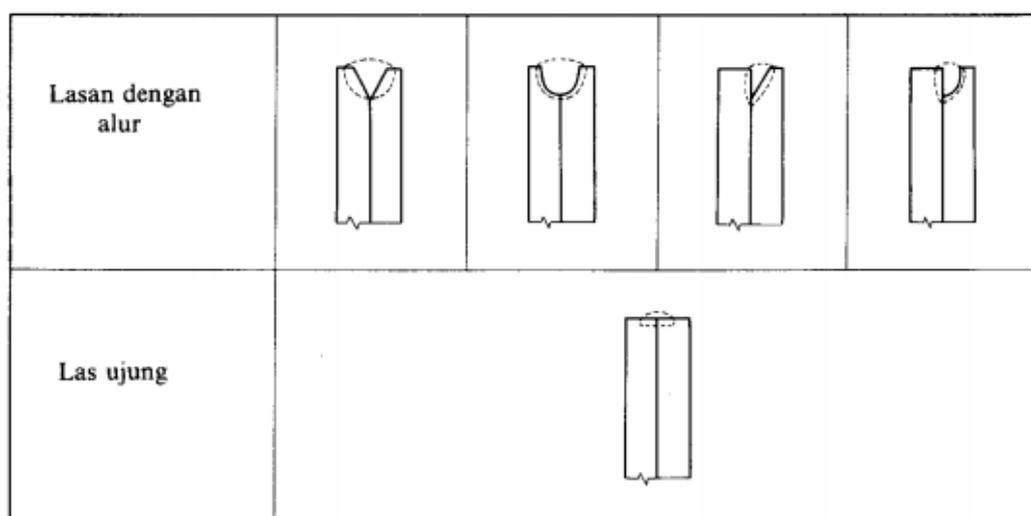
Jenis sambungan ini memiliki efisiensi yang rendah, sehingga jarang digunakan untuk penyambungan konstruksi utama. Sambungan tumpang dapat dibuat dengan las sudut atau las isi seperti pada Gambar 2.6 berikut.



Gambar 2.6 Sambungan Tumpang (Wirjosumarto dan Okumura, 2000)

e. Sambungan Sisi

Dalam sambungan sisi dibagi menjadi dua, yaitu lasan dengan alur dan las ujung seperti dijelaskan Gambar 2.7. Pada lasan dengan alur, dibuat alur pada salah satu atau kedua pelat. Sedangkan pada las ujung hanya dilakukan pengelasan pada ujung kedua pelat. Las ujung biasanya digunakan untuk menyambungkan sementara antar pelat seperti pada *tack welding*.



Gambar 2.7 Sambungan Sisi Sambungan Tumpang (Wirjosumarto dan Okumura, 2000)

2.2.4 Distribusi Temperatur

2.2.4.1 Heat Input

Pada pengelasan terdapat proses pemanasan dan pendinginan yang terjadi secara tidak merata pada seluruh material. Akibat dari tidak meratanya distribusi temperatur, maka dapat menyebabkan deformasi pada struktur las. Sehingga untuk menyelesaikan berbagai persoalan dari tegangan dan deformasi dari hasil pengelasan maka harus diketahui distribusi temperatur yang terjadi pada material las.

Power dari *Heat Input* merupakan hasil kali dari *thermal efficiency* dari proses pengelasan pada jenis material tertentu, tegangan listrik (*voltage*), dan arus listrik (*amperage*). Hasil *power* dari *Heat Input* kemudian dibagi kecepatan pengelasan atau *travel speed* atau *welding speed* yang merupakan refleksi dari *power* tiap satuan panjang garis las dalam satuan waktu tertentu, yaitu 1 detik. Digunakannya parameter *thermal efficiency* dikarenakan energi panas dari proses pengelasan tidak seluruhnya (100%) mengenai objek pengelasan, melainkan sebagian terbuang ke lingkungan. Sehingga *heat input* yang digunakan dalam pengelasan dapat dirumuskan sebagai berikut (Pilipenko, 2001).

$$Q = \eta V I \quad (2.1)$$

dimana,

Q : *Heat Input* (W)

η : *Thermal efficiency* (%)

V : *Voltage* (V)

I : *Current or Amperage* (A)

Koefisien efisiensi pengelasan atau *Thermal efficiency* bergantung pada jenis proses pengelasan dan material yang akan digunakan. Untuk FCAW (*Flux Core Arc Welding*) memiliki *Thermal efficiency* sebesar 0,8 %.

Dalam proses pengelasan terdapat *heat flux* yang merupakan laju perpindahan energi panas pada suatu permukaan tiap satuan waktu. *Heat flux* mempunyai peran dalam distribusi temperatur pada proses pengelasan dan dapat dihitung dengan persamaan (2.2) berikut.

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

dimana,

q_{el} : *heat flux* pada elemen (J/mm²)

q_e : *heat flux* yang dihasilkan elektrode (J/mm²)

A_1 : luas permukaan elemen (mm²)

A_f : luas *flux* yang dihasilkan elektrode (mm²)

Heat flux yang dihasilkan elektrode dapat diperoleh menggunakan persamaan (2.3) berikut.

$$q_e = \frac{Q}{A_e} \quad (2.3)$$

dimana,

Q : *heat input* bersih (Watt)

A_e : luasan elektrode (mm²)

Luas *flux* yang dihasilkan elektrode dapat dihitung menggunakan persamaan (2.4) berikut.

$$A_f = b v t \quad (2.4)$$

dimana,

b : panjang *welding toe* (mm)

v : *travel speed* (mm/s)

t : waktu yang diperlukan pada satu elemen (s)

2.2.4.2 Heat Transfer

Secara umum, *heat transfer* atau perpindahan panas dapat dibagi menjadi tiga, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Pada proses pengelasan, konduksi atau perpindahan panas yang terjadi pada satu medium atau material yang sama terjadi saat energi panas yang menyebar ke seluruh bagian material. Sedangkan terlepasnya energi panas dari material dan alat las ke lingkungan merupakan proses konveksi. Menurut hukum Fourier, kerapatan aliran panas atau *heat flow density* bergantung pada gradien temperatur yang dikalikan dengan faktor koefisien

konduktivitas panas atau dengan kata lain panas yang mengalir dari bagian material panas ke bagian material yang lebih dingin.

Berdasarkan hukum Fourier, konduktivitas panas dapat dirumuskan seperti persamaan (2.5) berikut.

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

dimana,

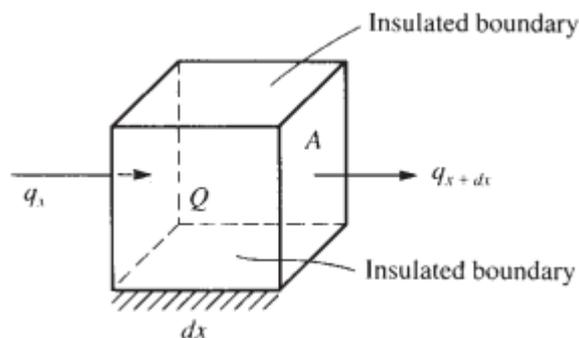
q_x : konduksi panas (W/m^2)

K_{xx} : konduktivitas *thermal* arah-x ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)

$\frac{dT}{dx}$: gradien temperatur (K/m)

Dari persamaan (2.5), perbedaan temperatur dengan nilai konduktivitas yang tinggi akan menambah *heat flux* untuk setiap unit waktu. Untuk jenis material *isotropic* memiliki harga konduktivitas *thermal* yang sama untuk dua sumbu yang lain (y dan z). Dalam persamaan (2.6) di bawah ini, konduktivitas panas yang berada di luar kontrol volume, seperti ditunjukkan Gambar 2.8 yaitu pada permukaan $x + dx$. Dimana gradien temperatur berada pada $x + dx$.

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



Gambar 2.8 Volume Kontrol untuk Konduksi Panas Satu Dimensi (Logan, 2010)

Model ilustrasi aliran panas secara konveksi dapat dilihat pada Gambar 2.9. Aliran panas secara konveksi disebut juga hukum pendinginan Newton dan dirumuskan pada persamaan (2.7) berikut.

$$q_h = h (T_s - T_\infty) \quad (2.7)$$

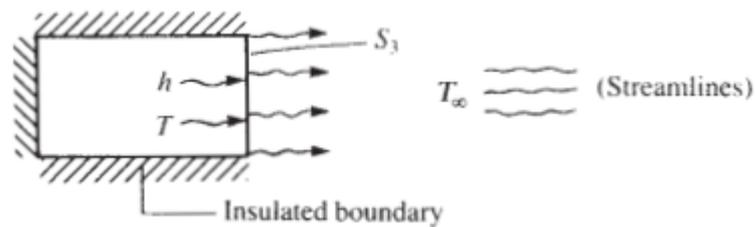
dimana,

q_h : aliran konveksi panas (W/m^2)

h : koefisien konveksi ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)

T_s : temperatur pada permukaan benda yang kontak dengan fluida atau sumber panas (K)

T_∞ : temperatur fluida atau sumber panas (K)



Gambar 2.9 Model Ilustrasi Aliran Panas secara Konveksi (anak panah pada *surface* S_3 mengindikasikan transfer panas secara konveksi) (Logan, 2010)

Logan (2010) telah menurunkan persamaan aliran panas secara konduksi pada aliran satu dimensi menggunakan persamaan energi konservatif seperti persamaan (2.8) berikut.

$$E_{in} + E_{generated} = \Delta U + E_{out} \quad (2.8)$$

$$q_x A dt + Q A dx dt = c (\rho A dt) dT + q_{x+dx} A dt + q_h P dx dt \quad (2.9)$$

dimana,

q_x : konduksi panas (W/m^2)

A : luasan yang terkena aliran panas (m^2)

Q : sumber energi panas (W/m^3)

c : *specific heat* ($\text{W}/\text{kg} \cdot \text{K}$)

q_{x+dx} : aliran panas pada permukaan *boundary*

q_h : aliran konveksi panas (W/m^2)

P : keliling permukaan A (m)

Persamaan aliran panas (*heat transfer*) untuk satu dimensi dengan melibatkan konduksi dan konveksi dapat didapatkan dengan memasukkan persamaan (2.5), (2.6), dan (2.7) pada persamaan (2.9) sebagai berikut.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{hP}{A} (T - T_{\infty}) \quad (2.10)$$

Dari penelitian yang dilakukan Plipenko (2001), persamaan aliran panas untuk model tiga dimensi dirumuskan dengan memperluas persamaan (2.5) dan (2.6) sebagai fungsi aliran temperatur untuk tiga dimensi pada sumbu x, y, dan z serta menambahkan persamaan tersebut ke dalam persamaan (2.10) sehingga menjadi sebagai berikut.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{hP}{A} (T - T_{\infty}) \quad (2.11)$$

Pada kondisi batas untuk temperatur dalam persamaan (2.5), perubahan temperatur pada persamaan (2.6), dan energi yang hilang akibat konveksi pada persamaan (2.7), maka persamaan aliran panas untuk model solid adalah sebagai berikut.

$$- \left[\left(K_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] = h (T - T_{\infty}) \quad (2.12)$$

2.2.5 Tegangan Sisa

Saat dilakukan proses pengelasan, pada bagian yang dilas mengalami pemanasan setempat. Selain itu, selama jalannya proses pengelasan akan terjadi perubahan suhu yang terjadi secara tidak merata. Hal tersebut menyebabkan bagian yang dilas mengalami pengembangan termal. Namun pada bagian yang dingin tidak berubah. Sehingga, terbentuk penghalangan pengembangan yang menyebabkan terjadinya peregangan. Peregangan ini dapat menyebabkan perubahan bentuk yang tetap dikarenakan perubahan sifat mekanis. Selain itu akan timbul tegangan yang sifatnya tetap atau disebut tegangan sisa. Tegangan sisa akan mempengaruhi sifat

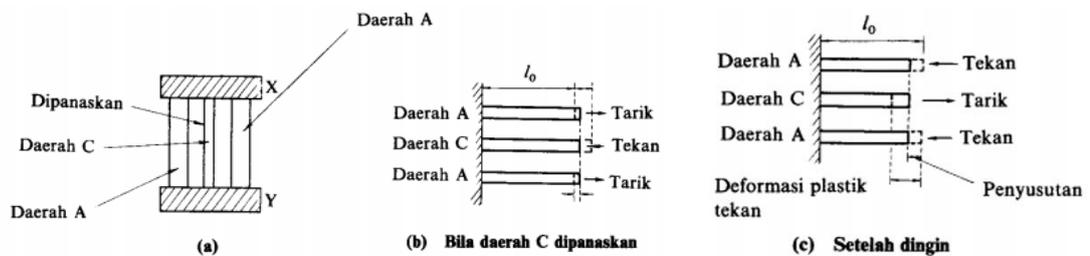
dan kekuatan dari sambungan. Untuk itu perlu dilakukan upaya dalam mengurangi tegangan sisa.

2.2.5.1 Proses Terjadinya Tegangan Sisa

Menurut Wiryosumarto dan Okumura (2000) dalam bukunya yang berjudul Teknologi Pengelasan Logam, pada lasan konstruksi bebas akan terjadi tegangan tarik arah memanjang pada sekitar garis las dan tegangan tekan pada jarak yang sedikit lebih jauh lagi yang seimbang antara satu sama lain. Proses terjadinya tegangan sisa dapat dilihat pada Gambar 2.10, yang mana daerah C akan mengembang pada waktu pengelasan. Pengembangan oleh daerah C akan ditahan daerah A, sehingga daerah C mengalami tegangan tekan dan daerah A mengalami tegangan tarik.

Namun jika luas daerah A jauh lebih besar daripada daerah C, maka daerah C akan mengalami perubahan bentuk tetap, sedangkan daerah A akan mengalami perubahan bentuk elastis. Pada saat pengelasan selesai, terjadi proses pendinginan dimana daerah C menyusut cukup besar. Disamping karena pendinginan, hal tersebut terjadi karena adanya tegangan tekan. Penyusutan ini akan ditahan oleh daerah A. Dengan kata lain, tegangan tarik pada daerah C akan diimbangi tegangan tekan pada daerah A.

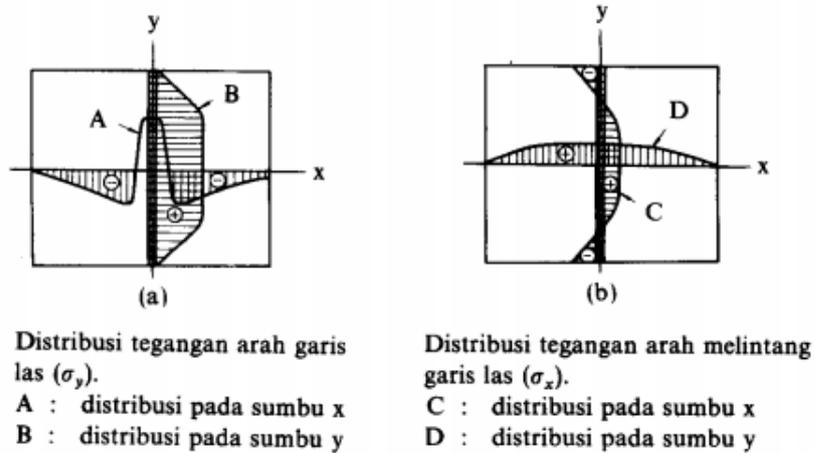
Hal-hal yang memiliki pengaruh dalam terbentuknya tegangan sisa adalah batas transformasi dan batas luluh bahan, suhu pemanasan yang tertinggi, kecepatan pendinginan, tahanan luar, dan pemanasan mula. Semua hal tersebut memiliki keterkaitan satu sama lain, sehingga untuk mencegah terjadinya tegangan sisa maka harus memperhatikan semua hal tersebut.



Gambar 2.10 Pembentukan Tegangan Sisa (Wiryosumarto dan Okumura, 2000)

2.2.5.2 Distribusi Tegangan Sisa

Jenis dan bentuk lasan akan mempengaruhi distribusi tegangan sisa. Pada las tumpul, garis las dengan arah memanjang akan mencapai batas kekuatan luluh (*yield strength*) pada garis las dan kemudian menurun dan mencapai nol pada ujung pelat. Sedangkan pada arah melintang garis las, terjadi keseimbangan antara tegangan tarik dan tekan seperti pada Gambar 2.11 berikut.



Gambar 2.11 Skema Distribusi Tegangan Sisa dalam Sambungan Las Tumpul
(Wiryosumarto dan Okumura, 2000)

2.2.5.3 Pengukuran Besarnya Tegangan Sisa

Besarnya tegangan sisa dapat dihitung menggunakan hukum Hooke melalui besarnya regangan sisa. Pengukuran besar regangan sisa dapat diukur dari perubahan panjang material uji antara sebelum dan sesudah dipotong. Melalui hukum Hooke dapat diketahui bahwa perubahan ukuran disebabkan karena adanya tegangan, sehingga besarnya tegangan dapat dihitung. Pada tegangan satu arah dapat dihitung dengan persamaan (2.13) berikut.

$$\sigma = E \frac{\Delta l}{l} \quad (2.13)$$

dimana,

σ : tegangan sisa yang terjadi

E : modulus elastisitas

Δl : perubahan panjang sebelum dan sesudah dipotong

l : panjang sebelum dipotong

Wiryosumarto dan Okumura (2000) menjelaskan persamaan tegangan sisa pada dua dimensi seperti persamaan (2.14) dan (2.15) berikut.

$$\sigma_x = \frac{E}{(1-\nu^2)} (\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y) \quad (2.14)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1-\nu^2)} (\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x) \quad (2.15)$$

dimana,

σ_x : tegangan sisa tegak lurus garis las

σ_y : tegangan sisa searah garis las

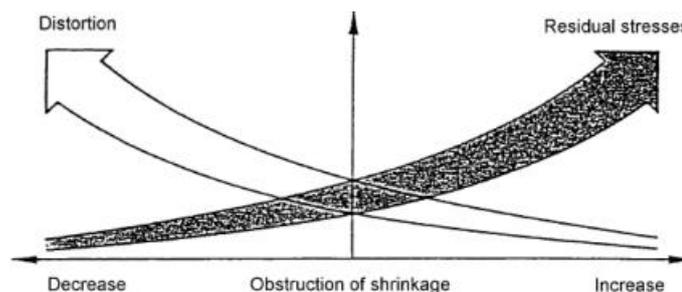
ν : *poisson ratio*

ε_x : regangan sisa tegak lurus garis las

ε_y : regangan sisa searah garis las

2.2.6 Distorsi pada Pengelasan

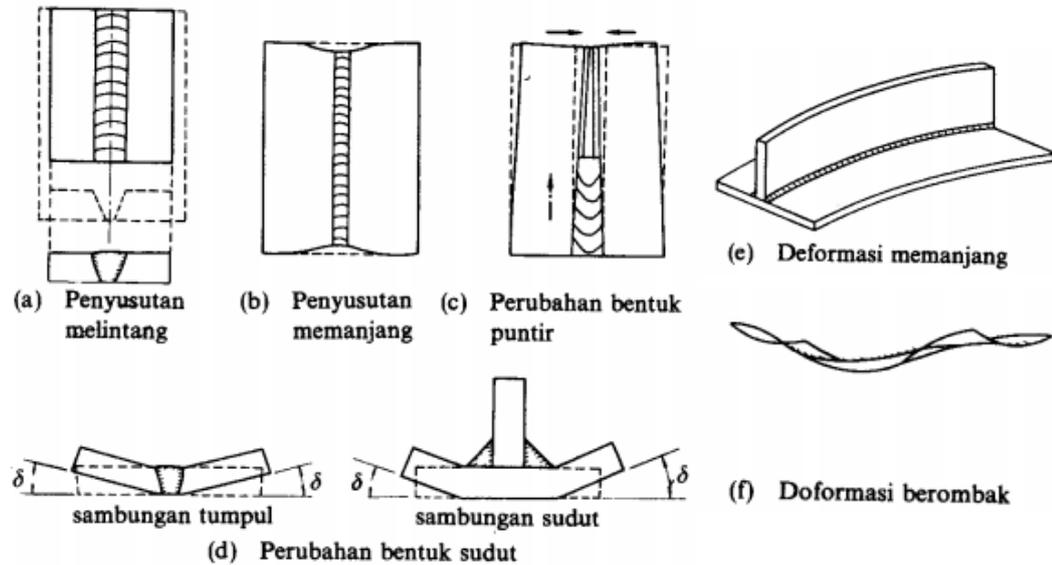
Distorsi memiliki kaitan erat dengan tegangan sisa pada proses pengelasan. Pemanasan dan pendinginan terjadi pada siklus proses pengelasan, akibatnya akan timbul regangan termal di antara logam las dan logam induk pada daerah jalur las. Regangan yang terjadi disertai dengan perubahan plastis. Tegangan yang dihasilkan dari regangan ini akan menyebabkan gaya dalam (*internal force*) sehingga dapat menyebabkan *bending*, *buckling*, dan rotasi. *Displacement* yang terjadi inilah yang disebut dengan distorsi. Hubungan antara tegangan sisa dan distorsi pada sambungan yang mendapatkan *restrain* dapat dilihat pada Gambar 2.12. Sambungan las dengan tingkat *restrain* lebih rendah memiliki keuntungan karena memiliki tegangan sisa yang lebih rendah namun cenderung mendapatkan distorsi yang lebih tinggi. Sebaliknya, jika sambungan las dengan tingkat *restrain* yang lebih tinggi akan memiliki lebih sedikit distorsi namun akan menghasilkan tegangan sisa yang lebih tinggi.



Gambar 2.12 Hubungan antara Tegangan Sisa dan Distorsi (Syahroni dan Hidayat, 2012)

2.2.6.1 Jenis-jenis Distorsi

Distorsi atau perubahan bentuk memiliki jenis-jenis yang ditunjukkan pada Gambar 2.13 dan dapat dilelaskan sebagai berikut.



Gambar 2.13 Distorsi atau Perubahan Bentuk pada Lasan (Wiryo Sumarto dan Okumura, 2000)

- a.) Penyusutan melintang, yaitu penyusutan tegak lurus terhadap garis las.
- b.) Penyusutan memanjang, yaitu penyusutan searah garis las.
- c.) Perubahan bentuk puntir atau distorsi rotasi, yaitu perubahan dalam bidang yang melalui garis las dan tegak lurus terhadap pelat.
- d.) Perubahan bentuk sudut atau distorsi sudut, yaitu perubahan sudut sekitar garis las yang disebabkan distribusi termal yang tidak merata terhadap arah ketebalan pelat.
- e.) Deformasi memanjang atau distorsi memanjang, yaitu perubahan sudut pada bidang pelat yang berkaitan dengan perluasan termal.
- f.) Deformasi berombak atau distorsi *buckling*, yaitu tegangan tekan yang berkaitan dengan panas menyebabkan ketidakstabilan jika mengenai pelat tipis.

2.2.7 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan suatu metode numerik untuk memecahkan masalah-masalah teknik dan fisika matematika yang sulit diselesaikan dengan perhitungan manual atau analitik. Masalah-masalah yang dalam bidang

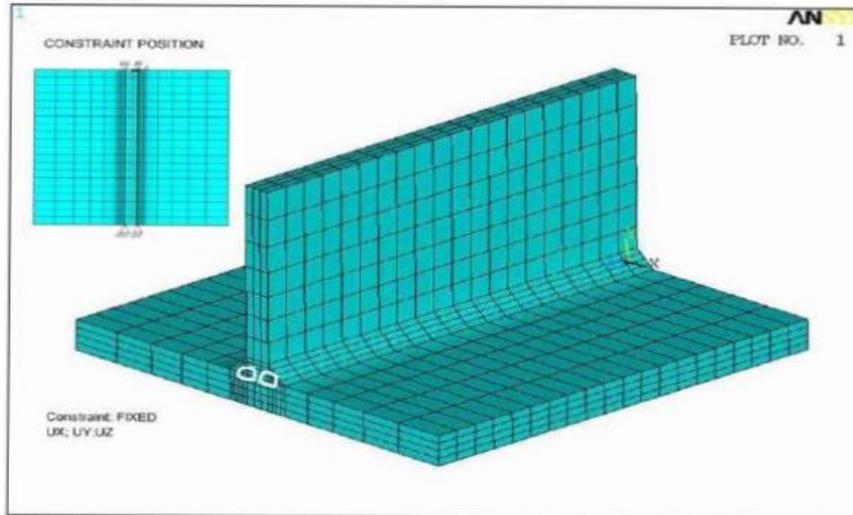
teknik dan fisika matematika yang dapat dipecahkan dengan menggunakan metode elemen hingga adalah seperti analisis struktural, perpindahan panas, aliran fluida, transportasi massa, dan potensial elektromagnetik. Masalah analitik sulit untuk menyelesaikan masalah yang kompleks seperti geometri yang rumit, pembebanan, dan sifat material. Sehingga perlu digunakan metode numerik seperti metode elemen hingga untuk mendapatkan solusi. Proses pemodelan benda dilakukan dengan membagi benda menjadi unit yang lebih kecil (elemen hingga) yang saling berhubungan pada titik-titik simpul yang sama antara dua elemen atau lebih (*node*) dan garis batas pada permukaan yang disebut diskritisasi.

Tahapan umum untuk menggunakan metode elemen hingga adalah sebagai berikut.

1. Pendiskritan dan penentuan jenis elemen

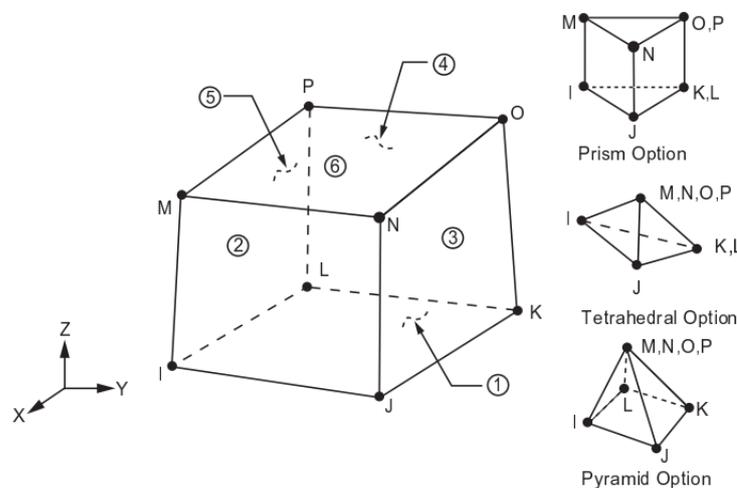
Pemilihan jenis elemen berguna untuk menentukan keakuratan hasil analisis. Jenis elemen dipilih sesuai dengan analisis agar dapat memperoleh hasil analisis yang mendekati keadaan sebenarnya. Selanjutnya adalah proses *meshing* yang mana merupakan pendiskritan dari model. Ketika proses *meshing*, ukuran yang dipilih harus mewakili keadaan struktur sebenarnya. Semakin kecil ukuran *meshing* maka hasil akan semakin akurat, namun membutuhkan kapasitas memori penyimpanan yang cukup besar. Hal tersebut karena input data hasil perhitungan dalam *software* semakin banyak sehingga untuk proses akan lebih berat dan lama.

Meshing yang menggunakan ukuran elemen kecil biasanya digunakan untuk analisis dengan kondisi yang mengalami perubahan drastis. Sedangkan untuk *meshing* berukuran elemen besar digunakan untuk analisis yang perubahannya cenderung konstan. *Meshing* sebuah model dapat dilihat pada Gambar 2.14 berikut.



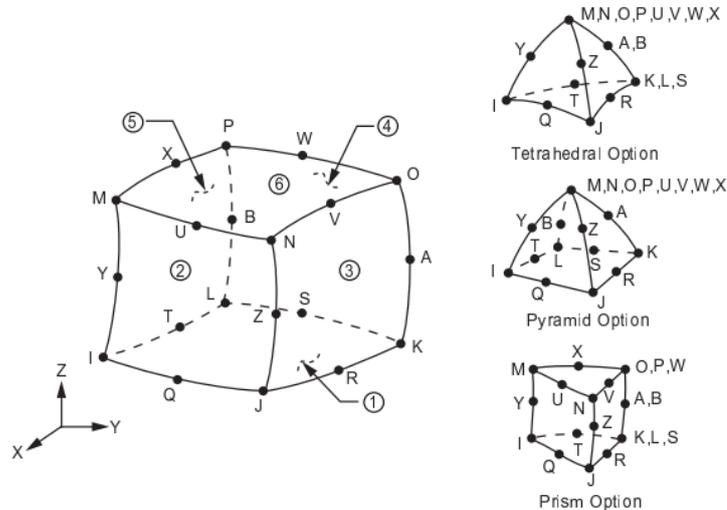
Gambar 2.14 Meshing pada T-joint Fillet Weld (Syahroni dan Hidayat, 2012)

Jenis elemen yang dapat digunakan untuk analisis *thermal* adalah SOLID70 dan SOLID90. Elemen SOLID70 mempunyai delapan *nodes* yang tiap *node* memiliki satu derajat kebebasan dan temperatur seperti pada Gambar 2.15. Elemen ini dapat menghantarkan panas sehingga bisa digunakan pada analisis *thermal transient* dan *steady-state*. Elemen SOLID70 memiliki bentuk elemen prisma, *tetrahedral*, dan piramida. Elemen ini didefinisikan dengan delapan *nodes* dan *orthotropic material properties*. Pada analisis *steady-state*, dapat mengabaikan *specific heat* dan massa jenis. Elemen yang memiliki kemampuan menghantarkan panas ini secara otomatis dapat juga digunakan untuk analisis struktural.



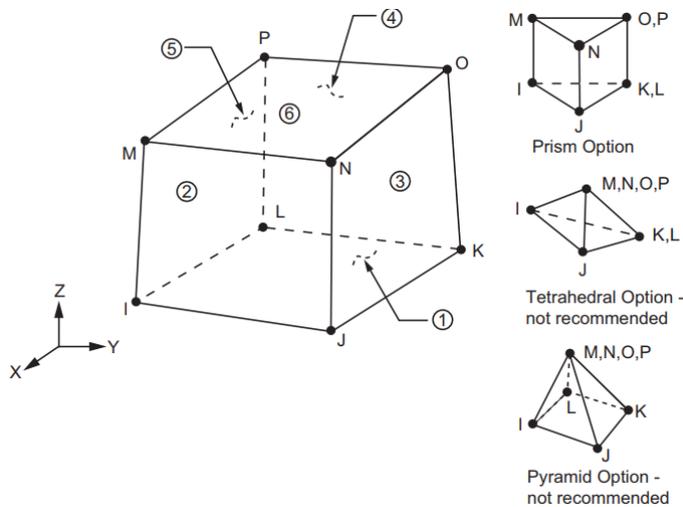
Gambar 2.15 Geometri elemen SOLID70 (ANSYS *Mechanical APDL Element Reference*)

Selanjutnya elemen SOLID90 yang memiliki kemampuan sama dengan SOLID70, namun yang membedakan adalah jumlah node pada SOLID90 sebanyak 20 derajat kebebasan seperti pada Gambar 2.16 berikut.



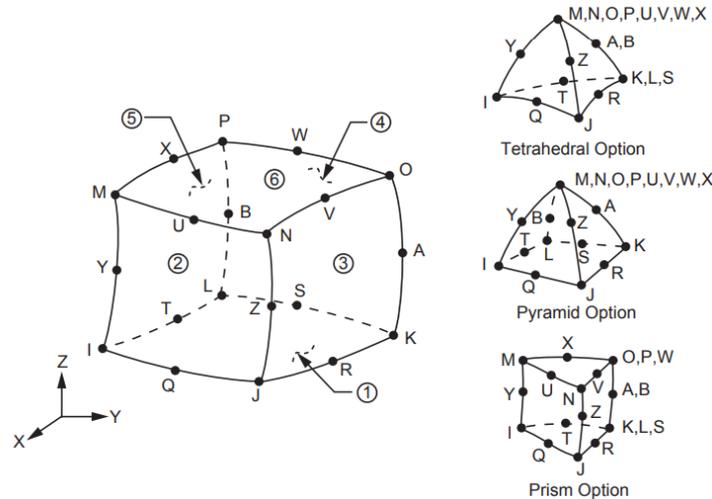
Gambar 2.16 Geometri elemen SOLID90 (ANSYS Mechanical APDL Element Reference)

Selanjutnya jenis elemen yang digunakan dalam analisis struktural adalah SOLID185 dan SOLID186. Elemen SOLID185 mempunyai delapan nodes yang masing-masing node memiliki tiga derajat kebebasan seperti pada Gambar 2.17. Elemen ini bertranslasi ke arah sumbu x dan y dan memiliki kemampuan plastisitas dan elastisitas yang tinggi serta defleksi dan regangan yang besar. Elemen SOLID185 memiliki opsi bentuk prisma, tetrahedral, dan piramida.



Gambar 2.17 Geometri elemen SOLID185 (ANSYS Mechanical APDL Element Reference)

Sedangkan untuk elemen SOLID186 adalah elemen solid 3D yang memiliki 20 *nodes* untuk mengetahui perilaku *displacement*, mempunyai kemampuan yang sama dengan SOLID185. Perbedaannya terletak pada jumlah *nodenya* yaitu 20 *nodes* dan tiap *node* memiliki 3 derajat kebebasan seperti tampak pada Gambar 2.18 berikut.



Gambar 2.18 Geometri elemen SOLID186 (ANSYS *Mechanical APDL Element Reference*)

2. Pemilihan fungsi *displacement*

Langkah kedua adalah menentukan fungsi *displacement* yang didefinisikan pada tiap elemen menggunakan nilai parameter tiap *node* elemen. Fungsi yang digunakan adalah fungsi polinomial, *linear quadratic*, kubik, atau deret trigonometri.

3. Definisi hubungan regangan-*displacement* dan tegangan-regangan

Hubungan tegangan-regangan selanjutnya akan digunakan dalam proses penurunan persamaan untuk masing-masing elemen. Besarnya tegangan sisa dapat dihitung melalui besarnya regangan sisa yang terjadi dengan menggunakan hukum Hooke seperti persamaan (2.16) berikut.

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon^{el}\} \quad (2.16)$$

dimana,

$\{\sigma\}$: vektor tegangan = $[\sigma_x \sigma_y \sigma_z \sigma_{xy} \sigma_{yz} \sigma_{xz}]^T$

$[D]$: matrik kekakuan elastis atau matrik *stress-strain*

$\{\varepsilon^{el}\}$: $\{\varepsilon - \varepsilon^{th}\}$ = vektor regangan elastis

$\{\varepsilon\}$: vektor regangan total = $[\varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z \varepsilon_{xy} \varepsilon_{yz} \varepsilon_{xz}]^T$

$\{\varepsilon^{th}\}$: vektor regangan termal

Sehingga persamaan (2.16) dapat dijabarkan seperti persamaan (2.17) berikut.

$$\{\varepsilon^{th}\} = \{\varepsilon^{th}\} + [D]^{-1} \{\sigma\} \quad (2.17)$$

Pada kasus tegangan sisa model tiga dimensi, maka persamaan regangan termal dapat diubah seperti persamaan (2.18) berikut.

$$\{\varepsilon^{th}\} = \Delta T [\alpha_x \alpha_y \alpha_z 0 0 0]^T \quad (2.18)$$

dimana,

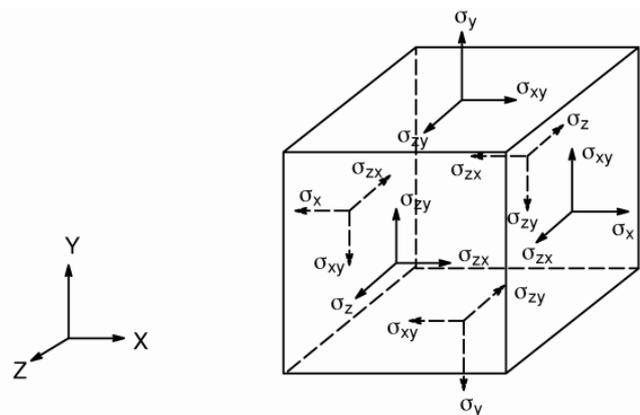
α_x : koefisien ekspansi termal arah sumbu-x

α_y : koefisien ekspansi termal arah sumbu-y

α_z : koefisien ekspansi termal arah sumbu-z

ΔT : perbedaan temperatur yang ditinjau dengan temperatur referensi

Vektor tegangan yang bekerja pada struktur diilustrasikan pada Gambar 2.19 berikut.



Gambar 2.19 Vektor tegangan (ANSYS Mechanical APDL Element Reference)

Matrik kekakuan $[D]^{-1}$ ditunjukkan pada persamaan (2.19) berikut.

$$[D]^{-1} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -\nu_{xy}/E_x & -\nu_{xz}/E_x & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{yx}/E_y & 1/E_y & -\nu_{yz}/E_y & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{zx}/E_z & -\nu_{zy}/E_z & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{yz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{xz} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

dimana,

E_x : modulus elastisitas arah x

ν_{xy} : *poisson ratio major*

ν_{yx} : *poisson ratio minor*

G_{xy} : modulus geser bidang x-y

G_{yz} : modulus geser bidang y-z

G_{xz} : modulus geser bidang x-z

Untuk material isotropik maka.

$$E_x = E_y = E_z$$

$$\nu_{xy} = \nu_{yz} = \nu_{xz}$$

$$\nu_{yx} = \nu_{zx} = \nu_{zy}$$

4. Penentuan matriks kekakuan elemen dan persamaan elemen

Pada tahap penentuan matriks kekakuan dan persamaan elemen dapat digunakan metode kesetimbangan langsung dan metode energi menggunakan prinsip energi potensial minimum. Pada analisis termal pengelasan, matriks kekakuan elemen yang digunakan didasarkan pada hukum Fourier sebagai berikut.

$$\frac{kA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \left\{ \begin{matrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} q_1 \\ q_2 \end{matrix} \right\} \text{ atau } k^{(e)} \theta^{(e)} = q^{(e)} \quad (2.20)$$

dimana,

- θ : vektor termal
- k : karakteristik matrik elemen
- q : vektor elemen gaya

5. Penggabungan persamaan elemen dengan penentuan kondisi batas

Pada tahap ini didapatkan matriks kekakuan global yang bersifat *singular*. Maka untuk menghilangkan singularitasnya digunakan kondisi batas. Matriks kekakuan global didapatkan dari gabungan persamaan elemen pada tahap empat menggunakan metode kekakuan langsung.

6. Penyelesaian derajat kebebasan yang belum diketahui

Tahap ini berguna untuk mendapatkan hasil besaran yang diperlukan tetapi tidak didapat secara langsung dari tahap sebelumnya. Maka derajat kebebasan dapat dicari dengan metode eliminasi (misalkan metode *gauss*) dan iterasi (misalkan metode *gauss-siedel*).

7. Penentuan regangan dan tegangan elemen

Untuk perhitungan regangan dan tegangan yang terjadi pada elemen didasarkan pada hasil dari tahap enam.

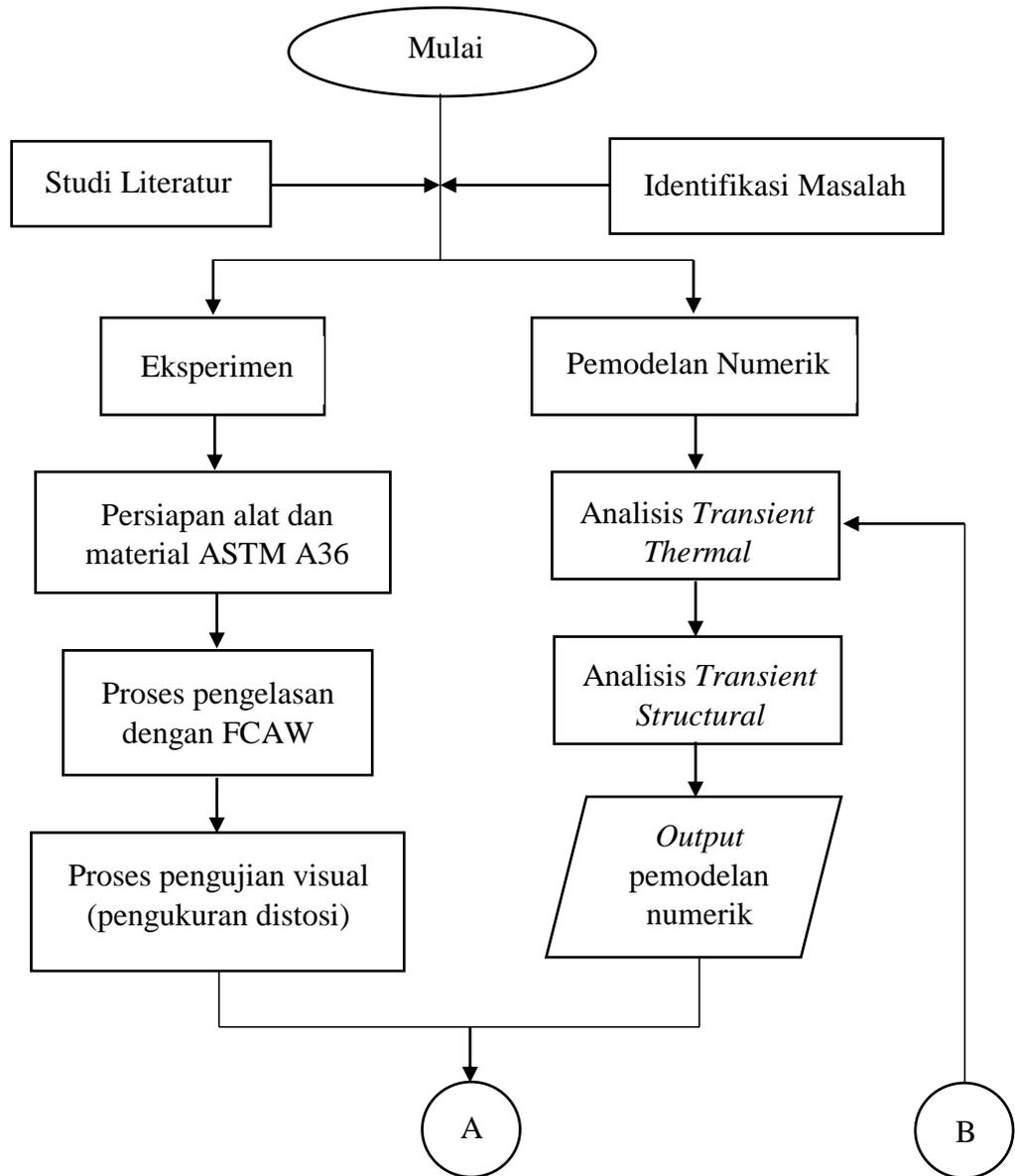
8. Penampilan hasil

Hasil yang didapat dari analisis menggunakan metode elemen hingga akan ditampilkan dalam bentuk grafis sehingga akan mempermudah pembacaan hasil.

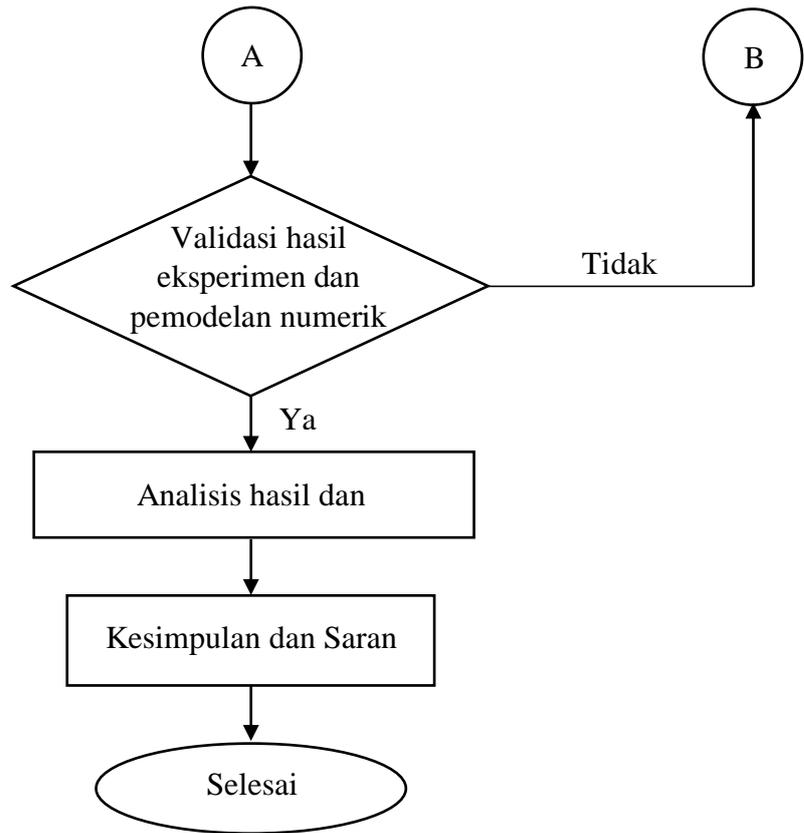
BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Skema Diagram Alir

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



Gambar 3.1 Skema Diagram Alir Analisis



Gambar 3.1 Skema Diagram Alir Analisis (lanjutan)

3.2 Penjelasan Diagram Alir

1. Identifikasi Masalah

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

2. Studi Literatur

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

3. Eksperimen

Pelaksanaan eksperimen bertujuan untuk mendapatkan hasil distorsi sudut secara fisik dan untuk digunakan sebagai validasi pada hasil pemodelan numerik. Berikut tahapan eksperimen dalam penelitian ini:

a. Persiapan alat dan material ASTM A36

Alat yang digunakan untuk eksperimen pengelasan ditunjukkan pada Gambar 3.2 hingga 3.12 berikut.

- Mesin FCAW (*Flux Core Arc Welding*) pada Gambar 3.2 merupakan sumber *power* dari listrik yang dibutuhkan dalam pengelasan, baik yang mengalir ke *welding gun* maupun untuk menggerakkan *wire feeder*.



Gambar 3.2 Mesin FCAW (*Flux Core Arc Welding*)

- *Wire Feeder* pada Gambar 3.3 berguna untuk menarik kawat las dan mengeluarkannya melalui *welding gun* secara otomatis.



Gambar 3.3 *Wire Feeder*

- FCAW *Welding Gun* pada Gambar 3.4 berfungsi sebagai tempat dan pengatur kapan keluarnya kawat las serta gas pelindung jika menggunakan FCAW *Gas Shielded*.



Gambar 3.4 FCAW Welding Gun

- *Work Clamp* atau disebut juga *work lead* pada Gambar 3.5 adalah penghubung kabel masa dari mesin las ke benda kerja.



Gambar 3.5 Work Clamp

- *Wire Electrode* pada Gambar 3.6 merupakan logam pengisi yang sekaligus berfungsi sebagai elektroda. Dalam eksperimen ini menggunakan jenis CHT711.



Gambar 3.6 Wire Electrode CHT711

- *Portable Blower* pada Gambar 3.7 berfungsi untuk menghisap dan mengarahkan asap dari proses pengelasan sehingga tidak mengganggu juru las.



Gambar 3.7 *Portable Blower*

- Gerinda pada Gambar 3.8 berguna untuk membersihkan daerah yang akan dilas dan membersihkan *spatter* setelah proses pengelasan.



Gambar 3.8 Gerinda

- Meter Ukur *Roll* dan Siku Ukur pada Gambar 3.9 dan 3.10 digunakan pada proses *fitting* dan *marking* pada material sebelum dilas agar didapatkan hasil las yang presisi.



Gambar 3.9 Meter Ukur *Roll*



Gambar 3.10 Siku Ukur

- Kapur besi pada Gambar 3.11 digunakan untuk menandai lokasi saat proses *fitting* dan *marking*.



Gambar 3.11 Kapur Besi

- *Welding Chipping* pada Gambar 3.12 dan *Wire Brush* pada Gambar 3.13 digunakan untuk membersihkan terak pada hasil lasan.

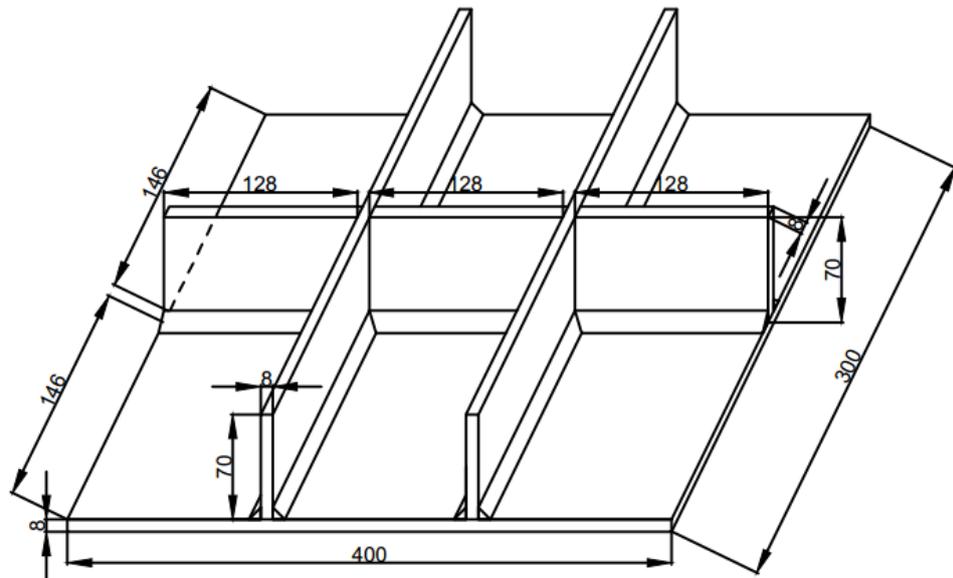


Gambar 3.12 *Welding Chipping*



Gambar 3.13 *Wire Brush*

Sedangkan material yang digunakan adalah baja ASTM A36 dengan bentuk dan dimensi spesiemen seperti pada Gambar 3.14 berikut.



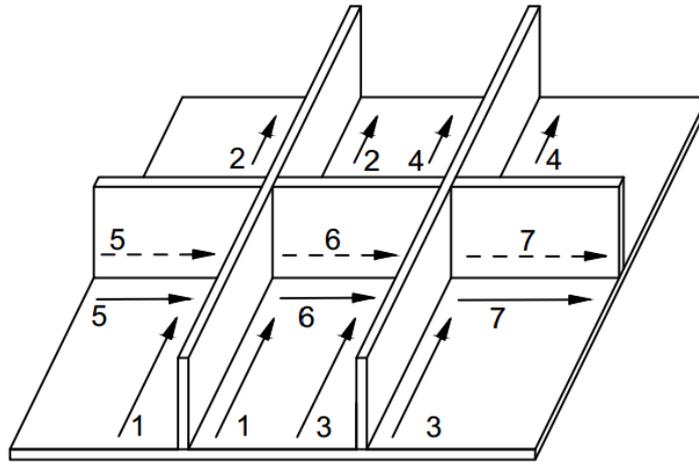
Gambar 3.14 Bentuk dan Dimensi Spesimen Uji
(Satuan dalam mm)

b. Proses pengelasan dengan FCAW (*Flux Core Arc Welding*)

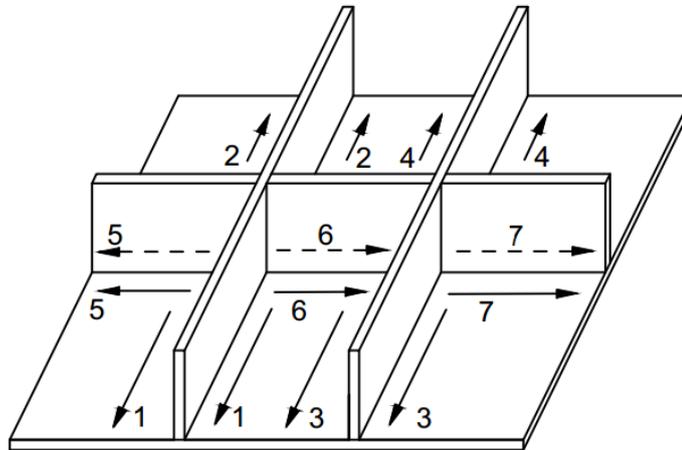
Pengelasan dilakukan dengan proses FCAW (*Flux Core Arc Welding*) seperti pada Gambar 3.15. Terdapat tiga variasi urutan pengelasan yang ditunjukkan Gambar 3.16, 3.17, dan 3.18. Pelaksanaan pengelasan dilakukan di Bengkel Pipa Divisi Kapal Niaga, PT PAL Indonesia (Persero) dengan mengacu pada WPS (*Welding Procedure Specification*) No. PAL GE-169-WPS seperti ditunjukkan pada Lampiran A.1.



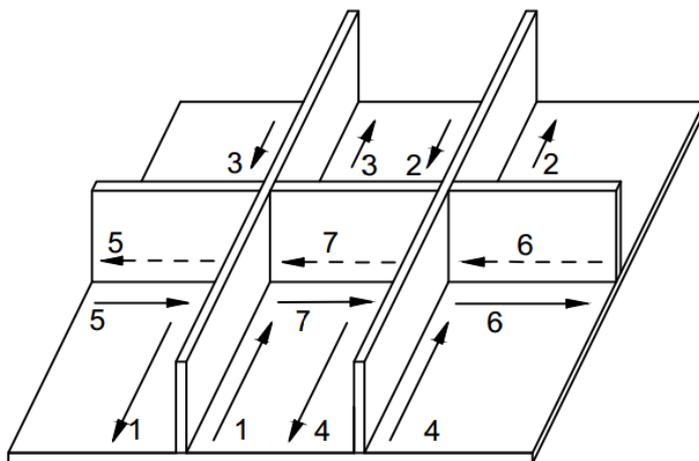
Gambar 3.15 (a) Proses *Tack Welding*; (b) Proses Pengelasan



Gambar 3.16 Variasi Urutan Pengelasan 1 (lurus)



Gambar 3.17 Variasi Urutan Pengelasan 2 (simetri)



Gambar 3.18 Variasi Urutan Pengelasan 3 (loncat)

c. Proses pengujian visual (pengukuran distorsi sudut)

Pengujian dilakukan dengan pengukuran visual setelah proses pengelasan dilakukan pada tiap variasi urutan pengelasan spesimen uji menggunakan *dial indicator* atau *dial gauge* dengan tingkat ketelitian 0,01 mm dan diletakkan pada meja perata yang ditunjukkan pada Gambar 3.19. Pengukuran besar distorsi sudut dilakukan di Laboratorium Reparasi Mesin, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.



Gambar 3.19 *Dial Indicator* beserta Meja Perata

d. Data hasil eksperimen

Setelah pengukuran besar distorsi sudut pada tahap eksperimen, maka didapatkan data hasil eksperimen berupa besar distorsi sudut pada tiap titik di masing-masing variasi urutan pengelasan.

4. Pemodelan Numerik

a. *Analisis Transient Thermal*

Tahap analisis ini bertujuan untuk mengetahui sebaran panas yang diterima spesimen uji pada masing-masing variasi urutan pengelasan.

b. *Analisis Transient Structural*

Sedangkan pada tahap ini bertujuan untuk mengetahui sebaran distorsi sudut yang diterima spesimen uji pada masing-masing variasi urutan pengelasan.

c. Data hasil pemodelan numerik

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

5. Validasi Hasil Eksperimen dan Pemodelan Numerik

Tahap ini berguna untuk memvalidasi kesesuaian hasil pemodelan numerik dengan eksperimen.

6. Analisis dan Pembahasan

Setelah melakukan validasi hasil, maka dilakukan analisis dan pembahasan mengenai distorsi sudut terkecil akibat pengaruh urutan pengelasan pada panel baja ASTM A36 dengan pengelasan FCAW (*Flux Core Arc Welding*).

7. Kesimpulan dan Saran

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

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Parameter Pengelasan

Dalam penelitian ini, parameter-parameter yang digunakan dalam eksperimen dan pemodelan numerik mengacu pada WPS (*Welding Procedure Specification*) dari PT PAL Indonesia (Persero) dengan No. PAL GE-169-WPS seperti ditunjukkan pada Lampiran A.1. Berikut merupakan parameter pengelasan yang digunakan dalam penelitian ini:

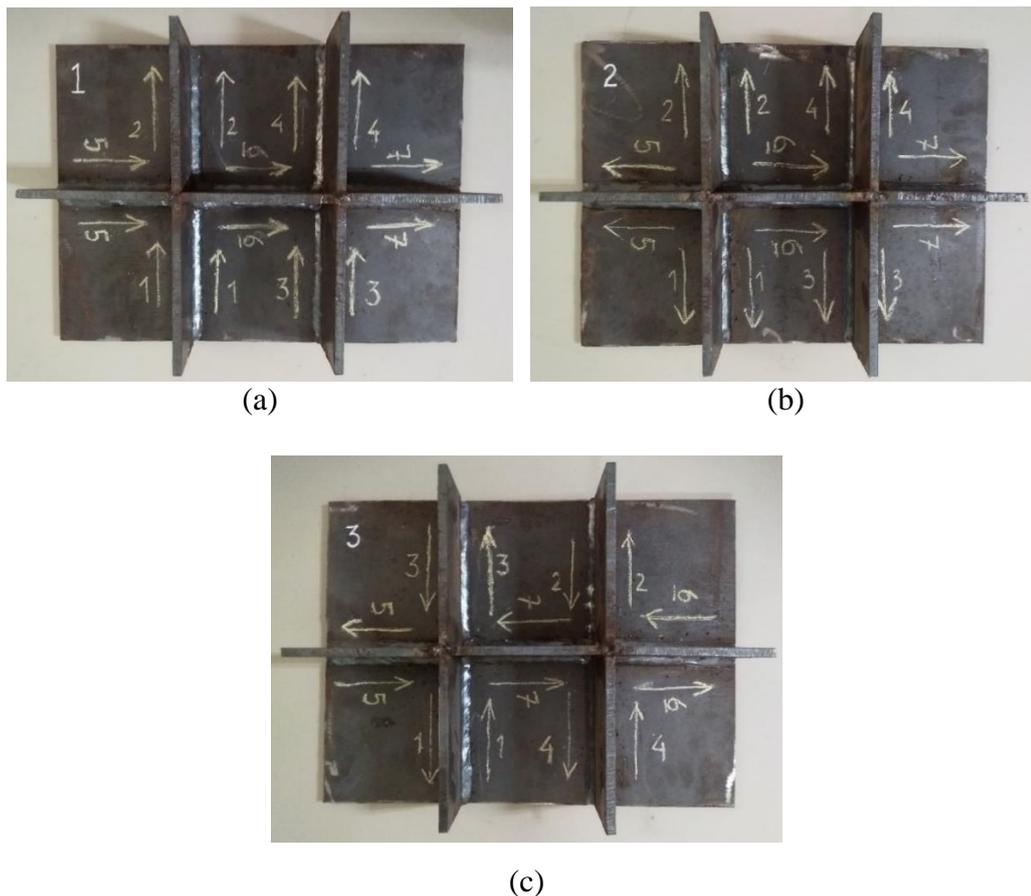
Proses	: FCAW (<i>Flux Core Arc Welding</i>)
Kampuh	: <i>Fillet Weld</i>
Sambungan	: <i>T-joint</i>
Arus	: 160 A
Tegangan	: 18 V
Diameter elektroda	: 1,2 mm
Jumlah Lapisan	: <i>Single Pass</i>
<i>Thermal efficiency</i>	: 0,8

4.2 Eksperimen

Pada penelitian Tugas Akhir ini, eksperimen digunakan untuk validasi hasil dari pemodelan numerik. Validasi penting dilakukan untuk mengetahui keakuratan hasil pemodelan numerik.

4.2.1 Pengelasan

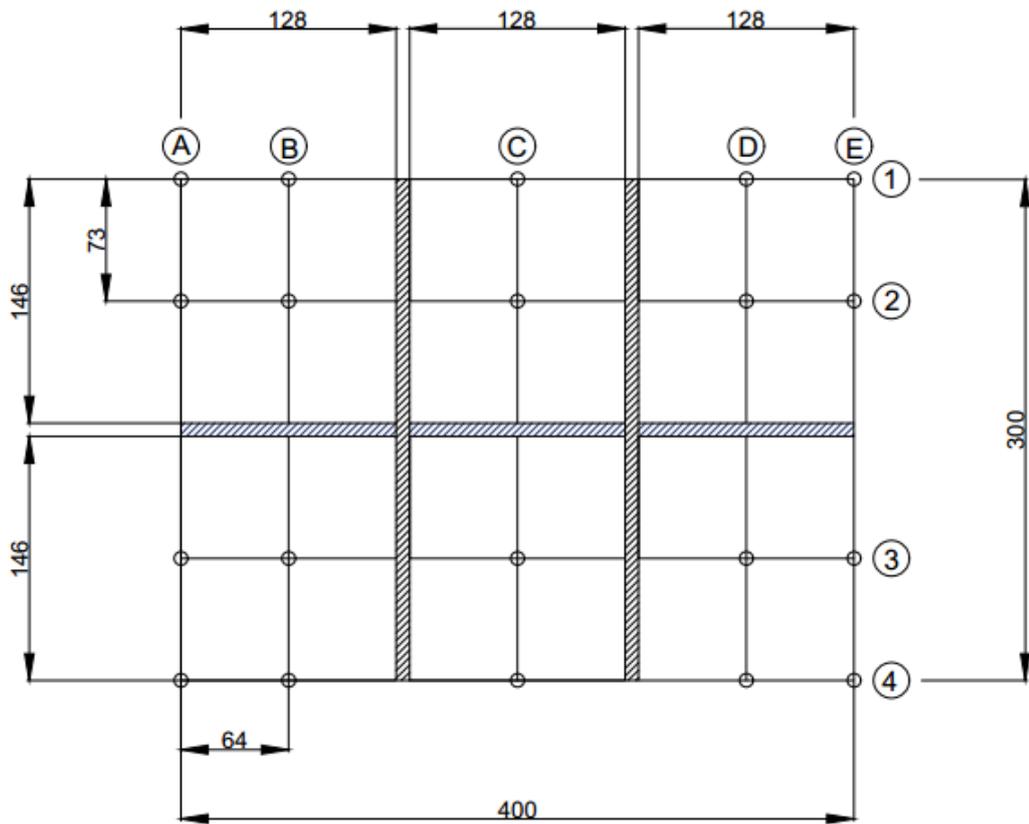
Proses pengelasan dilakukan pada 3 panel baja ASTM A36 dengan konfigurasi yang sama namun dilakukan perlakuan variasi urutan pengelasan yang berbeda seperti telah dijelaskan Gambar 3.15, 3.16, 3.17 pada Bab III berupa urutan pengelasan lurus, simetri, dan loncat. Proses pengelasan dilakukan di Bengkel Pipa Divisi Kapal Niaga, PT PAL Indonesia (Persero). Kondisi lingkungan pada saat itu hujan sehingga temperatur kamar berkisar 23 °C. Namun proses dilakukan dalam bengkel tetap dalam kondisi kering dan sedikit mendapat pengaruh angin. Sedangkan kondisi juru las dalam keadaan baik atau tidak mengalami kelelahan. Hasil proses pengelasan ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Hasil Pengelasan (a) Variasi Urutan Pengelasan 1 (lurus);
 (b) Variasi Urutan Pengelasan 2 (simetri); (c) Variasi Urutan Pengelasan 3
 (loncat)

4.2.2 Pengukuran Distorsi Sudut

Pengukuran besar distorsi sudut dilakukan menggunakan *dial indicator* atau *dial gauge*. Keakuratan *dial indicator* adalah sebesar 0,01 mm. Pengukuran dilakukan pada meja perata untuk menghasilkan hasil yang akurat. Datum diposisikan pada meja perata, sehingga hasil pengukuran dikurangi ketebalan untuk menghasilkan besar distorsi sudut secara aktual. Gambar 4.2 menunjukkan titik pengukuran distorsi sudut pada panel dengan tiga penegar.



Gambar 4.2 Titik Pengukuran Distorsi Sudut

Setelah dilakukan pengukuran distorsi sudut, maka didapatkan data ukuran distorsi pada titik pengukuran yang ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Distorsi Sudut pada Panel Baja ASTM A36 dengan FCAW

Titik	Variasi 1 (mm)	Variasi 2 (mm)	Variasi 3 (mm)
A1	0,75	0,38	1,45
A2	0,59	0,33	0,86
A3	0,66	0,27	0,22
A4	0,96	0,43	0,47
B1	0,58	0,32	0,99
B2	0,54	0,28	0,81
B3	0,65	0,42	0,09
B4	0,70	0,46	0,22
C1	0,10	0,14	0,39
C2	0,31	0,33	0,41

Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Distorsi Sudut pada Panel Baja ASTM A36 dengan FCAW (Lanjutan)

Titik	Variasi 1 (mm)	Variasi 2 (mm)	Variasi 3 (mm)
C3	0,37	0,22	0,44
C4	0,08	0,08	0,08
D1	0,23	0,83	0,45
D2	0,21	0,57	0,41
D3	0,41	0,49	0,64
D4	0,42	0,53	0,76
E1	0,16	0,82	0,8
E2	0,09	0,65	0,45
E3	0,51	0,53	0,69
E4	0,61	0,75	0,83
Rata-rata	0,45	0,44	0,57

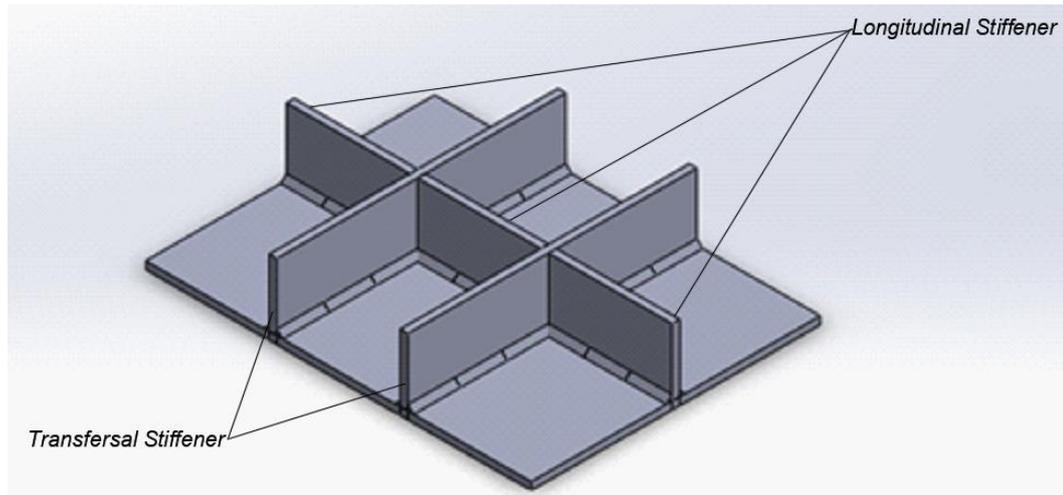
Dari hasil eksperimen diketahui variasi urutan pengelasan 2 (simetri) menghasilkan distorsi sudut terkecil yaitu dengan rata-rata 0,44 mm. Terdapat juga karakter perubahan bentuk distorsi sudut yang sama pada setiap variasi urutan pengelasan, yaitu titik $C2 > C1$ dan titik $C3 > C4$. Hal tersebut dikarenakan titik C1 hingga C4 mendapat pengaruh panas yang lebih banyak dari pengelasan dua *transfersal stiffener* dan satu *longitudinal stiffener*.

4.3 Pemodelan Numerik

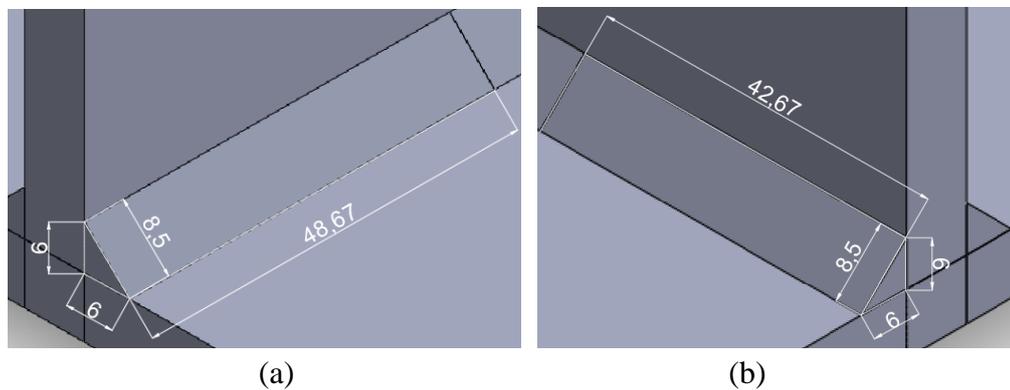
Pembuatan model geometri dilakukan menggunakan *software* SolidWorks, sedangkan pemodelan numerik menggunakan ANSYS. Proses analisis numerik diawali dengan analisis *Transient Thermal* kemudian dilanjutkan analisis *Transient Structural* menggunakan data hasil analisis *Transient Thermal*.

4.3.1 Perhitungan *Heat Input* dan *Heat Flux*

Sumber panas atau beban yang digunakan untuk mensimulasikan proses pengelasan secara transient pada model numerik adalah *heat flux* pada *weld bead*. *Heat Flux* akan dikenakan pada tiap elemen dan akan berjalan berdasarkan fungsi waktu. Pembagian step untuk simulasi proses pengelasan ditunjukkan pada Gambar 4.3, sedangkan bentuk penampang *weld bead* tiap step ditunjukkan seperti Gambar 4.4 berikut.



Gambar 4.3 Pembagian Step untuk Simulasi Proses Pengelasan



Gambar 4.4 Bentuk dan Dimensi (a) *Transversal Weld Bead*;
(b) *Longitudinal Weld Bead*

Perhitungan *heat flux* pada pengelasan:

<i>Welding Leg</i>	=	6 mm
Jumlah step <i>weld bead</i>	=	42
Panjang satu <i>Transversal Stiffener weld bead</i>	=	48,67 mm
Panjang satu <i>Longitudinal Stiffener weld bead</i>	=	42,67 mm

Dari pelaksanaan eksperimen, didapatkan total durasi pengelasan dan durasi 1 step *weld bead* pengelasan pada *transversal* maupun *longitudinal stiffener*. Durasi pengelasan didapat dari lama pengelasan pada tiap sisi *stiffener*. Durasi 1 step *weld*

bead dalam model numerik dapat dihitung dengan persamaan (4.1) berikut. Penjelasan yang lebih jelas akan disajikan pada Tabel 4.2 dan 4.3 berikut.

Durasi 1 step *weld bead* -

$$\text{dalam model numerik} = \frac{\text{Rata-rata Durasi}}{\text{Jumlah Step pada Tiap Sisi Stiffener}} \quad (4.1)$$

Tabel 4.2 Data Hasil Eksperimen pada Panel Bagian *Transfersal Stiffener*

Variasi 1 (Lurus)		Variasi 2 (Simetri)		Variasi 3 (Loncat)	
Menit	Durasi (s)	Menit	Durasi (s)	Menit	Durasi (s)
0,33	18	0,33	18	0,27	19
1,02	14	1,03	13	0,55	15
1,36	19	1,35	19	1,27	19
2,11	20	2,05	19	1,50	22
2,44	18	2,40	13	2,24	19
3,09	10	3,11	16	2,51	11
3,46	22	3,47	22	3,17	23
4,18	17	4,15	16	3,47	18
Total Durasi (s)	138	Total Durasi (s)	136	Total Durasi (s)	146
Rata-rata	17,3	Rata-rata	17,0	Rata-rata	18,3
Durasi 1 Step <i>Weld Bead</i> dalam Model Numerik	5,8	Durasi 1 Step <i>Weld Bead</i> dalam Model Numerik	5,7	Durasi 1 Step <i>Weld Bead</i> dalam Model Numerik	6,1

Tabel 4.3 Data Hasil Eksperimen pada Panel Bagian *Longitudinal Stiffener*

Variasi 1 (Lurus)		Variasi 2 (Simetri)		Variasi 3 (Loncat)	
Menit	Durasi (s)	Menit	Durasi (s)	Menit	Durasi (s)
4,48	15	4,55	14	4,12	16
5,13	10	5,17	11	4,40	11
5,43	15	5,49	14	5,08	15
6,08	10	6,17	11	5,32	12
6,37	14	6,47	14	5,57	15
7,05	13	7,15	12	6,24	14
Total Durasi (s)	77	Total Durasi (s)	76	Total Durasi (s)	83

Tabel 4.3 Data Hasil Eksperimen pada Panel Bagian *Longitudinal Stiffener*
(Lanjutan)

Rata-rata	12,8	Rata-rata	12,6667	Rata-rata	13,8
Durasi 1 Step <i>Weld Bead</i> dalam Model Numerik	4,3	Durasi 1 Step <i>Weld Bead</i> dalam Model Numerik	4,2	Durasi 1 Step <i>Weld Bead</i> dalam Model Numerik	4,6

Perhitungan selanjutnya adalah mencari panjang *weld bead* per sekon dan *travel speed* untuk satu *transfersal* dan *longitudinal stiffener weld bead* tiap variasi urutan pengelasan. Panjang *weld bead* per sekon dapat dihitung dengan persamaan (4.2). Sedangkan *travel speed* didapat dari persamaan (4.3). Untuk lebih jelasnya akan dijelaskan Tabel 4.4 dan 4.5 berikut.

$$\text{Panjang } weld \text{ bead per sekon} = \frac{\text{Panjang Satu Step Weld Bead}}{\text{Durasi Satu Step Weld Bead}} \quad (4.2)$$

$$\text{Travel Speed} = \frac{\text{Panjang Total Lasan}}{\text{Total Durasi Pengelasan}} \quad (4.3)$$

Tabel 4.4 Panjang Weld Bead per Sekon dan *Travel Speed* Untuk Satu *Transfersal Stiffener Weld Bead* Tiap Variasi Urutan Pengelasan

Variasi	Total Durasi Pengelasan (Sekon)	Panjang Satu Step <i>Weld Bead</i> (mm)	Waktu Satu Step <i>Weld Bead</i> (Sekon) (t)	Panjang <i>Weld Bead</i> per sekon (mm)	Panjang Total Lasan (mm)	<i>Travel Speed</i> (mm/s) (v)
1	138,0	48,67	5,8	8,5	1168,1	8,5
2	136,0		5,7	8,6		8,6
3	146,0		6,1	8,0		8,0

Tabel 4.5 Panjang Weld Bead per Sekon dan *Travel Speed* Untuk Satu *Longitudinal Stiffener Weld Bead* Tiap Variasi Urutan Pengelasan

Variasi	Total Durasi Pengelasan (Sekon)	Panjang Satu Step <i>Weld Bead</i> (mm)	Waktu Satu Elemen (Sekon) (t)	Panjang <i>Weld Bead</i> per sekon (mm)	Panjang Total Lasan (mm)	<i>Travel Speed</i> (mm/s) (v)
1	77	42,67	4,3	10,0	768,1	10,0

Tabel 4.5 Panjang Weld Bead per Sekon dan *Travel Speed* Untuk Satu *Longitudinal Stiffener Weld Bead* Tiap Variasi Urutan Pengelasan (Lanjutan)

Variasi	Total Durasi Pengelasan (Sekon)	Panjang Satu Step Weld Bead (mm)	Waktu Satu Elemen (Sekon) (t)	Panjang Weld Bead per sekon (mm)	Panjang Total Lasan (mm)	<i>Travel Speed</i> (mm/s) (v)
2	76	42,67	4,2	10,1	768,1	10,1
3	83		4,6	9,3		9,3

Luasan *weld bead* (A_{wb}) yang dilalui *heat flux* selama 1 detik didapatkan dari persamaan (4.4) berikut. Lebih jelasnya akan ditunjukkan Tabel 4.6 berikut.

Luasan *weld bead* yang dilalui-

$$\text{heat flux selama 1 detik } (A_{wb}) = \frac{\text{Panjang Weld Bead per Sekon}}{\text{Sisi Miring Weld Bead}} \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} \text{Sisi miring weld bead} &= [(Welding Leg)^2 + (Welding Leg)^2]^{1/2} \\ &= [6^2 + 6^2]^{1/2} \\ &= 8,5 \text{ mm} \end{aligned}$$

Tabel 4.6 Hasil Perhitungan Luasan *Weld Bead* (A_{wb}) yang Dilalui Selama 1 detik

No.	<i>Transfersal Stiffener</i>		<i>Longitudinal Stiffener</i>	
	Panjang Weld Bead per sekon (mm)	A_{wb} Selama 1 detik (mm^2)	Panjang Weld Bead per sekon (mm)	A_{wb} Selama 1 detik (mm^2)
1	8,5	71,9	10,0	84,8
2	8,6	73,0	10,1	85,9
3	8,0	68,0	9,3	78,7

Untuk menghitung *heat input* bersih dapat menggunakan persamaan *heat inpu* (2.1) dan dibagi dengan kecepatan pengelasan (v) seperti pada persamaan (4.5) seperti berikut. Sedangkan hasil perhitungan *heat input* bersih dapat dilihat pada Tabel 4.7.

$$Q = \eta \frac{VI}{v} \quad (4.5)$$

Tabel 4.7 Perhitungan *Heat Input*

Variasi	Efisiensi Elektroda	Voltase (V)	Arus (A)	<i>Transfersal Stiffener</i>		<i>Longitudinal Stiffener</i>	
				Travel Speed (mm/s)	Heat Input (Watt)	Travel Speed (mm/s)	Heat Input (Watt)
1	0,8	18	160	8,5	272,2	10,0	231,0
2				8,6	268,3	10,1	228,0
3				8,0	288,0	9,3	249,0

Sehingga untuk menghitung *heat flux* (q) dengan membagi *heat input* bersih (Q) dengan luasan *weld bead* (A_{wb}) yang dilalui selama 1 detik seperti persamaan 2.3. Hasil perhitungan *heat flux* ditunjukkan pada Tabel 4.8 berikut.

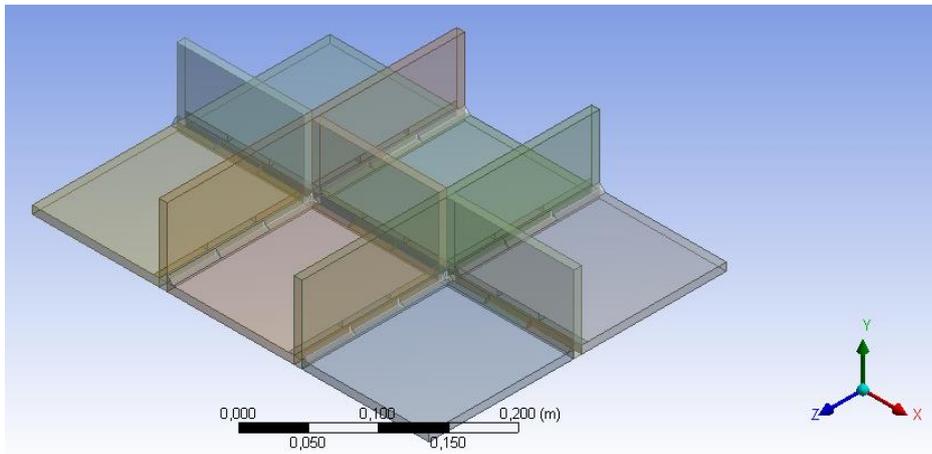
Tabel 4.8 Hasil Perhitungan *Heat Flux*

Variasi	<i>Transfersal Stiffener</i>			<i>Longitudinal Stiffener</i>		
	Heat Input (Watt)	Awb Selama 1 detik (mm ²)	Heat Flux (Watt/mm ²)	Heat Input (Watt)	Awb Selama 1 detik (mm ²)	Heat Flux (Watt/mm ²)
1	272,2	71,9	3,8	231,0	84,8	2,7
2	268,3	73,0	3,7	228,0	85,9	2,7
3	288,0	68,0	4,2	249,0	78,7	3,2

Dari perhitungan diatas diketahui beban *heat flux* yang dikenakan tiap step. Selain itu, dalam pemodelan numerik juga menentukan kondisi batas. Kondisi batas ini digunakan dikarenakan permukaan pelat dan udara bebas terjadi kontak langsung. Model dari kondisi batas ini berupa konveksi. Untuk itu harus digunakan koefisien untuk memasukkan faktor konveksi dalam pemodelan. Koefisien yang dimasukkan untuk memodelkan faktor konveksi berupa *Film Coefficient* dan *Bulk Temperature*. *Film Coefficient* adalah koefisien faktor konveksi yang terjadi antara logam yang mengalami proses pemanasan dan udara bebas. Menurut Sutekat (2018), konveksi yang digunakan untuk pengelasan baja ASTM A36 adalah $1,5 \times 10^{-5} \text{ W/mm}^\circ\text{C}$. Sedangkan *Bulk Temperature* adalah temperatur ruang yang terjadi saat proses pengelasan yaitu sebesar 23°C .

4.3.2 Input Hasil Geometri dari SolidWorks ke ANSYS

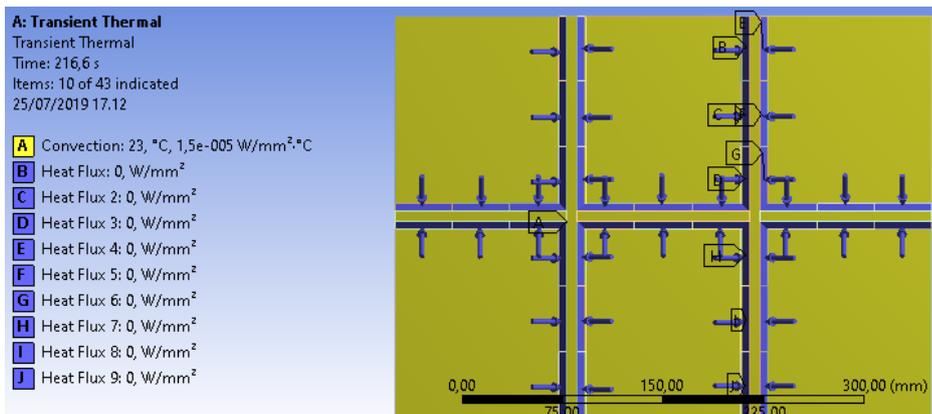
Geometri yang telah dibuat pada *software CAD (Computer Aided Design)* seperti SolidWorks dapat langsung diimpor menuju ANSYS dengan menyesuakannya menjadi format (.igs). Impor dilakukan dalam *Design Modeler* di *Project Schematic*, kemudian di-*generate*. Gambar 4.5 menunjukkan hasil impor geometri yang telah dilakukan.



Gambar 4.5 Hasil Impor Geometri

4.3.3 Lokasi Pembebanan *Heat Flux*

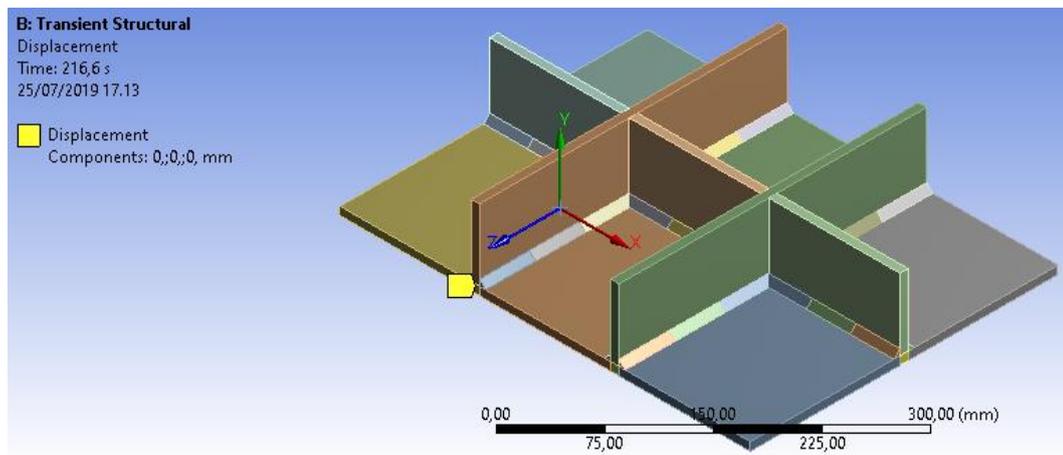
Heat flux yang merupakan beban pada analisis *transient thermal* diletakkan pada 42 step sepanjang *weld bead*. *Magnitude* yang digunakan adalah durasi satu step *weld bead* pada model numerik yang telah dijelaskan pada Tabel 4.2 dan 4.3. Gambar 4.6 menunjukkan hasil dari pembebanan pada analisis *transient thermal*.



Gambar 4.6 Lokasi Pembebanan pada Analisis *Transient Thermal*

4.3.4 Boundary Condition

Pada model numerik, digunakan *boundary condition* untuk menggambarkan kondisi di lapangan. Sebelum proses pengelasan dikakukan *tack weld* untuk menahan pelat dan *stiffener*. Untuk itu perlu ditambahkan *boundary condition* yang menggambarkan kondisi tersebut. Gambar 4.7 menunjukkan *boundary condition* pada analisis *transient structural*.



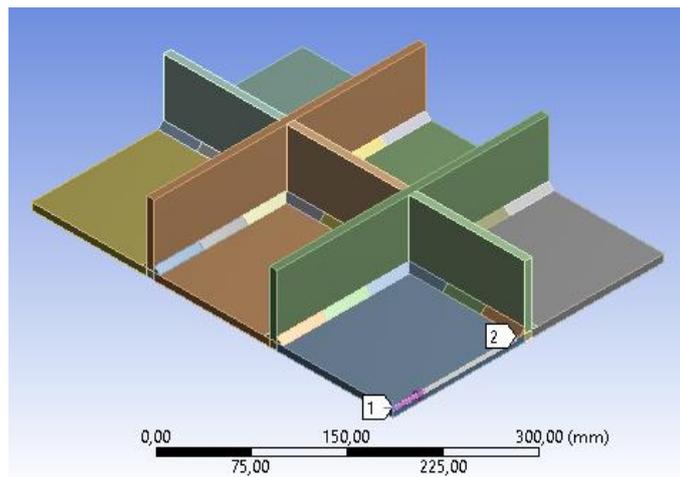
Gambar 4.7 *Boundary Condition* pada Analisis *Transient Structural*

4.3.5 Meshing dan Tipe Elemen

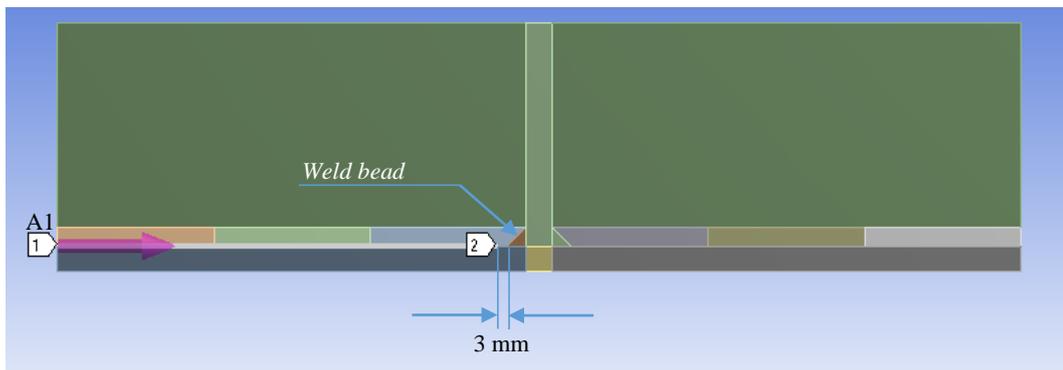
Untuk mendapatkan hasil yang optimal, elemen pada *meshing* diperkecil ukurannya pada tiap bagian yang berdekatan dengan *weld bead*. Sehingga akan menghasilkan ketelitian yang lebih baik dibandingkan *meshing* dengan elemen yang seragam pada seluruh geometri. Elemen yang digunakan untuk analisis *transient thermal* adalah jenis Solid 70 yang memiliki bentuk tertrahedral. Elemen Solid 70 dipilih karena dapat menghantarkan panas dan secara otomatis dapat digunakan pada analisis *transient structural*. Selain itu, jumlah *node* yang sedikit akan mempercepat waktu solusi. Sedangkan pada analisis *transient structural* digunakan elemen solid 185 yang memiliki kemampuan plastisitas dan elastisitas yang tinggi serta defleksi dan regangan yang besar.

Untuk menentukan jumlah elemen yang digunakan, maka dilakukan analisis *meshing sensitivity*. Jumlah dan ukuran *meshing* divariasikan hingga mencapai respon struktur berupa distorsi sudut yang cenderung konstan. Sedangkan nilai masukan beban adalah nilai yang tetap. Semakin banyak jumlah elemen, maka akan

semakin memperkecil *error* pada analisis. Namun, hal tersebut akan memberatkan dan memperlama kerja komputer untuk melakukan *solving*. Sehingga, dilakukan analisis *meshing sensitivity* agar menghasilkan nilai *error* yang tidak terlalu besar dan dapat menentukan jumlah elemen yang tepat sesuai dengan analisis yang dilakukan. Titik pengukuran distorsi sudut ditempatkan pada daerah sekitar *weld bead*, tepatnya pada 3 mm di depan *weld bead* dan 137 mm dari titik pengukuran A1 seperti ditunjukkan pada Gambar 4.6. Hasil analisis *meshing sensitivity* dapat dilihat pada Tabel 4.9, Gambar 4.7, serta pada Lampiran C.



(a)

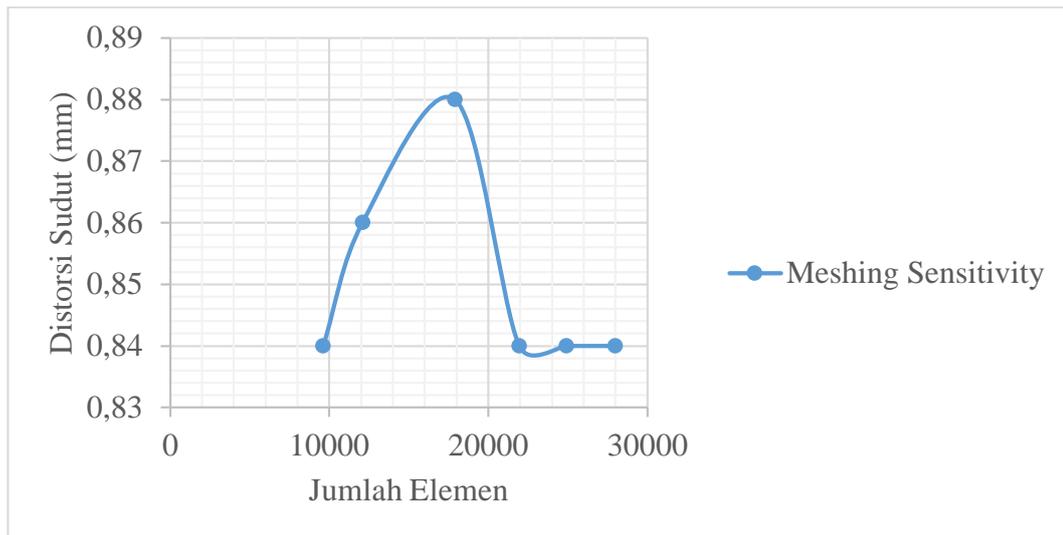


(b)

Gambar 4.8 Titik Pengukuran Distorsi Sudut Pada *Meshing Sensitivity*,
(a) Tampak Isometri; (b) Tampak Samping Kanan

Tabel 4.9 Analisis *Meshing Sensitivity*

Jumlah Elements	Jumlah Nodes	Distorsi Sudut (mm)
9633	24083	0,84
12104	28702	0,86
17907	39076	0,88
21954	47633	0,84
24940	53260	0,84
27989	59286	0,84



Gambar 4.9 Grafik *Meshing Sensitivity*

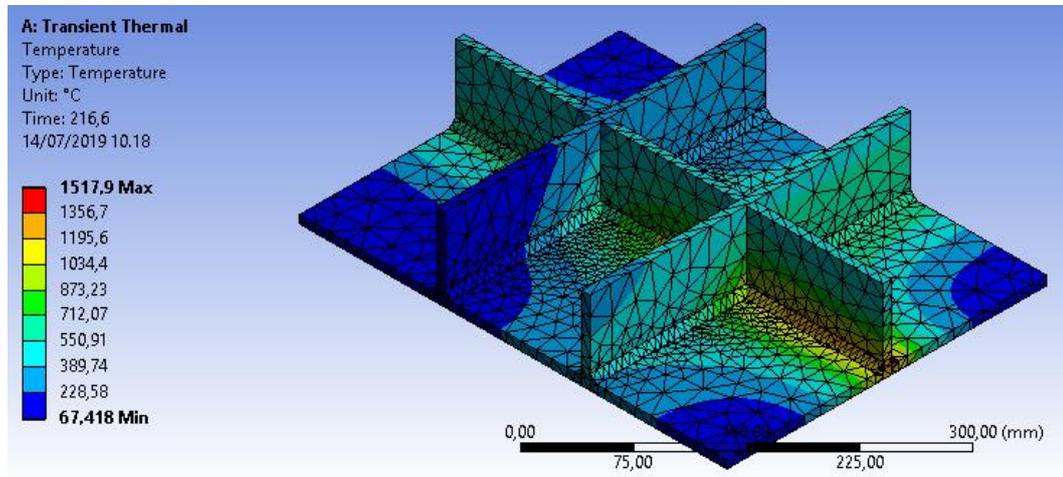
Berdasarkan Tabel 4.9 dan Gambar 4.7 diketahui bahwa pada jumlah elemen 21954 dan jumlah *nodes* 47633 menghasilkan distorsi sudut yang konstan sebesar 0,84 mm. Maka, jumlah elemen dan *nodes* tersebut yang digunakan untuk analisis pada semua variasi urutan pengelasan.

4.3.6 Analisis *Transient Thermal*

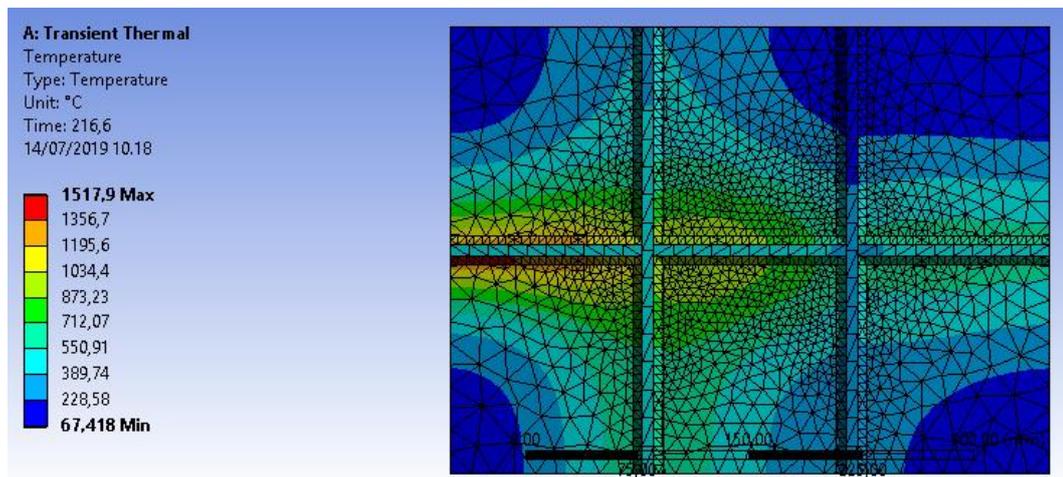
Tahap analisis *transient thermal* dilakukan untuk mengetahui perubahan temperatur berdasarkan fungsi waktu. Hasil pada analisis ini digunakan juga sebagai *load* pada analisis *transient structural*. Proses dan tahapan pada analisis *transient thermal* dijelaskan pada Lampiran B.1.

4.3.6.1 Hasil *Transient Thermal* Variasi Urutan Pengelasan 1 (Lurus)

Hasil analisis *transient thermal* pada variasi urutan pengelasan 1 dengan urutan lurus dapat dilihat pada Gambar 4.8 dan Gambar 4.9 berikut.

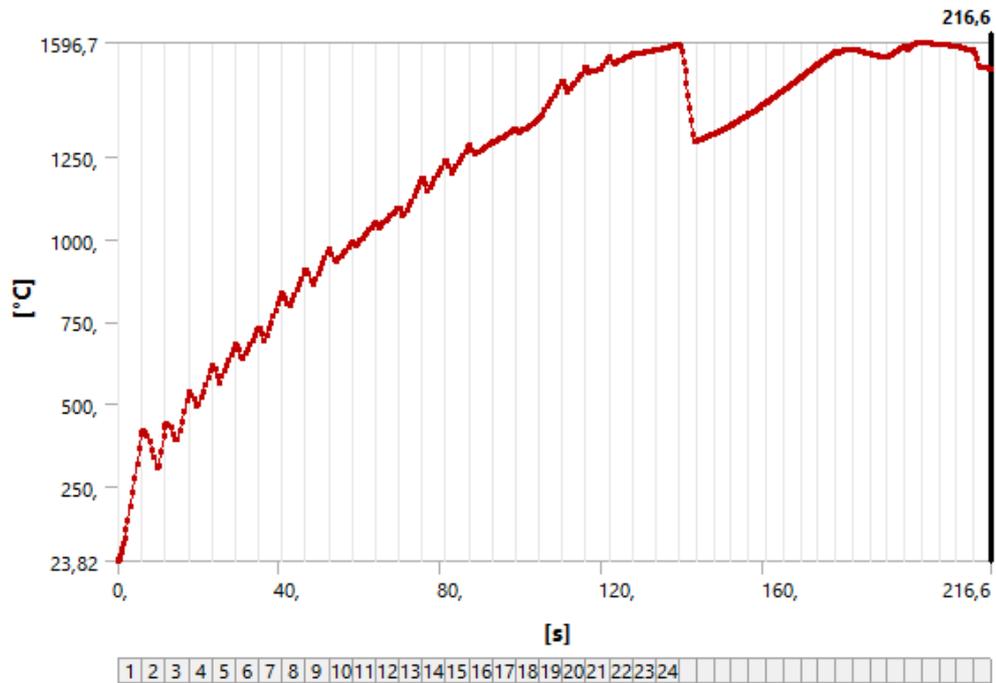


Gambar 4.10 Hasil Analisis *Transient Thermal* Tampak Isometri Variasi 1



Gambar 4.11 Hasil Analisis *Transient Thermal* Tampak Atas Variasi 1

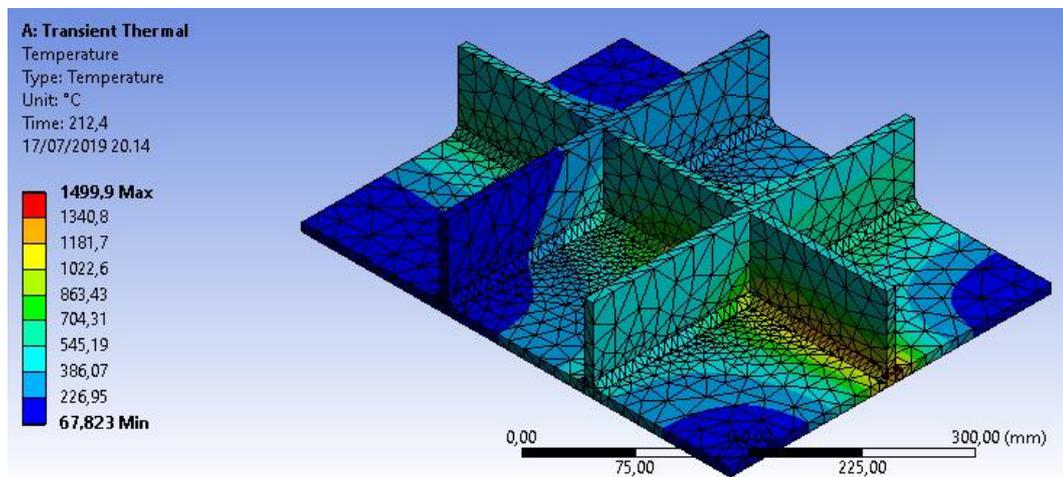
Dari analisis *transient thermal* urutan pengelasan lurus diketahui temperatur puncak pada proses pengelasan sebesar 1517,9 °C. Gambar 4.10 menunjukkan temperatur pada tiap satuan waktu.



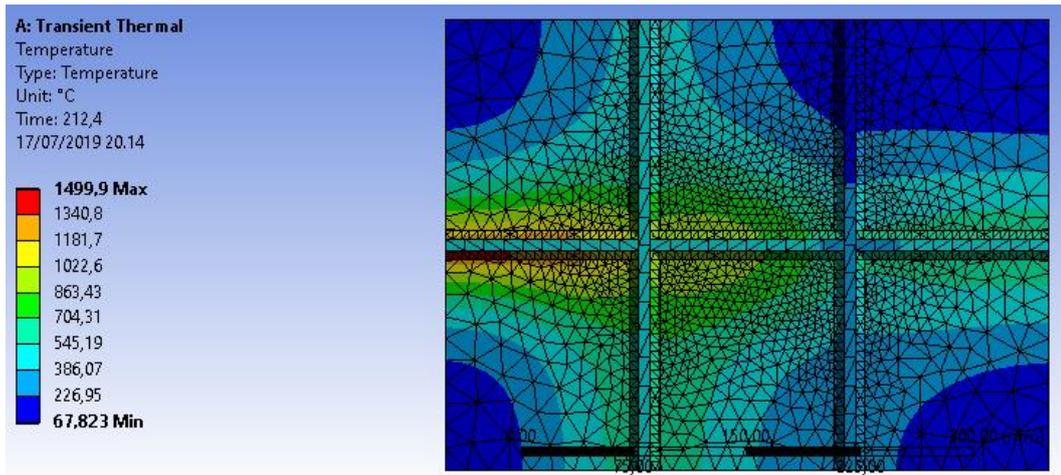
Gambar 4.12 Grafik Temperatur Maksimum Tiap Satuan Waktu pada Variasi 1 (Lurus)

4.3.6.2 Hasil *Transient Thermal* Variasi Urutan Pengelasan 2 (Simetri)

Hasil analisis *transient thermal* pada variasi urutan pengelasan 2 dengan urutan simetri dapat dilihat pada Gambar 4.11 dan Gambar 4.12 berikut.

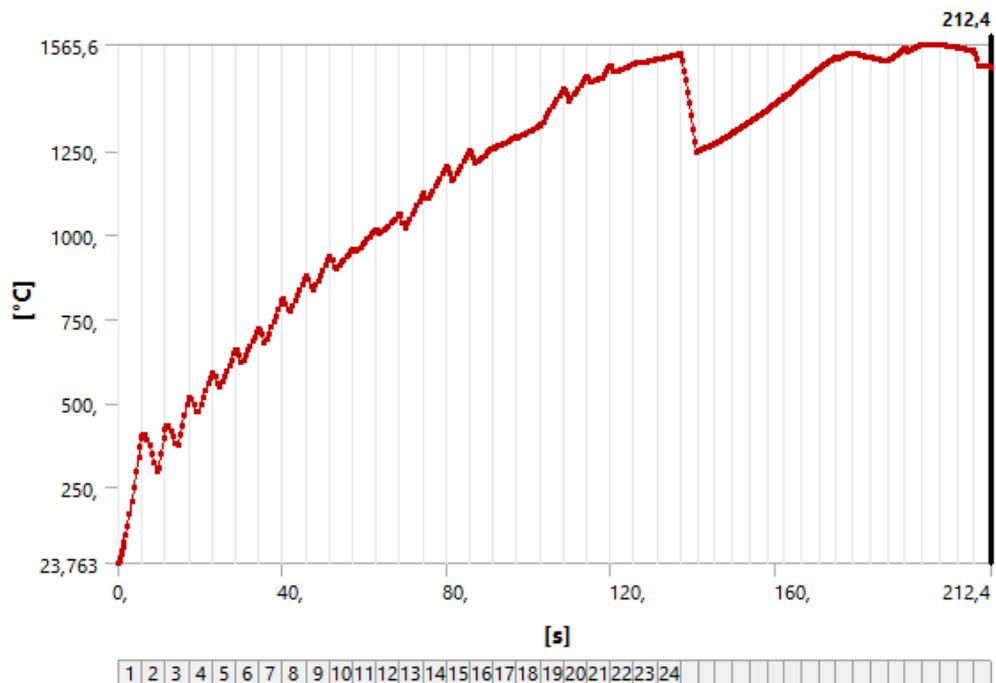


Gambar 4.13 Hasil Analisis *Transient Thermal* Tampak Isometri Variasi 2



Gambar 4.14 Hasil Analisis *Transient Thermal* Tampak Atas Variasi 2

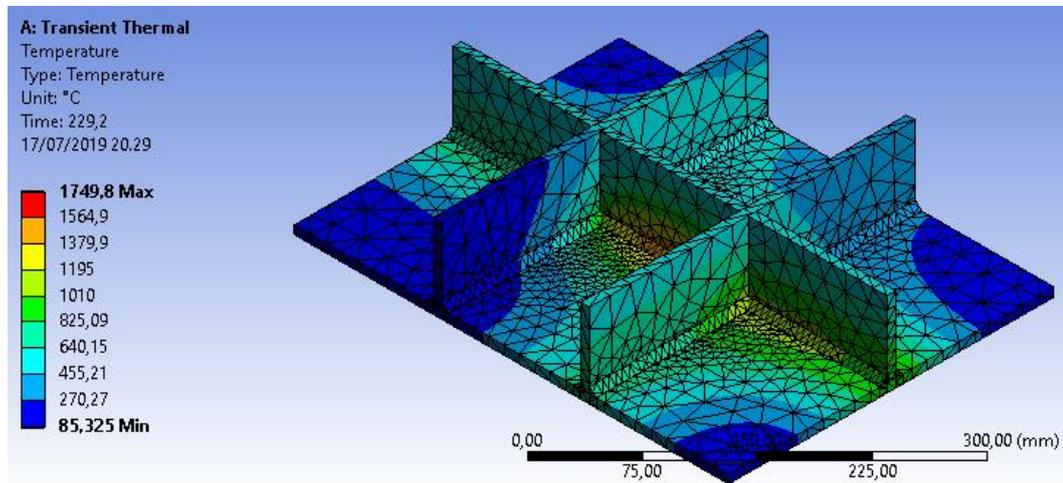
Melalui analisis *transient thermal* urutan pengelasan simetri diketahui temperatur puncak pada proses pengelasan sebesar 1499,9 °C. Gambar 4.13 menunjukkan temperatur pada tiap satuan waktu.



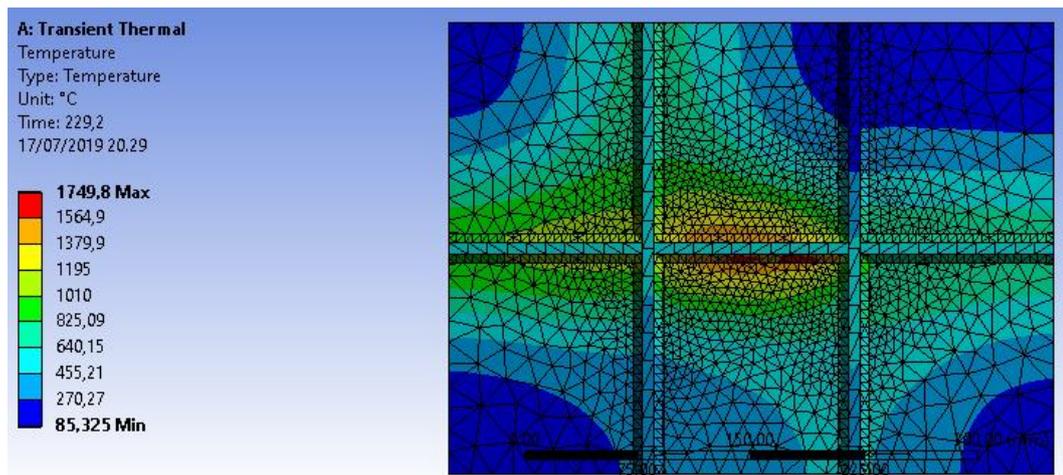
Gambar 4.15 Grafik Temperatur Maksimum Tiap Satuan Waktu pada Variasi 2 (Simetri)

4.3.6.3 Hasil *Transient Thermal* Variasi Urutan Pengelasan 3 (Loncat)

Hasil analisis *transient thermal* pada variasi urutan pengelasan 3 dengan urutan loncat dapat dilihat pada Gambar 4.14 dan Gambar 4.15 berikut.

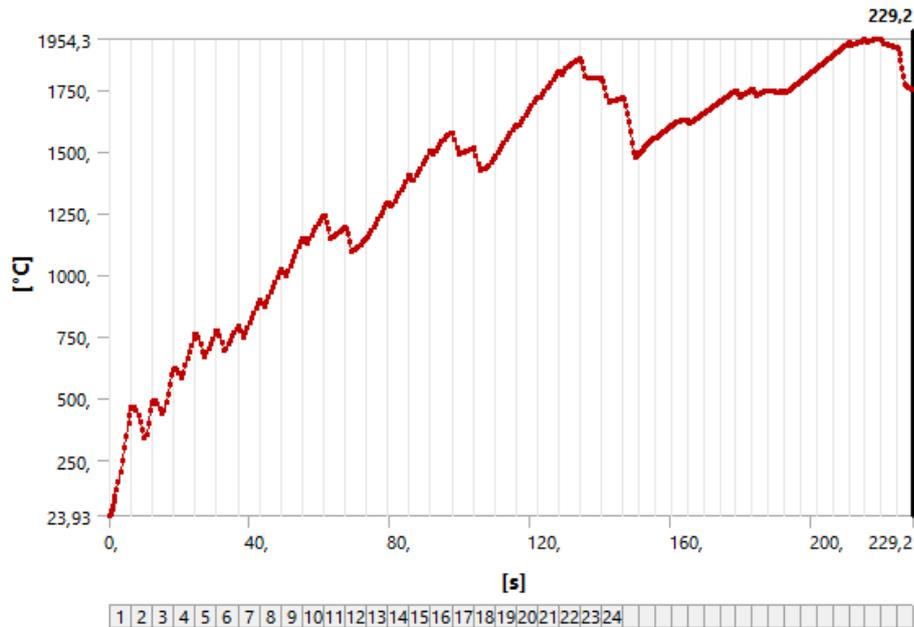


Gambar 4.16 Hasil Analisis *Transient Thermal* Tampak Isometri Variasi 3



Gambar 4.17 Hasil Analisis *Transient Thermal* Tampak Atas Variasi 3

Berdasarkan analisis *transient thermal* urutan pengelasan simetri diketahui temperatur puncak pada proses pengelasan sebesar 1749,8 °C. Gambar 4.16 menunjukkan temperatur pada tiap satuan waktu.



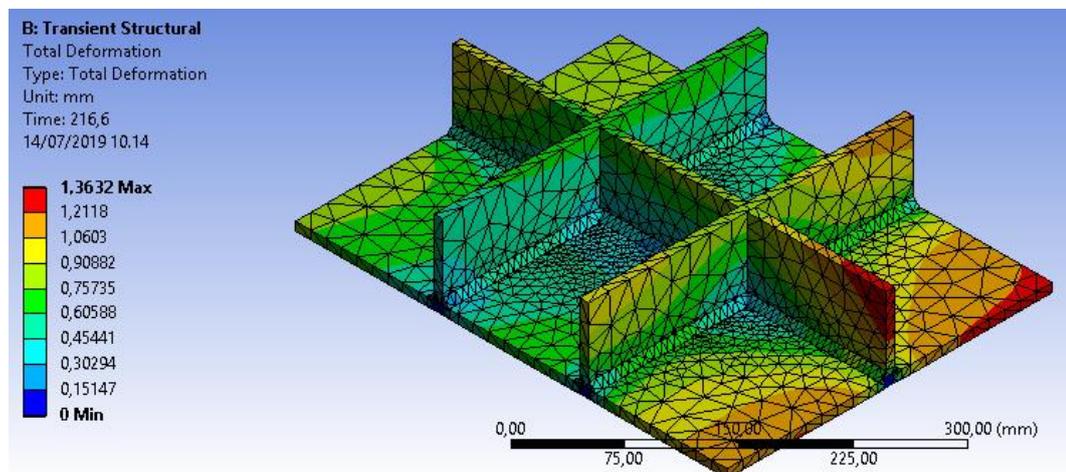
Gambar 4.18 Grafik Temperatur Tiap Satuan Waktu pada Variasi 3 (Loncat)

4.3.7 Analisis *Transient Structural*

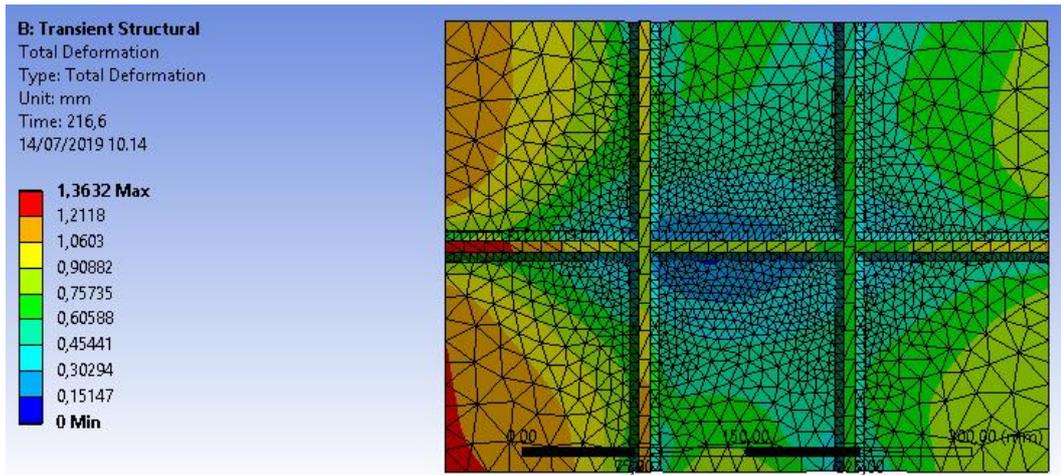
Pada tahap ini dilakukan untuk mengetahui perubahan bentuk pada geometri spesimen uji. Hasil analisis ini menunjukkan perubahan bentuk yang terjadi setelah dilakukan proses pengelasan atau pada waktu terakhir setelah pengelasan. Proses dan tahapan pada analisis *transient structural* dijelaskan pada Lampiran B.2.

4.3.7.1 Hasil *Transient Structural* Variasi Urutan Pengelasan 1 (Lurus)

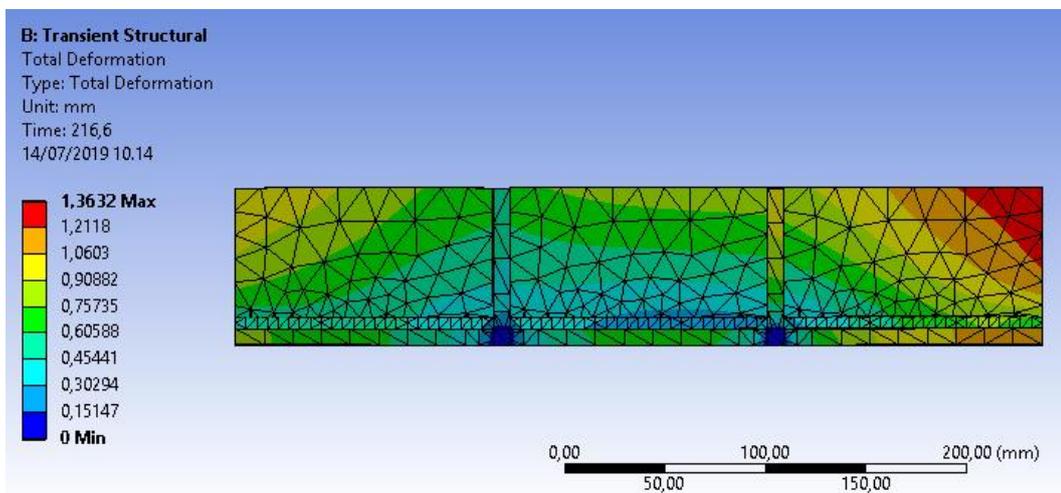
Hasil analisis *transient structural* pada variasi urutan pengelasan 1 dengan urutan lurus dapat dilihat pada Gambar 4.17 hingga Gambar 4.22 berikut.



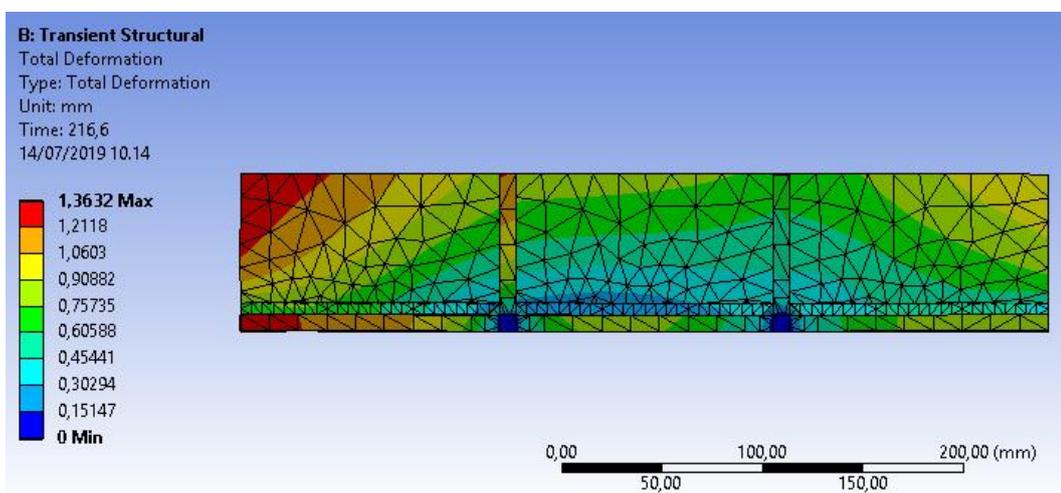
Gambar 4.19 Hasil Analisis *Transient Structural* Tampak Isometri Variasi 1



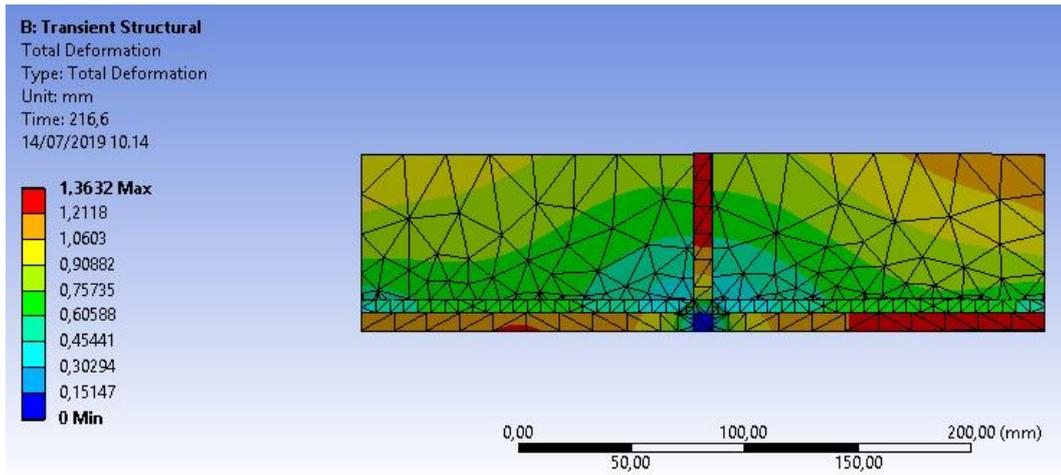
Gambar 4.20 Hasil Analisis *Transient Structural* Tampak Atas Variasi 1



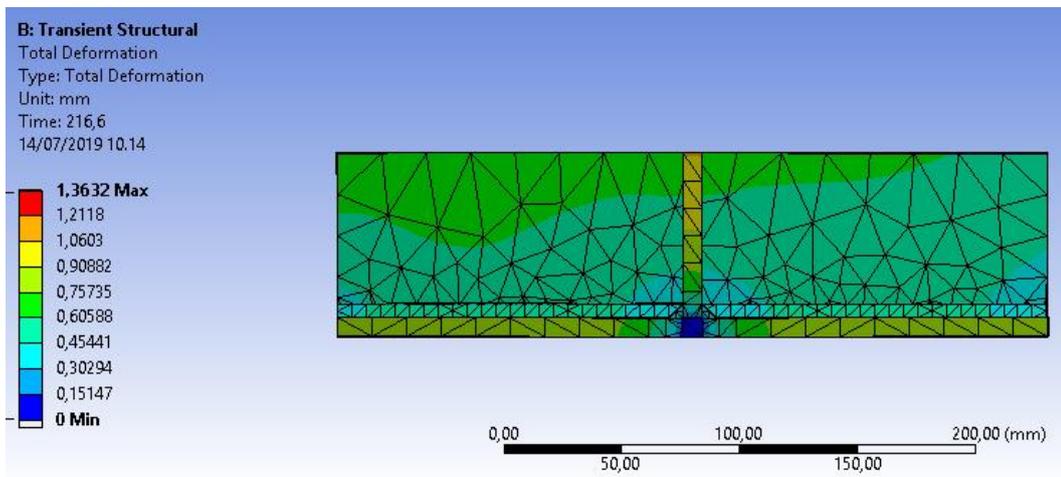
Gambar 4.21 Hasil Analisis *Transient Structural* Tampak Depan Variasi 1



Gambar 4.22 Hasil Analisis *Transient Structural* Tampak Belakang Variasi 1



Gambar 4.23 Hasil Analisis *Transient Structural* Tampak Sisi Kanan Variasi 1



Gambar 4.24 Hasil Analisis *Transient Structural* Tampak Sisi Kiri Variasi 1

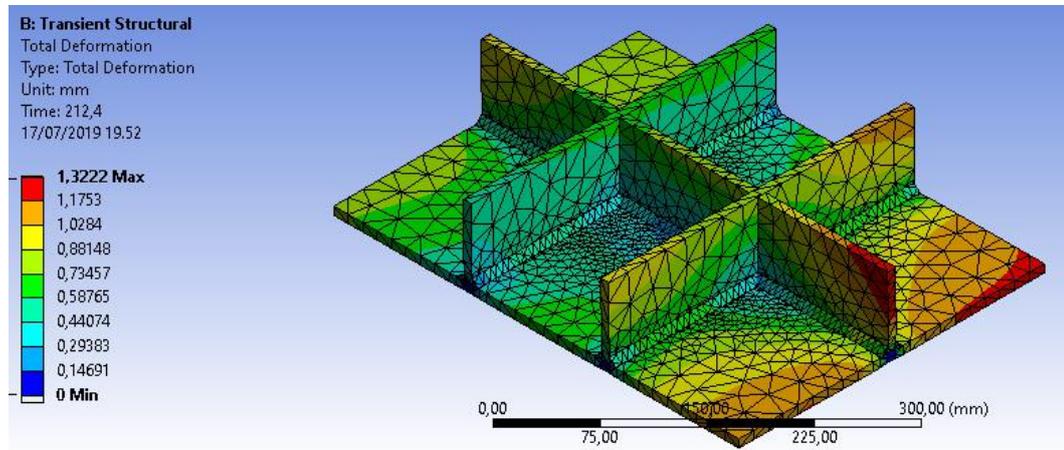
Hasil pengukuran besar distorsi Sudut sudut pada tiap titik pengukuran dapat dilihat pada Tabel 4.10 berikut.

Tabel 4.10 Hasil Pengukuran Distorsi Sudut Variasi 1 (mm)

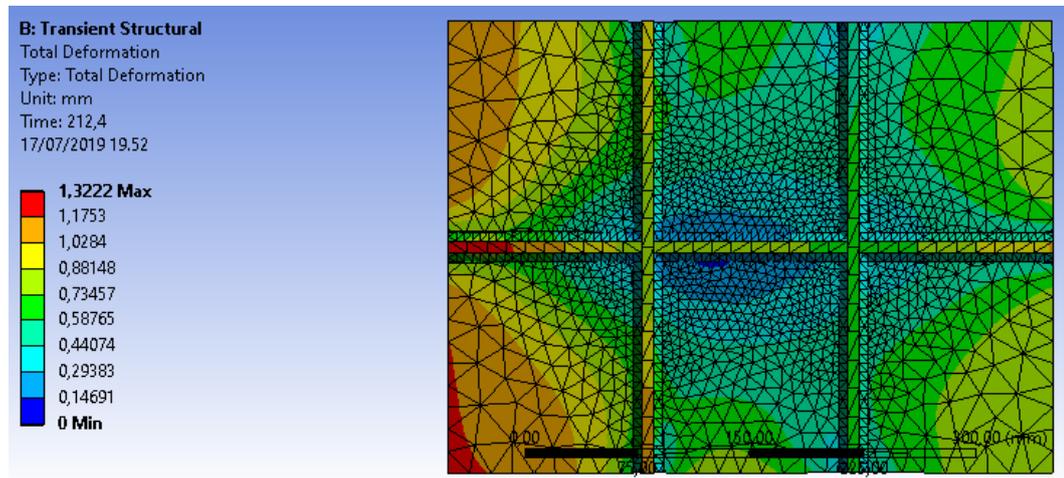
Titik	1	2	3	4
A	0,89	0,90	0,86	0,80
B	0,79	0,76	0,69	0,65
C	0,79	0,52	0,55	0,70
D	1,16	1,04	0,97	1,01
E	1,24	1,22	1,20	1,18
Rata-rata	0,90			

4.3.7.2 Hasil *Transient Structural* Variasi Urutan Pengelasan 2 (Simetri)

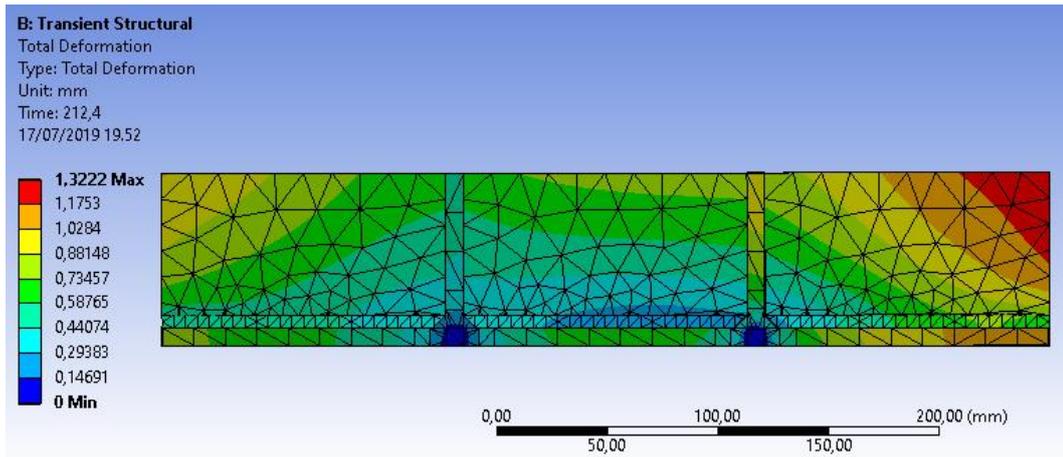
Hasil analisis *transient structural* pada variasi urutan pengelasan 2 dengan urutan simetri dapat dilihat pada Gambar 4.23 hingga Gambar 4.28 berikut.



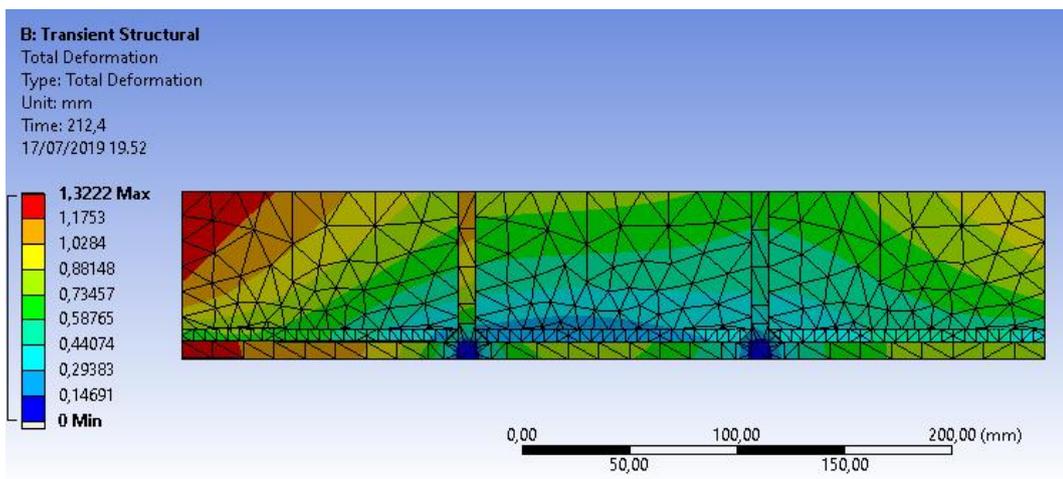
Gambar 4.25 Hasil Analisis *Transient Structural* Tampak Isometri Variasi 2



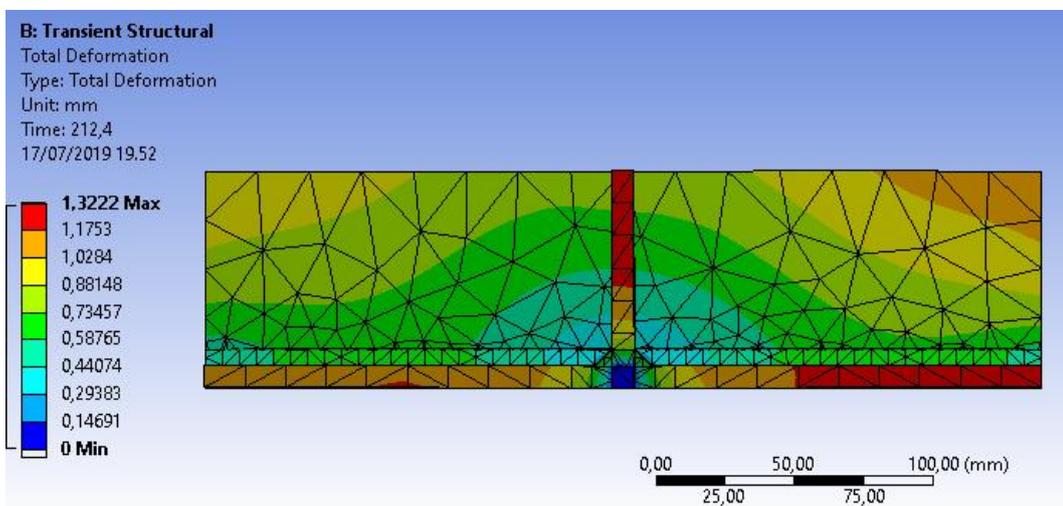
Gambar 4.26 Hasil Analisis *Transient Structural* Tampak Atas Variasi 2



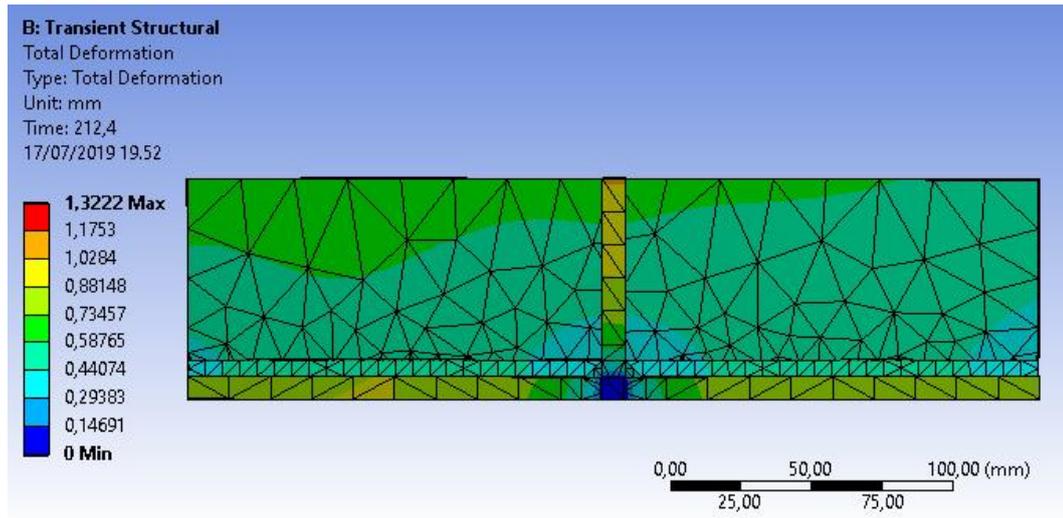
Gambar 4.27 Hasil Analisis *Transient Structural* Tampak Depan Variasi 2



Gambar 4.28 Hasil Analisis *Transient Structural* Tampak Belakang Variasi 2



Gambar 4.29 Hasil Analisis *Transient Structural* Tampak Sisi Kanan Variasi 2



Gambar 4.30 Hasil Analisis *Transient Structural* Tampak Sisi Kiri Variasi 2

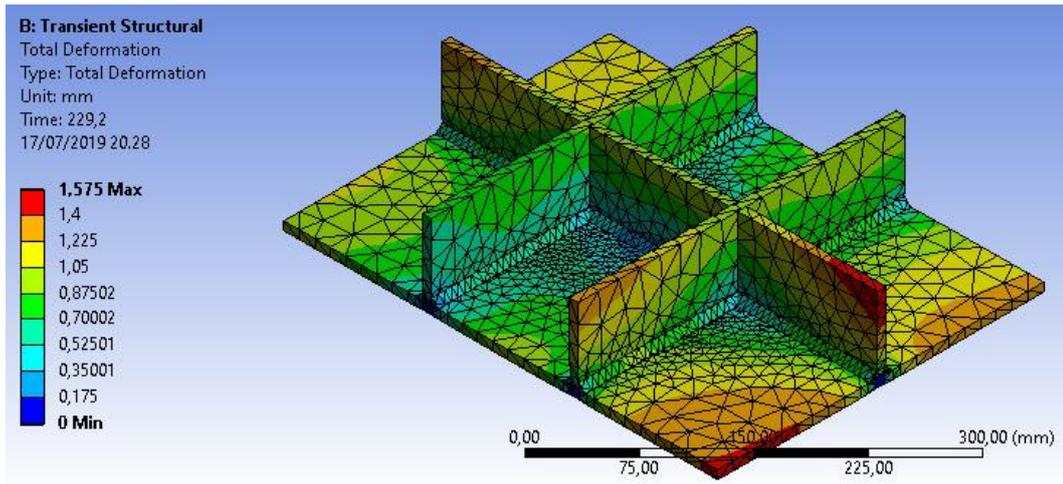
Hasil pengukuran besar distorsi sudut sudut pada tiap titik pengukuran dapat dilihat pada Tabel 4.11 berikut.

Tabel 4.11 Hasil Pengukuran Distorsi Sudut Variasi 2 (mm)

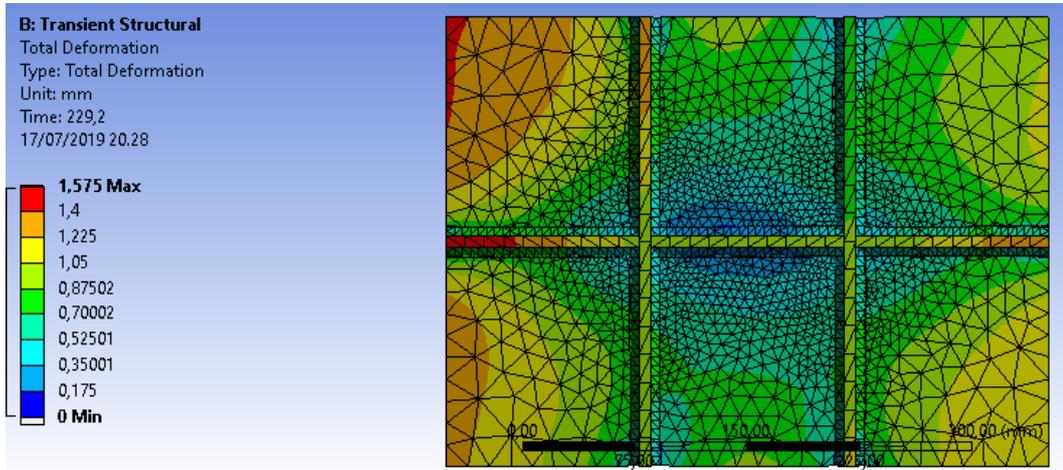
Titik	1	2	3	4
A	0,86	0,88	0,84	0,78
B	0,77	0,73	0,67	0,64
C	0,79	0,50	0,53	0,69
D	1,12	1,01	0,94	0,98
E	1,20	1,18	1,17	1,14
Rata-Rata	0,87			

4.3.7.3 Hasil *Transient Structural* Variasi Urutan Pengelasan 3 (Loncat)

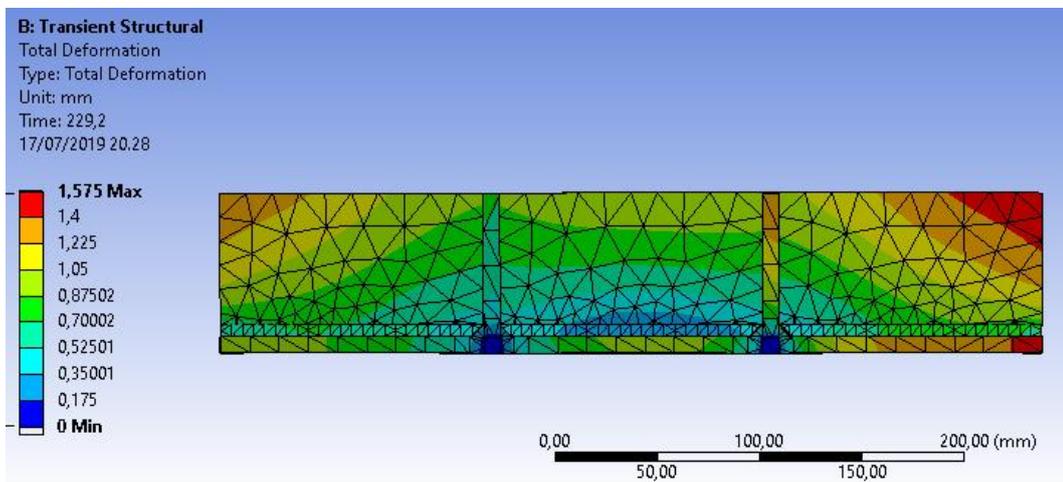
Hasil analisis *transient structural* pada variasi urutan pengelasan 2 dengan urutan simetri dapat dilihat pada Gambar 4.29 hingga Gambar 4.34 berikut.



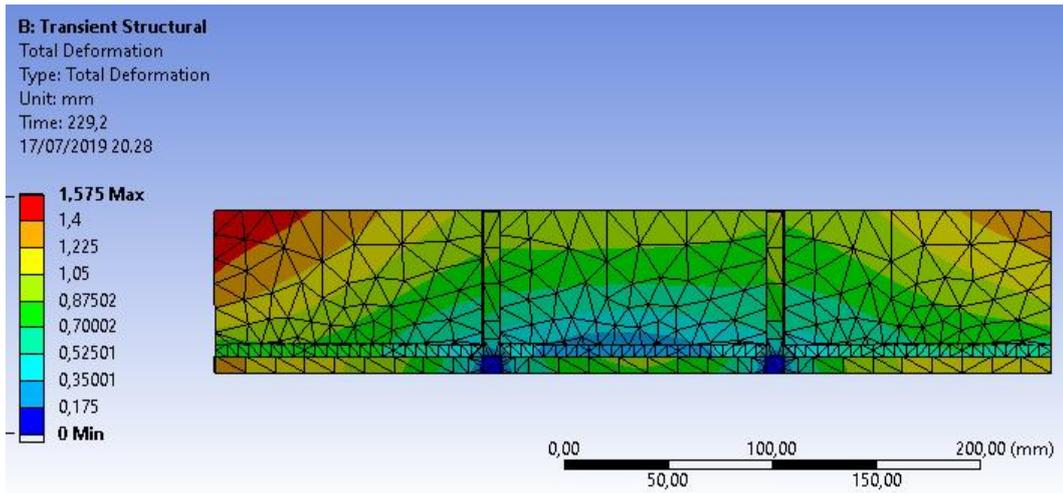
Gambar 4.31 Hasil Analisis *Transient Structural* Tampak Isometri Variasi 3



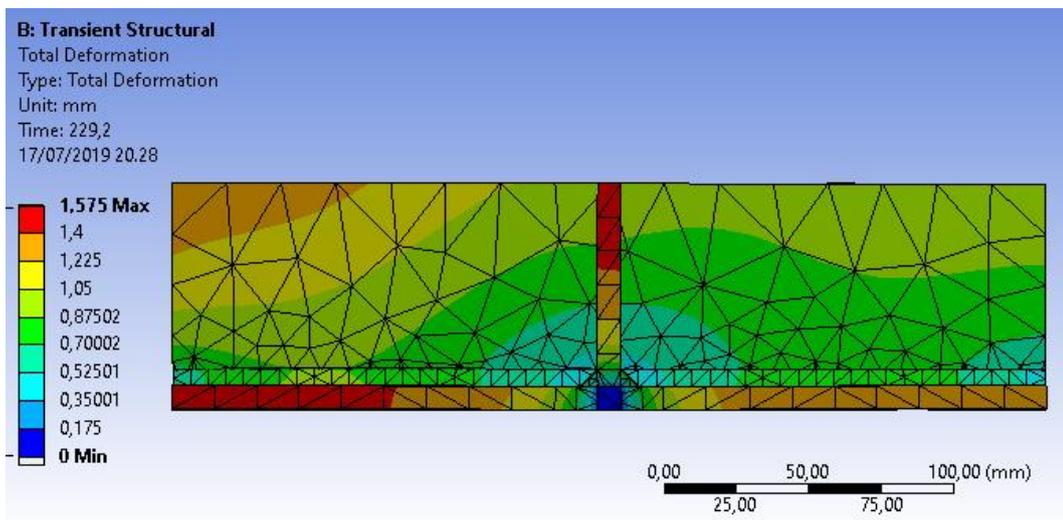
Gambar 4.32 Hasil Analisis *Transient Structural* Tampak Atas Variasi 3



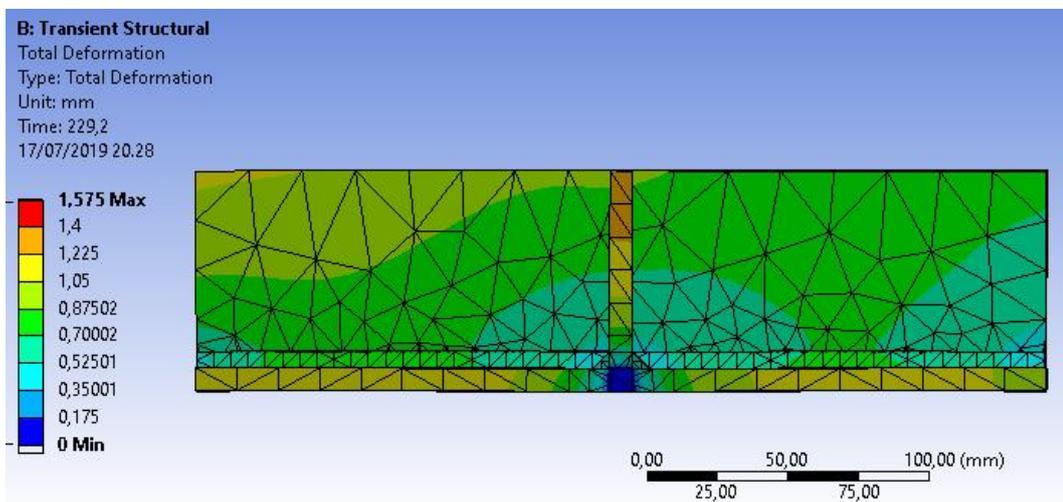
Gambar 4.33 Hasil Analisis *Transient Structural* Tampak Depan Variasi 3



Gambar 4.34 Hasil Analisis *Transient Structural* Tampak Belakang Variasi 3



Gambar 4.35 Hasil Analisis *Transient Structural* Tampak Sisi Kanan Variasi 3



Gambar 4.36 Hasil Analisis *Transient Structural* Tampak Sisi Kiri Variasi 3

Hasil pengukuran besar distorsi sudut pada tiap titik pengukuran dapat dilihat pada Lampiran D, namun telah dirangkum pada Tabel 4.12 berikut.

Tabel 4.12 Hasil Pengukuran Distorsi Sudut Variasi 3 (mm)

Titik	1	2	3	4
A	1,20	1,19	1,10	1,03
B	1,09	1,02	0,90	0,84
C	0,90	0,67	0,68	0,94
D	1,05	1,06	1,21	1,32
E	1,28	1,33	1,40	1,42
Rata-rata	1,08			

4.4 Validasi Hasil Eksperimen dan Pemodelan Numerik

Pada subbab 4.2 dan 4.3 didapatkan hasil pengukuran distorsi sudut melalui eksperimen dan pemodelan numerik. Selanjutnya untuk mengetahui perbandingan hasil dilakukan validasi hasil eksperimen dan model numerik seperti pada Tabel 4.13 dan 4.14 berikut.

Tabel 4.13 Perbandingan Hasil Pengukuran Distorsi Sudut pada Pemodelan Numerik dan Eksperimen

Titik	Variasi 1 (mm)		Variasi 2 (mm)		Variasi 3 (mm)	
	Eksperimen	Pemodelan Numerik	Eksperimen	Pemodelan Numerik	Eksperimen	Pemodelan Numerik
A1	0,75	0,89	0,38	0,86	1,45	1,20
A2	0,59	0,90	0,33	0,88	0,86	1,19
A3	0,66	0,86	0,27	0,84	0,22	1,10
A4	0,96	0,80	0,43	0,78	0,47	1,03
B1	0,58	0,79	0,32	0,77	0,99	1,09
B2	0,54	0,76	0,28	0,73	0,81	1,02
B3	0,65	0,69	0,42	0,67	0,09	0,90
B4	0,7	0,65	0,46	0,64	0,22	0,84
C1	0,1	0,79	0,14	0,79	0,39	0,90
C2	0,31	0,52	0,33	0,50	0,41	0,67
C3	0,37	0,55	0,22	0,53	0,44	0,68
C4	0,08	0,70	0,08	0,69	0,08	0,94
D1	0,23	1,16	0,83	1,12	0,45	1,05
D2	0,21	1,04	0,57	1,01	0,41	1,06
D3	0,41	0,97	0,49	0,94	0,64	1,21

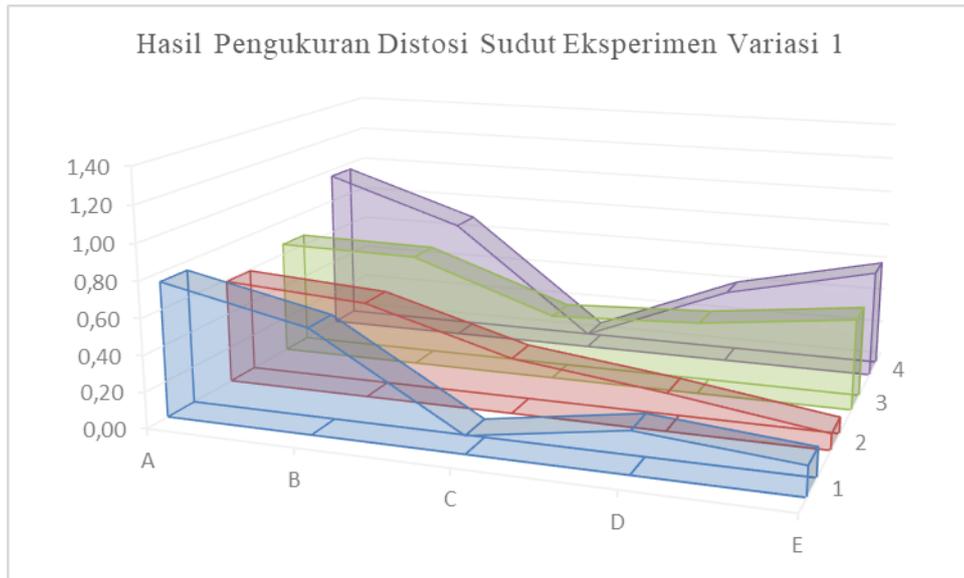
Tabel 4.13 Perbandingan Hasil Pengukuran Distorsi Sudut pada Pemodelan Numerik dan Eksperimen (Lanjutan)

Titik	Variasi 1 (mm)		Variasi 2 (mm)		Variasi 3 (mm)	
	Eksperimen	Pemodelan Numerik	Eksperimen	Pemodelan Numerik	Eksperimen	Pemodelan Numerik
D4	0,42	1,01	0,53	0,98	0,76	1,32
E1	0,16	1,24	0,82	1,20	0,8	1,28
E2	0,09	1,22	0,65	1,18	0,45	1,33
E3	0,51	1,20	0,53	1,17	0,69	1,40
E4	0,61	1,18	0,75	1,14	0,83	1,42

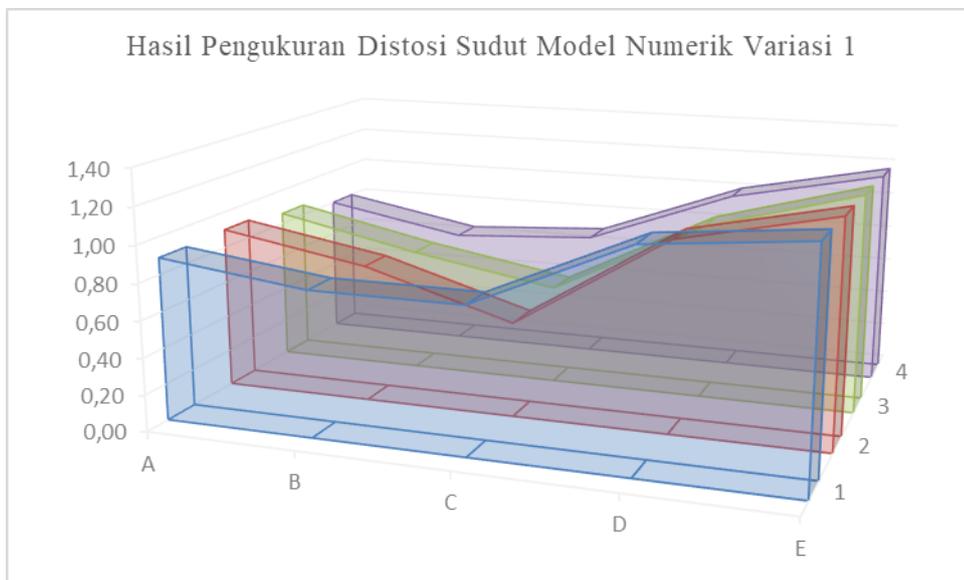
Tabel 4.14 Perbandingan Rata-rata dan Selisih Hasil Eksperimen dan Pemodelan Numerik

No.	Variasi Urutan	Distorsi Sudut Eksperimen (mm)	Distorsi Sudut Pemodelan Numerik (mm)	Selisih Distorsi Sudut (mm)
1	Lurus	0,45	0,90	0,45
2	Simetri	0,44	0,87	0,43
3	Loncat	0,57	1,08	0,51

Berdasarkan Tabel 4.13 dan 4.14 diketahui bahwa hasil eksperimen dan pemodelan numerik hanya memiliki selisih 0,45 mm; 0,43 mm; dan 0,51 mm. Sehingga dapat dikatakan pemodelan numerik memiliki hasil yang valid. Secara visual perbandingan tren perubahan bentuk antara eksperimen dan pemodelan numerik dapat lebih jelas dilihat pada Gambar 4.35; 4.36; dan 4.37 berikut.

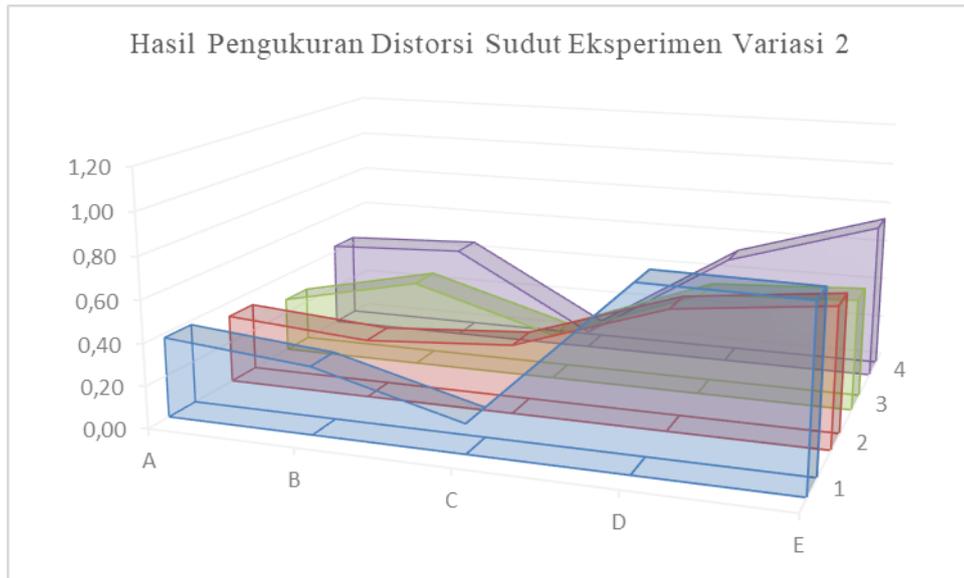


(a)

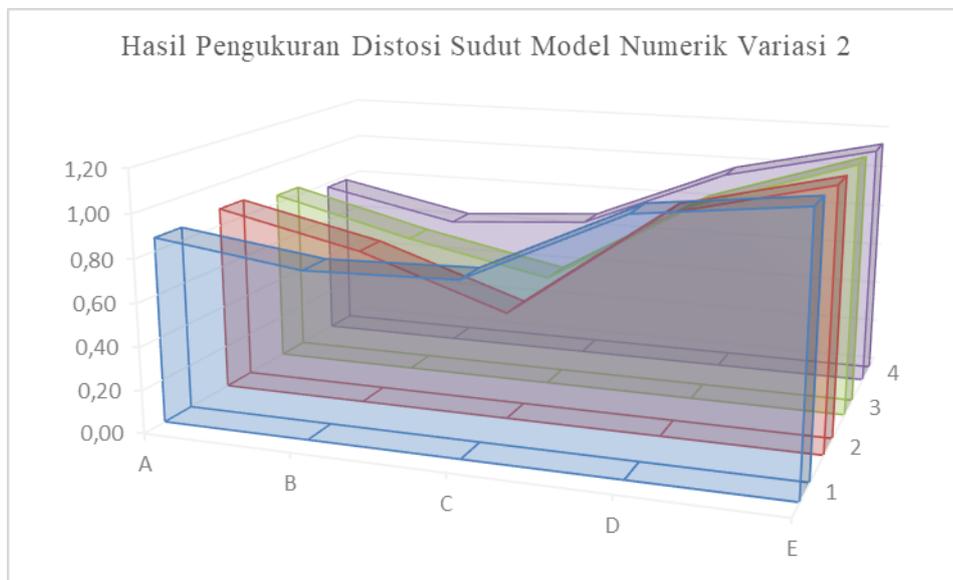


(b)

Gambar 4.37 Grafik Pengukuran Distorsi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 1 (Lurus); (a) Eksperimen, (b) Pemodelan Numerik

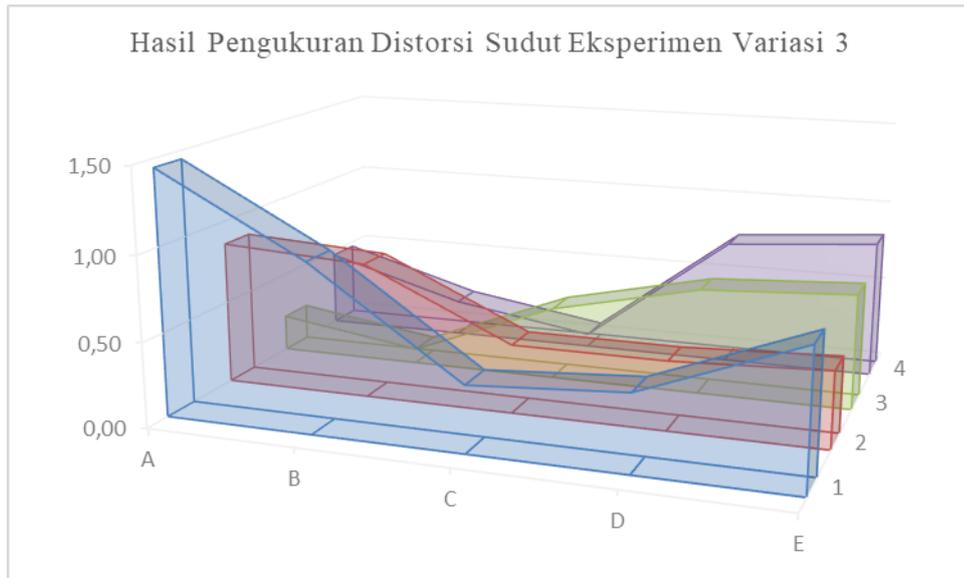


(a)

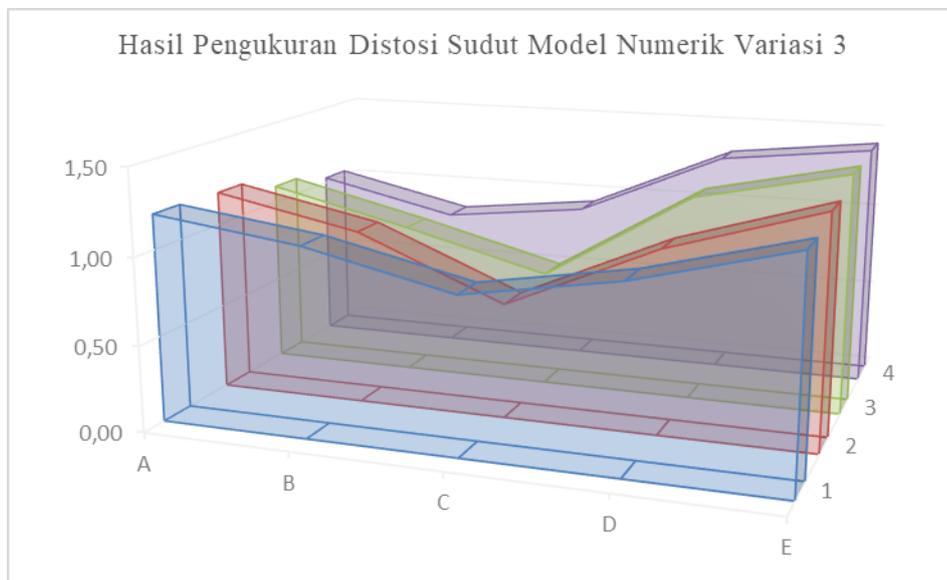


(b)

Gambar 4.38 Grafik Pengukuran Distorsi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 2 (Simetri); (a) Eksperimen, (b) Pemodelan Numerik



(a)



(b)

Gambar 4.39 Grafik Pengukuran Distorsi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 3 (Loncat); (a) Eksperimen, (b) Pemodelan Numerik

4.5 Analisis Hasil

Kemampuan dari juru las dan kondisi lingkungan tempat dilakukannya pengelasan sangat mempengaruhi hasil eksperimen pengelasan. Selain itu kondisi kelelahan juru las juga memungkinkan hasil yang tidak diharapkan pada spesimen uji. Untuk memastikan hasil eksperimen sesuai, maka dilakukan analisis numerik

menggunakan *software* berbasis elemen hingga. Berdasarkan validasi pengukuran distorsi sudut dari hasil eksperimen dan pemodelan numerik diketahui bahwa urutan pengelasan 2 (simetri) menghasilkan rata-rata distorsi sudut yang terkecil, yaitu sebesar 0,44 mm pada eksperimen dan 0,87 mm pada hasil pemodelan numerik. Rata-rata tersebut lebih kecil jika dibandingkan urutan pengelasan 1 (lurus) yang memiliki rata-rata 0,45 mm pada eksperimen dan 0,90 mm pada hasil pemodelan numerik. Sedangkan urutan pengelasan 3 (loncat) menghasilkan rata-rata distorsi sudut terbesar yaitu 0,45 mm pada eksperimen dan 0,90 mm pada hasil pemodelan numerik.

Urutan pengelasan simetri menghasilkan distorsi sudut terkecil dikarenakan termal yang menyebar pada material lebih rendah dibandingkan variasi lain. Urutan pengelasan simetri menghasilkan temperatur puncak sebesar 1499,9 °C, lebih kecil dibandingkan urutan pengelasan lurus dengan temperatur puncak sebesar 1517,9 °C dan loncat yang memiliki temperatur puncak sebesar 1749,8. Hal tersebut dikarenakan setelah selesai proses pengelasan pada satu sisi *stiffener* dilanjutkan dengan memulai pengelasan di sisi balik dari *stiffener* dengan titik mulai yang sama dengan sisi *stiffener* awal. Efeknya, pengembangan termal menjadi lebih rendah dan bagian yang lebih dingin tidak banyak menghalangi pengembangan.

Dalam proses terjadinya tegangan sisa, daerah yang dilas akan mengembang pada waktu pengelasan. Pengembangan daerah lasan akan ditahan daerah yang lebih dingin, sehingga daerah lasan mengalami tegangan tekan dan daerah yang lebih dingin mengalami tegangan tarik. Pada saat pengelasan selesai, terjadi proses pendinginan dimana daerah lasan menyusut cukup besar. Penyusutan ini akan ditahan oleh daerah yang lebih dingin. Dengan kata lain, tegangan tarik pada daerah lasan akan diimbangi tegangan tekan pada daerah yang lebih dingin. Sehingga, sedikitnya regangan termal di antara logam las dan logam induk pada daerah jalur las menjadikan tegangan sisa yang muncul tidaklah besar. Tegangan yang dihasilkan dari regangan ini akan menyebabkan gaya dalam (*internal force*) sehingga terjadi distorsi sudut.

Selain karena temperatur pemanasan, kecilnya hasil distorsi sudut juga disebabkan oleh adanya pengekanan atau *restrain*. *Restrain* dalam penelitian ini merupakan *stiffener* yang berada di plat berupa 2 *transfersal stiffener* dan 1

longitudinal stiffener seperti pada Gambar 4.3. Banyaknya jumlah *stiffener* menjadikan distorsi sudut yang terjadi semakin kecil. Sehingga, disimpulkan bahwa variasi urutan pengelasan 2 secara simetri menghasilkan distorsi sudut yang terkecil dikarenakan temperatur puncak yang lebih rendah dibandingkan variasi urutan pengelasan 1 secara lurus dan variasi urutan pengelasan 3 secara loncat. Selain itu, adanya *stiffener* yang besimpangan juga memperkecil terjadinya distorsi sudut.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Setelah dilakukan studi numerik dan eksperimen mengenai pengaruh urutan pengelasan pada panel baja ASTM A36 dengan pengelasan FCAW (*Flux Core Arc Welding*), maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Melalui eksperimen pada kondisi riil didapatkan rata-rata distorsi sudut pada variasi urutan pengelasan 1 (lurus) sebesar 0,45 mm, variasi urutan pengelasan 2 (simetri) sebesar 0,44 mm, dan variasi urutan pengelasan 3 (loncat) sebesar 0,57. Pemodelan numerik menggunakan definisi material linear-elastik menghasilkan rata-rata distorsi sudut sebesar 0,90 mm pada variasi urutan pengelasan 1 (lurus), 0,87 mm pada variasi urutan pengelasan 2 (simetri), dan 1,08 mm pada variasi urutan pengelasan 3 (loncat).
2. Berdasarkan validasi hasil eksperimen dan pemodelan numerik, diketahui bahwa variasi urutan pengelasan 2 secara simetri menghasilkan rata-rata distorsi sudut yang terkecil. Hal tersebut dikarenakan temperatur puncak yang lebih rendah dibandingkan variasi urutan pengelasan 1 secara lurus dan variasi urutan pengelasan 3 secara loncat. Selain itu, adanya *stiffener* yang besimpangan juga memperkecil terjadinya distorsi sudut. Namun hasil pemodelan numerik masih belum sempurna dikarenakan masih mendefinisikan material sebagai linear-elastik. Kedepannya diharapkan dapat dikembangkan menggunakan definis material elastik-plastik.

5.2 Saran

Hasil penelitian tugas akhir ini diharapkan dapat menjadi acuan untuk pemilihan urutan pengelasan untuk pengelasan panel baja ASTM A36 dengan FCAW (*Flux Core Arc Welding*). Dalam tugas akhir ini masih terdapat beberapa kekurangan, oleh karena itu jika dilakukan studi lanjutan tentang bidang terkait, penulis memberikan beberapa saran sebagai berikut:

1. Menggunakan *plasma cutting* saat pemotongan material, sehingga material tidak mendapat paparan panas yang terlalu lama seperti jika menggunakan *oxy acetylene cutting*. Karena paparan panas yang terlalu lama dapat menyebabkan deformasi dan perubahan sifat mekanis pada material.
2. Mengukur kerataan material uji sebelum proses pengelasan, dan memastikan material dalam kondisi rata.
3. Menambahkan variasi urutan pengelasan lain yang belum pernah digunakan dalam proses fabrikasi.
4. Memperbesar ukuran spesimen uji.
5. Hasil pemodelan numerik pada penelitian ini dapat digunakan sebagai referensi untuk menggunakan definisi material elastik-plastik pada penelitian berikutnya.

DAFTAR PUSTAKA

- ANSYS. (2013). *ANSYS Mechanical APDL Element Reference-Release 15.0*. USA: ANSYS Inc.
- ASTM. (1999). *Standard Specification for Carbon Structural Steel*. USA: ASTM International.
- Company, L. E. (1973). *The Procedure Handbook of Arc Welding Twelfth Edition*. Ohio: The Lincoln Electric Company.
- Gannon, L., Liu, Y., Pegg, N., & Smith, M. (2010). Effect of Welding Sequence on Residual Stress and Distortion in Flat-Bar Stiffened Plates. *Elsevier: Marine Structures*, 385-404.
- Logan, D. L. (2010). *A First Course in the Finite Element Method Fifth Edition*. Kanada: Global Engineering.
- Nurfitriana, M. A. (2016). *Analisa Pengaruh Pengelasan SMAW dan FCAW-SS pada Material Low Carbon Steel Grade S355J2+N terhadap Perubahan Distorsi dengan Variasi Heat Input dengan Menggunakan Metode Eksperimen dan Metode Numerik*. Surabaya: Tugas Akhir, Departemen Teknik Kelautan, FTK, ITS.
- Pilipenko, A. (2001). *Computer Simulation of Residual Stress and Distortion of Thick Plates in Multi-Electrode Submerged Arc Welding*. Norwegia: Departement of Machine Design and Material Technology, NTNU.
- Sutekat, A. G. (2017). *Studi Numerik dan Eksperimen Pengaruh Variasi Urutan Pengelasan Terhadap Distorsi Sudut pada Struktur Panel Baja A36*. Surabaya: Tugas Akhir, Departemen Teknik Kelautan, FTK, ITS.
- 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. *INTECH*, 24: 583-606.
- Unitor. (2005). *Maritime Welding Handbook*. USA: Wilhelmsen Ship Service.

- Wibisono, B. O. (2017). *Analisa Tegangan Sisa pada Panel Pelat dengan Metode Elemen Hingga Menggunakan Jenis Elemen Solid dan Elemen Shell*. Surabaya: Tugas Akhir, Departemen Teknik Kelautan, FTK, ITS.
- Wibowo, B. A. (2016). *Analisa Numerik Tegangan Sisa dan Distorsi pada Struktur Pelat Berpenegar Jamak dengan Variasi Urutan Pengelasan*. Surabaya: Tugas Akhir, Departemen Teknik Kelautan, FTK, ITS.
- Wibowo, H., Ilman, M. N., & Iswanto, P. T. (2016). Analisa Heat Input Pengelasan terhadap Distorsi, Struktur Mikro dan Kekuatan Mekanis Baja A36. *Jurnal Rekayasa Mesin Vol. 7*, 5-12.
- Wirjosumarto, H., & Okumura, T. (2000). *Teknologi Pengelasan Logam-Cetakan Kedelapan*. Jakarta: PT Pradnya Paramita.
- Yang, Z. S., Huang, Y. F., Wang, M. Z., Yan, W., Gu, B. P., & Yu, Z. H. (2015). Lacer-induced Surface Burn: A Feasible Approach for Controlled Production of Thermal Damage and its Monitoring Based on Acoustic Emission. *Lasers in Eng., Vol. 0*, 1-17.

LAMPIRAN A
(*WELDING PROCEDURE SPECIFICATION*)

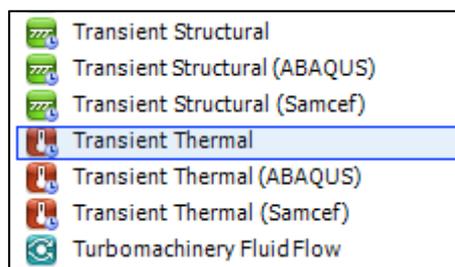
LAMPIRAN B
(LANGKAH PEMODELAN NUMERIK)

B.1 Pemodelan Numerik Analisis *Transient Thermal*

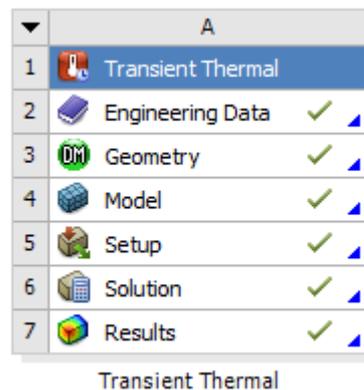
Analisis *transient thermal* merupakan tahap awal analisis numerik pada penelitian yang dilakukan untuk mengetahui pengaruh urutan pengelasan terhadap distorsi sudut pada panel baja ASTM A36 dengan pengelasan FCAW (*Flux Core Arc Welding*). Pemodelan *transient thermal* dilakukan pada *software* ANSYS Workbench 16.0 untuk mengetahui sebaran panas pada material di tiap variasi urutan pengelasan. Tahapan analisisnya adalah sebagai berikut:

1. Memilih *Transient Thermal Project* pada *Toolbox*

Pada *toolbox* langsung dapat dipilih *transient thermal* seperti ditunjukkan pada Gambar B.1 berikut. Kemudian akan tampil *transient thermal project* pada *project schematic* seperti pada Gambar B.2.



Gambar B.1 Pemilihan *Transient Thermal Project*



Gambar B.2 *Transient Thermal Project* pada *Project Schematic*

2. Memasukkan *Engineering Data*

Pada tahap ini digunakan untuk memasukkan properti material sesuai dengan material yang digunakan. Pertama yang dilakukan dengan *double* klik *Engineering Data* pada *Transient Thermal Project* pada *Project Schematic* seperti Gambar B.2. Kemudian properti material yang dimasukkan pada *engineering data* berupa *density*, *isotropic thermal conductivity*, dan *specific heat*. Langsung dapat dimasukkan besar nilai dan memilih satuannya. Gambar B.3 menunjukkan posisi nilai dan satuan yang harus dimasukkan pada tab dari *engineering data*.

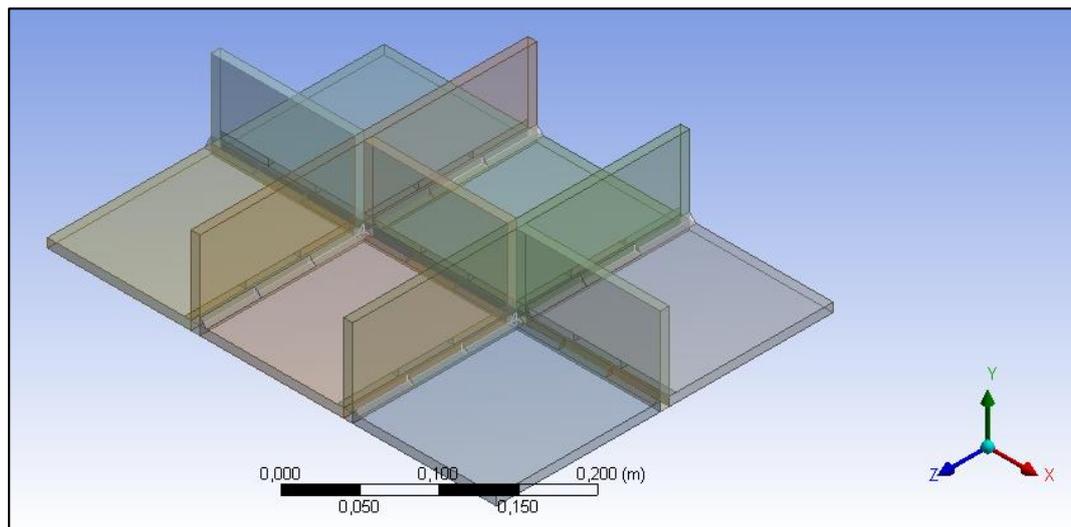
Outline of Schematic A2: Engineering Data				
	A	B	C	D
1	Contents of Engineering Data		Source	Description
2	Material			
3	A36	<input type="checkbox"/>	General	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material			

Properties of Outline Row 3: A36					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7860	kg m ⁻³		<input type="checkbox"/>
3	Isotropic Thermal Conductivity	43	W m ⁻¹ ...		<input type="checkbox"/>
4	Specific Heat	440	J kg ⁻¹ K...		<input type="checkbox"/>

Gambar B.3 Tab dari *engineering data*

3. Impor Geometri

Geometri yang telah dibuat pada SolidWorks kemudian dimport pada ANSYS dengan ekstensi (.igs). Tahapannya adalah klik *file* -> *imported external geometry file* -> pilih file dengan format (.igs) -> open -> klik kanan file yang telah di impor -> *Generate*. File geometri yang berhasil di import ditunjukkan pada Gambar B.4 berikut.

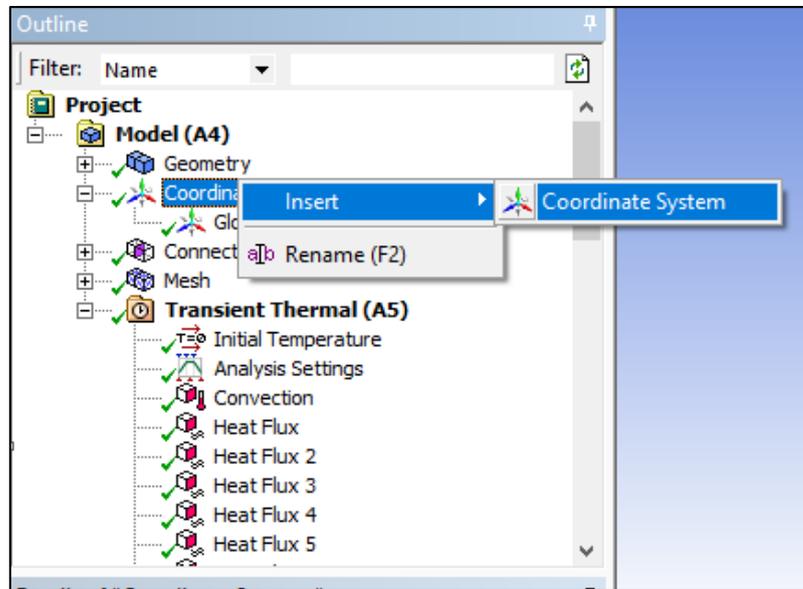


Gambar B.4 Hasil Impor Geometri

4. Memilih *Coordinate System*

Sebelum memilih *coordinate system*, *double* klik Model pada *Transient Thermal Project* di Gambar B.2. Kemudian dapat memilih lokasi *coordinate*

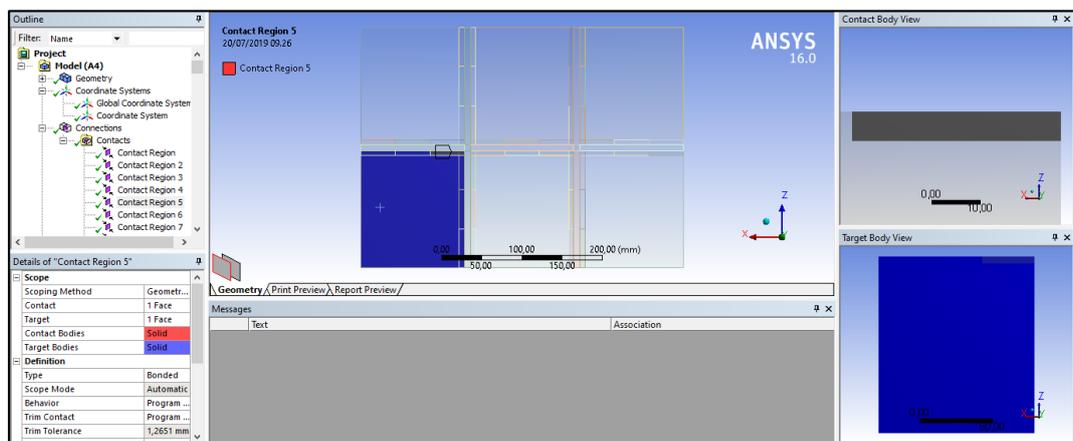
system sesuai dengan koordinat yang diinginkan dengan klik kanan *coordinate system* pada *outline* -> *insert* -> *coordinate system* -> pilih geometri yang digunakan sebagai acuan. Maka akan muncul *Global Coordinate System* yang digunakan sebagai titik 0 pada sumbu x, y, dan z. Tahapan ditunjukkan pada Gambar B.5.



Gambar B.5 Tahapan Memasukkan *Coordinate System*

5. Koneksi Antar Part

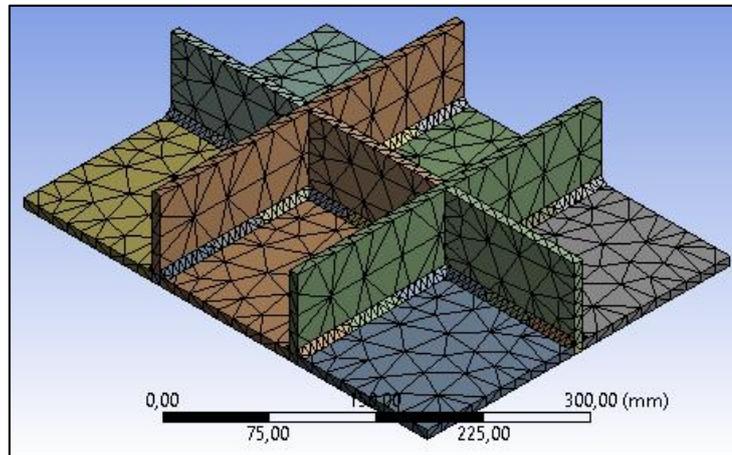
Koneksi antar part telah dilakukan otomatis sesuai desain pada SolidWorks. Untuk melihat lokasi *contact region* dapat dilakukan dengan tahapan klik *connections* pada *outline* -> klik (-) pada *contacts*. Setelah itu dapat dilihat *contact region* pada geometri yang ditunjukkan pada Gambar B.6.



Gambar B.6 *Contact Region*

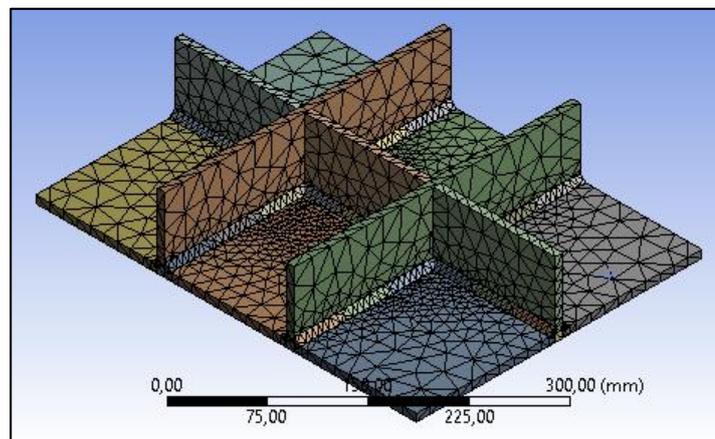
6. Melakukan *Meshing*

Meshing dilakukan untuk menentukan *element* dan *node* yang sesuai pada jenis analisis. Tahapannya adalah klik *mesh* pada *outline* -> *insert* -> *method* -> muncul *patch conforming method* -> pilih jenis *element* pada *method* (tetrahedrons) -> *mesh* -> *Generate Mesh*. Hasil pemilihan elemen pada *meshing* ditunjukkan pada Gambar B.7.



Gambar B.7 Hasil Pemilihan Elemen pada *Meshing*

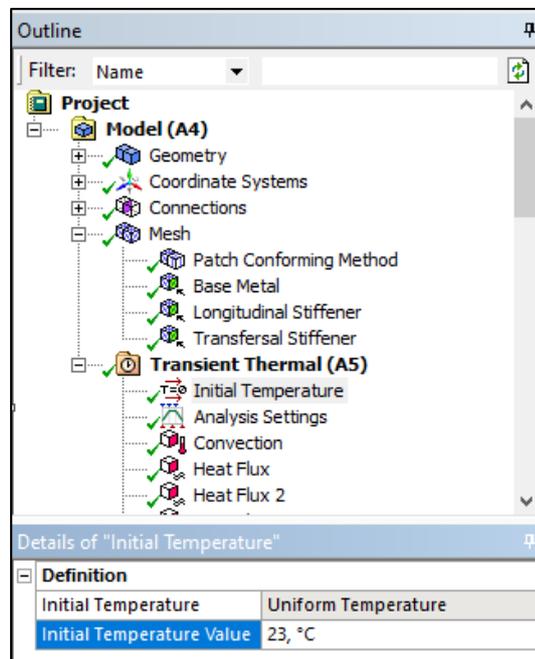
Selanjutnya adalah *sizing* pada *meshing*. *Sizing* berguna untuk memperkecil elemen pada daerah sekitar *weld bead* sehingga analisis akan semakin akurat. Tahapannya adalah klik *mesh* pada *outline* -> *insert* -> *sizing* -> pilih geometri -> masukkan *element size* -> kembali klik *mesh* -> *update*. Hasil *sizing* ditunjukkan pada Gambar B.8 berikut.



Gambar B.8 Hasil *Sizing* pada *Meshing*

7. Memasukkan *Initial Temperature*

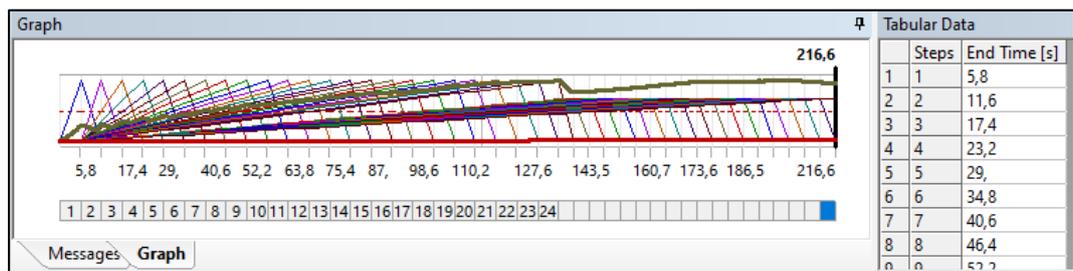
Initial Temperature merupakan temperatur awal pada saat pemodelan numerik yang disesuaikan dengan kondisi di lapangan saat dilakukannya eksperimen. Tahapannya adalah klik *initial temperature* pada outline -> *initial temperature value* -> masukkan besaran temperatur. Gambar B.9 akan memperjelas penjelasan.



Gambar B.9 *Initial Temperature*

8. Melakukan *Analysis Setting*

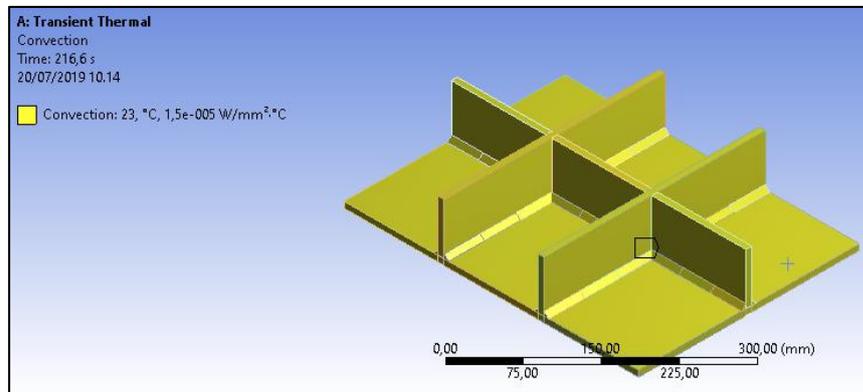
Tahap ini digunakan untuk mengatur waktu pembebanan sesuai dengan perhitungan. Tahapannya adalah klik *analysis setting* pada outline -> masukkan *end time* pada *tabular*. Gambar B.10 menunjukkan *tabular data* dan grafik pada *analysis setting*.



Gambar B.10 *Tabular Data* dan Grafik pada *Analysis Setting*

9. Memasukkan Proses Konveksi

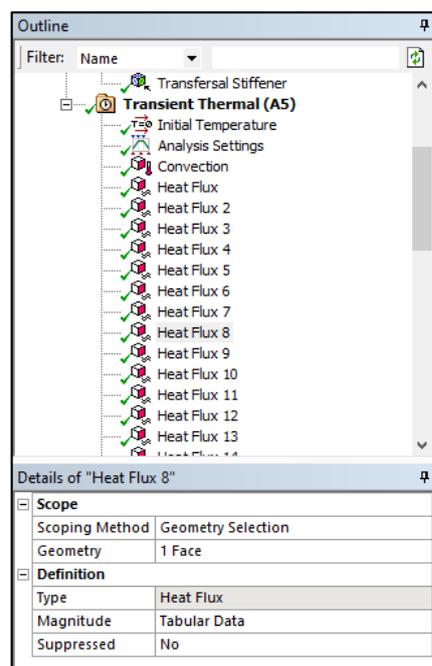
Untuk memasukkan faktor konveksi, maka dilakukan dengan tahapan klik kanan *Transient Thermal (A5)* -> *insert* -> *convection* -> masukkan *film coefficient*. Hasil dari konveksi dapat dilihat pada Gambar B.11 berikut.



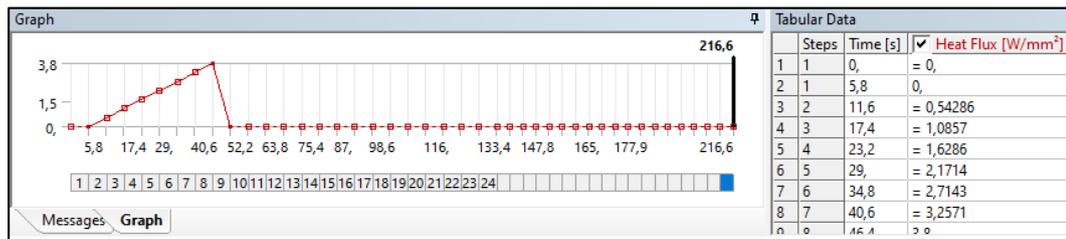
Gambar B.11 Hasil Setelah Memasukkan Faktor Konveksi

10. Input Heat Flux

Beban pada pemodelan simulasi pengelasan adalah *heat flux*. Jadi terlebih dahulu harus diketahui besar dan letak pembebanan *heat flux*. Tahapannya adalah klik kanan *Transient Thermal (A5)* -> *insert* -> *heat flux* -> pilih geometri -> ganti *magnitude* pada *tabular data* -> masukkan besar *heat flux* sesuai perhitungan. Akan lebih jelas disajikan pada Gambar B.12 dan B.13 berikut.



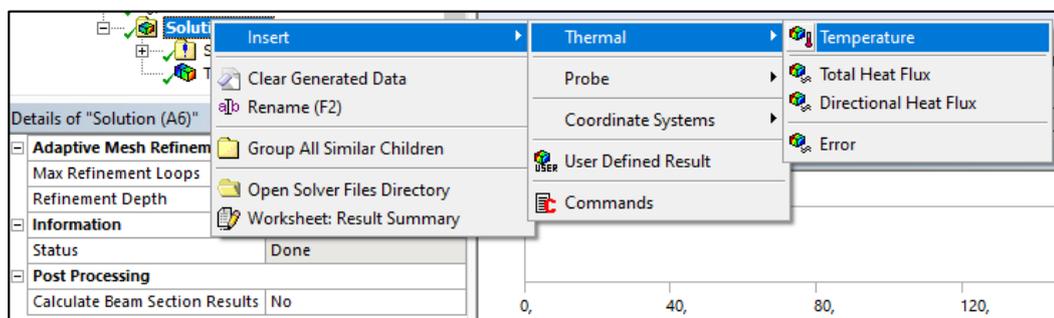
Gambar B.12 Lokasi *Heat Flux* pada *Outline*



Gambar B.13 Tabular Data dan Grafik pada *Heat Flux*

11. Melakukan *Temperature Solving*

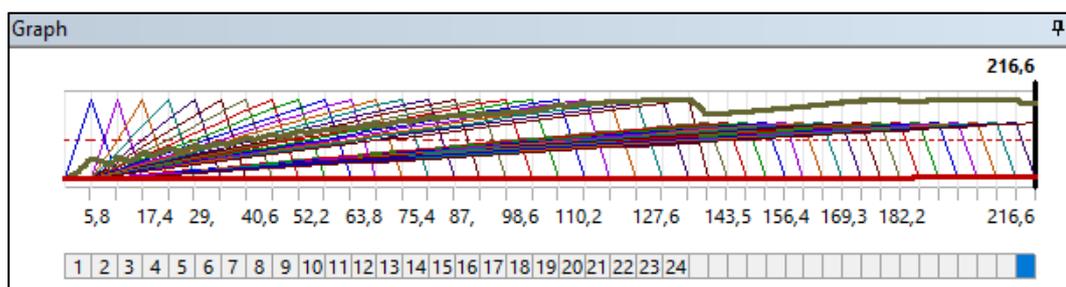
Untuk melakukan kalkulasi *finite element* dan menyiapkan model matematis, maka dilakukan *solving* dari masukan dan analisis yang telah dilakukan pada tahap-tahap sebelumnya. Tahapan untuk *solving* adalah klik kanan *solution (A6)* pada *outline* -> *insert* -> *thermal* -> *temperature* -> *solve*. Lebih jelas akan ditunjukkan pada Gambar B.14 berikut.



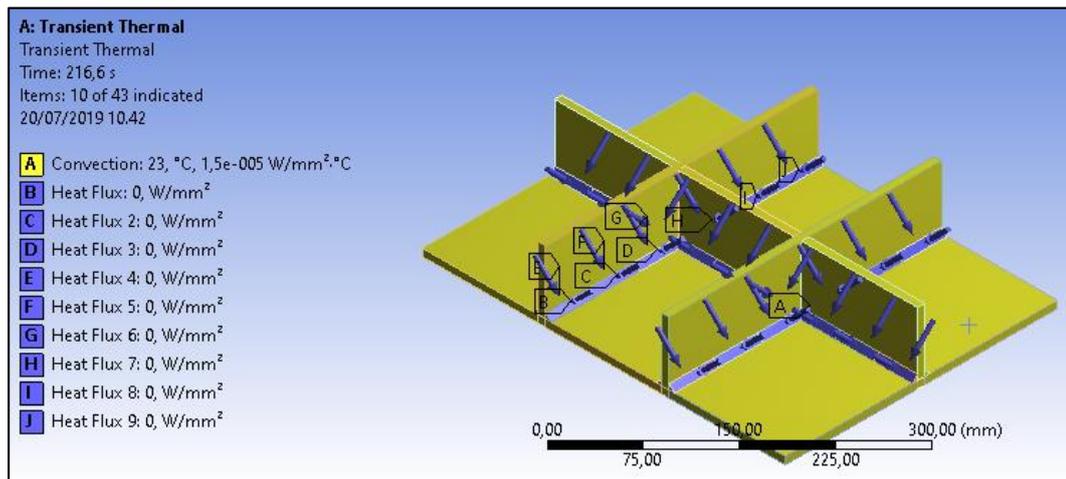
Gambar B.14 Tahapan *Solving* pada *Transient Thermal*

12. Hasil Analisis *Transient Thermal*

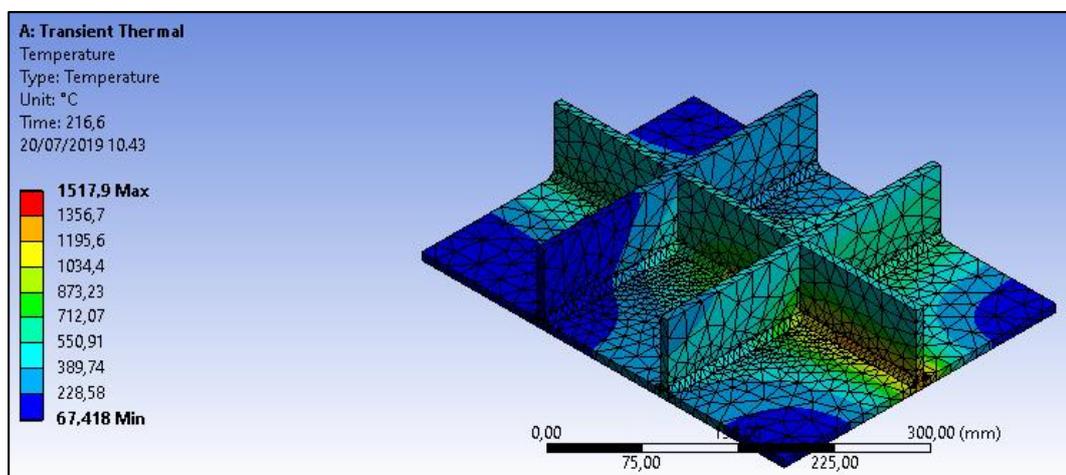
Tahap akhir analisis ini adalah penampilan hasil berupa grafik *analysis setting* seperti Gambar B.15, hasil masukan parameter analisis *transient thermal* seperti Gambar B.16, dan tampilan visual hasil analisis *transient thermal* seperti Gambar B.17.



Gambar B.15 Grafik *Analysis Setting*



Gambar B.16 Hasil Masukan Parameter Analisis *Transient Thermal*



Gambar B.17 Tampilan Visual Hasil Analisis *Transient Thermal*

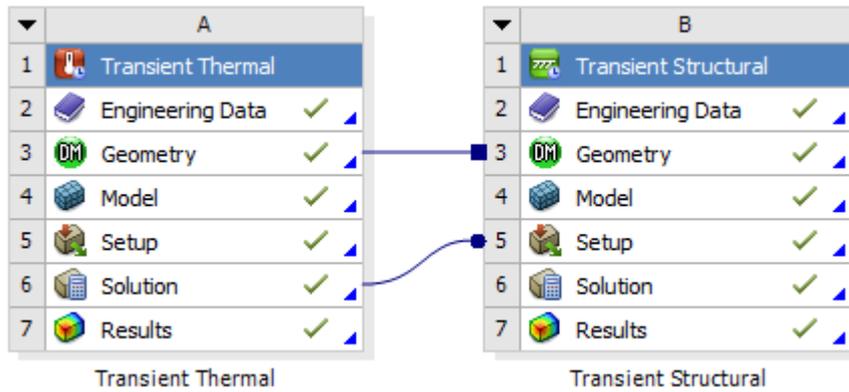
B.2 Pemodelan Numerik Analisis *Transient Structural*

Pada tahap ini, dilakukan analisis untuk mengetahui distorsi sudut yang terjadi setelah dilakukan proses analisis numerik simulasi pengelasan secara *transient thermal*. Tahapan dari analisis *transient structural* adalah sebagai berikut:

1. Memilih *Transient Structural Project* pada *Toolbox*

Pada *toolbox* langsung dapat dipilih *transient structural* sama dengan analisis *transient thermal*. Kemudian menyambungkan hasil analisis *transient thermal* menuju analisis *transient structural* dengan langsung *drag geometry* pada *transient thermal* menuju geometri *transient structural* dan *solution* pada

transient thermal menuju *setup* pada *transient structural*. Hasil penyambungan ditunjukkan pada Gambar B.18 berikut.



Gambar B.18 Hasil Penyambungan *Transient Thermal* menuju *Transient Structural*

2. Memasukkan *Engineering Data*

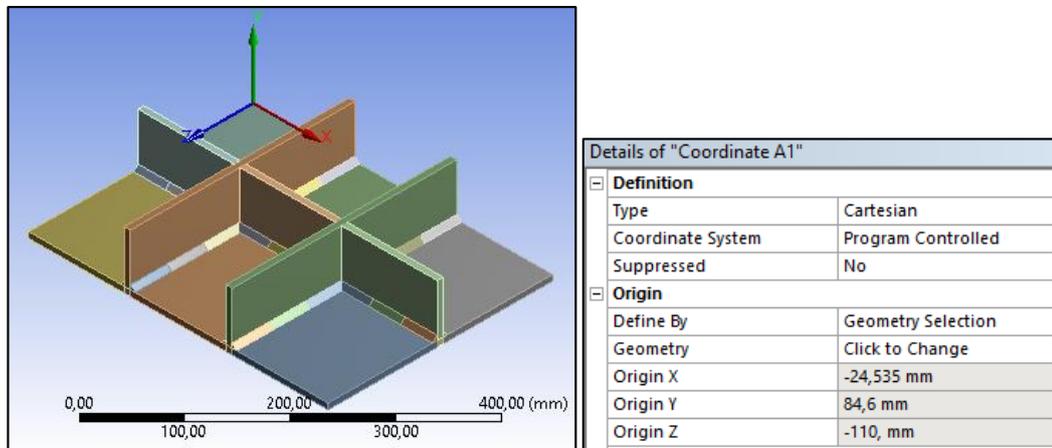
Pertama yang dilakukan untuk memasukkan *engineering data* adalah dengan *double* klik *Engineering Data* pada *Transient Structural Project* pada *Project Schematic* seperti Gambar B.18. Kemudian memasukkan properti material seperti pada Gambar B.19.

Outline of Schematic B2: Engineering Data				
	A	B	C	D
1	Contents of Engineering Data	X	Source	Description
2	Material			
3	A36	General	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1	
*	Click here to add a new material			
Properties of Outline Row 3: A36				
	A	B	C	D
1	Property	Value	Unit	
2	Density	7860	kg m ⁻³	
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
6	Isotropic Elasticity			
16	Alternating Stress Mean Stress	Tabular		
20	Strain-Life Parameters			
28	Tensile Yield Strength	2,5E+08	Pa	
29	Compressive Yield Strength	2,5E+08	Pa	
30	Tensile Ultimate Strength	4,6E+08	Pa	
31	Compressive Ultimate Strength	0	Pa	

Gambar B.19 Properti Material pada *Engineering Data*

3. Memilih *Coordinate Systems*

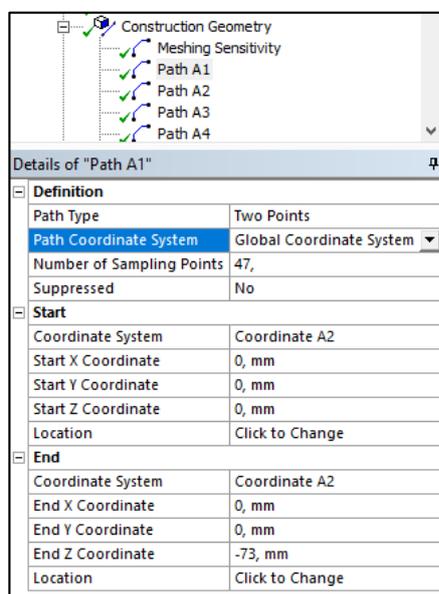
Coordinate systems yang digunakan pada analisis *transient structural* berjumlah sesuai dengan titik pengukuran, yaitu 20 titik. Tahapannya adalah klik *coordinate systems* pada *outline* -> *insert* -> *coordinate system* -> memilih geometri. Tampilan *coordinate systems* ditunjukkan pada Gambar B.20 berikut.



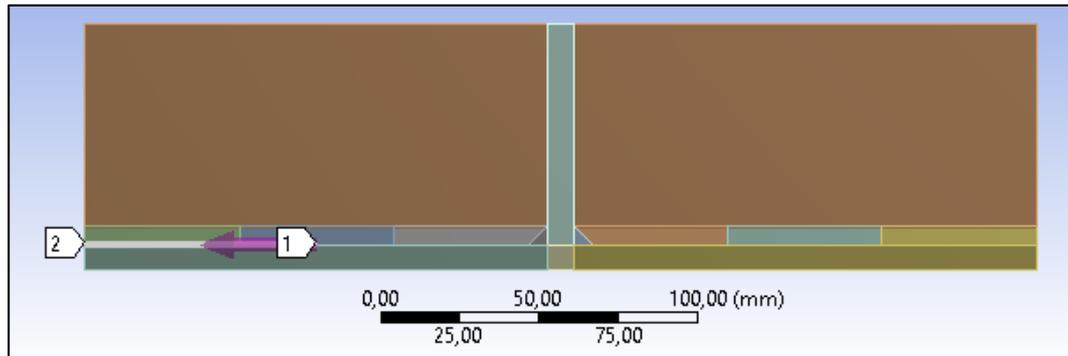
Gambar B.20 Tampilan *Coordinate System* Beserta *Coordinate Detail*

4. Memasukkan *Path*

Untuk membuat *path*, tahapan yang digunakan adalah klik *model* pada *outline* -> *construction geometry* -> klik kanan -> *insert* -> *path* -> masukkan *coordinate system* yang digunakan sebagai acuan pada *definition*, *start*, dan *end* -> tentukan letak *x*, *y*, *z* *start* dan *x*, *y*, *z* *end* pada *path*. Jumlah *path* sesuai dengan jumlah titik acuan. Gambar B.21 menunjukkan contoh detail dari *path*, sedangkan contoh hasil dari *path* untuk titik pengukuran A1 ditunjukkan pada Gambar B.22.



Gambar B.21 Contoh Detail dari *Path*



Gambar B.22 Contoh Hasil Pembuatan *Path* untuk Titik Pengukuran A1

5. Koneksi Antar *Part*

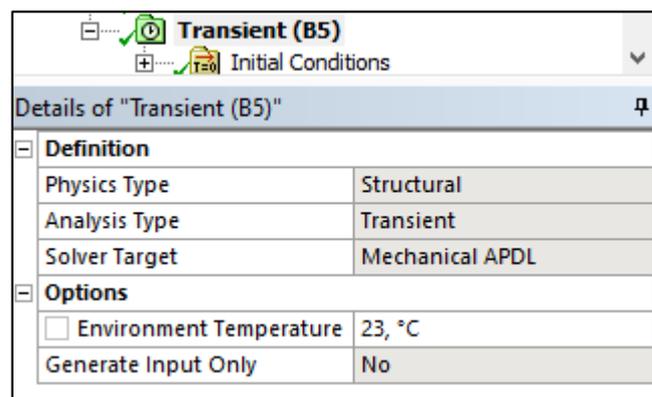
Pada analisis *transient structural*, koneksi antar *part* sama dengan tahap *transient thermal*.

6. Melakukan *Meshing*

Meshing pada analisis *transient structural* menggunakan cara yang sama seperti analisis *transient thermal*.

7. Memasukkan *Environment Temperature*

Untuk memasukkan *environment temperature* dilakukan dengan klik *Transient (B5)* pada *outline* kemudian memasukkan nilai sesuai temperatur lingkungan saat dilakukan eksperimen. Lebih jelas akan ditunjukkan pada Gambar B.24 berikut.



Gambar B.24 Lokasi dari *Environment Temperature*

8. Melakukan *Analysis Settings*

Pada tahap *analysis setting* dimasukkan *end time* sesuai dengan hasil eksperimen dan perhitungan pada *tabular data*. Kemudian memasukkan *initial time step*, *minimum time step*, dan *maximum time step*. Lebih jelas akan ditunjukkan pada Gambar B.25.

Tabular Data		
	Steps	End Time [s]
1	1	5,8
2	2	11,6
3	3	17,4
4	4	23,2
5	5	29,
6	6	34,8
7	7	40,6
8	8	46,4
9	9	52,2

Details of "Analysis Settings"	
Step Controls	
Number Of Steps	42,
Current Step Number	1,
Step End Time	5,8 s
Auto Time Stepping	On
Define By	Time
Initial Time Step	1, s
Minimum Time Step	1, s
Maximum Time Step	5, s
Time Integration	On

Gambar B.25 Tabular Data dan Detail dari Analysis Settings

9. Memilih Displacement

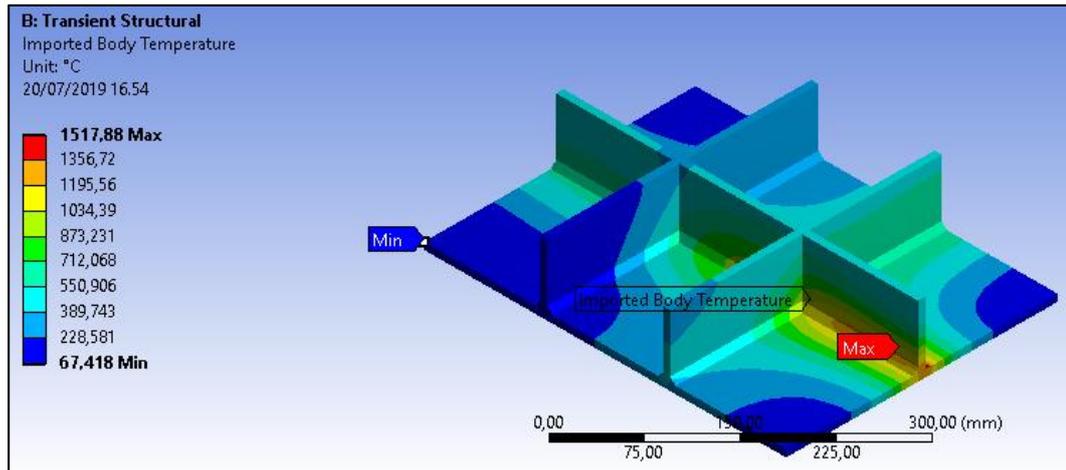
Displacement yang dipilih berupa *face* pada part yang saat eksperimen diberikan *tack weld* dan bagian bawah *intersection* dari *transfersal* dan *longitudinal stiffener*. Kemudian memberikan nilai 0 pada sumbu x, y, dan z pada *coordinate system* yang digunakan. Gambar B.26 menunjukkan detail dari *displacement*.

Details of "Displacement"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	8 Faces
Definition	
Type	Displacement
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
<input type="checkbox"/> X Component	0, mm (step applied)
<input type="checkbox"/> Y Component	0, mm (step applied)
<input type="checkbox"/> Z Component	0, mm (step applied)
Suppressed	No

Gambar B.26 Detail dari Displacement

10. Mengimpor Beban

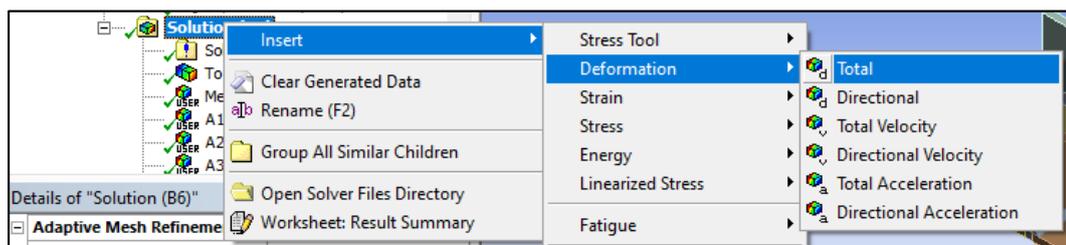
Beban panas yang digunakan pada analisis *transient structural* berupa hasil dari analisis *transient thermal*. Tahapan untuk mengimpor beban yaitu klik *imported load* (A6) pada *outline* -> klik kanan -> *insert* -> *imported body temperature* -> isi *analysis time* -> klik kanan pada *imported body temperature* -> *import load*. Gambar B.27 menunjukkan hasil *imported load*.



Gambar B.27 Hasil *Imported Load*

11. Melakukan *Deformation Solving*

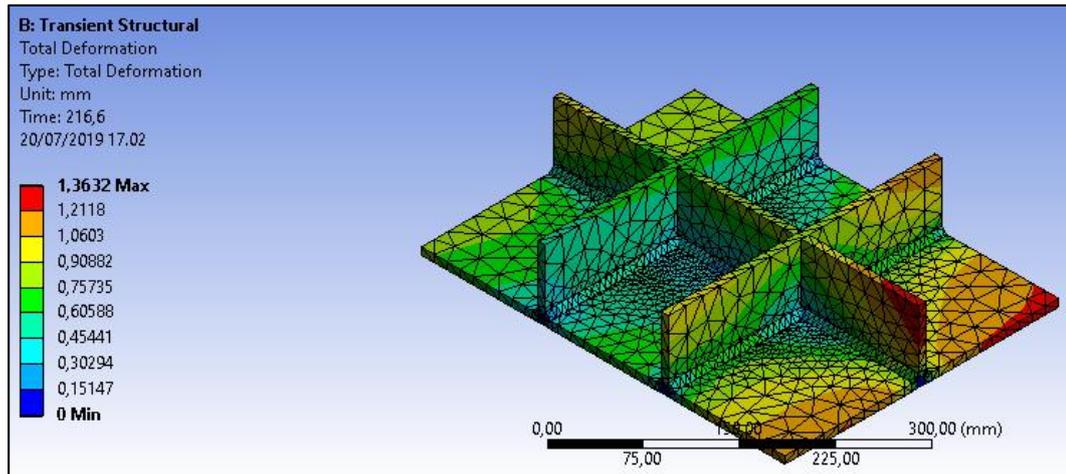
Solving digunakan untuk melakukan kalkulasi *finite element* dan menyiapkan model matematis dari masukan dan analisis yang telah dilakukan pada tahap-tahap sebelumnya. Tahapan untuk *solving* adalah klik kanan *solution* (B6) pada *outline* -> *insert* -> *deformation*-> *total* -> *solve*. Lebih jelas akan ditunjukkan pada Gambar B.28 berikut.



Gambar B.28 Tahapan *Solving* pada *Transient Structural*

12. Hasil Analisis *Transient Structural*

Hasil analisis *transient structural* berupa tampilan visual deformasi atau distorsi sudut yang terjadi pada panel seperti ditunjukkan pada Gambar B.29 berikut.



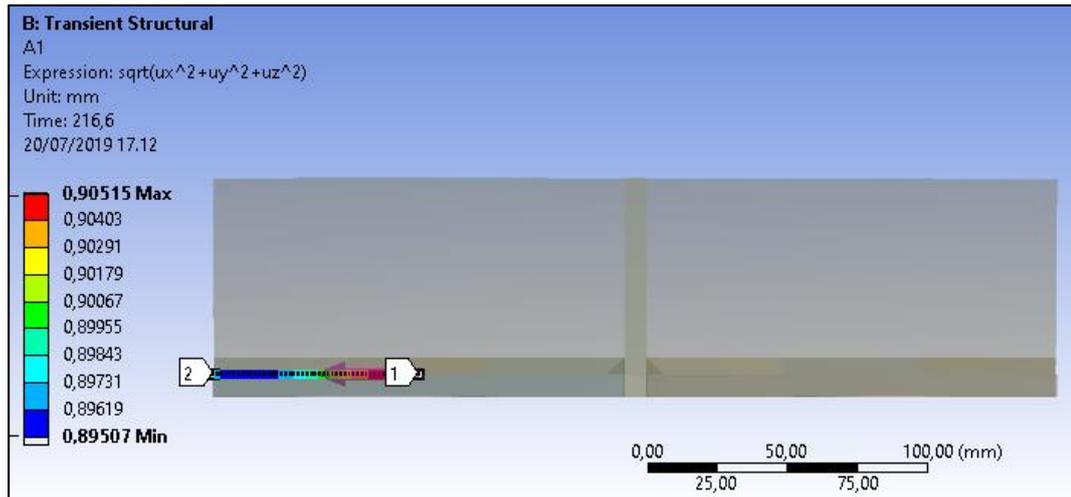
Gambar B.29 Tampilan Visual Hasil Analisis *Transient Structural*

13. Pengukuran Distorsi Sudut

Untuk mengukur besar distorsi sudut, maka dilakukan pendefinisian hasil dengan tahapan klik *solution* pada *outline* -> *insert* -> *user defined result* -> ganti *scoping method* menjadi *path* -> pilih *path* sesuai titik pengukuran -> masukkan *expression* -> ganti *output unit* menjadi *displacement* -> *evaluate all results*. Pengukuran dilakukan pada semua titik pengukuran. Gambar B.30 menunjukkan detail dari *user defined result*, sedangkan Gambar B.31 menunjukkan hasil pengukuran distorsi sudut sesuai titik yang ditinjau. Titik yang ditinjau berada pada bagian 2 (*end*) pada *path*.

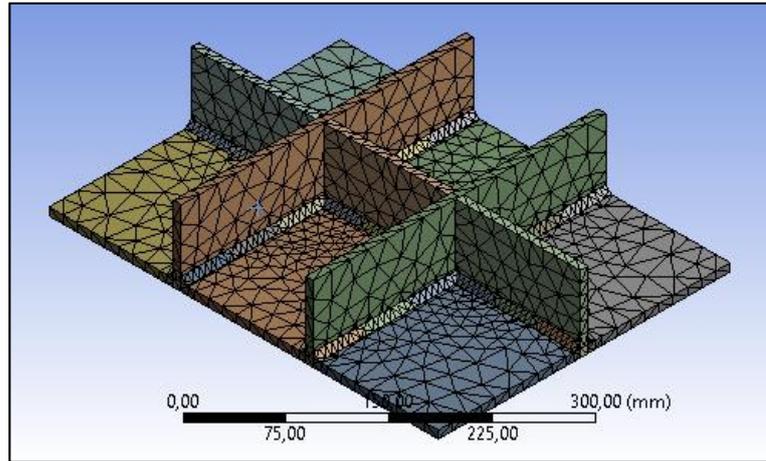
Details of "A1"	
Scope	
Scoping Method	Path
Path	Path A1
Geometry	All Bodies
Definition	
Type	User Defined Result
Expression	$= \sqrt{ux^2 + uy^2 + uz^2}$
Input Unit System	Metric (mm, kg, N, s, mV, mA)
Output Unit	Displacement
By	Time
<input type="checkbox"/> Display Time	Last
Coordinate System	Global Coordinate System
Calculate Time History	Yes
Suppressed	No

Gambar B.30 Detail dari *User Defined Result*

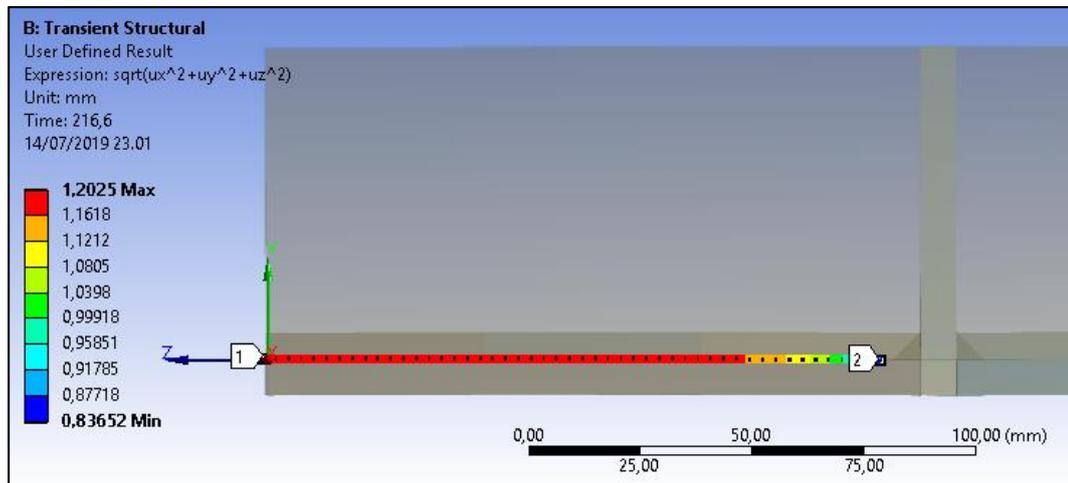


Gambar B.31 Hasil Pengukuran Distorsi Sudut

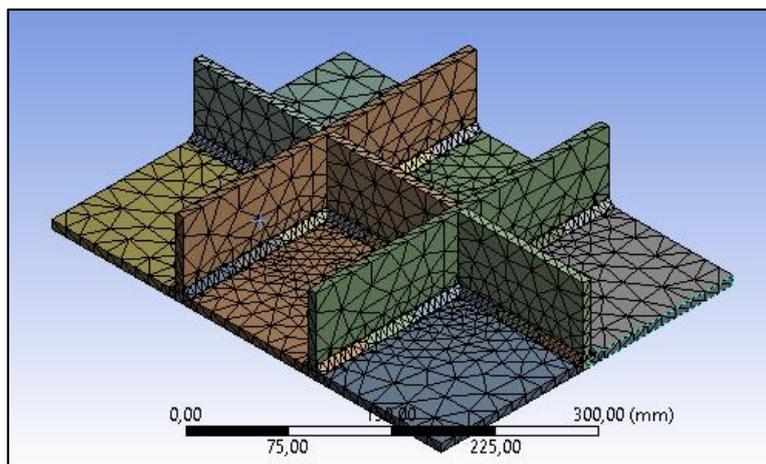
LAMPIRAN C
(HASIL *MESHING SENSITIVITY*)



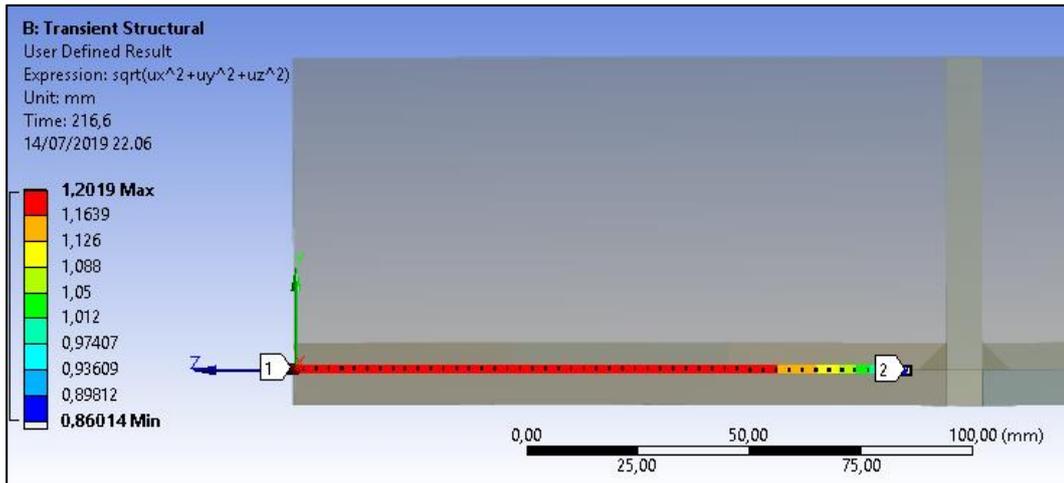
Gambar C.1 Hasil *Meshing* pada Jumlah Elemen 9633



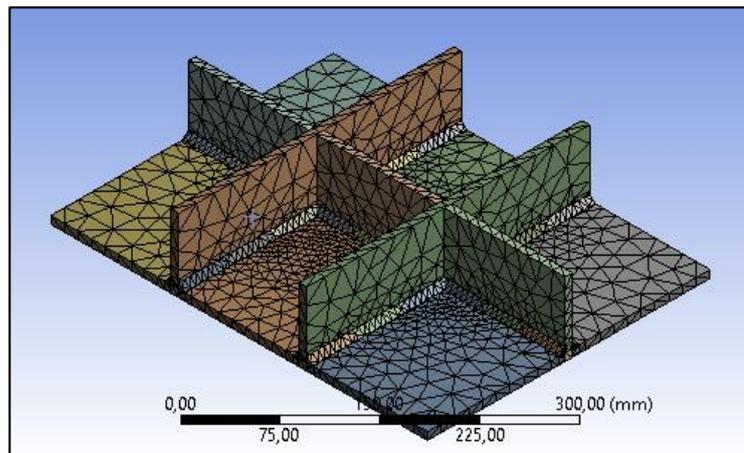
Gambar C.2 Hasil Pengukuran Distorsi Sudut pada Jumlah Elemen 9633



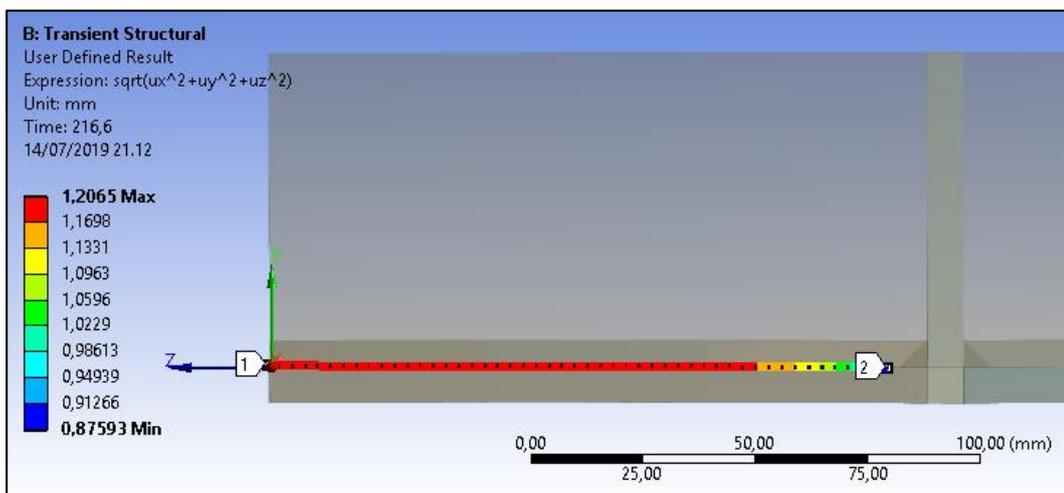
Gambar C.3 Hasil *Meshing* pada Jumlah Elemen 12104



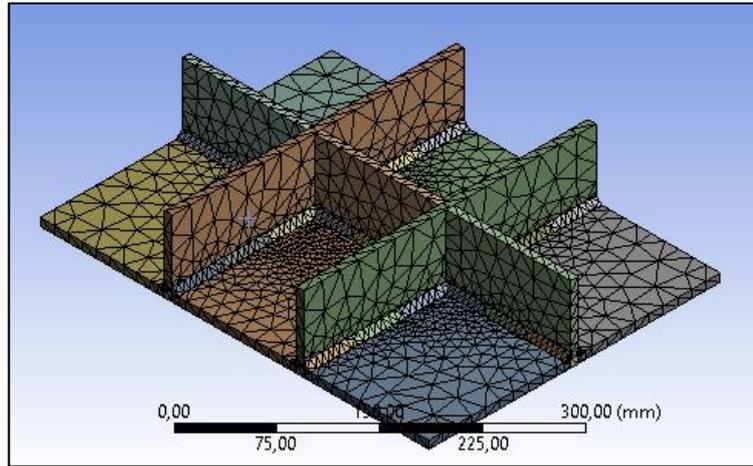
Gambar C.4 Hasil Pengukuran Distorsi Sudut pada Jumlah Elemen 12104



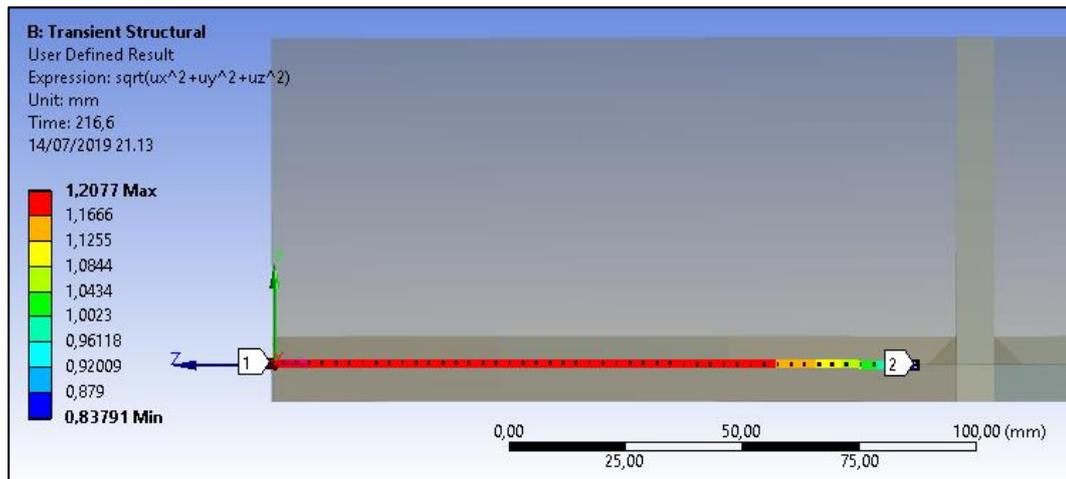
Gambar C.5 Hasil *Meshing* pada Jumlah Elemen 17907



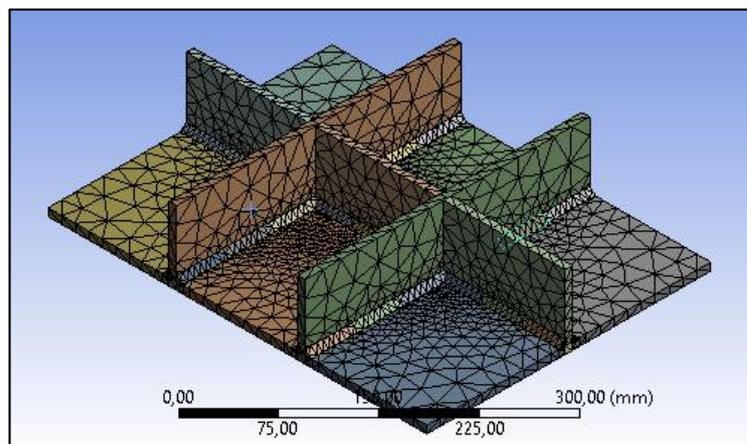
Gambar C.6 Hasil Pengukuran Distorsi Sudut pada Jumlah Elemen 17907



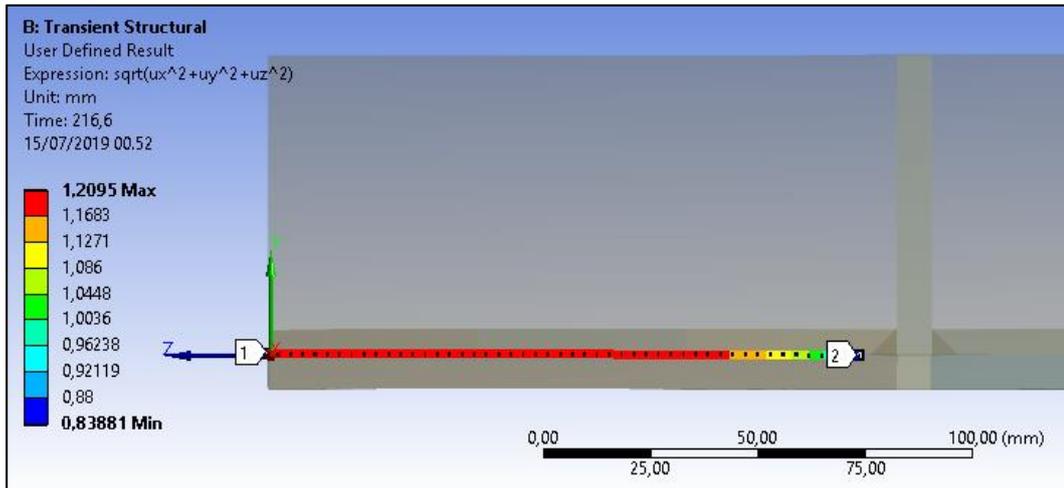
Gambar C.7 Hasil *Meshing* pada Jumlah Elemen 21954



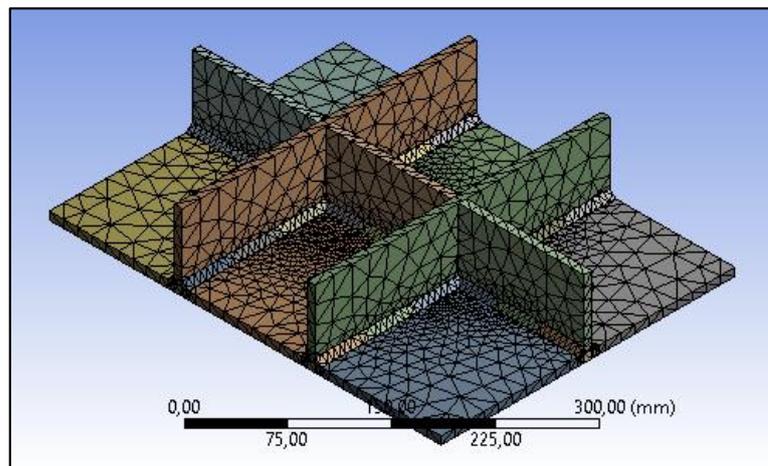
Gambar C.8 Hasil Pengukuran Distorsi Sudut pada Jumlah Elemen 21954



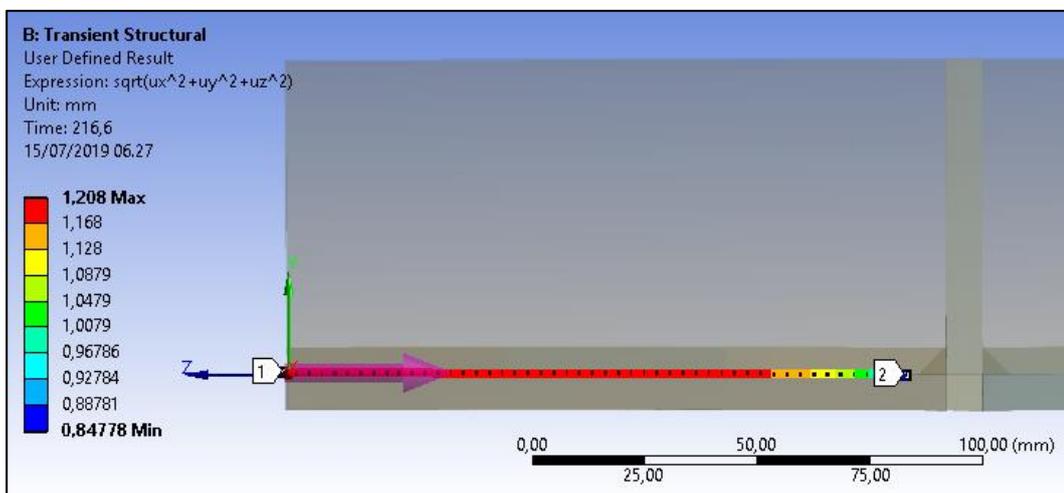
Gambar C.9 Hasil *Meshing* pada Jumlah Elemen 24940



Gambar C.10 Hasil Pengukuran Distorsi Sudut pada Jumlah Elemen 24940



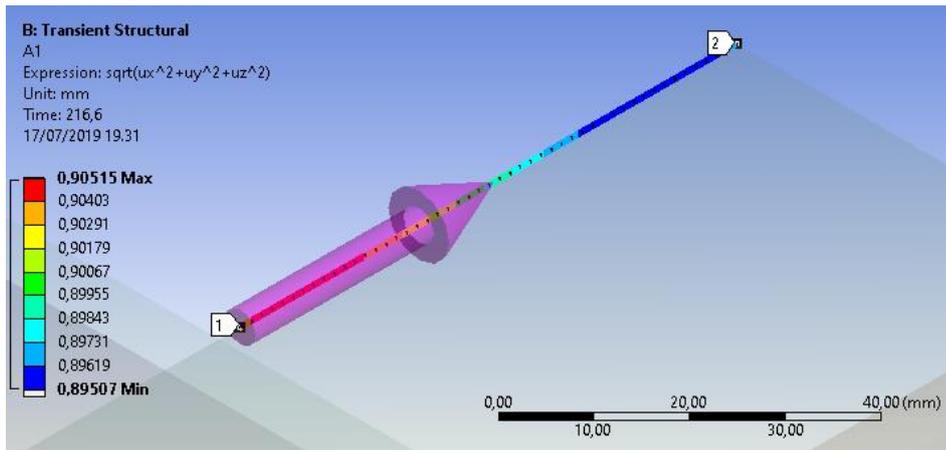
Gambar C.11 Hasil *Meshing* pada Jumlah Elemen 27989



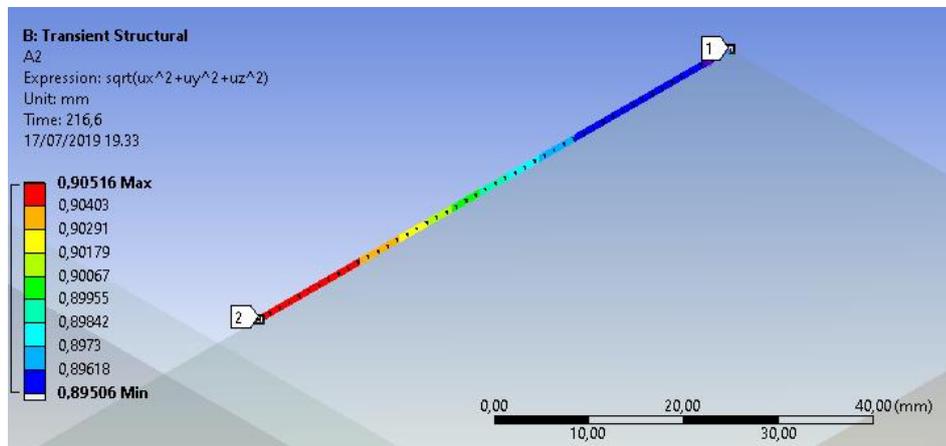
Gambar C.12 Hasil Pengukuran Distorsi Sudut pada Jumlah Elemen 27989

LAMPIRAN D
(HASIL PENGUKURAN
PADA ANALISIS NUMERIK)

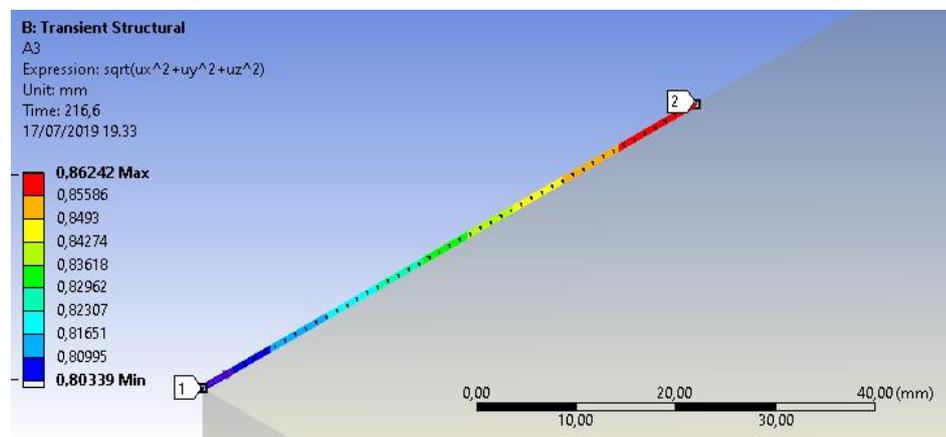
D.1 Pengukuran Deformasi Sudut Pada Variasi Urutan Pengelasan 1 (Lurus)



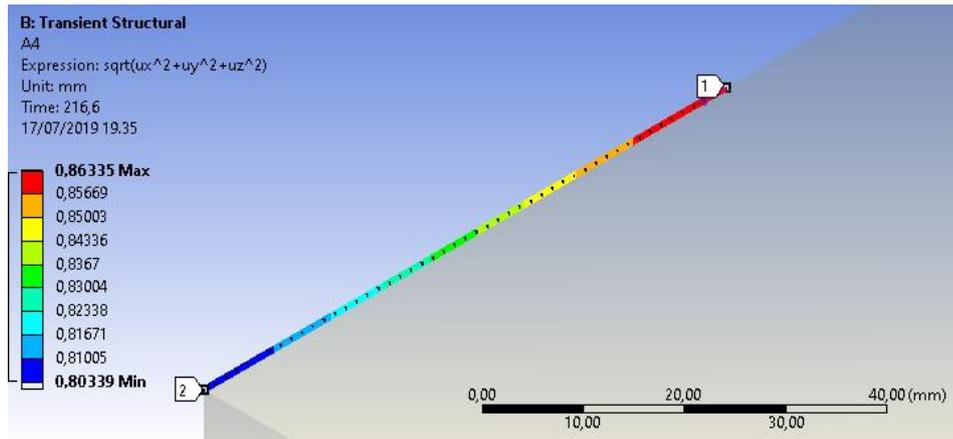
Gambar D.1 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 1 (Lurus) Titik A1



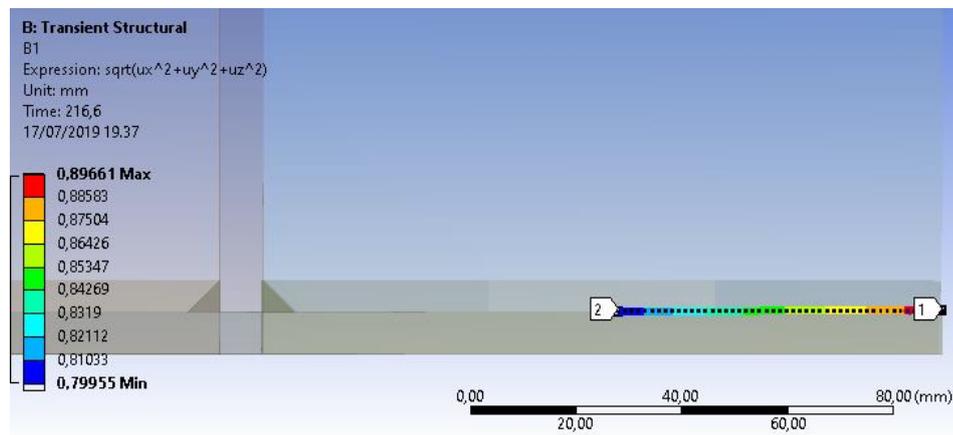
Gambar D.2 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 1 (Lurus) Titik A2



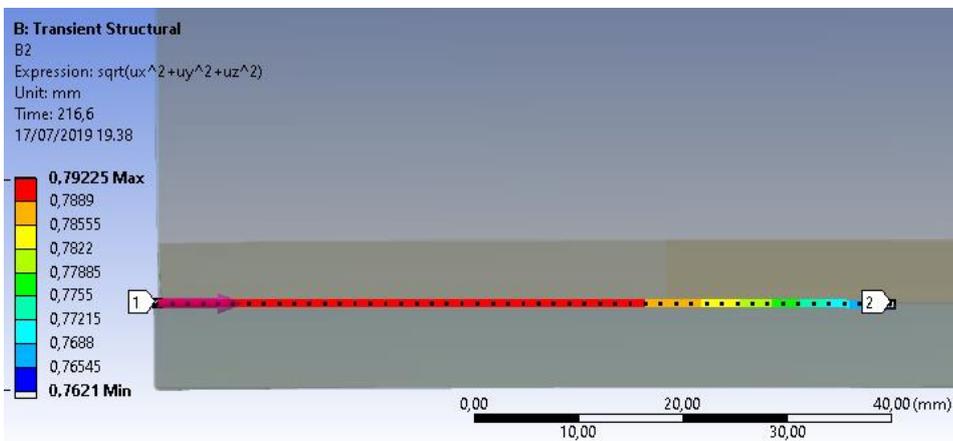
Gambar D.3 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 1 (Lurus) Titik A3



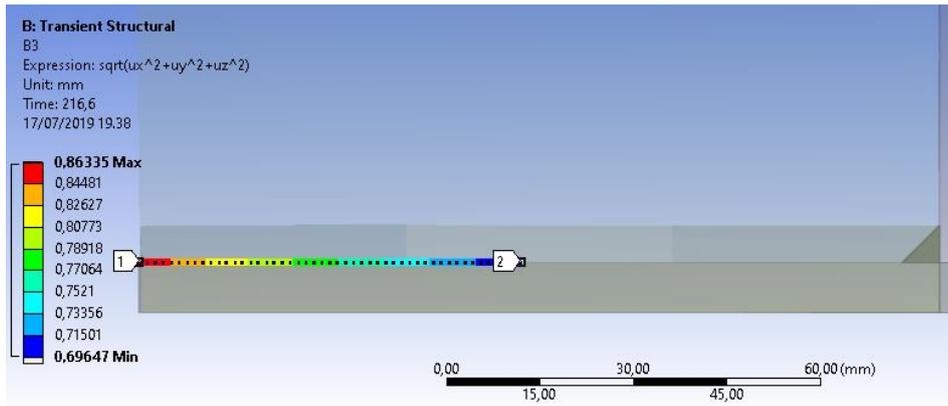
Gambar D.4 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 1 (Lurus) Titik A4



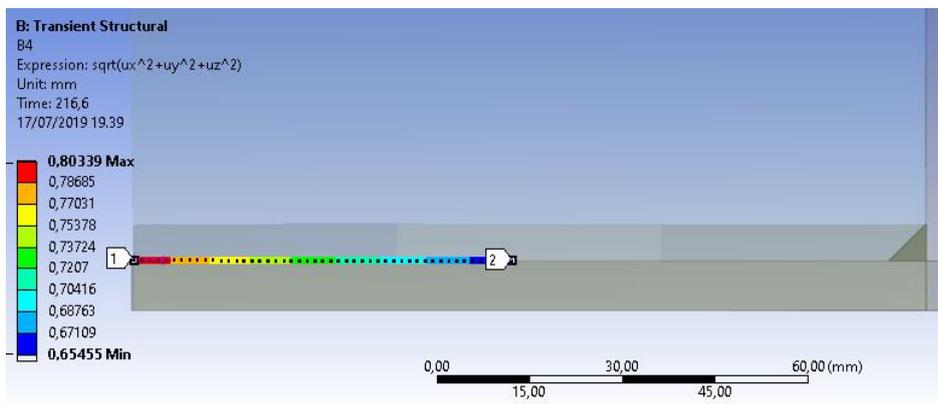
Gambar D.5 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 1 (Lurus) Titik B1



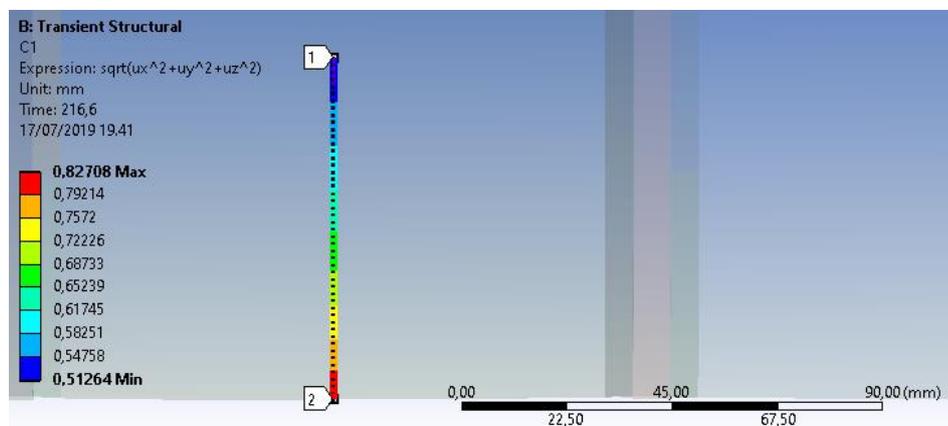
Gambar D.6 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 1 (Lurus) Titik B2



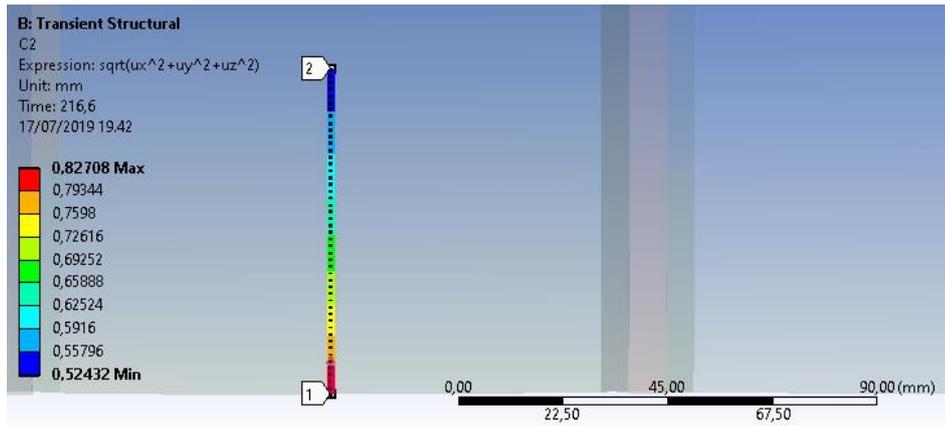
Gambar D.7 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 1 (Lurus) Titik B3



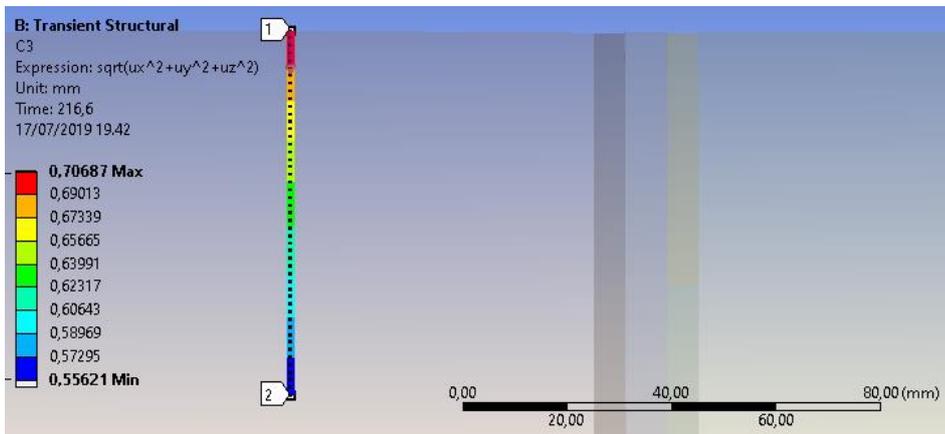
Gambar D.8 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 1 (Lurus) Titik B4



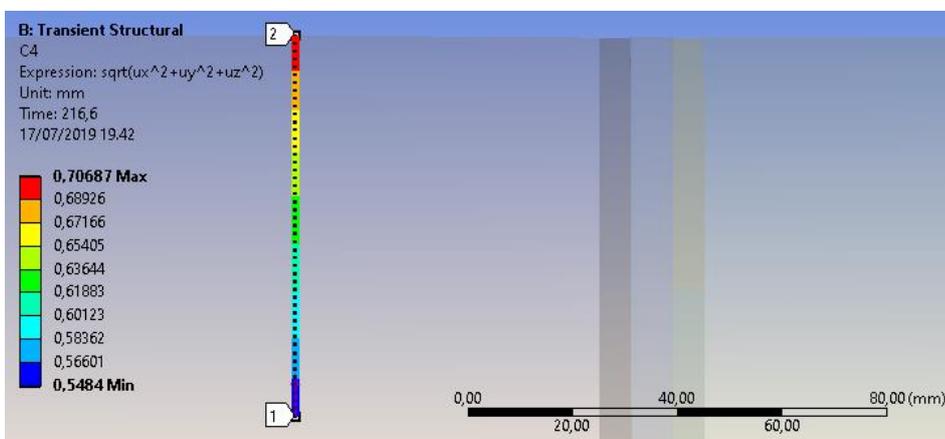
Gambar D.9 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 1 (Lurus) Titik C1



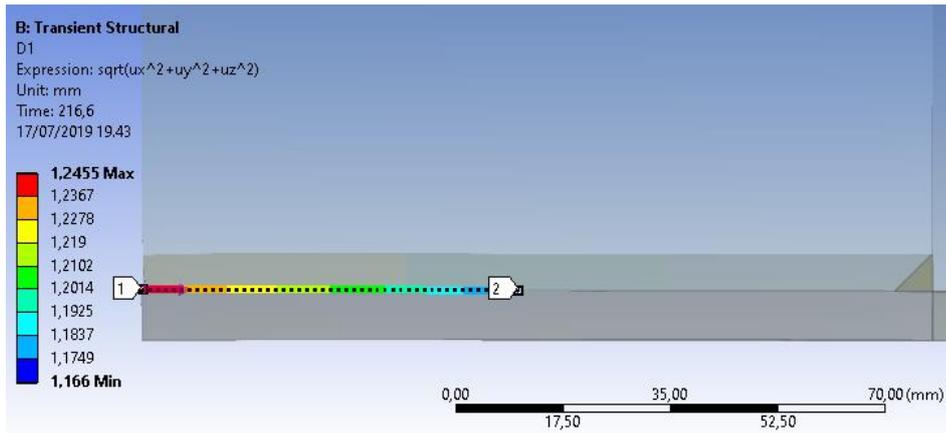
Gambar D.10 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 1 (Lurus) Titik C2



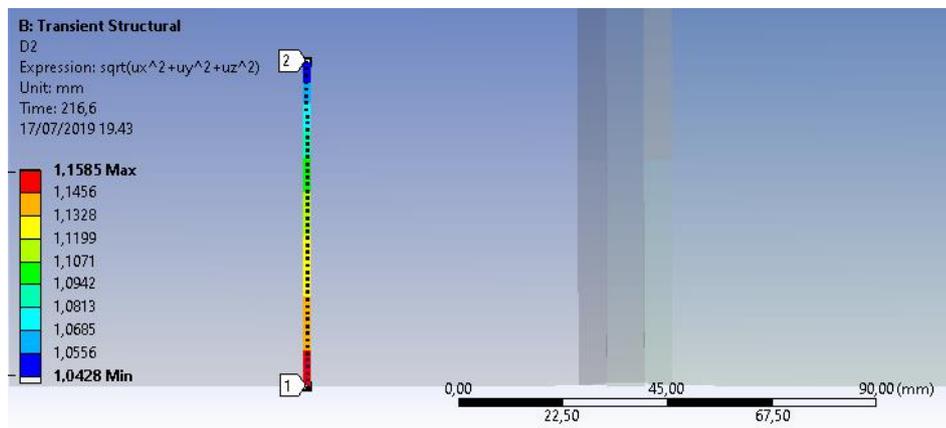
Gambar D.11 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 1 (Lurus) Titik C3



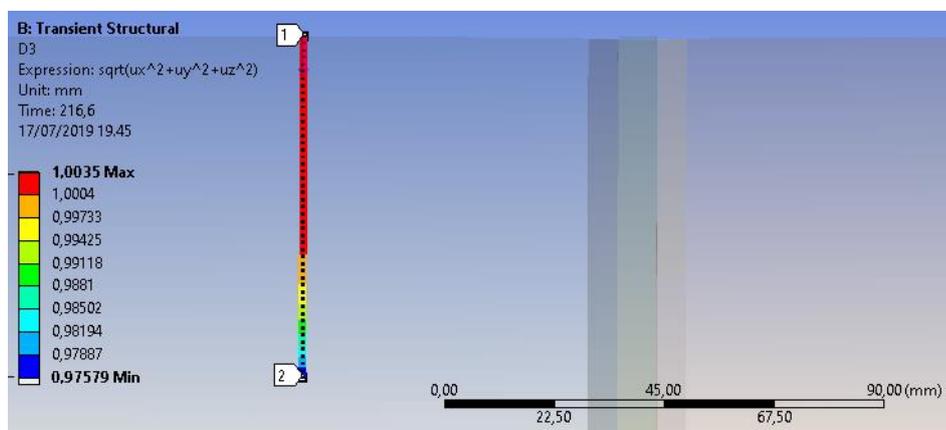
Gambar D.12 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 1 (Lurus) Titik C4



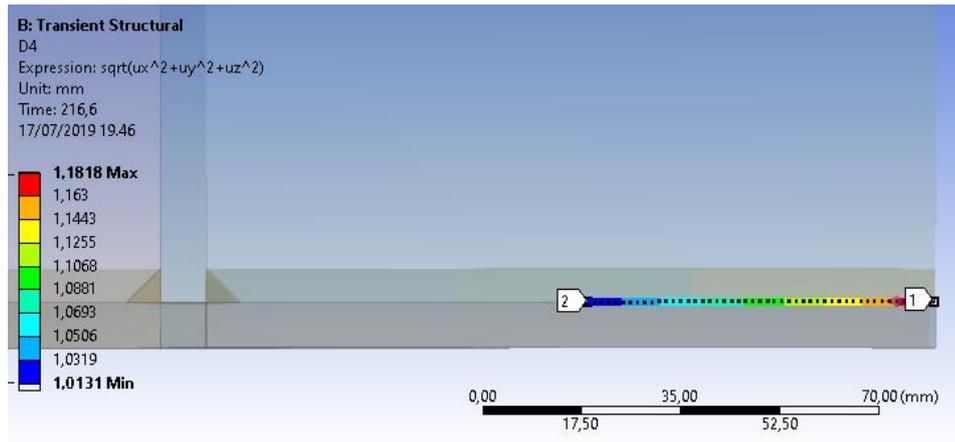
Gambar D.13 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 1 (Lurus) Titik D1



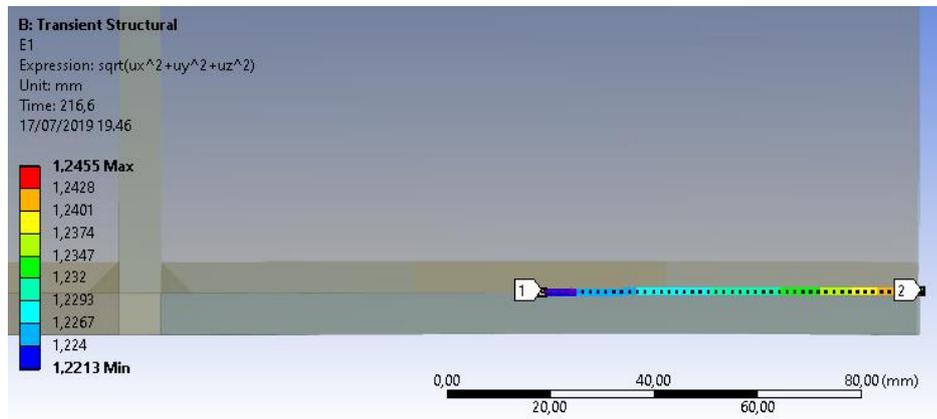
Gambar D.14 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 1 (Lurus) Titik D2



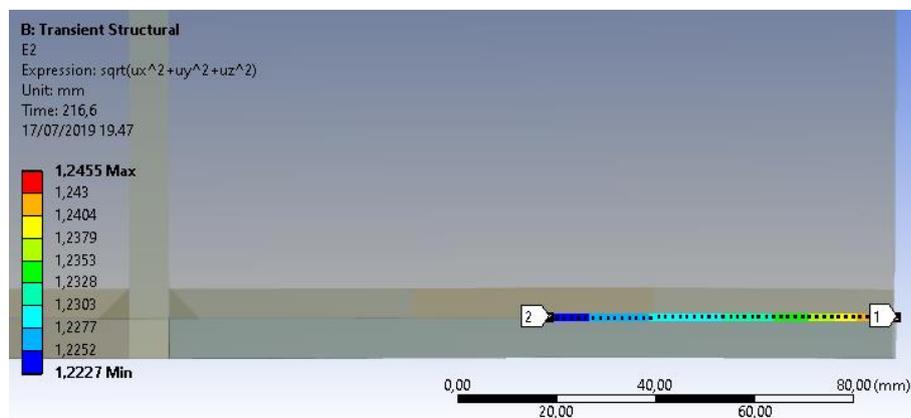
Gambar D.15 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 1 (Lurus) Titik D3



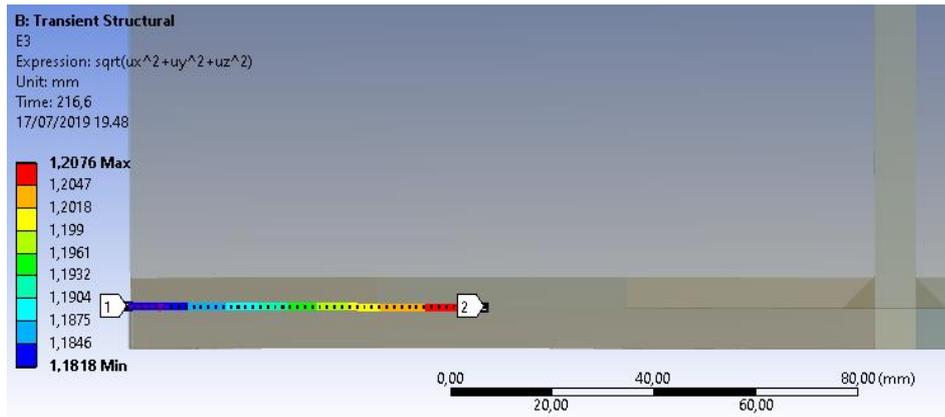
Gambar D.16 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 1 (Lurus) Titik D4



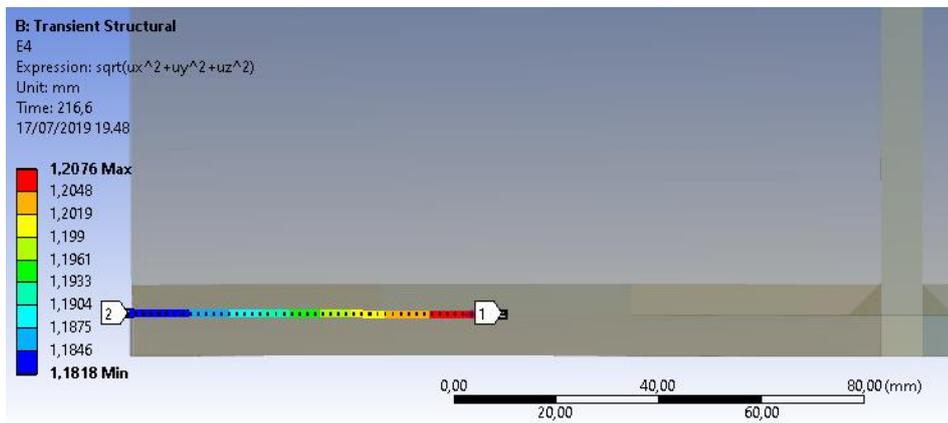
Gambar D.17 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 1 (Lurus) Titik E1



Gambar D.18 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 1 (Lurus) Titik E2

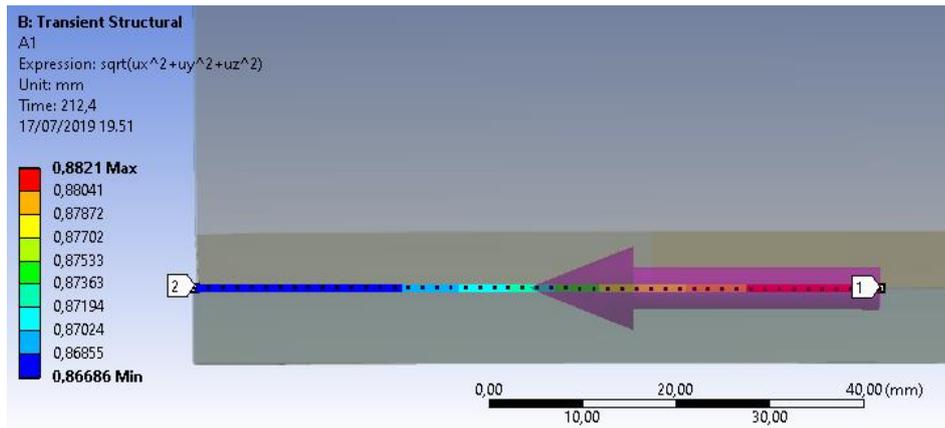


Gambar D.19 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 1 (Lurus) Titik E3

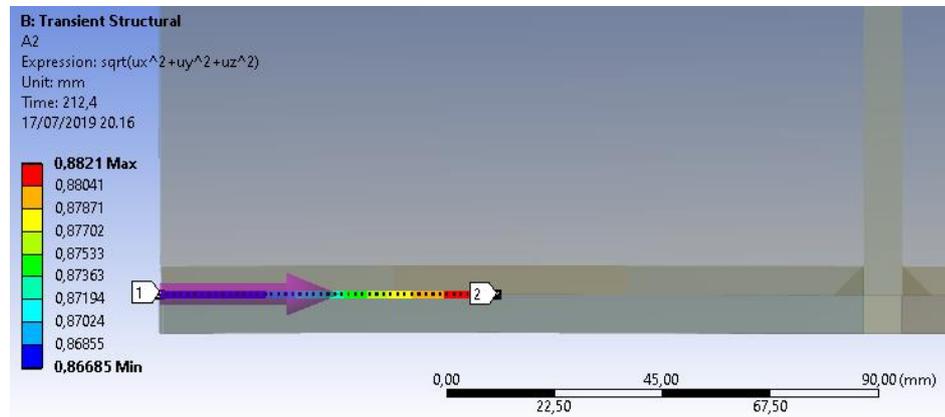


Gambar D.20 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 1 (Lurus) Titik E4

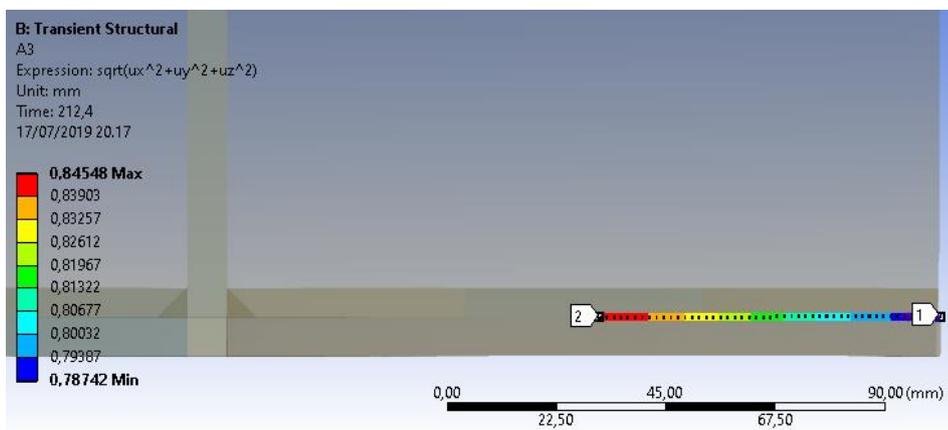
D.2 Pengukuran Deformasi Sudut Pada Variasi Urutan Pengelasan 2 (Simetri)



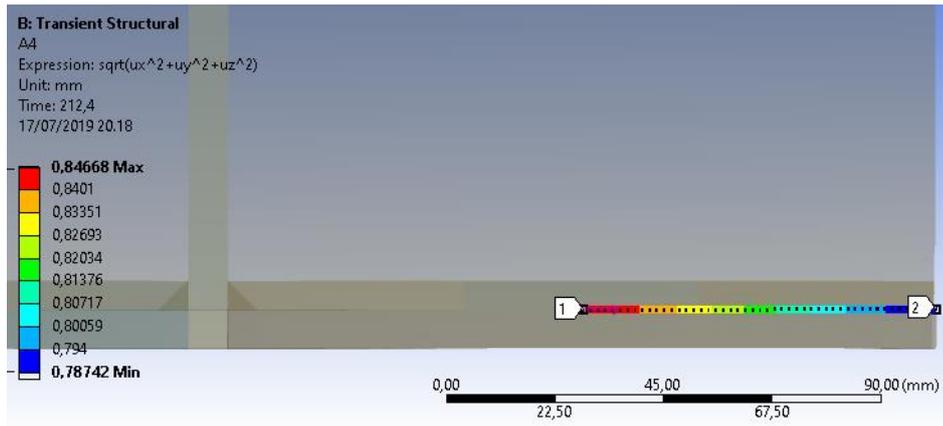
Gambar D.21 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 2 (Simetri) Titik A1



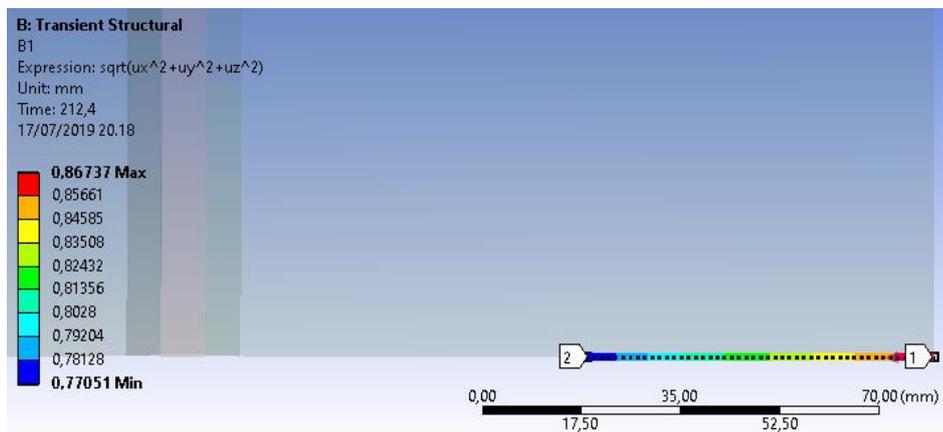
Gambar D.22 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 2 (Simetri) Titik A2



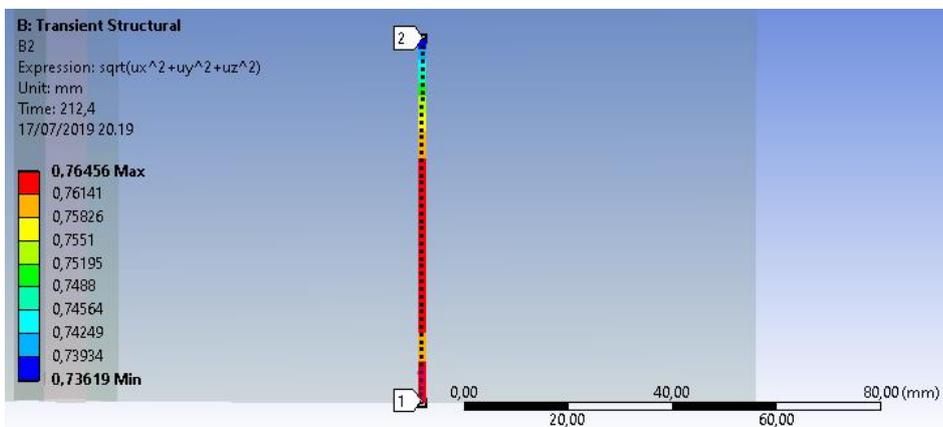
Gambar D.23 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 2 (Simetri) Titik A3



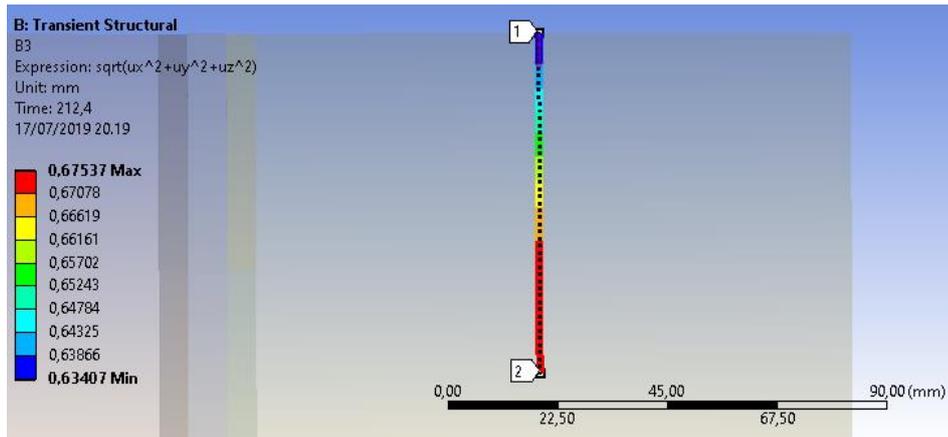
Gambar D.24 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 2 (Simetri) Titik A4



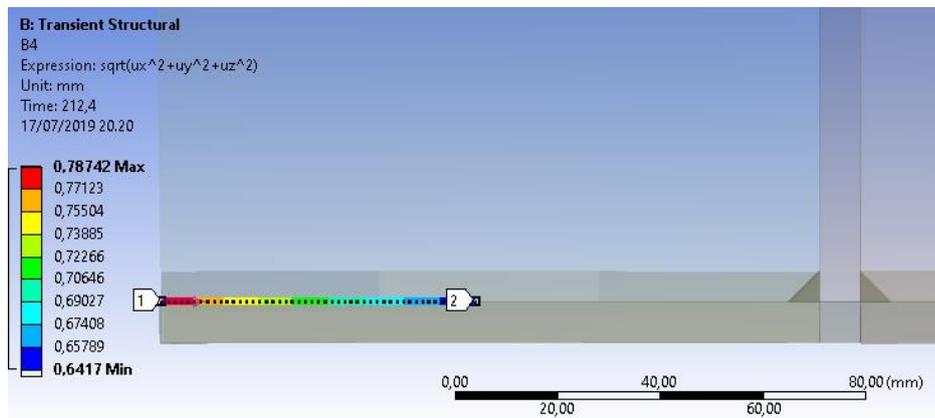
Gambar D.25 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 2 (Simetri) Titik B1



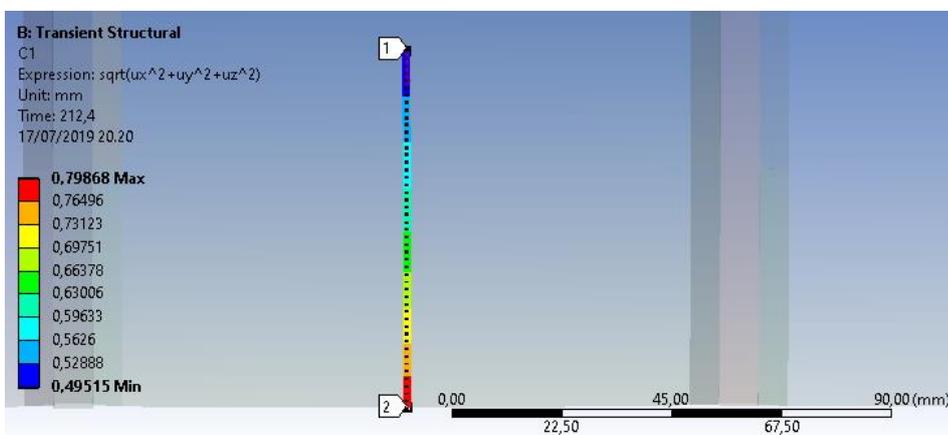
Gambar D.26 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 2 (Simetri) Titik B2



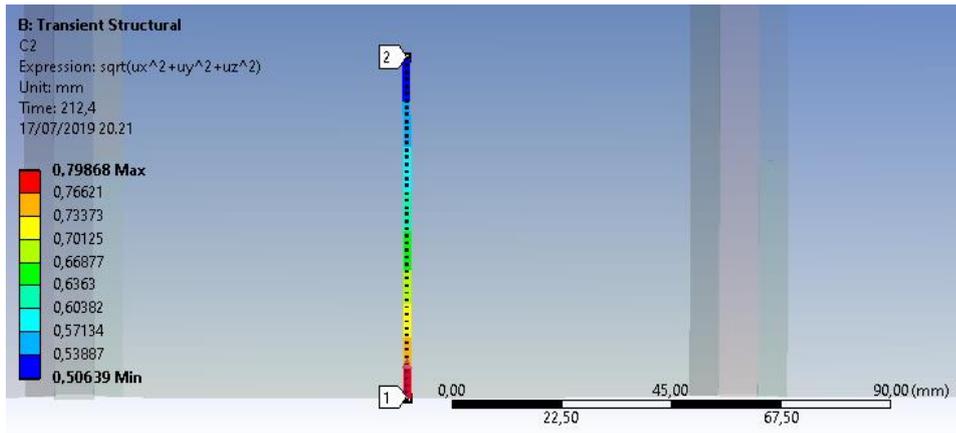
Gambar D.27 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 2 (Simetri) Titik B3



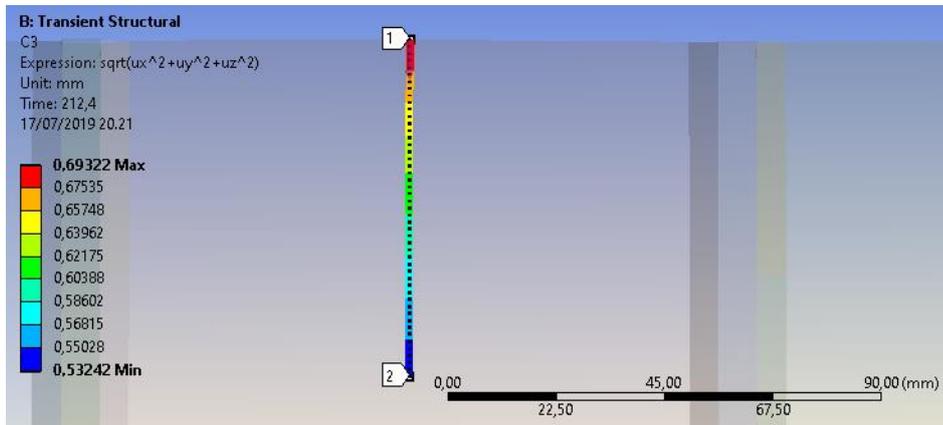
Gambar D.28 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 2 (Simetri) Titik B4



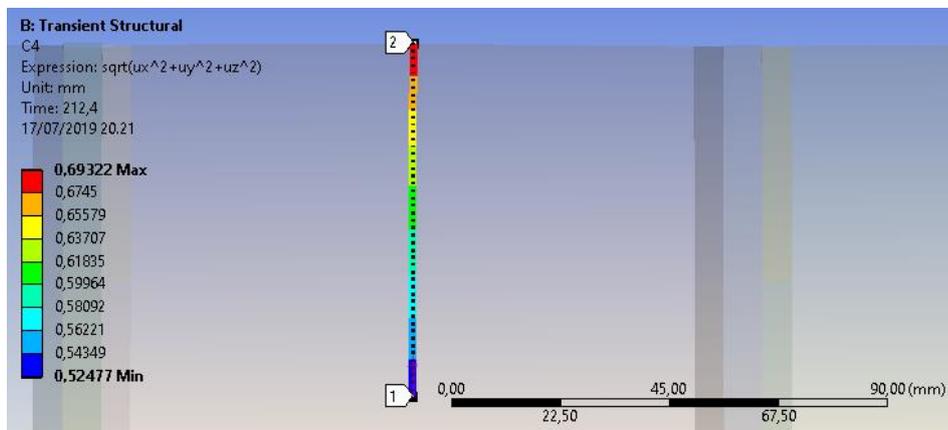
Gambar D.29 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 2 (Simetri) Titik C1



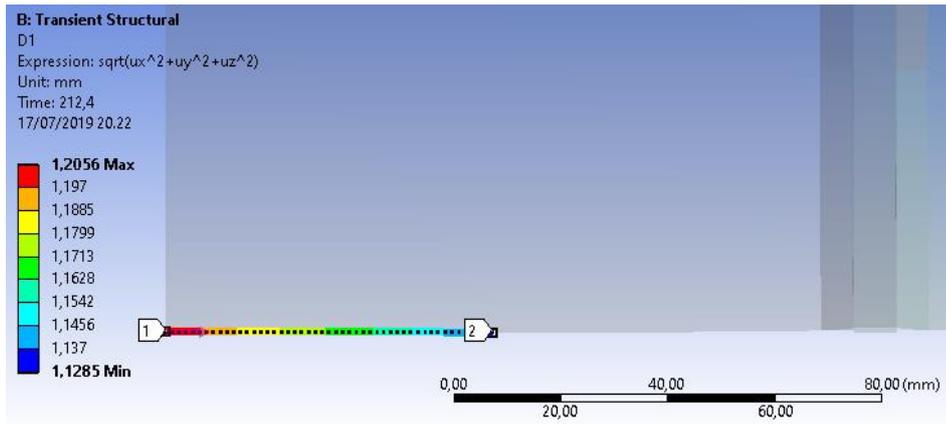
Gambar D.30 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 2 (Simetri) Titik C2



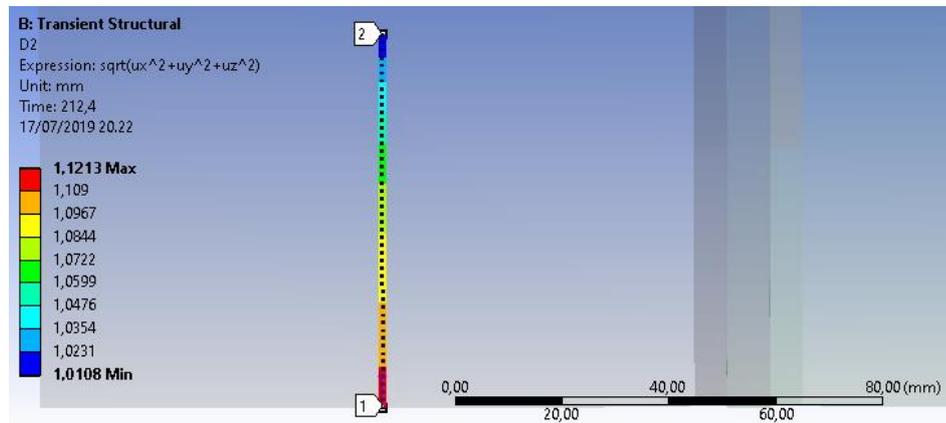
Gambar D.31 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 2 (Simetri) Titik C3



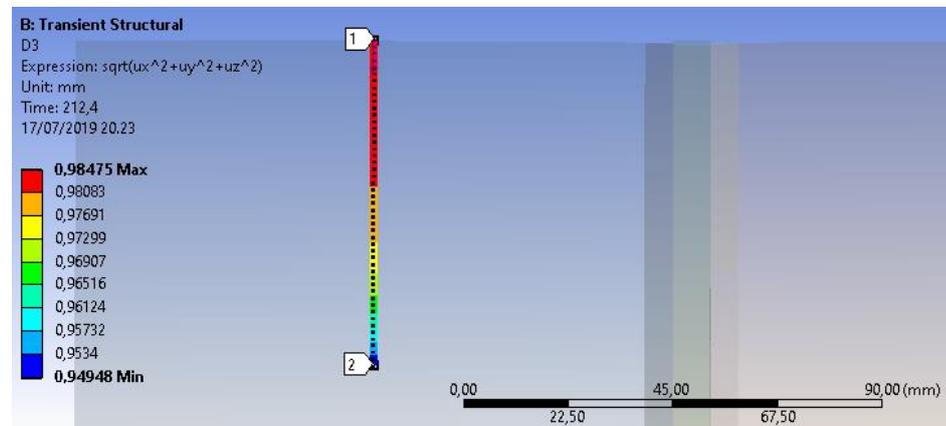
Gambar D.32 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 2 (Simetri) Titik C4



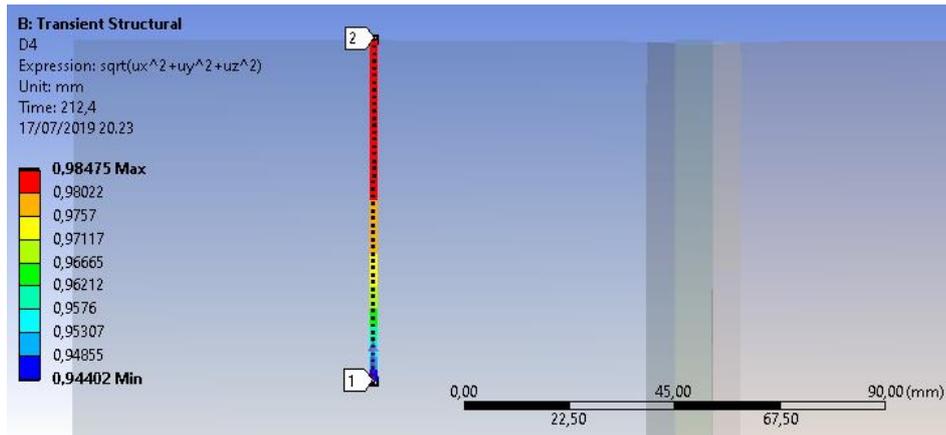
Gambar D.33 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 2 (Simetri) Titik D1



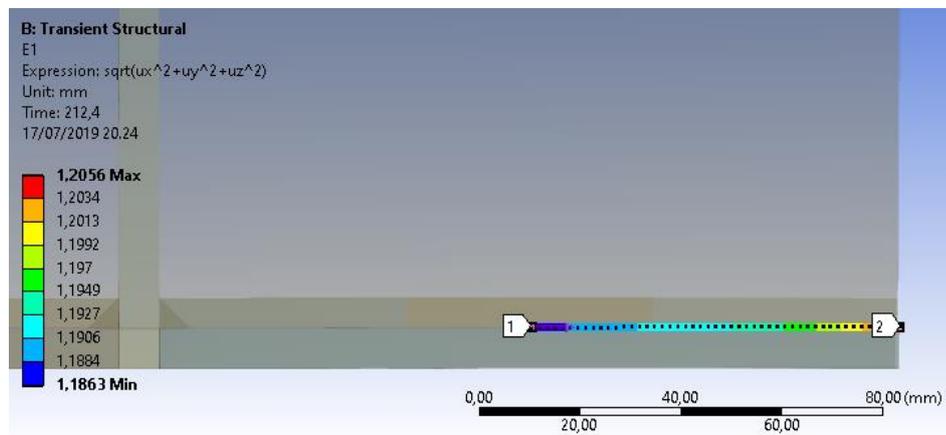
Gambar D.34 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 2 (Simetri) Titik D2



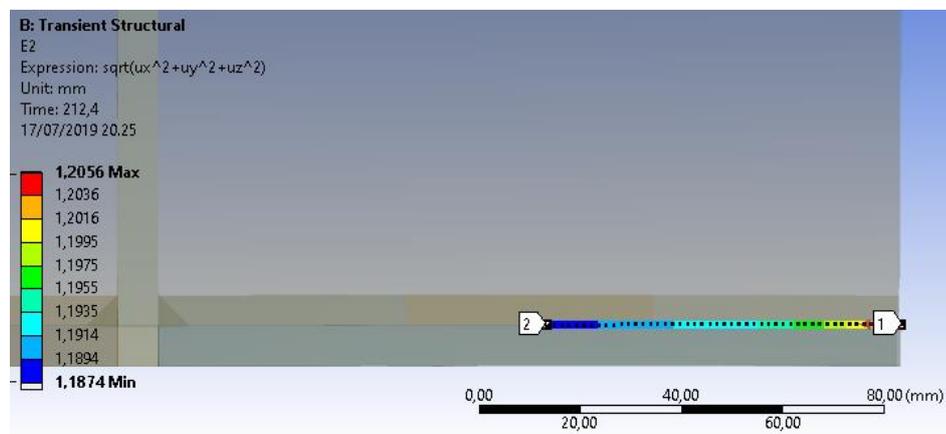
Gambar D.35 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 2 (Simetri) Titik D3



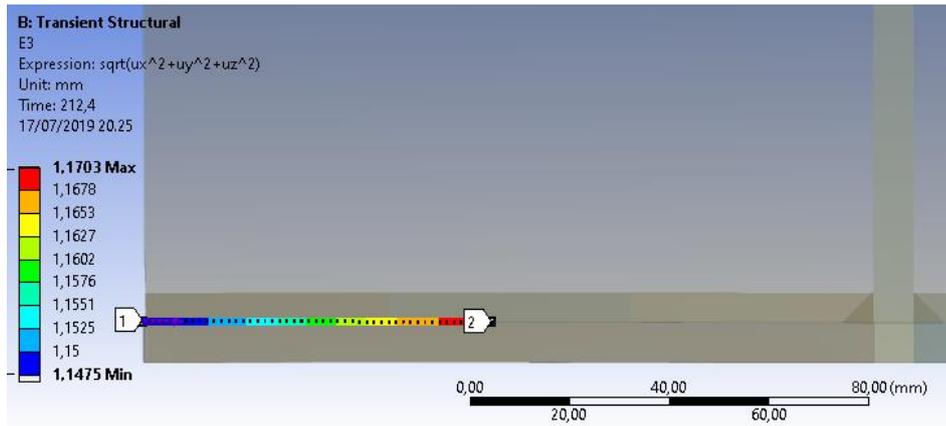
Gambar D.36 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 2 (Simetri) Titik D4



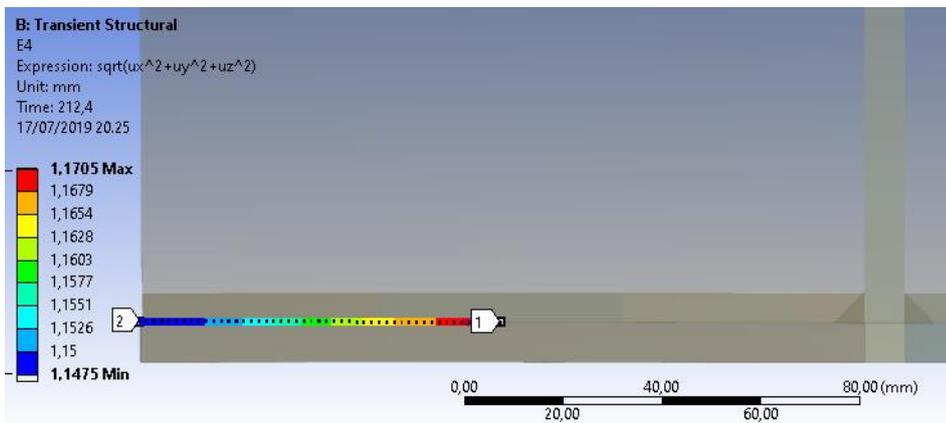
Gambar D.37 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 2 (Simetri) Titik E1



Gambar D.38 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 2 (Simetri) Titik E2

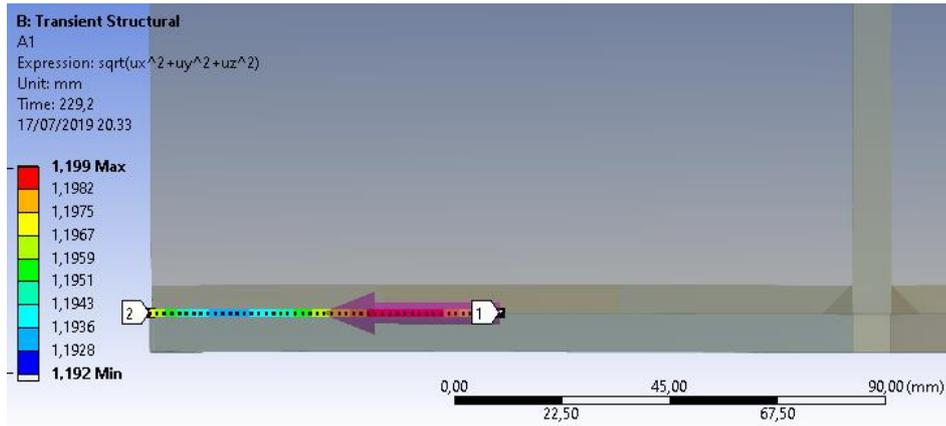


Gambar D.39 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 2 (Simetri) Titik E3

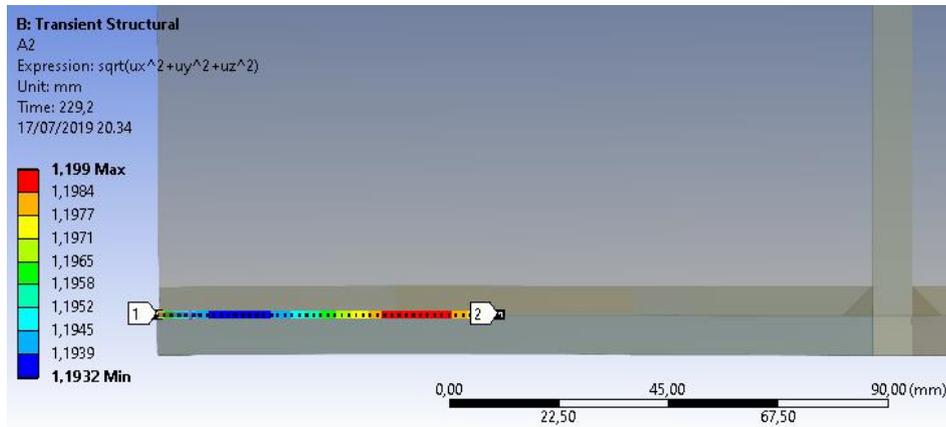


Gambar D.40 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 2 (Simetri) Titik E4

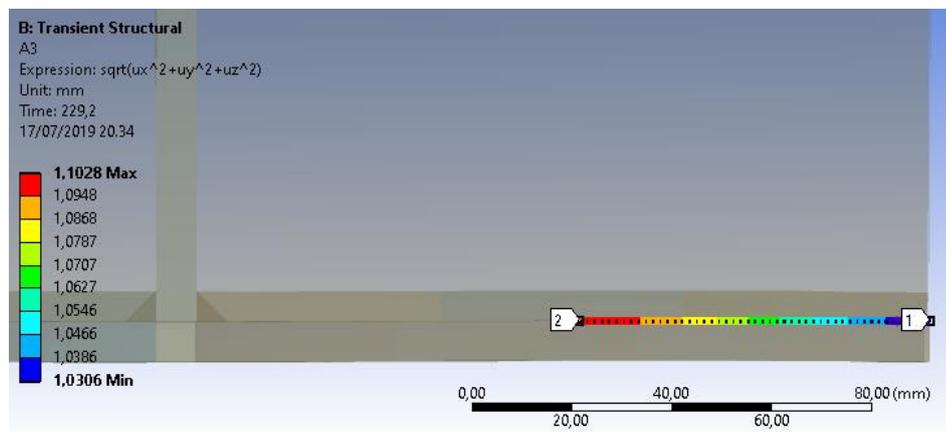
D.3 Pengukuran Deformasi Sudut Pada Variasi Urutan Pengelasan 3 (Loncat)



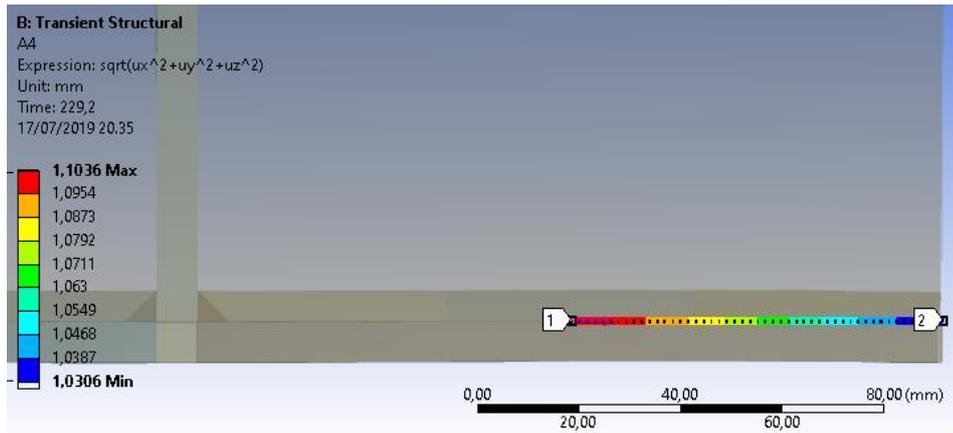
Gambar D.41 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 3 (Loncat) Titik A1



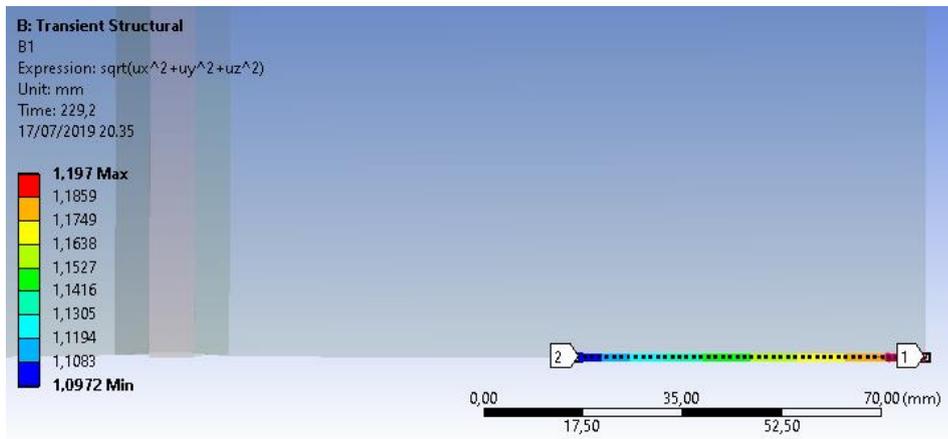
Gambar D.42 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 3 (Loncat) Titik A2



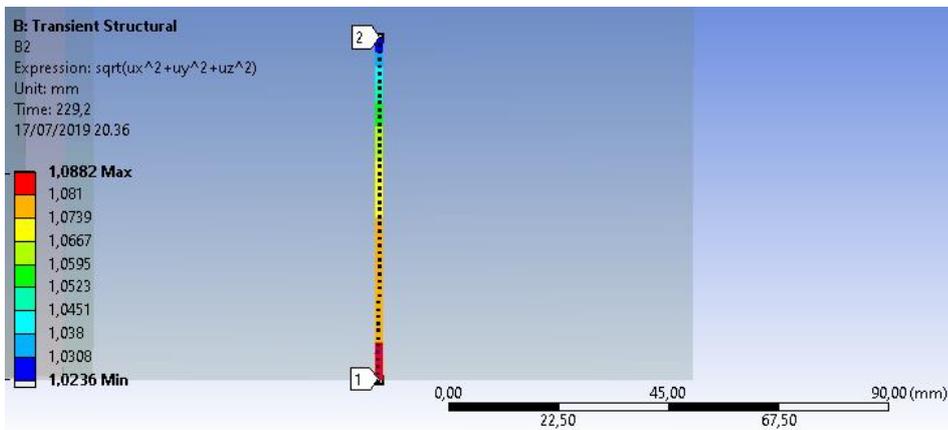
Gambar D.43 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 3 (Loncat) Titik A3



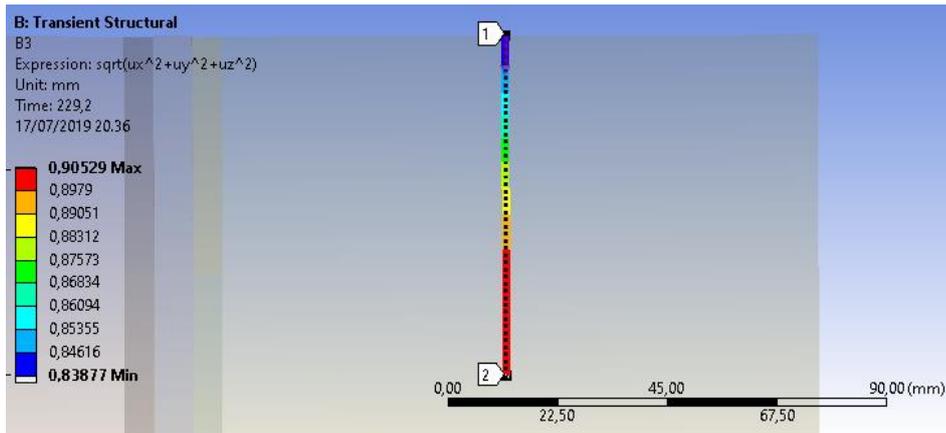
Gambar D.44 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 3 (Loncat) Titik A4



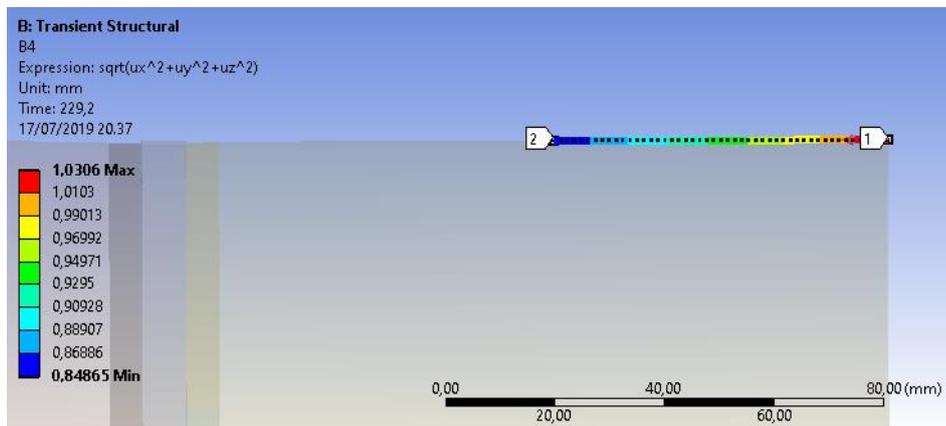
Gambar D.45 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 3 (Loncat) Titik B1



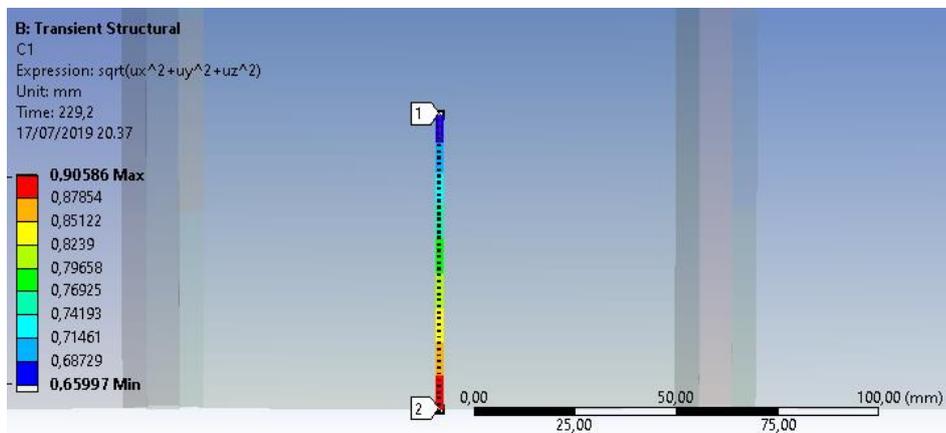
Gambar D.46 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 3 (Loncat) Titik B2



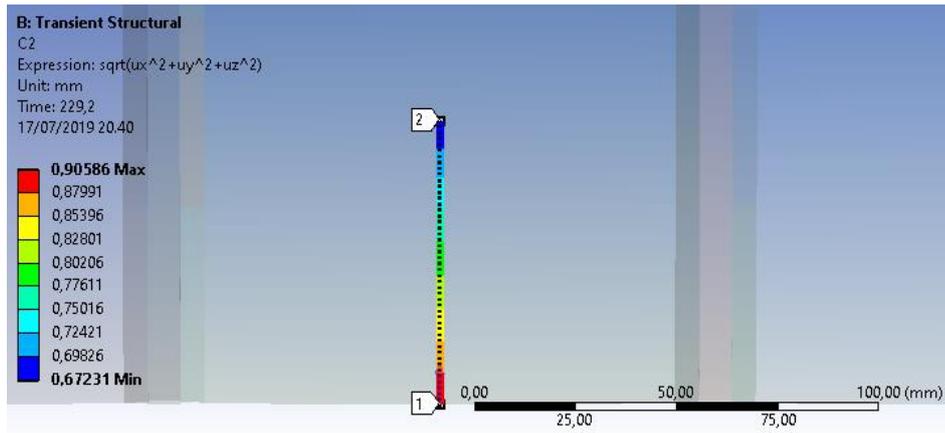
Gambar D.47 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 3 (Loncat) Titik B3



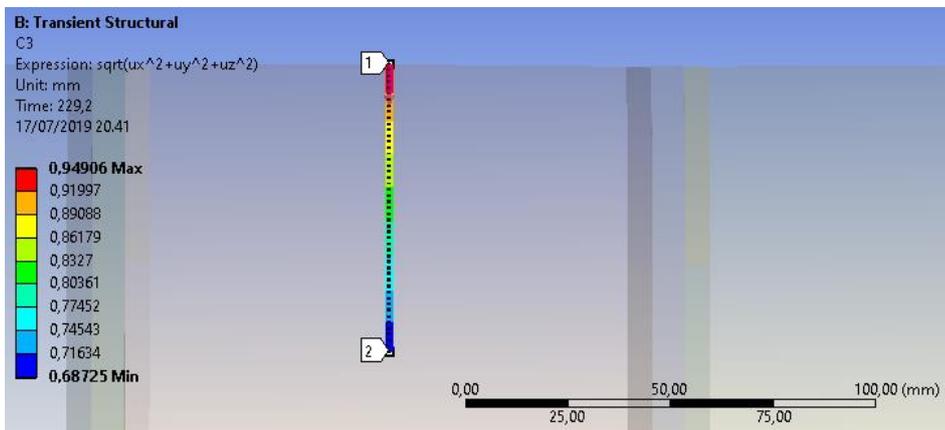
Gambar D.48 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 3 (Loncat) Titik B4



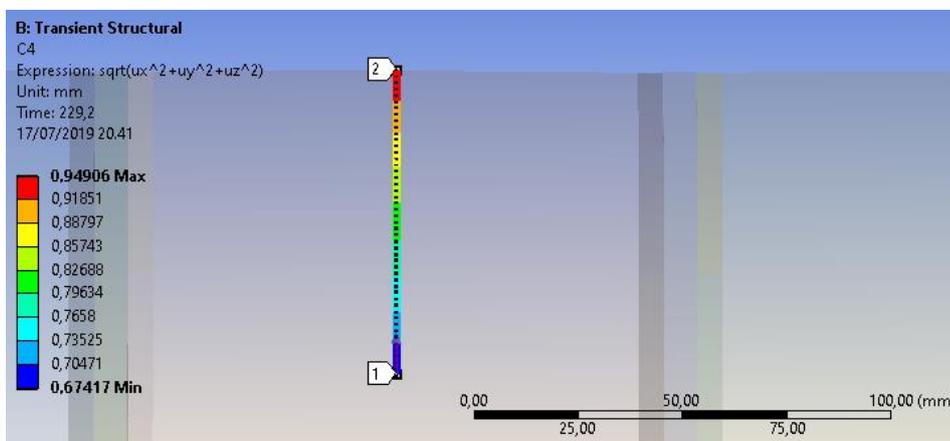
Gambar D.49 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 3 (Loncat) Titik C1



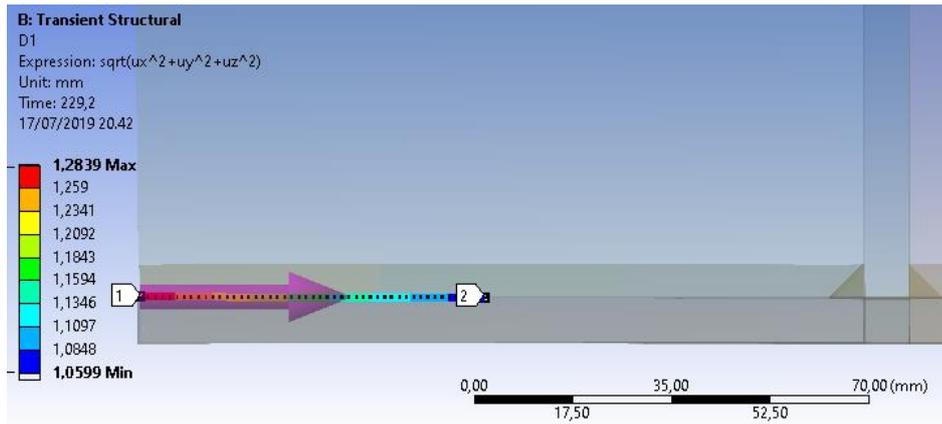
Gambar D.50 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 3 (Loncat) Titik C2



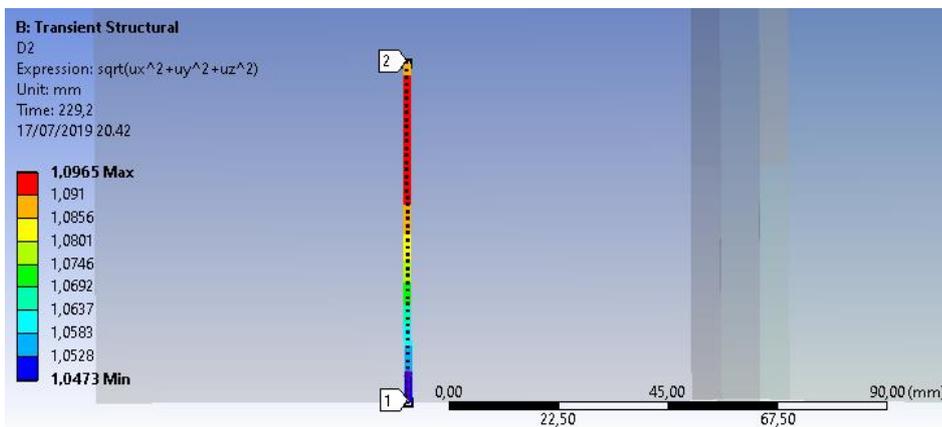
Gambar D.51 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 3 (Loncat) Titik C3



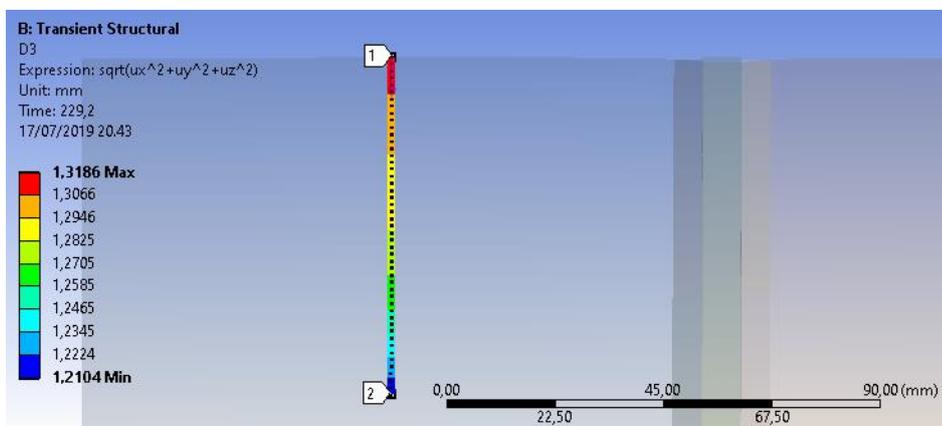
Gambar D.52 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 3 (Loncat) Titik C4



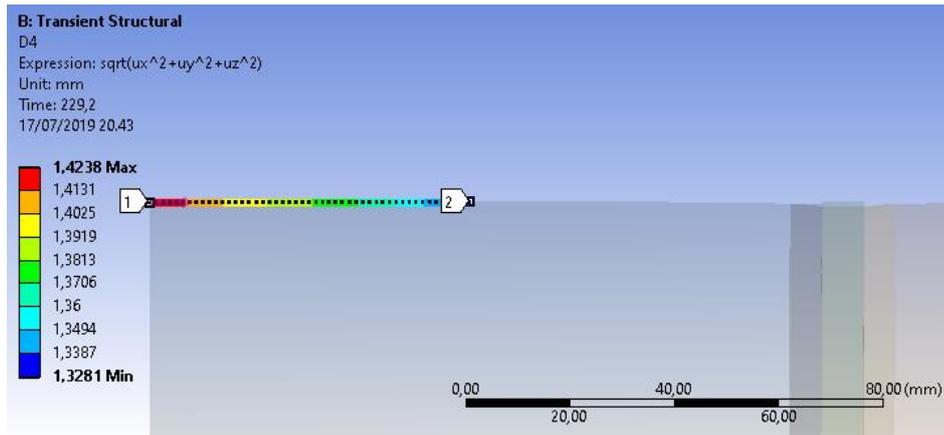
Gambar D.53 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 3 (Loncat) Titik D1



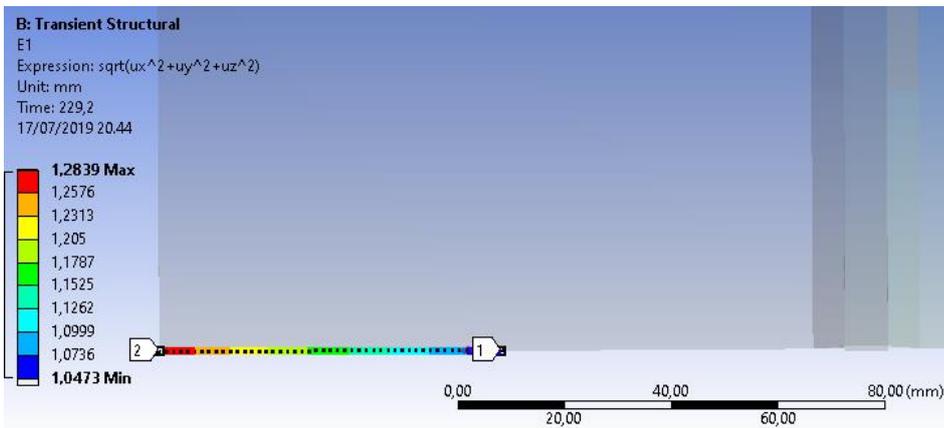
Gambar D.54 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 3 (Loncat) Titik D2



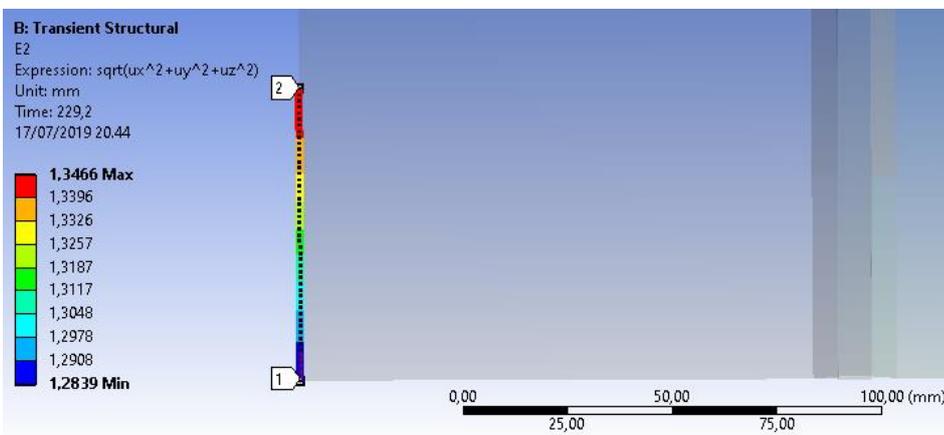
Gambar D.55 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 3 (Loncat) Titik D3



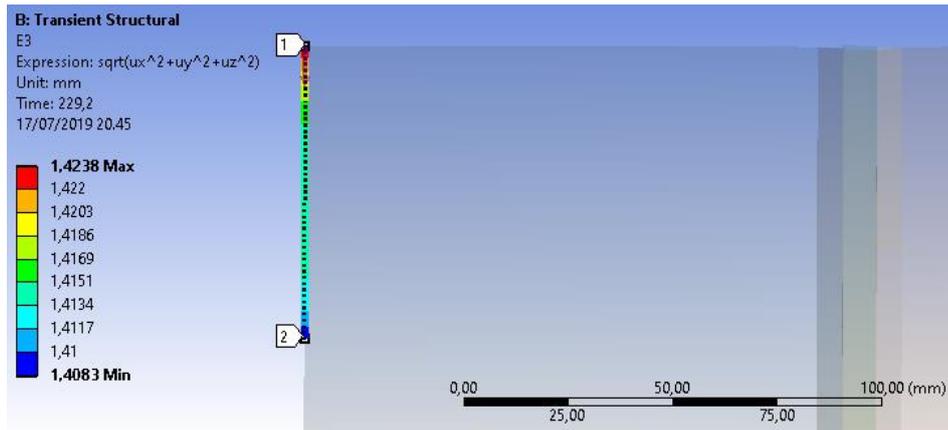
Gambar D.56 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 3 (Loncat) Titik D4



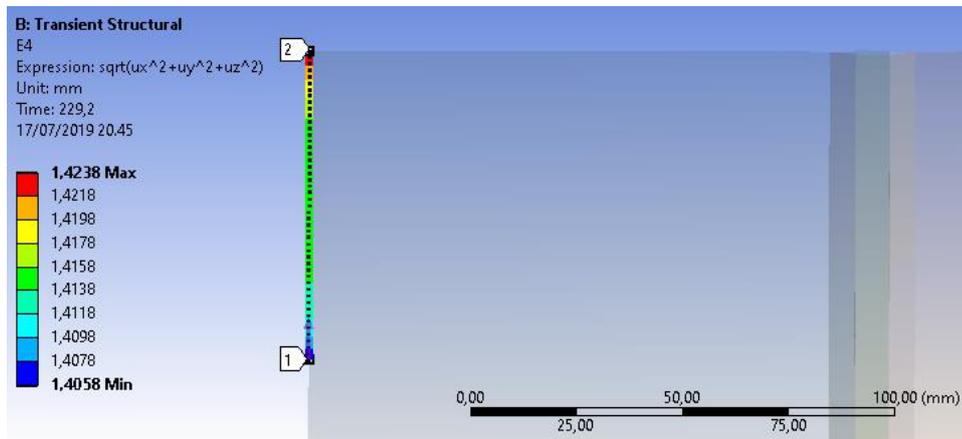
Gambar D.57 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 3 (Loncat) Titik E1



Gambar D.58 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 3 (Loncat) Titik E2



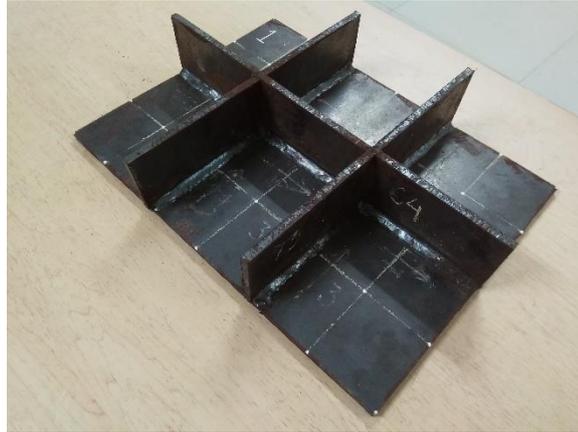
Gambar D.59 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 3 (Loncat) Titik E3



Gambar D.60 Hasil Pengukuran Deformasi Sudut pada Variasi Urutan Pengelasan 3 (Loncat) Titik E4

LAMPIRAN E
(DOKUMENTASI HASIL EKSPERIMEN)

E.1 Dokumentasi Hasil Eksperimen Variasi Urutan Pengelasan 1 (Lurus)



Gambar E.1 Hasil Eksperimen Variasi 1 (Lurus) Tampak Isometri



Gambar E.2 Hasil Eksperimen Variasi 1 (Lurus) Tampak Depan



Gambar E.3 Hasil Eksperimen Variasi 1 (Lurus) Tampak Belakang

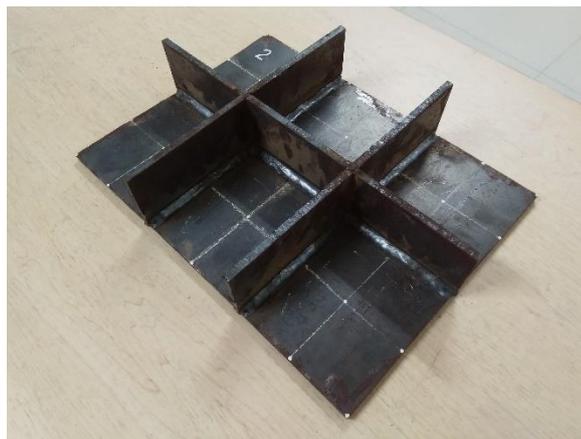


Gambar E.4 Hasil Eksperimen Variasi 1 (Lurus) Tampak Samping Kanan



Gambar E.5 Hasil Eksperimen Variasi 1 (Lurus) Tampak Samping Kiri

E.2 Dokumentasi Hasil Eksperimen Variasi Urutan Pengelasan 2 (Simetri)



Gambar E.6 Hasil Eksperimen Variasi 2 (Simetri) Tampak Isometri



Gambar E.7 Hasil Eksperimen Variasi 2 (Simetri) Tampak Depan



Gambar E.8 Hasil Eksperimen Variasi 2 (Simetri) Tampak Belakang

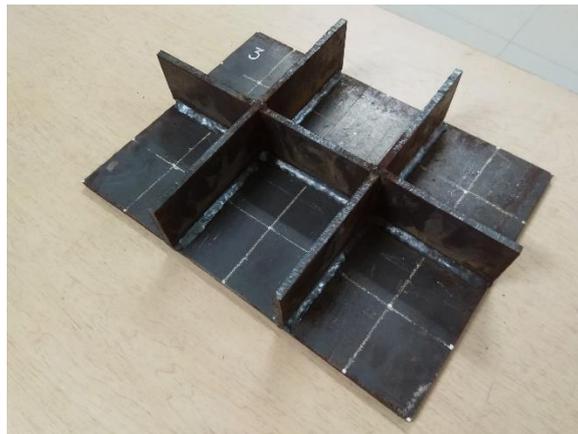


Gambar E.9 Hasil Eksperimen Variasi 2 (Simetri) Tampak Samping Kanan



Gambar E.10 Hasil Eksperimen Variasi 2 (Simetri) Tampak Samping Kiri

E.3 Dokumentasi Hasil Eksperimen Variasi Urutan Pengelasan 3 (Loncat)



Gambar E.11 Hasil Eksperimen Variasi 3 (Loncat) Tampak Isometri



Gambar E.12 Hasil Eksperimen Variasi 3 (Loncat) Tampak Depan



Gambar E.13 Hasil Eksperimen Variasi 3 (Loncat) Tampak Belakang



Gambar E.14 Hasil Eksperimen Variasi 3 (Loncat) Samping Kanan



Gambar E.15 Hasil Eksperimen Variasi 3 (Loncat) Samping Kiri

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Lamongan, 16 Juli 1997 dengan nama Muhammad Satrio Tuhu Nugroho. Merupakan anak pertama dari dua bersaudara, putra pasangan Prpto Mulyono dan Nuryasih. Sehari-hari penulis dipanggil Satrio dan ada pula yang memanggil Tuhu. Dari Sekolah Dasar hingga Sekolah Menengah Atas penulis menyelesaikannya di kabupaten Lamongan, Jawa Timur. Pada tahun 2015 penulis lulus dari SMA N 2 Lamongan. Kemudian diterima di Teknik Kelutan ITS pada tahun yang sama (2015). Dalam perkuliahan, penulis aktif mengikuti kegiatan baik akademik maupun non akademik. Dalam lingkup departemen, penulis pernah diamanahi sebagai koordinator asisten Laboratorium Pantai dan Lingkungan Laut pada tahun 2018 dan panitia OCEANO (*Ocean Engineering Exhibition and Competition*) 2018. Sedangkan di luar akademik penulis aktif dalam UKM (Unit Kegiatan Mahasiswa) Pencak Silat Merpati Putih dan pernah diamanahi sebagai Kepala Departemen Pengembangan Sumber Daya Anggota pada tahun 2017. Penulis juga aktif dalam organisasi Mahagana ITS (Mahasiswa Penanggulangan Bencana, ITS) yang mana pada tahun 2017 dan 2018 diamanahi sebagai Wakil Koordinator Umum dan Kepala Divisi Riset Bencana. Penulis tertarik mempelajari lebih lanjut tentang material dan produksi bangunan laut. Pada tahun 2018 penulis berkesempatan menempuh Kerja Praktik di PT PAL Indonesia (Persero) pada Divisi QA (*Quality Assurance*), Biro DT/NDT (*Distructive Testing/Non Distructive Testing*). Pada kesempatan yang sama penulis melakukan analisis numerik tentang pengaruh *welding sequence* pada pembuatan dudukan/pondasi mesin. Kemudian penelitian tersebut dikembangkan dan dijadikan Tugas Akhir oleh penulis. Penulis juga telah tersertifikasi sebagai inspektor NDT Level II pada *Limited RT* (*Radiographic Testing*), PT (*Penetrant Testing*), dan MT (*Magnetic Testing*).

Kontak penulis: 085735530661/satrio.muhammadtn@gmail.com