



**TUGAS AKHIR - MO 141326**

**ANALISA TEGANGAN SISA DAN DISTORSI PADA  
SAMBUNGAN TUBULAR TIPE T DENGAN PENGARUH *POST  
WELD HEAT TREATMENT* MENGGUNAKAN METODE  
ELEMEN HINGGA**

**ANGGI APRILIA PANGESTI**

**NRP. 4312 100 082**

**Dosen Pembimbing :**

**Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.**

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

**Jurusan Teknik Kelautan**

**Fakultas Teknologi Kelautan**

**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Surabaya**

**2016**



**FINAL PROJECT - MO 141326**

**ANALYSIS OF RESIDUAL STRESS AND DISTORTION ON  
TUBULAR T-JOINTS DUE TO THE INFLUENCE OF POST  
WELD HEAT TREATMENT USING FINITE ELEMENT  
METHOD**

**ANGGI APRILIA PANGESTI**

**NRP. 4312 100 082**

**Supervisors :**

**Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.**

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

**Departement Of Ocean Engineering**

**Faculty of Marine Technology**

**Sepuluh Nopember Institute of Technology**

**Surabaya**

**2016**

## LEMBAR PENGESAHAN

### ANALISA TEGANGAN SISA DAN DISTORSI PADA SAMBUNGAN TUBULAR TIPE T DENGAN PENGARUH *POST WELD HEAT TREATMENT* MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

#### TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada Program Studi S-1 Jurusan Teknik Kelautan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**ANGGI APRILIA PANGESTI**

NRP. 4312 100 082

Disetujui oleh:

1. Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D. (Pembimbing 1)  
.....
2. Ir. Handyanu, M.Sc., Ph.D. (Pembimbing 2)  
.....
3. Dr. Eng. Muhammad Zikra, S.T., M.Sc. (Penguji 1)  
.....
4. Ir. Wisnu Wardhana, S.E., M.Sc., Ph.D. (Penguji 2)  
.....
5. Kriyo Sambodho, S.T., M.Eng., Ph.D. (Penguji 3)  
.....

SURABAYA, JULI 2016

**ANALISA TEGANGAN SISA DAN DISTORSI PADA SAMBUNGAN  
TUBULAR TIPE T DENGAN PENGARUH *POST WELD HEAT  
TREATMENT* MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

**Nama Mahasiswa : Anggi Aprilia Pangesti  
NRP : 4312100082  
Jurusan : Teknik Kelautan – FTK ITS  
Dosen Pembimbing : Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D  
Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.**

**ABSTRAK**

Komponen struktur lepas pantai yang umumnya sambungan tubular harus diperhatikan proses pengelasannya karena dapat mempengaruhi kekuatan sambungan. Pemanasan lokal pada sambungan tubular dan proses pendinginan yang cepat dapat menyebabkan terjadinya tegangan sisa. Tegangan akibat panas pengelasan ini dapat menyebabkan distorsi pada sambungan tubular. Dalam tugas akhir ini akan dibahas tentang tegangan sisa dan distorsi yang terjadi pada sambungan tubular T akibat pengelasan. Simulasi pengelasan sambungan tubular T dilakukan menggunakan *software* berbasis metode elemen hingga dengan data parameter pengelasan berdasarkan *Welding Procedure Specification (WPS)* dari fabrikator. Sambungan tubular T dimodelkan dengan spesifikasi material baja SM 400. Simulasi terbagi menjadi dua analisa yaitu analisa termal dan analisa struktural. Dalam analisa termal didapatkan suhu pengelasan dari daerah las dan dalam analisa struktural didapatkan tegangan sisa. Distribusi tegangan sisa ditinjau untuk tegangan sisa arah aksial pada bagian atas, tengah, dan bawah *chord*. Nilai distribusi tegangan sisa arah aksial berkisar antara -70 MPa sampai 244 MPa. Sedangkan nilai total deformasi maksimum yang terjadi setelah pengelasan adalah 3,3 mm. Setelah simulasi pengelasan dilakukan dilanjutkan simulasi *post weld heat treatment (PWHT)* dengan variasi suhu dan waktu tahan pada sambungan tubular sesuai dengan ketentuan AWS D1.1:2000. Hal ini dilakukan untuk mengurangi tegangan sisa yang terjadi. Simulasi *PWHT* terbagi menjadi *heating rate*, *holding time*, dan *cooling time* pada analisa termal lalu dilanjutkan analisa struktural. Tegangan sisa hasil *PWHT* ditinjau pada bagian atas *chord* untuk melihat pengurangan tegangan sisa. Setelah dilakukan semua variasi suhu dan waktu tahan *PWHT*, tegangan sisa berkurang. Dari semua variasi *PWHT*, nilai tegangan sisa arah aksial maksimum bagian atas *chord* berkurang dari 141 MPa menjadi -14,6 MPa.

**Kata Kunci :** tegangan sisa, deformasi, sambungan tubular T, metode elemen, hingga, dan *post weld heat treatment*

**ANALYSIS OF RESIDUAL STRESS AND DISTORTION ON TUBULAR  
T-JOINTS DUE TO THE INFLUENCE OF POST WELD HEAT  
TREATMENT USING FINITE ELEMENT METHOD**

**Name : Anggi Aprilia Pangesti**  
**NRP : 4312100082**  
**Department : Teknik Kelautan – FTK ITS**  
**Supervisors : Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.**  
**Ir. Handayanu, M.Sc., Ph. D.**

**ABSTRACT**

*Components of offshore structures which is generally tubular connection must be considered because the welding process can affect the strength of the connection. Local heating in tubular connections and the rapid cooling process can cause residual stress. The residual stress is calculated based on the strain due to temperature distribution during cooling time, from welding temperature to the room temperature. Stress due to welding temperature causes distortion of the tubular connection. This final project is to carry out simulation of residual stress and distortion analysis of Tubular T-joint caused by welding process. Welding simulation performed with finite element based software. Tubular T-joints modeled with material specifications SM 400, while the data for welding simulation taken from Welding Procedure Specification (WPS) made by fabricator. Simulation analysis comprises of two steps which are thermal analysis and structural analysis. In thermal analysis we can obtain welding temperature of the weld area, whereas structural analysis we can obtain the residual stress. The distribution of axial residual stress were observed at the top, the middle and the bottom chord. The value of residual stress distribution in axial direction ranges from -70 MPa to 244 MPa. Meanwhile the total value of the maximum deformation that occurs after welding process is 3.3 mm. To reduce residual stress can be done by post-weld heat treatment (PWHT) with temperature and holding time specified in accordance with the thickness and type of material connection. After welding simulation is done PWHT simulation performed with temperature and holding time variations on the tubular connection in accordance with the provisions of AWS D1.1: 2000. PWHT simulation is divided into heating rate, holding time, and cooling time in the thermal analysis and continue with structural analysis. The residual stress results after PWHT is reviewed in the upper chord to see any reduction in residual stress. The maximum stress value of residual stress the upper chord in axial direction is 141 MPa. After all the variations of temperature and holding time PWHT, the residual stress is reduced significantly. Of all the variations of PWHT, the maximum residual stress the upper chord in axial direction reduced from 141 MPa to -14.6 MPa.*

**Keywords:** *residual stress, deformation, tubular T-joints, finite element method, and post weld heat treatment*

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
ABSTRAK .....	iv
ABSTRACT .....	v
KATA PENGANTAR .....	vi
UCAPAN TERIMA KASIH.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 LATAR BELAKANG MASALAH.....	1
1.2 PERUMUSAN MASALAH .....	2
1.3 TUJUAN .....	3
1.4 MANFAAT .....	3
1.5 BATASAN MASALAH .....	3
1.6 SISTEMATIKA PENULISAN .....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	5
2.1 TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.2 DASAR TEORI.....	6
2.2.1 Siklus Termal Pengelasan .....	6
2.2.2 Tegangan Sisa .....	11
2.2.3 Deformasi Pada Pengelasan .....	16
2.2.4 <i>Post Weld Heat Treatment</i> .....	17
2.2.5 Metode Elemen Hingga.....	23
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	31
3.1 METODE PENELITIAN .....	31
3.2 PENJELASAN DIAGRAM ALIR PENELITIAN .....	32
3.2.1 Studi Literatur .....	32
3.2.2 Pengumpulan Data .....	33
3.2.3 Pemodelan Geometri Sambungan Tubular T.....	35

3.2.4	Input Geometri Sambungan Tubular Tipe T Ke <i>Software</i> ANSYS Mechanical APDL 16.0 .....	36
3.2.5	Analisa Termal Menggunakan <i>Software</i> ANSYS Mechanical APDL 16.0 .....	37
3.2.6	Analisa Struktural Menggunakan <i>Software</i> ANSYS Mechanical APDL 16.0.....	42
3.2.7	Analisa <i>Post Weld Heat Treatment</i> Dengan Variasi Suhu Dan Waktu Tahan .....	44
3.2.8	Analisa Dan Pembahasan.....	45
3.2.9	Kesimpulan .....	45
3.2.10	Penyusunan Laporan .....	45
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN.....		47
4.1	SIMULASI PENGELASAN.....	47
4.1.1	Data-Data Untuk Simulasi Pengelasan .....	47
4.1.1.1	Perhitungan Beban Heat Flux.....	48
4.2	ANALISA PEMODELAN GEOMETRI DAN SENSITIFITAS MESHING.....	51
4.3	ANALISA DISTRIBUSI PANAS/TEMPERATUR .....	54
4.4	HASIL ANALISA TEGANGAN SISA.....	57
4.4.1	Distribusi Tegangan Sisa Bagian Atas Chord.....	58
4.4.2	Distribusi Tegangan Sisa Bagian Tengah <i>Chord</i> .....	59
4.4.3	Distribusi Tegangan Sisa Bagian Bawah <i>Chord</i> .....	60
4.5	VALIDASI HASIL TEGANGAN SISA .....	62
4.6	ANALISA TOTAL DEFORMASI .....	65
4.7	ANALISA TEGANGAN SISA SETELAH PERLAKUAN <i>POST WELD HEAT TREATMENT</i> .....	67
BAB V PENUTUP.....		73
5.1	KESIMPULAN .....	73
5.2	SARAN .....	74
DAFTAR PUSTAKA .....		75
LAMPIRAN		
BIOGRAFI PENULIS		

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Nilai koefisien efisiensi pengelasan .....	8
Tabel 2.2 <i>Minimum Holding Time</i> .....	21
Tabel 2.3 <i>Alternate Stress-Relief Heat Treatment</i> .....	22
Tabel 3.1 Ukuran geometri sambungan tubular tipe T .....	33
Tabel 3.2 Data Pengelasan .....	33
Tabel 3.3 Data Material SM 400.....	34
Tabel 3.4 Data Material SM 400.....	34
Tabel 4.1 Variasi ukuran meshing dan jumlah elemen .....	52
Tabel 4.2 <i>Load step</i> simulasi pengelasan.....	56
Tabel 4.3 Variasi suhu dan waktu tahan untuk simulasi PWHT .....	67
Tabel 4.4 Pengurangan tegangan sisa setelah <i>post weld heat treatment</i> .....	70

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Pengurangan tegangan sisa dengan variasi suhu <i>PWHT</i> (Linnert, 1967) .....	6
Gambar 2.2 Siklus termal selama proses pengelasan.....	7
Gambar 2.3 Pembentukan tegangan sisa (Wiryosumarto, 2010).....	12
Gambar 2.4 Distribusi tegangan sisa pada las melingkar pada pipa (Wiryosumarto, 2010) .....	12
Gambar 2.5 Distribusi tegangan sisa pada las berbentuk lingkaran (Wiryosumarto, 2010) .....	13
Gambar 2.6 Skema distribusi tegangan sisa dalam sambungan las tumpul (Wiryosumarto, 2010).....	13
Gambar 2.7 Urutan pengelasan pada plat (Wiryosumarto, 2010).....	15
Gambar 2.7 Urutan pengelasan melingkar menerus, simetri, dan loncat.....	15
Gambar 2.9 Macam-macam distorsi pada pengelasan .....	17
Gambar 2.10 <i>PWHT</i> pada pipa dengan ukuran besar .....	19
Gambar 2.11 <i>Local heating</i> pada sambungan tubular.....	19
Gambar 2.12 Grafik siklus termal proses <i>PWHT</i> .....	20
Gambar 2.13 Contoh pendiskritan plat berlubang (Hidajat, 2009).....	23
Gambar 2.14 Geometri Elemen SOLID70 (ANSYS, 2013) .....	25
Gambar 2.15 Geometri Elemen SOLID90 (ANSYS, 2013) .....	25
Gambar 2.16 Bentuk elemen yang dapat dibentuk SOLID45 (ANSYS, 2013)....	26
Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir.....	31
Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir (lanjutan) .....	32
Gambar 3.2 Tampak Isometri X Platform.....	35
Gambar 3.3 Hasil pembuatan sambungan geometri sambungan tubular T .....	36
Gambar 3.4 Pemodelan pembagian area las .....	36
Gambar 3.5 Diagram alir analisa termal .....	37
Gambar 3.5 Diagram alir analisa termal (lanjutan).....	38
Gambar 3.6 Tipe Analisa .....	40
Gambar 3.7 Diagram alir analisa struktural .....	42
Gambar 4.1. Pemodelan geometri sambubngan tubular T.....	51
Gambar 4.2 Pemodelan dengan <i>meshing</i> hexahedral dan tetrahedral.....	52

Gambar 4.4 Grafik sensitifitas <i>meshing</i> .....	53
Gambar 4.5 <i>Meshing</i> (20250 elemen) .....	54
Gambar 4.6 Area pembebanan panas .....	55
Gambar 4.7 Ilustrasi pengelasan (kiri) kondisi akhir pendinginan (kanan) .....	55
Gambar 4.8 Distribusi temperatur pada node 12487 <i>load step 1</i> .....	57
Gambar 4.10 Distribusi tegangan sisa arah aksial bagian atas <i>chord</i> .....	58
Gambar 4.11 <i>Pathline</i> untuk pembacaan tegangan sisa bagian tengah <i>chord</i> .....	59
Gambar 4.12 Distribusi tegangan sisa arah aksial bagian tengah <i>chord</i> .....	60
Gambar 4.13 <i>Pathline</i> untuk pembacaan tegangan sisa bagian bawah <i>chord</i> .....	61
Gambar 4.14 Distribusi tegangan sisa arah aksial bagian bawah <i>chord</i> .....	61
Gambar 4.15 Model geometri yang digunakan referensi G.C. Jang dkk (2007) ..	62
Gambar 4.16 Validasi distribusi tegangan sisa arah aksial bagian atas <i>chord</i> .....	63
Gambar 4.17 Validasi distribusi tegangan sisa arah aksial bagian tengah <i>chord</i> ..	64
Gambar 4.18 Validasi distribusi tegangan sisa arah aksial bagian bawah <i>chord</i> ..	65
Gambar 4.19 Total deformasi .....	66
Gambar 4.20 Perbandingan sambungan tubular <i>undeformed</i> dan <i>deformed</i> .....	66
Gambar 4.21 Distribusi temperatur saat proses <i>PWHT</i> pada semua variasi suhu	68
Gambar 4.22 Distribusi tegangan sisa setelah pengelasan dan setelah proses <i>PWHT</i> .....	69
Gambar 4.21 Distribusi tegangan sisa bagian atas <i>chord</i> tampak atas .....	71

## DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A TAHAP SIMULASI NUMERIK PADA *SOFTWARE* ANSYS  
Mechanical APDL 16.0

LAMPIRAN B INPUT FILE ANALISA TERMAL PADA *SOFTWARE* ANSYS  
Mechanical APDL 16.0

LAMPIRAN C INPUT FILE ANALISA STRUKTURAL PADA *SOFTWARE*  
ANSY Mechanical APDL 16.0

LAMPIRAN D DATA PARAMETER PENGELASAN BERDASARKAN  
*WELDING PROCEDURE SPESIFICATION (WPS)*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 LATAR BELAKANG MASALAH

Dalam eksplorasi minyak lepas pantai, struktur yang paling banyak digunakan merupakan struktur tipe *fixed platform* selain jenis bangunan terapung. Pada bangunan lepas pantai komponen utama yang digunakan umumnya terdiri dari baja yang berbentuk silindris, disebut sebagai tubular. Komponen-komponen tubular ini saling dihubungkan dengan sambungan yang dikenal dengan sambungan tubular atau *tubular joint*. Sambungan tubular bagian utama disebut dengan *chord* dan bagian cabang disebut dengan *brace*. Sambungan tubular ini tidak hanya digunakan pada anjungan lepas pantai, tetapi juga pada struktur kapal, struktur jembatan, dll. Tipe sambungan tubular yang banyak digunakan dalam struktur adalah sambungan tubular tipe T. Tipe sambungan ini banyak digunakan karena banyaknya bentuk konstruksi yang saling tegak lurus. Aplikasi sambungan tubular tipe T banyak ditemukan di sistem perangkaan *jacket* dan juga perpipaan.

Pengelasan merupakan metode yang sangat umum dan banyak digunakan dalam proses fabrikasi penyambungan komponen suatu struktur yang terbuat dari logam. Jenis-jenis pengelasan yang dilakukan juga bermacam-macam tergantung jenis material dan geometri benda las. Tiap jenis pengelasan memiliki karakteristik tersendiri, oleh karena itu penentuan jenis pengelasan harus dilakukan secara tepat dan spesifik untuk tiap benda las. Hasil setiap pengelasan harus memiliki kualitas yang bagus agar tidak menyebabkan kegagalan pada struktur dan perubahan benda las. Proses pengelasan akan menentukan sifat dan kekuatan sambungan las.

Aspek-aspek dalam pengelasan meliputi tiga komponen yang berhubungan yaitu termal, fenomena mekanik dan transformasi fasa. Karena kompleksitas interaksi dari tiga komponen yang berhubungan ini, beberapa peneliti cenderung mempertimbangkan *thermomechanical coupling* (Bang dkk., 2002) tetapi untuk beberapa kondisi transformasi fasa juga perlu diperhatikan (Zacharia dkk, 1995). Untuk pertimbangan *thermomechanical coupling* dengan cara numerik dapat

dilakukan analisa termal dan analisa mekanik, dengan hasil berupa tegangan sisa. Tegangan sisa terjadi karena distribusi temperatur yang tidak merata saat proses pengelasan. Tegangan sisa yang terjadi ini dapat menentukan sifat dan kekuatan struktur. Jika tegangan sisa tidak diminimalisir dapat menyebabkan getas material, kegagalan *fatigue* dan pengurangan kekuatan struktur.

Proses pengelasan juga dapat menyebabkan distorsi pada sambungan tubular. Distorsi merupakan perubahan bentuk akibat adanya tegangan dalam logam las. Dalam hal ini distorsi disebabkan oleh ekspansi yang tidak uniform dari logam las selama periode pemanasan dan pendinginan. Untuk meminimalisir tegangan sisa dan distorsi dapat dilakukan dengan beberapa cara yaitu *post-welding*, *pre-welding*, *hammering*, dan pemilihan *welding sequence* ,

Untuk meminimalkan efek tegangan sisa pada sambungan las dapat dilakukan dengan aplikasi *post weld heat treatment (PWHT)*. Proses ini dilakukan dengan menerapkan panas *uniform* di daerah las dan sekitarnya selama waktu tahan tertentu. Parameter temperatur dan waktu tahan yang digunakan tergantung pada komposisi *base metal* dan *weld metal*. Hal ini akan mempengaruhi perubahan mikrostruktur yang mana akan berdampak pada sifat mekanik sambungan las. Tergantung pada temperatur *PWHT* dan teknik yang digunakan, penghilangan tegangan sisa secara menyeluruh dapat tercapai. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian mengenai analisa tegangan sisa dan distorsi pada sambungan tubular dengan adanya pengaruh *PWHT*. Sehingga dapat diketahui berapa persentase pengurangan tegangan sisa akibat ada perlakuan *PWHT*.

## **1.2 PERUMUSAN MASALAH**

1. Bagaimana distribusi panas pada sambungan tubular tipe T hasil pengelasan?
2. Bagaimana tegangan sisa dan distorsi yang terjadi pada sambungan tubular tipe T pada kondisi *as-welded*?
3. Bagaimana tegangan sisa yang terjadi pada sambungan tubular tipe T hasil pengelasan setelah diberi perlakuan *PWHT*?

### **1.3 TUJUAN**

1. Mengetahui distribusi panas pada sambungan tubular tipe T hasil pengelasan.
2. Mengetahui tegangan sisa dan distorsi yang terjadi pada sambungan tubular tipe T pada kondisi *as-welded*.
3. Mengetahui tegangan sisa yang terjadi pada sambungan tubular tipe T hasil pengelasan setelah diberi perlakuan *PWHT*.

### **1.4 MANFAAT**

Dengan dilakukannya analisa dalam tugas akhir ini diharapkan dapat diketahui tegangan sisa dan distorsi yang terjadi pada sambungan tubular tipe T. Selain itu juga dapat diketahui bagaimana pengurangan tegangan sisa dan distorsi yang terjadi setelah sambungan tubular hasil pengelasan diberi perlakuan *PWHT*.

### **1.5 BATASAN MASALAH**

Batasan masalah dalam tugas akhir ini adalah :

1. Jenis sambungan adalah sambungan tubular tipe T.
2. Logam pengisi tidak dimodelkan.
3. Pengaruh aliran panas secara radiatif diabaikan.
4. Pengelasan dimodelkan sebagai pengelasan *single pass*.
5. Spesifikasi material yang digunakan adalah SM 400 *Korean Standards*.
6. Perubahan mikrostruktur yang terjadi tidak dianalisa
7. Prosedur pengelasan berdasarkan *WPS (Welding Procedure Specification)* dari PT. Gunanusa Utama Fabricators.
8. Kode dasar yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah *American Welding Society – Structural Welding Code Steel AWS D.1.1*

### **1.6 SISTEMATIKA PENULISAN**

Sistematika penulisan dalam penyusunan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

## **BAB I PENDAHULUAN**

Bab ini menjelaskan tentang latar belakang penelitian yang akan dilakukan, perumusan masalah, tujuan yang hendak dicapai dalam penulisan tugas akhir, manfaat yang diperoleh, serta ruang lingkup penelitian untuk membatasi analisis yang dilakukan dalam tugas akhir.

## **BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

Bab ini berisi referensi dan juga teori-teori pendukung yang digunakan sebagai acuan atau pedoman dalam menyelesaikan tugas akhir. Referensi tersebut bersumber pada jurnal lokal maupun internasional, literatur, rules/code dan juga buku yang berkaitan dengan topik yang dibahas.

## **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Bab ini berisi tentang alur pengerjaan tugas akhir dengan tujuan untuk memecahkan masalah yang diangkat dalam bentuk diagram alir atau flow chart yang disusun secara sistematis yang dilengkapi pula dengan data data penelitian serta penjelasan detail untuk setiap langkah pengerjaannya.

## **BAB IV ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN**

Bab ini menjelaskan tentang pengolahan data yang diperoleh, kemudian pemodelan struktur menggunakan *software* ANSYS Mechanical APDL 16.0. Selanjutnya, dalam bab ini juga dilakukan pembahasan dan pengolahan output yang diperoleh dari running software secara termal yang mencakup analisis distribusi panas lalu diubah ke tegangan panas dan tegangan struktur.

## **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

Bab ini berisi kesimpulan yang merupakan uraian singkat dari keseluruhan hasil analisis. Uraian singkat ini diharapkan bisa menjawab rumusan masalah yang ada pada Bab I. Pada bab ini juga berisikan saran yang bermanfaat guna keberlanjutan penelitian terkait kedepannya.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1 TINJAUAN PUSTAKA

Tegangan sisa merupakan suatu fenomena karena proses pengelasan yang dapat mengurangi kekuatan struktur hasil pengelasan. Dalam proses pengelasan ada tiga komponen yang berhubungan yaitu, termal, fenomena mekanik, dan transformasi fasa. Beberapa peneliti cenderung mempertimbangkan *thermomechanical coupling* (Bang dkk., 2002) tetapi untuk beberapa kondisi transformasi fasa juga perlu diperhatikan (Zacharia dkk, 1995).

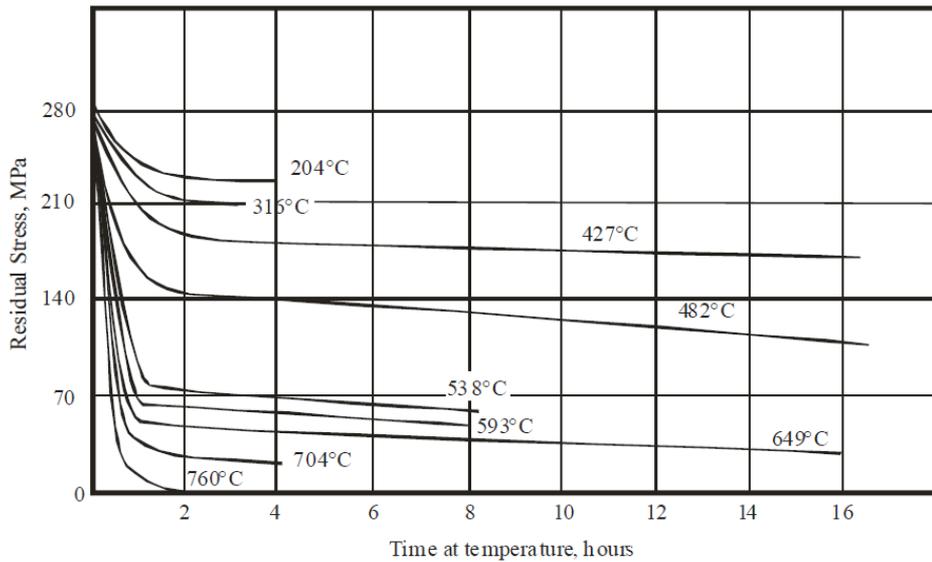
Beberapa penelitian telah dilakukan untuk menghitung besar tegangan sisa yang terjadi secara numerik ataupun eksperimental. Cara numerik dilakukan menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan *software* seperti ANSYS dan ABAQUS. Simulasi numerik dapat dilakukan dengan menampilkan kode elemen hingga ANSYS (ANSYS,2010), dengan menerapkan komponen thermal dan komponen mekanik elemen untuk diskritisasi.

Umumnya penelitian tentang tegangan sisa dilakukan pada plat dengan variasi ketebalan dan jenis material. Selain plat, penelitian tegangan sisa pada pengelasan sambungan pipa juga telah dilakukan. Seperti Tugas Akhir oleh Awang Dwi Andhika (2009), tentang pemodelan dan perhitungan tegangan sisa pada sambungan T sistem perpipaan kapal dengan menggunakan metode elemen hingga.

G. C. Jang dkk (2007) melakukan penelitian mengenai karakteristik distribusi tegangan sisa pada sambungan tubular tipe T dengan metode elemen hingga. Pada penelitian ini dihasilkan distribusi tegangan sisa pada atas, tengah, dan bawah member tubular horizontal.

Selain perhitungan tegangan sisa dan distorsi, beberapa penelitian mengenai pengurangan tegangan sisa dengan cara *post-weld* juga dilakukan. Penelitian telah dilakukan Telmo Viana Rodrigues dkk (2010) mengenai *PWHT* pada perbandingan tegangan sisa sebelum dan setelah dilakukan *PWHT* pada plat API 5L X65 dengan variasi temperatur *PWHT*. Pada penelitian ini menunjukkan

bahwa level suhu yang digunakan pada PWHT akan mempengaruhi nilai dari tegangan sisa. *Stress relieving* terjadi pada temperatur lebih dari 300<sup>0</sup>C dan nilai ini akan meningkat sampai temperatur 600<sup>0</sup>C dimana terjadi stabilisasi. Sedangkan Linert (1967) melakukan penelitian tentang pengurangan tegangan sisa pada baja yang mengandung 0,21% karbon dan 1,44% mangan. Pada Gambar 2.1 menunjukkan pengurangan tegangan sisa dengan variasi suhu *PWHT* pada penelitian Linert.



Gambar 2.1 Pengurangan tegangan sisa dengan variasi suhu *PWHT* (Linnert, 1967)

Beberapa penulis telah melakukan analisa mengenai efek dari suhu yang digunakan saat proses *PWHT*. Cao dkk. (2009) menganalisa efek dari *PWHT* pada sifat metalurgi dan kekuatan tarik logam Inconel 718 dengan proses laser. Sedangkan Paradowska (2010) menggunakan teknik hole drilling untuk menganalisa kontribusi *PWHT* dalam pengurangan tegangan sisa dan umur kelelahan sambungan tubular hasil pengelasan.

## 2.2 DASAR TEORI

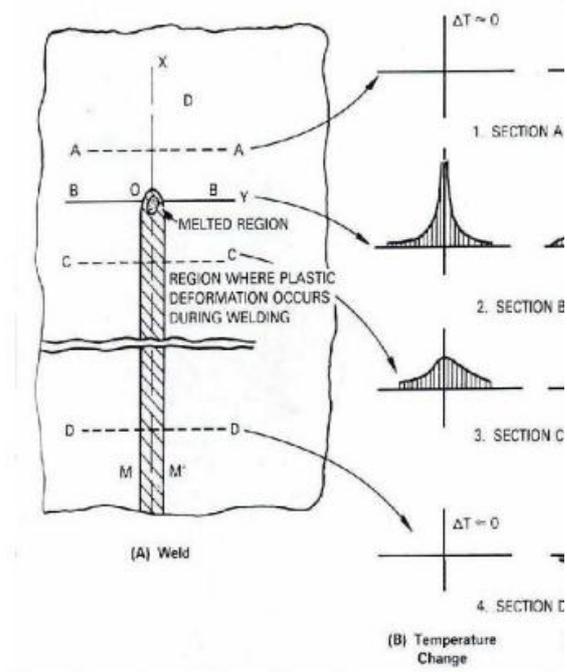
### 2.2.1 SIKLUS TERMAL PENGELASAN

Ketika suatu benda dikenai proses pengelasan, temperatur pada daerah busur las akan mengalami perubahan dengan sangat cepat. Hal ini mengakibatkan perbedaan temperatur di daerah sekitar busur las. Setelah perbedaan temperatur

terjadi, panas mulai mengalir ke sekitar daerah pengelasan yang mempunyai temperatur lebih rendah sehingga terjadi distribusi panas ke daerah sekitar alur las. Distribusi temperatur yang terjadi pada saat proses pemanasan maupun pendinginan tidak sama pada hampir tiap titik pada bagian daerah lasan. Seperti yang terlihat pada Gambar 2.2 terdapat bagian-bagian daerah berdasarkan distribusi temperaturnya.

- A-A : Daerah yang belum tersentuh panas
- B-B : Daerah yang mencair tepat pada busur las
- C-C : Daerah terjadinya deformasi plastis selama proses pengelasan
- D-D : Daerah yang sudah mengalami pendinginan.

Selain ditinjau dari tempatnya, distribusi yang tidak merata ini terjadi juga dari segi waktu. Hal ini mengakibatkan terjadinya siklus termal yang sangat kompleks, siklus ini menggambarkan laju pendinginan yang terjadi pada daerah tertentu dari benda las. Ketidakmerataan distribusi temperatur inilah yang menjadi penyebab timbulnya tegangan sisa dan distorsi pada struktur las.



Gambar 2.2 Siklus termal selama proses pengelasan

Adanya pemanasan dan pendinginan karena proses pengelasan, akan menyebabkan perubahan struktur mikro bagian-bagian tertentu pada benda las. Perubahan struktur mikro yang harus diperhatikan adalah pada daerah *Heat Affected Zone (HAZ)*. Perubahan struktur mikro ini akan merubah sifat mekanik. Sifat dari daerah *HAZ* akan mempengaruhi kualitas sambungan las, yang mana sifat ini tergantung pada lamanya proses pendinginan. Pemanasan yang terjadi pada saat pengelasan mendapat sumber panas dari elektroda yang digunakan. Nilai sumber panas dapat dihitung dengan persamaan dibawah ini:

$$Q = \eta \cdot U \cdot I \quad (2.1)$$

Dimana:

$Q$  : net heat input / effective thermal power (watt)

$\eta$  : koefisien efisiensi pengelasan

$U$  : tegangan busur (Volt)

$I$  : arus listrik (Ampere)

Nilai koefisien efisiensi pengelasan akan berbeda untuk setiap jenis pengelasannya. Pada Tabel 2.1 tertera nilai koefisien efisiensi pengelasan untuk tiap-tiap jenis pengelasan.

Tabel 2.1 Nilai koefisien efisiensi pengelasan

Jenis Pengelasan	$\eta$
SAW – Steel	0,91 – 0,99
SMAW – Steel	0,66 – 0,85
GMAW – CO <sub>2</sub> ; Steel	0,75 – 0,93
GMAW – Ar ; Steel	0,66 – 0,77
GTAW – Ar ; Steel	0,25 – 0,75
GTAW – He ; Al	0,50 – 0,80
GTAW – Ar ; Al	0,22 – 0,46

Energi panas yang terbentuk dari perubahan energi listrik tidak akan diserap secara penuh oleh logam lasan, sehingga energi busur las bersih dapat dihitung sebagai berikut:

$$H_{net} = \frac{f_1 \cdot E \cdot I}{v} \quad (2.2)$$

Dimana:

- $H_{net}$  : energi input bersih (J/mm)
- $E$  : tegangan (Volt)
- $I$  : arus listrik (Ampere)
- $f_1$  : efisiensi pemindahan panas
- $v$  : kecepatan pengelasan (mm/s)

Proses perpindahan atau distribusi panas yang terjadi saat pengelasan adalah proses konduksi dan konveksi. Proses konduksi terjadi saat logam menerima panas secara langsung karena adanya sentuhan langsung dengan elektroda. Sedangkan proses konveksi terjadi saat permukaan benda las terkena langsung dengan panas udara. Proses konduksi lebih dominan daripada konveksi karena memiliki nilai yang lebih tinggi dan panasnya ditransferkan ke semua arah. Persamaan dasar konduksi panas adalah:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = Q_G + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right] \quad (2.3)$$

Dimana:

- $\rho$  : massa jenis (Kg/m<sup>3</sup>)
- $c$  : *specific heat* (J/Kg.k)
- $\lambda$  : konduktivitas termal (W/m.K)
- $Q_G$  : debit perubahan temperatur (W/m<sup>3</sup>)

Sebagaimana pada konduksi, perbedaan suhu pada solid *base metal* dengan fluida pada *weld metal* menyebabkan terjadinya transfer energi dari daerah dengan suhu tinggi ke daerah dengan suhu rendah. Persamaan *heat transfer* secara konveksi diperoleh dari persamaan hukum pendinginan Newton,

$$q_h = h (T - T_\infty) \quad (2.4)$$

Dimana:

- $q_h$  : aliran panas secara konveksi (kW/m<sup>2</sup>)

- $h$  : koefisien konveksi ( $kW/m^{\circ}C$ )  
 $T$  : temperatur pada permukaan solid ( $^{\circ}C$ )  
 $T_{\infty}$  : temperatur fluida pengelasan ( $^{\circ}C$ )

Heat flux selama proses pemanasan dapat dihitung menggunakan hubungan vektor *heat flux* dan *thermal gradient*.

$$\{q\} = -[D] \cdot \{L\} \cdot T \quad (2.5)$$

$$[D] = \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Dimana:

- $[D]$  : matriks konduktivitas (-)  
 $K_{xx}$  : konduktivitas arah x (W/mm.K)  
 $K_{yy}$  : konduktivitas arah y (W/mm.K)  
 $K_{zz}$  : konduktivitas arah z (W/mm.K)

Transfer panas pada distribusi temperatur dipengaruhi besarnya *heat flux* yang mengenai elemen, dapat dihitung dengan persamaan:

$$q_1 = q_e \frac{A_1}{A_f} \quad (2.7)$$

Dimana:

- $q_1$  : *heat flux* pada elemen ( $J/mm^2$ )  
 $q_e$  : *heat flux* yang dihasilkan elektroda ( $J/mm^2$ )  
 $A_1$  : luas permukaan elemen ( $mm^2$ )  
 $A_f$  : luasan fluks yang dihasilkan elektroda ( $mm^2$ )

$$q_e = \frac{H_{net}}{A_e} = \frac{f_1 \cdot E \cdot I}{A_e} = \frac{f_1 \cdot E \cdot I}{\pi r_e^2} \quad (2.8)$$

Jika persamaan 2.6 disederhanakan, maka didapat:

$$A_f = b \cdot v \cdot t \quad (2.9)$$

Dimana:

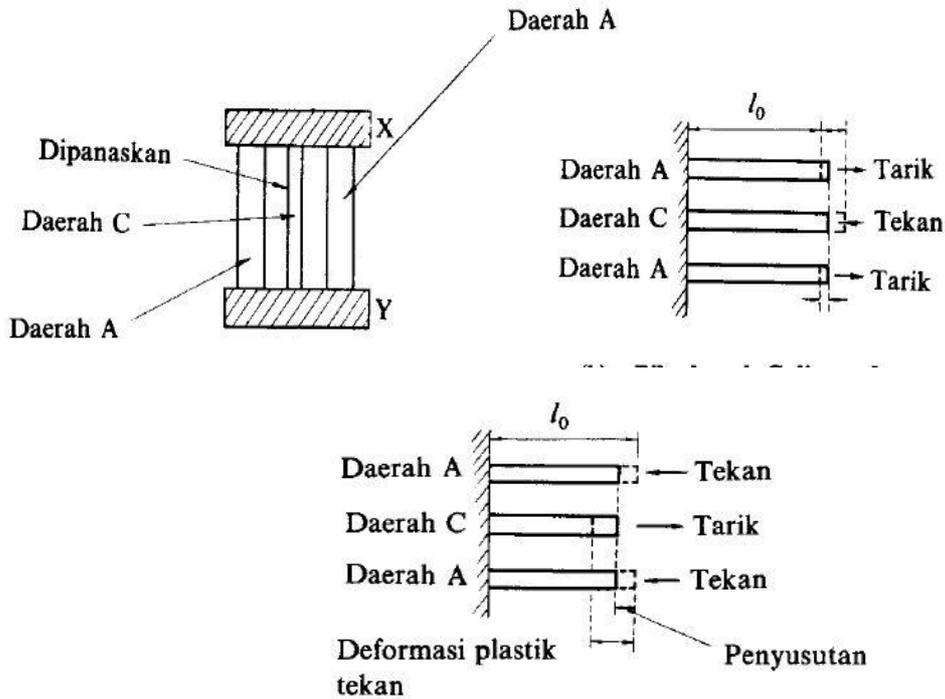
- b : panjang kaki las (mm)
- v : kecepatan pengelasan (mm/s)
- t : waktu yang diperlukan pada satu elemen (s)

### 2.2.2 TEGANGAN SISA

Tegangan yang muncul pada material selama proses pengerjaan disebut tegangan dalam, tegangan sisa atau tegangan yang terjebak dalam material, proses pengerjaan ini bisa berupa proses pemotongan, *bending* maupun pengelasan. Tegangan dalam atau tegangan sisa adalah tegangan yang bekerja pada material meskipun tidak ada gaya luar yang bekerja pada benda tersebut dan tegangan ini bersifat tetap selama tidak ada proses *stress relieving*. Tegangan sisa yang terjadi dalam suatu benda yang diakibatkan oleh distribusi temperatur yang tidak merata, seperti ketika pengelasan, sering disebut juga tegangan termal.

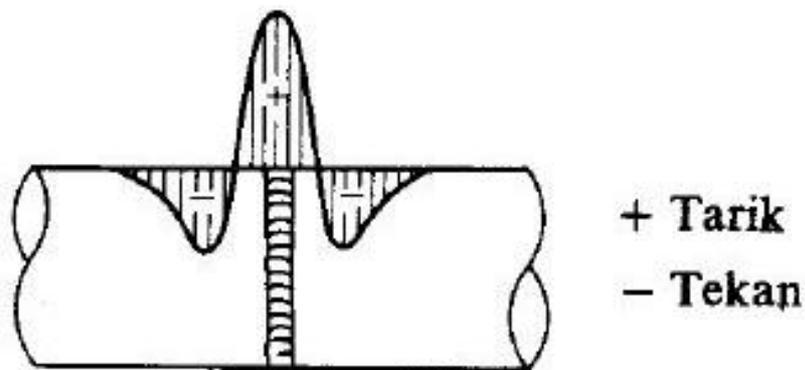
Ada beberapa faktor yang mempengaruhi tegangan sisa seperti proses penyusutan, proses pendinginan yang cepat, dan transformasi fasa. Volume yang dipanaskan akan mengalami penyusutan selama proses pendinginan berdasarkan koefisien ekspansi termal material dan perbedaan temperatur yang ada. Volume yang mengalami peleburan tidak memberikan gaya kepada volume sekitar, sehingga sambungan las dan volume logam yang tidak meleleh selama proses pengelasan memiliki suhu berbeda dan tegangan sisa terjadi.

Pada Gambar 2.3 daerah C mengembang waktu pengelasan dan ditahan oleh daerah A. Sehingga daerah C mengalami tegangan tekan dan pada daerah A terjadi tegangan tarik. Jika daerah A lebih luas daripada daerah C, maka daerah C tidak akan mengalami perubahan bentuk dan daerah A mengalami perubahan bentuk elastik. Ketika pengelasan selesai terjadi proses pendinginan, daerah C menyusut cukup besar karena ada pendinginan dan tegangan tekan. Penyusutan ini ditahan oleh daerah A, sehingga daerah C akan terjadi tegangan tarik yang diimbangi oleh tegangan tekan pada daerah A.

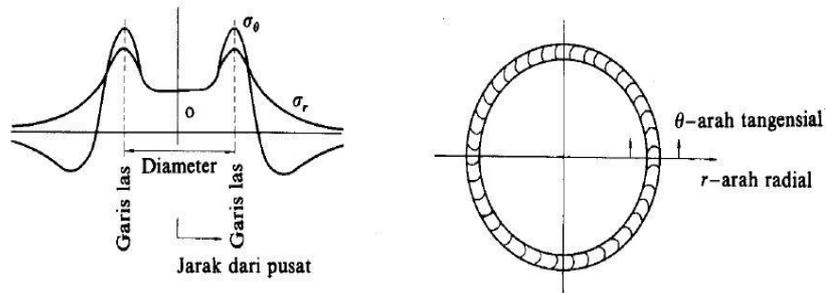


Gambar 2.3 Pembentukan tegangan sisa (Wirjosumarto, 2010)

Distribusi tegangan sisa tergantung dari jenis dan bentuk las an. Dalam sambungan las bentuk lingkaran akan mengalami distribusi yang sama pada ujung jarak dari pusat. Gambar 2.4 dan Gambar 2.5 menunjukkan distribusi tegangan sisa pada las melingkar pipa. Distribusi tegangan sisa dalam sambungan melingkar pada pipa hampir sama seperti pada lasan plat datar.

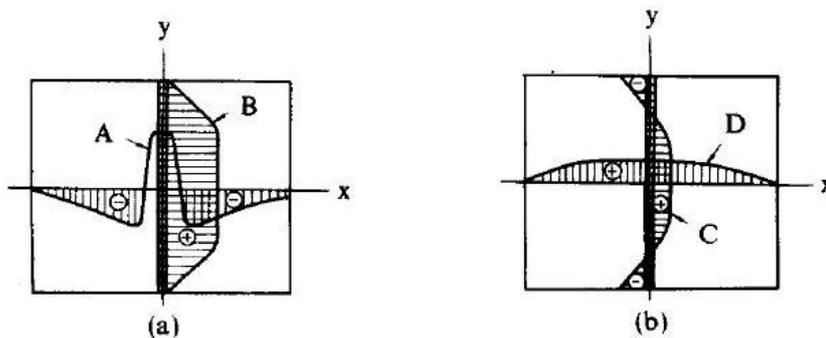


Gambar 2.4 Distribusi tegangan sisa pada las melingkar pada pipa (Wirjosumarto, 2010)



Gambar 2.5 Distribusi tegangan sisa pada las berbentuk lingkaran (Wiryosumarto, 2010)

Untuk las tumpul pada garis las an dengan arah memanjang akan mencapai batas kekuatan luluh pada garis las dan kemudian menurun mencapai nol pada ujung pelat. Sedangkan pada arah melintang garis las terjadi keseimbangan antara tegangan tarik dan tekan seperti yang terlihat pada Gambar 2.6.



Distribusi tegangan arah garis las ( $\sigma_y$ ).  
 A : distribusi pada sumbu x  
 B : distribusi pada sumbu y

Distribusi tegangan arah melintang garis las ( $\sigma_x$ ).  
 C : distribusi pada sumbu x  
 D : distribusi pada sumbu y

Gambar 2.6 Skema distribusi tegangan sisa dalam sambungan las tumpul (Wiryosumarto, 2010)

Tegangan sisa dihitung melalui persamaan hubungan antara tegangan-regangan. Menggunakan hukum Hooke tegangan sisa dapat dihitung melalui besarnya regangan sisa yang terjadi. Dari hukum Hooke terlihat bahwa perubahan ukuran benda disebabkan oleh adanya tegangan, karena itu besarnya tegangan dapat dihitung. Dalam hal tegangan satu arah dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$\sigma = E \frac{\Delta l}{l} \quad (2.10)$$

Dimana :

- $\sigma$  : tegangan sisa yang terjadi
- $E$  : modulus elastik
- $l$  : panjang awal
- $\Delta l$  : perubahan panjang awal dan akhir

Dalam hal terjadi tegangan sisa dengan dua dimensi dapat dilakukan perhitungan dengan persamaan:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y) \quad (2.11)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x) \quad (2.12)$$

Dimana:

- $\sigma_x$  : tegangan tegak lurus garis las
- $\sigma_y$  : tegangan searah garis las
- $\varepsilon_x$  : regangan tegak lurus garis las
- $\varepsilon_y$  : regangan tegak lurus garis las
- $\nu$  : angka perbandingan Poisson

Tegangan sisa dapat diukur dengan cara numerik dan eksperimental. Untuk cara eksperimental dapat dilakukan dengan teknik pengukuran destruktif dan non-destruktif. Beberapa metode pengukuran tegangan sisa dengan teknik destruktif yaitu:

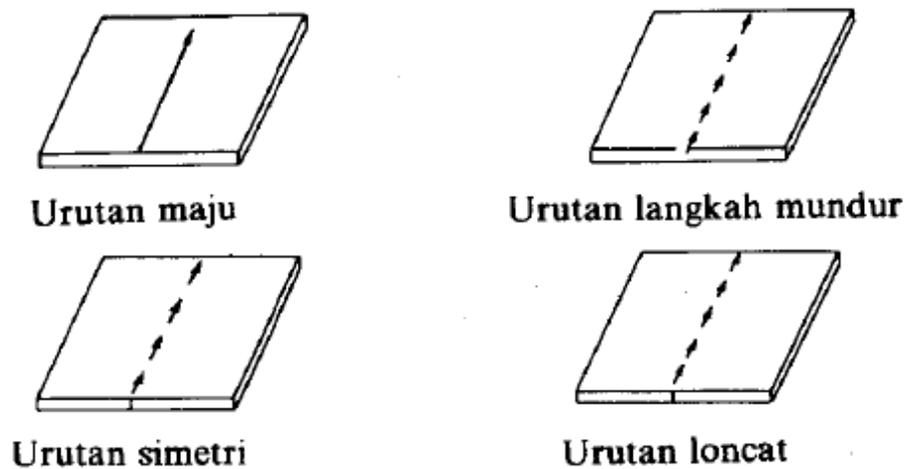
1. Metode *Hole-drilling*
2. Metode *Ring-core*
3. Metode *Bending deflection*
4. Metode *Sectioning*

Sedangkan untuk teknik non-destruktif dilakukan tanpa merusak sample. Cara ini dinilai lebih akurat karena menggunakan bantuan teknologi terkini.

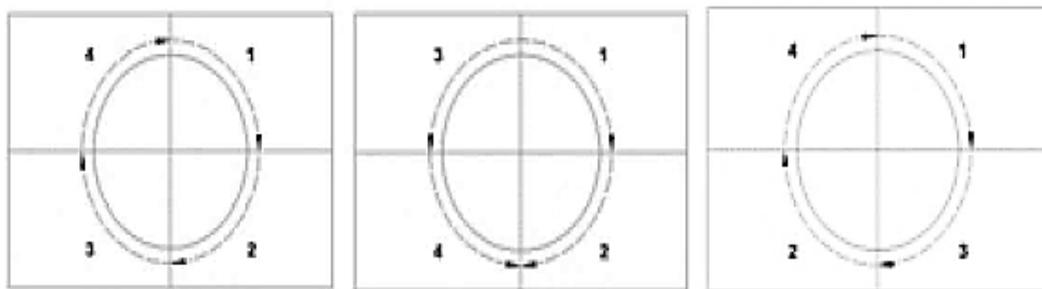
Beberapa metode umum yang digunakan untuk metode pengukuran non-destruktif, yaitu:

1. *X-ray/ neutron/ diffraction*
2. *Ultrasonic*
3. *Magnetic methods*

Besarnya tegangan sisa dapat dikurangi dengan cara mengurangi mengurangi masukan panas dan banyaknya logam lasan. Selain itu, adanya penghalang luar juga menyebabkan terjadinya tegangan sisa, oleh karena itu dalam proses pengelasan perlu ditentukan urutan pengelasan (*welding sequence*) yang tepat. Urutan pengelasan pada plat dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 2.7. Sedangkan untuk urutan pengelasan melingkar dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.7 Urutan pengelasan pada plat (Wiryosumarto, 2010)



Gambar 2.7 Urutan pengelasan melingkar menerus, simetri, dan loncat

Tegangan sisa dapat dibebaskan dengan cara mekanik dan termal. Untuk cara termal banyak digunakan dengan proses anil. Proses aniling adalah proses

pemanasan kembali setelah proses pengelasan dengan temperatur dan waktu tahan tertentu. Pada proses aniling ini, temperatur dan waktu tahan yang digunakan ditentukan berdasarkan jenis material benda las.

### 2.2.3 DEFORMASI PADA PENGELASAN

Proses pengelasan yang terdiri dari pencairan, pembekuan, ekspansi, dan penyusutan akan menyebabkan perubahan bentuk atau deformasi pada benda las. Pada proses pengelasan, tegangan sisa dan distorsi merupakan hal yang berhubungan. Saat siklus pemanasan dan pendinginan berlangsung, regangan panas muncul di antara logam las dan logam induk pada daerah yang dekat dengan *weld bead*. Regangan ini menyebabkan tegangan dalam material dan dapat menyebabkan terjadinya *bending*, *buckling*, dan rotasi. Deformasi ini lah yang disebut distorsi. Macam-macam distorsi yang terjadi pada pengelasan, dengan ilustrasi pada Gambar 2.9 :

1. *Transversal shrinkage*

Merupakan jenis distorsi yang berupa penyusutan tegak lurus terhadap garis las.

2. *Longitudinal shrinkage*

Merupakan jenis distorsi yang berupa penyusutan material searah atau sejajar dengan garis las.

3. *Angular shrinkage*

Merupakan jenis distorsi yang terjadi karena adanya distribusi panas yang tidak merata pada kedalaman material sehingga menyebabkan terjadinya perubahan sudut.

4. *Rotational distortion*

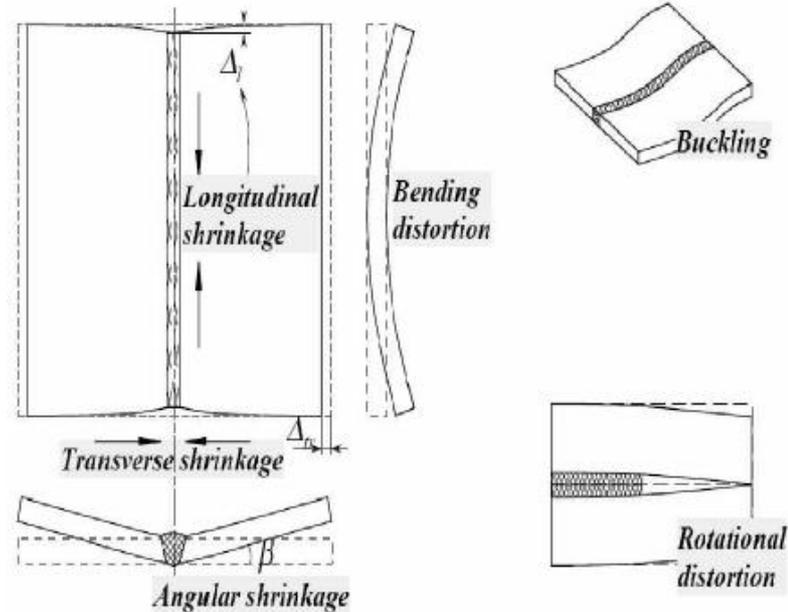
Merupakan distorsi sudut dalam bidang plat yang berkaitan dengan perluasan bidang panas.

5. *Buckling distortion*

Berhubungan dengan kompresi yang berkenaan dengan panas dan menyebabkan ketidakstabilan ketika platnya tipis.

#### 6. *Longitudinal bending distortion*

Merupakan distorsi dalam bidang bidang yang melalui garis las dan tegak lurus terhadap plat.



Gambar 2.9 Macam-macam distorsi pada pengelasan

Perubahan bentuk pada benda hasil pengelasan akan mengurangi ketelitian ukuran dan menurunkan kekuatan. Jika pada benda hasil pengelasan banyak terjadi deformasi maka harus dilakukan pelurusan yang akan memakan waktu dan tenaga. Perubahan bentuk harus dihindari dengan cara menentukan prosedur terlebih dahulu dan melakukan pengelasan sesuai dengan prosedur yang telah ditentukan. Sebelum proses pengelasan dimulai, benda yang akan dilas dapat diluruskan terlebih dahulu sesuai dengan bentuk dan ukuran yang seharusnya.

Masukan panas yang kecil tidak akan menyebabkan terjadinya suhu tinggi sehingga deformasi dapat dikurangi. Selain itu mengurangi logam las juga dapat dilakukan, sehingga ketika proses pendinginan jumlah logam yang menyusut tidak akan terlalu banyak dan deformasi akan berkurang.

#### **2.2.4 POST WELD HEAT TREATMENT (PWHT)**

*Post Weld Heat Treatment (PWHT)* merupakan proses perlakuan panas pada benda hasil pengelasan dengan tujuan untuk menghilangkan tegangan sisa yang terbentuk setelah proses pengelasan selesai. Setelah pemanasan dan

pendinginan akibat proses pengelasan, sifat material akan berubah karena adanya perubahan struktur mikro. Untuk mengembalikan kembali sifat material struktur maka dilakukan pemanasan pada suhu tertentu dan pada jangka waktu tertentu. Parameter suhu dan waktu ini tergantung dari jenis material dan ketebalan material.

Berikut ini beberapa metode *PWHT*:

1. *Fixed Furnace*

Merupakan metode tradisional yang banyak diketahui oleh orang dalam industri fabrikasi. Metode ini menggunakan sebuah tungku berbentuk kotak yang berukuran besar sehingga dapat dimasuki oleh benda yang akan diberi perlakuan *PWHT*. Kotak ini terbuat dari material yang tahan panas. Umumnya tungku jenis ini dapat memanaskan hingga 1200<sup>0</sup>C untuk proses *stress relieving*. Akan tetapi metode ini memiliki kelemahan yaitu mahal biaya operasi.

2. *Temporary Furnace*

Metode ini dilakukan ketika benda yang akan diberi perlakuan *PWHT* terlalu besar dan tidak dapat dibawa ke lokasi fabrikasi yang terdapat *fixed furnace*. *Furnace* sementara akan dibangun di kapal (jika benda berada di kapal) atau di lokasi dimana benda berada. Hal ini juga untuk meminimalisir adanya ruang antara benda dengan dinding *furnace*, sehingga dapat mempercepat proses pemanasan dan pendinginan.

3. *Internal Firing*

Metode ini diterapkan pada benda yang memiliki bentuk lebih spesifik.

4. *Local Heating*.

Benda yang disambungkan oleh pengelasan melingkar dapat diberi perlakuan *PWHT* dengan memberi panas di sekitar las an.

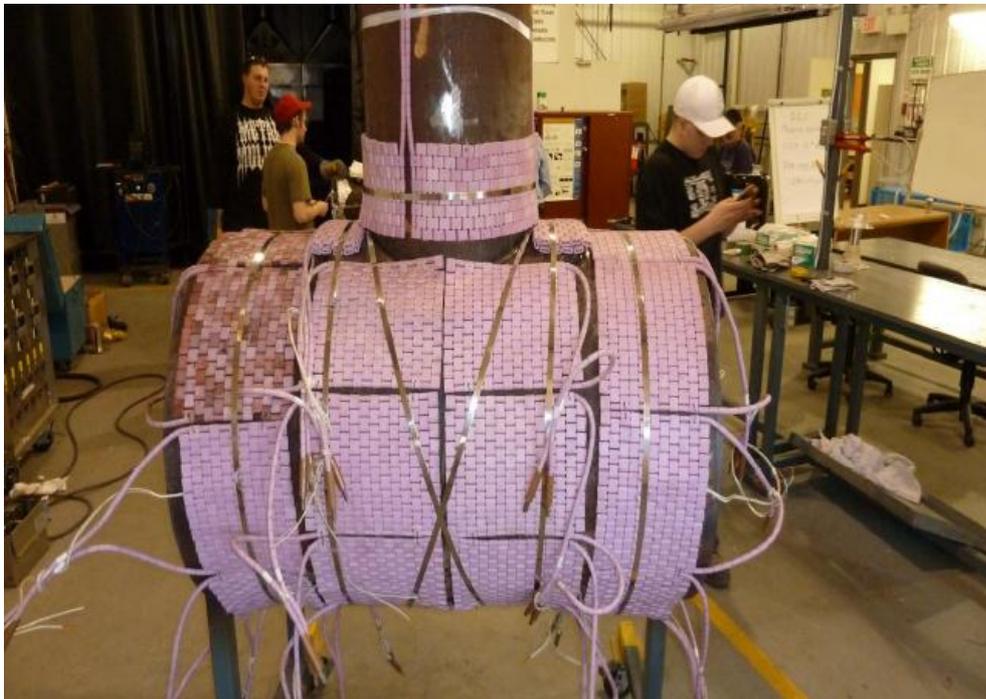
5. *Partial Heat Treatment*.

Untuk kasus tertentu, contohnya pada *vessel* yang sangat panjang tidak mungkin dapat dimasukkan ke dalam *fixed furnace*. Sehingga bisa dilakukan *PWHT* pada bagian tertentu saja.

Ilustrasi *PWHT* pada pipa dengan metode *local heating* dapat dilihat pada Gambar 2.10 dan 2.11.

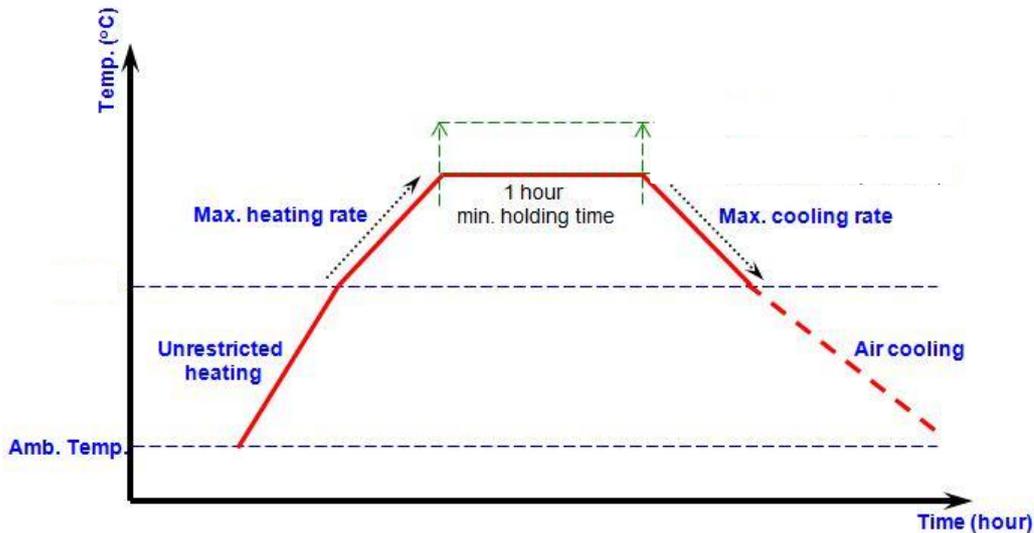


Gambar 2.10 *PWHT* pada pipa dengan ukuran besar



Gambar 2.11 *Local heating* pada sambungan tubular

Siklus termal yang terjadi selama proses *PWHT* dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Grafik siklus termal proses *PWHT*

Berdasarkan AWS D.1.1 *Structural Welding Code-Steel* pada subbab *Prequalification section 3.14 Postweld Heat Treatment*, material yang dapat diberi perlakuan *PWHT* harus mempunyai syarat sebagai berikut:

1. Logam dasar yang akan diberi *PWHT* memiliki nilai *specified minimum yield strength* yang tidak melebihi 50 ksi (345 Mpa)
2. Logam dasar yang digunakan bukan hasil *quenching & tempering*, *quenching & self-tempering*, *thermomechanical control processing* (contohnya seperti ASTM A 500 tubing)
3. Material tidak disyaratkan untuk mengalami *impact test* pada *base metal*, *weld metal*, dan HAZ.
4. Adanya data pendukung bahwa material memiliki kekuatan dan keuletan yang cukup.
5. *Post Weld Heat Treat* dilakukan sesuai *section 5.8*

*Post Weld Heat Treatment* dilakukan sesuai berdasarkan AWS D.1.1 *Section 5.8* tentang *Stress-Relief Heat Treatment*, harus memenuhi kriteria-kriteria berikut ini:

1. Temperatur tungku pembakaran untuk *PWHT* tidak boleh melebihi 600<sup>0</sup>F (315<sup>0</sup>C) pada saat benda hasil pengelasan diletakkan.
2. Diatas 600<sup>0</sup>F, *heating rate* tidak boleh melebihi 400<sup>0</sup>F per jam dibagi dengan tebal maksimum logam pada bagian tertebal, dalam inch. *Heating rate* dan *cooling rate* tidak boleh kurang dari 100<sup>0</sup>F (55<sup>0</sup>C).
3. Setelah temperatur maksimum mencapai 1100<sup>0</sup>F (600<sup>0</sup>C) pada logam hasil *quenching* dan *tempering*, atau rentang temperatur rata-rata diantara 1100<sup>0</sup>F (600<sup>0</sup>C) dan 1200<sup>0</sup>F (650<sup>0</sup>C) pada logam lain, temperatur harus ditahan dengan batas waktu tertentu tergantung pada ketebalan lasan, tertera pada Tabel 2.2. Ketika *stress relief* digunakan untuk stabilitas dimensi, waktu tahan harus tidak kurang dari ketentuan di Tabel 2.2 tergantung ketebalan pada bagian tertebal.
4. Diatas 600<sup>0</sup>F (315<sup>0</sup>C), pendinginan dilakukan pada bilik pendinginan dengan suhu tidak lebih dari 500<sup>0</sup>F (260<sup>0</sup>C) per jam dibagi dengan tebal maksimum logam pada bagian tertebal. Dari 600<sup>0</sup>F (315<sup>0</sup>C), benda las didinginkan ke temperatur ruang.

Tabel 2.2 *Minimum Holding Time*

<i>Weld thickness</i>	<i>Holding time</i>
¼ in atau kurang	15 menit
¼ in – 2 in	1 jam
Lebih dari 2 in	2 jam plus 15 menit untuk tiap pertambahan inch (25 mm) .

Ketika *PWHT* tidak dapat dilakukan dengan batasan temperatur sesuai dengan kriteria di atas, maka dapat dilakukan *PWHT* alternatif. Dalam *PWHT* alternatif, pembebasan tegangan dilakukan pada temperatur yang lebih rendah tetapi dengan waktu tahan yang lebih lama. Temperatur dan waktu tahan yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 *Alternate Stress-Relief Heat Treatment*

Penurunan Temperatur di Bawah Ketentuan Temperatur Minimum		Waktu Tahan Minimum Saat Penurunan Temperatur, Jam
$\Delta^{\circ}\text{F}$	$\Delta^{\circ}\text{C}$	
50	30	2
100	60	4
150	90	10
200	120	20

Proses *PWHT* ini dilakukan dengan pemanasan lokal di dekat daerah pengelasan. Parameter-parameter yang harus diperhatikan dalam *PWHT* adalah:

1. *Heating Rate*: proses pemanasan sampai temperatur diatas atau dibawah temperature kritis suatu material.
2. *Holding Temperature*: proses penahanan material pada temperatur pemanasan untuk memberikan kesempatan adanya perubahan struktur mikro.
3. *Cooling Rate*: proses pendinginan material dengan kecepatan tertentu tergantung pada sifat akhir material yang dibutuhkan.

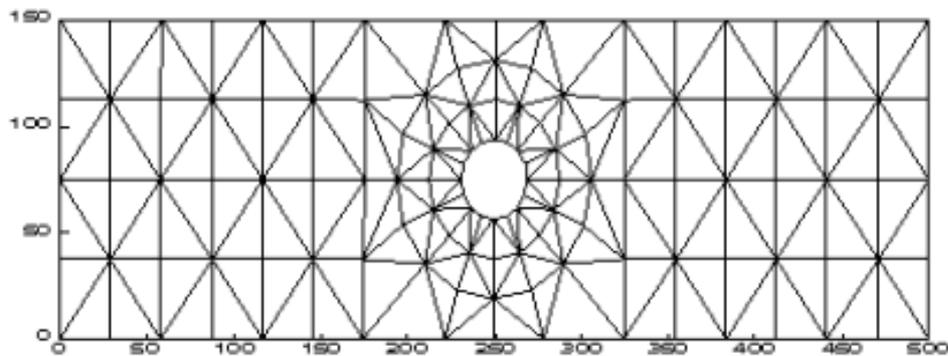
Dalam melakukan *PWHT* ada beberapa faktor penting yang harus diperhatikan agar tujuan dari *PWHT* ini dapat tercapai. Berikut ini adalah faktor penting tersebut:

1. *Expansion Area* : Proses pemanasan akan mengakibatkan terjadinya pemuaihan dan ekspansi material. Sehingga harus diperhatikan bahwa saat *stress relieve* material tersebut tidak mengalami *restraint*.
2. Insulasi : Area disekitar daerah yang akan di *PWHT* harus ditutup / dilapisi dengan *ceramic fiber* untuk menjaga kestabilan suhu
3. *Cleaning Material* : Permukaan material harus bersih
4. *Support Material* : Proses pemanasan akan mengakibatkan pelunakan material sehingga diperlukan *support* agar tidak terjadi distorsi

### 2.2.5 METODE ELEMEN HINGGA

Konsep dasar metode elemen hingga adalah pendekatan menggunakan informasi-informasi pada titik simpul (*node*). Dalam proses penentuan titik simpul yang di sebut dengan pendiskritan (*discretization*), suatu sistem di bagi menjadi bagian-bagian yang lebih kecil, kemudian penyelesaian masalah dilakukan pada bagian-bagian tersebut dan selanjutnya digabung kembali sehingga diperoleh solusi secara menyeluruh. Usaha pendiskritan ini dilakukan agar memudahkan dalam analisa karena adanya keterbatasan dalam analisa secara global. Pada Gambar 2.13 diilustrasikan pendiskritan sebuah plat berlubang dimana plat dibagi menjadi bagian-bagian kecil.

Metode elemen hingga ini dapat digunakan untuk menyelesaikan berbagai masalah. Struktur yang dianalisa dapat berbentuk sembarang, beban dan kondisi batas sembarang sesuai analisa yang dilakukan. Untuk memudahkan penerapan konsep metode elemen hingga dapat dilakukan pemodelan dengan software seperti ABAQUS, ANSYS, SAAP, dan CATIA.



Gambar 2.13 Contoh pendiskritan plat berlubang (Hidajat, 2009)

Metode elemen hingga ini banyak digunakan karena hasil analisa sangat dekat atau hampir sama dengan struktur sebenarnya. Namun hasil dari metode elemen hingga ini bersifat numerik, bukan merupakan persamaan yang dapat diaplikasikan untuk berbagai kasus. Selain itu data-data yang dimasukkan cenderung banyak sehingga data *output* yang dijalankan oleh *software* pun lebih banyak.

Dalam tugas akhir ini, sambungan tubular tipe T akan dimodelkan menggunakan *software* ANSYS Mechanical APDL 16.0. Dalam *software* ANSYS Mechanical APDL 16.0 dapat dilakukan pemodelan 2D ataupun 3D dengan elemen titik, elemen garis, elemen area, dan elemen solid. Semua jenis elemen ini dapat digabungkan untuk membentuk struktur yang akan dianalisa.

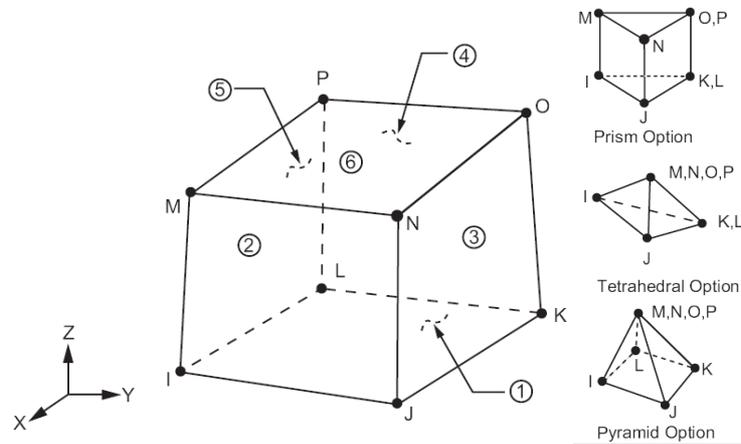
Dalam perumusan metode elemen hingga, terdapat tujuh tahap yang secara umum sering digunakan, yaitu :

### **1. Pendiskritan dan Pemilihan Jenis Elemen**

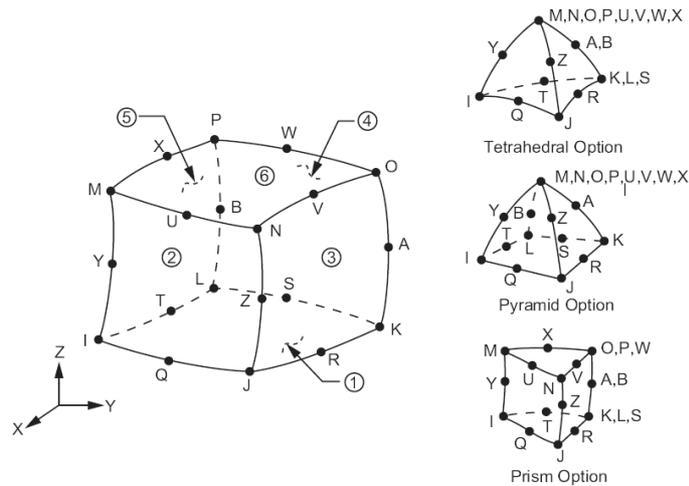
Pemilihan jenis elemen merupakan tahap yang sangat penting karena dapat menentukan keakuratan hasil analisa. Jenis elemen harus dipilih sesuai analisa agar dapat menghasilkan hasil analisa yang mendekati keadaan sebenarnya. Hasil analisa yang mendekati keadaan sebenarnya juga tergantung dari pendiskritan yang mana dalam pemodelan disebut dengan proses *meshing*. Ukuran yang dipilih ketika proses *meshing* harus mewakili keadaan struktur sebenarnya. Semakin kecil ukuran *meshing* akan membutuhkan kapasitas hardisk dan memori yang cukup besar. Hal ini karena input data *software* semakin banyak sehingga untuk proses akan lebih berat. *Meshing* untuk ukuran elemen kecil biasanya digunakan untuk analisa dengan kondisi yang mengalami perubahan drastis. Sedangkan untuk *meshing* ukuran elemen besar digunakan untuk analisa yang perubahannya cenderung konstan.

Jenis elemen yang digunakan pada analisa termal adalah SOLID70 dan SOLID90. Elemen SOLID70 memiliki delapan node, sedangkan SOLID90 memiliki dua puluh node, dengan masing-masing node memiliki satu derajat kebebasan dan temperatur. Bentuk geometri SOLID70 dapat dilihat pada Gambar 2.14 dan SOLID90 dapat dilihat pada Gambar 2.15. Elemen ini memiliki kemampuan menghantarkan panas sehingga dapat digunakan untuk analisa termal *transient* dan *steady-state*. Elemen dapat membentuk elemen dengan bentuk elemen prisma, tetrahedral dan juga piramida. Elemen ini didefinisikan dengan delapan node dan ortotropik material

propertis. Untuk analisa *steady-state* specific heat dan massa jenis dapat diabaikan. Dapat digunakan untuk analisa struktural. Ketika proses analisa termal menggunakan SOLID70 sudah selesai dilakukan, otomatis pada proses analisa struktural jenis elemen akan berubah menjadi SOLID185.



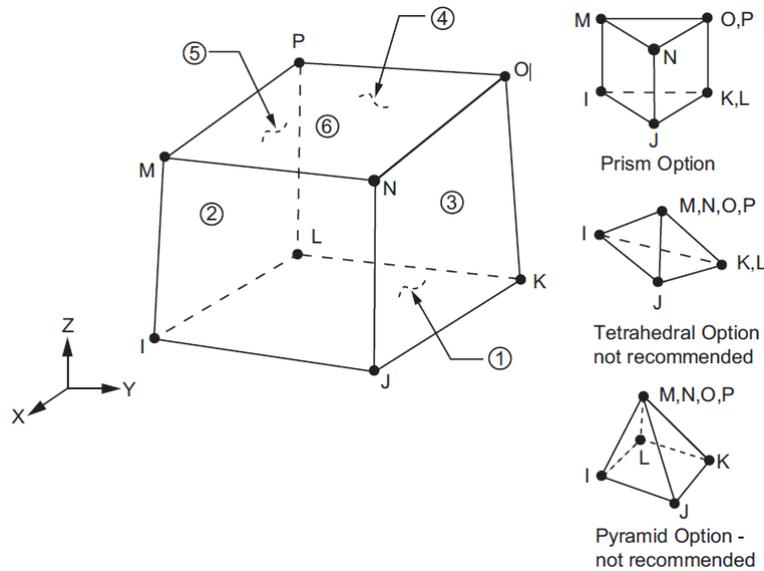
Gambar 2.14 Geometri Elemen SOLID70 (ANSYS, 2013)



Gambar 2.15 Geometri Elemen SOLID90 (ANSYS, 2013)

Jenis elemen yang digunakan pada analisa struktural adalah SOLID45. Elemen SOLID185 memiliki delapan node dengan masing-masing node memiliki tiga derajat kebebasan. Elemen ini dapat bertranslasi ke arah sumbu x dan y. Elemen ini memiliki kemampuan berdefleksi dan meregang secara besar karena memiliki sifat plastis. Elemen SOLID185 dapat membentuk elemen dengan bentuk elemen prisma dan tetrahedral yang diilustrasikan pada Gambar 2.16. Elemen ini didefinisikan dengan delapan

node dan ortotropik material propertis. Pada permukaan elemen dapat diberikan beban tekan.



Gambar 2.16 Bentuk elemen yang dapat dibentuk SOLID45 (ANSYS, 2013)

## 2. Pemilihan fungsi displasmen

Menentukan fungsi displasmen yang didefinisikan pada tiap elemen dengan menggunakan nilai parameter di tiap node elemen. Fungsi yang digunakan adalah fungsi polinomial, linear kuadratik, kubik, atau deret trigonometri.

## 3. Definisi hubungan regangan-displasmen dan tegangan-regangan

Dapat ditentukan hubungan regangan akibat displasmen yang sudah ditentukan pada tahap sebelumnya. Hubungan tegangan-regangan nanti akan digunakan dalam proses penurunan persamaan untuk masing-masing elemen.

$$\sigma = D \varepsilon^{el} \quad (2.13)$$

dan

$$\varepsilon = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{th} \quad (2.14)$$

dimana:

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

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

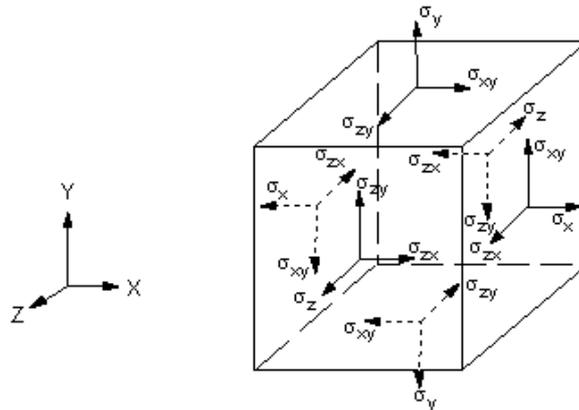
- $\varepsilon^{el}$  : regangan elastis  
 $\varepsilon^{th}$  : regangan termal  
 $D$  : kekakuan material

Pada model 3 dimensi, persamaan regangan termal dapat diubah menjadi rumus:

$$\{\varepsilon^{th}\} = \Delta T [\alpha_x \ \alpha_y \ \alpha_z \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (2.15)$$

dimana:

- $\alpha_x$  : koefisien ekspansi termal arah sumbu-x  
 $\Delta T$  :perbedaan antara *reference temperature* dengan *actual temperature*.



Gambar 2.16 Vektor tegangan (ANSYS, 2010)

Gambar 2.16 menunjukkan vektor tegangan yang bekerja pada struktur. Dari persamaan 2.15 dapat dijabarkan menjadi,

$$\{\varepsilon^{th}\} = \{\varepsilon^{th}\} + [D]^{-1}\{\sigma\} \quad (2.16)$$

Dimana matrik kekakuan  $[D]^{-1}$  yaitu

$$[D]^{-1} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -\nu_{xy}/E_x & -\nu_{xz}/E_x & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{yx}/E_y & 1/E_y & -\nu_{yz}/E_y & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{zx}/E_z & -\nu_{zy}/E_z & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{yz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{xz} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

dimana:

$E_x$  : modulus elastisitas arah x

$\nu_{xy}$  : mayor *poisson ratio*

$\nu_{yx}$  : minor *poisson ratio*

$G_{xy}$  : modulus geser bidang x-y

Untuk material isotropik maka  $E_x = E_y = E_z$  dan  $\nu_{xy} = \nu_{yz} = \nu_{xz}$

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

Untuk menentukan matriks kekakuan dan persamaan elemen dapat digunakan nilai koefisien kekakuan. Untuk analisa termal pengelasan, matrik kekakuan elemen mengacu pada hukum Fourier, yaitu.

$$\frac{kA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{Bmatrix} \text{ or } \mathbf{k}^{(e)} \boldsymbol{\theta}^{(e)} = \mathbf{q}^{(e)} \quad (2.18)$$

Dimana:

$\theta$  : vektor termal

$k$  : karakteristik matrik elemen

$q$  : vektor elemen gaya

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

Pada tahap ini akan didapatkan matriks kekakuan global yang bersifat singular. Kondisi batas digunakan untuk menghilangkan singularitasnya. Matriks kekakuan global didapatkan dari menggabungkan persamaan elemen pada tahap empat menggunakan metode kekakuan langsung. Persamaan sistem global yang digunakan adalah,

$$[K][\theta] = [Q] \quad (2.19)$$

Dimana:

$[K]$  : Kekakuan Global

$[\theta]$  : Global Termal

$[Q]$  : *Global Force*

#### **6. Penyelesaian derajat kebebasan yang belum diketahui**

Mendapatkan hasil besaran yang diperlukan tetapi tidak didapat secara langsung dari tahap sebelumnya. Dapat dicari dengan metode eliminasi (misalkan metode *gauss*) dan iterasi (misalkan metode *gauss-siedel*).

#### **7. Penentuan regangan dan tegangan elemen**

Perhitungan regangan dan tegangan yang terjadi pada elemen berdasarkan hasil dari tahap enam.

#### **8. Penampilan hasil**

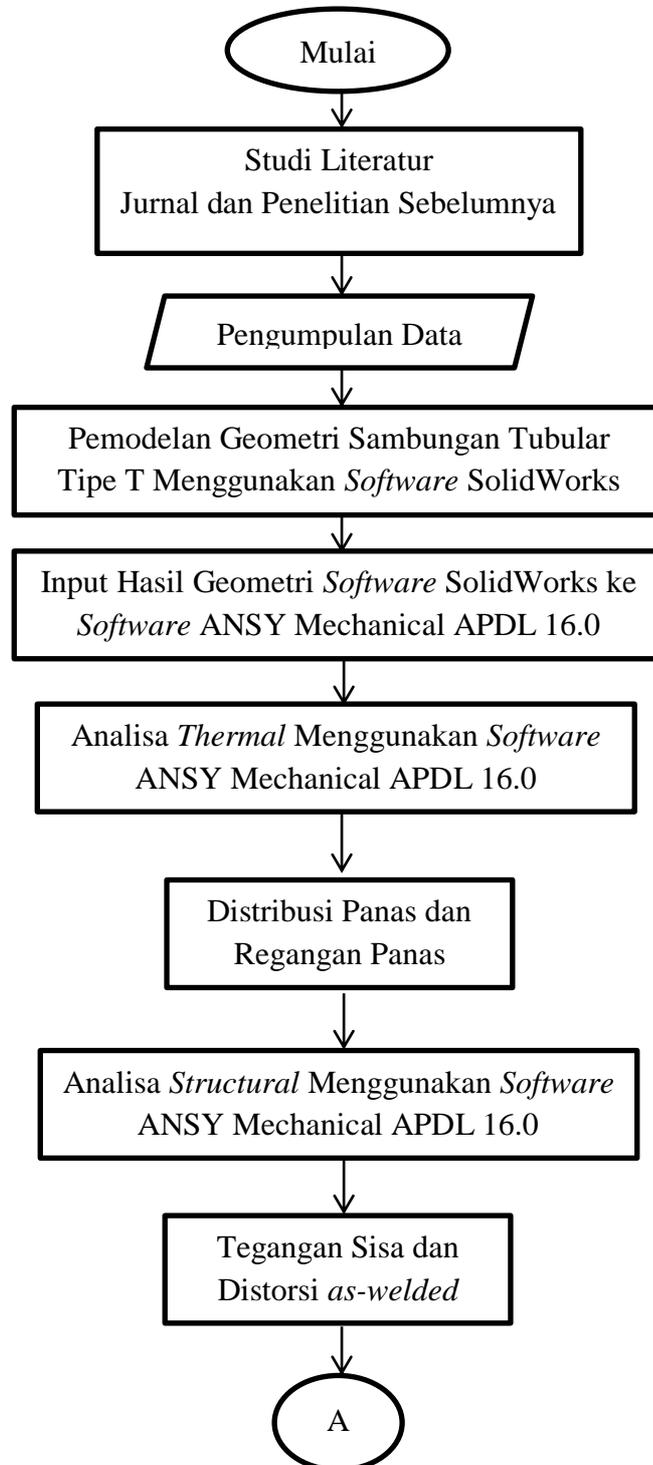
Hasil yang diperoleh ditampilkan dalam bentuk grafis sehingga akan mempermudah pembacaan hasil.

## BAB III

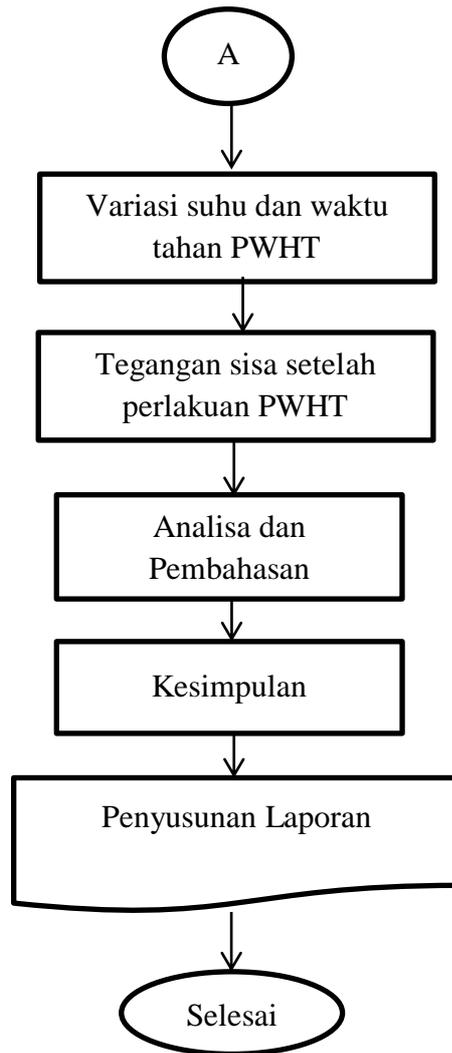
### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 METODE PENELITIAN

Alur pengerjaan Tugas Akhir terdapat dalam bagan Gambar 3.1



Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir



Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir (lanjutan)

## 3.2 PENJELASAN DIAGRAM ALIR PENELITIAN

### 3.2.1 STUDI LITERATUR

Studi literatur dilakukan dengan mendapatkan informasi mengenai pengelasan pada sambungan tubular tipe T serta penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Sumber yang digunakan pada tahap studi literatur adalah materi perkuliahan, buku, jurnal lokal dan internasional, penelitian sebelumnya termasuk tugas akhir dengan topik yang berkaitan.

### 3.2.2 PENGUMPULAN DATA

Pengumpulan data yang digunakan dalam analisa tugas akhir merupakan ukuran geometri sambungan tubular dan data *Welding Procedur Spesification*. Ukuran geometri sambungan tubular tipe T menggunakan ukuran tubular pada *jacket X Platform* tertera pada Tabel 3.1. Untuk gambar isometri X Platform tampak pada Gambar 3.2. Sedangkan *Welding Procedur Spesification (WPS)* menggunakan WPS dari PT. Gunanusa Utama Fabricators tertera pada Tabel 3.2. Spesifikasi material yang digunakan adalah SM 400 *Korean Standards* tertera pada Tabel 3.3 dan Tabel 3.4.

Tabel 3.1 Ukuran geometri sambungan tubular tipe T

	<b>Parameter</b>	<b>Nilai (inch)</b>
<b>Chord</b>	<i>Outside Diameter</i>	20
	Tebal	0,5
	Panjang	120,36
<b>Brace</b>	<i>Outside Diameter</i>	12,75
	Tebal	0,375
	Panjang	39,3

Tabel 3.2 Data Pengelasan

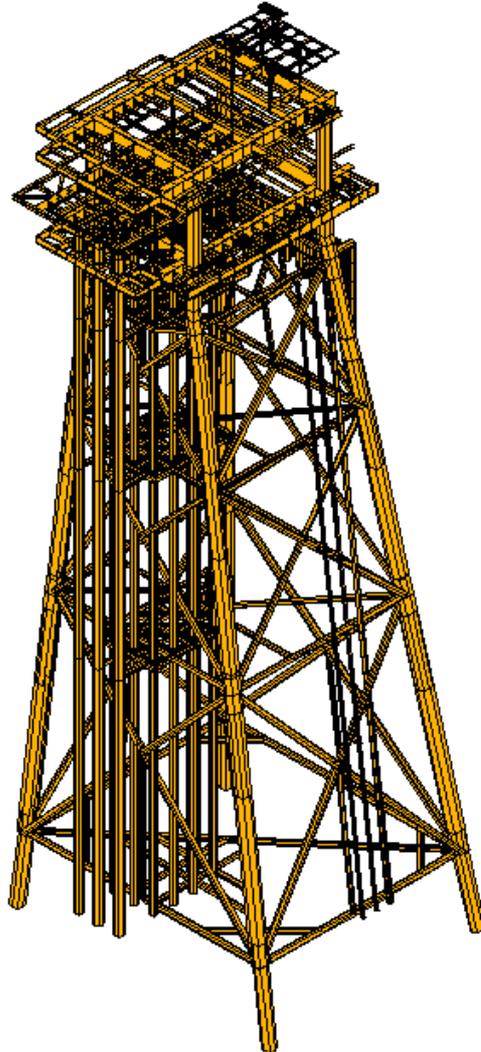
<b>Parameter</b>	<b>Keterangan</b>
Tipe Pengelasan	FCAW
Kecepatan Pengelasan	148 – 182 mm/min
Kuat Arus	148 – 209 Ampere
Voltage	20 – 26 Volts
Jenis Elektroda	E 71T-9C-J
Diameter Elektroda	1,2 mm

Tabel 3.3 Data Material SM 400

<b>Suhu</b> ( <sup>0</sup> C)	<b>Heat Conductivity</b> (W/m <sup>0</sup> C)	<b>Specific Heat</b> (J/Kg <sup>0</sup> C)	<b>Thermal Expansion</b> (1/ <sup>0</sup> C x 10 <sup>-6</sup> )
0	18,1	410	16
200	19,3	535	17,2
400	30,8	661	18,2
600	38,4	783	18,6
800	45,1	903	19,5
1000	43,7	910	19,5
1200	43,7	910	19,5
1400	43,7	910	19,5

Tabel 3.4 Data Material SM 400

<b>Suhu</b> ( <sup>0</sup> C)	<b>Poisson's</b> <b>Ratio</b>	<b>Density</b> (kg/m <sup>3</sup> )	<b>Young's Modulus</b> (GPa)	<b>Yield Strength</b> (MPa)
0	0,28	7820	199	240
200	0,28	7790	180	240
400	0,28	7740	166	240
600	0,28	7680	150	80
800	0,28	7620	125	3
1000	0,28	7600	125	3
1200	0,28	7600	125	3
1400	43,7	7600	125	3

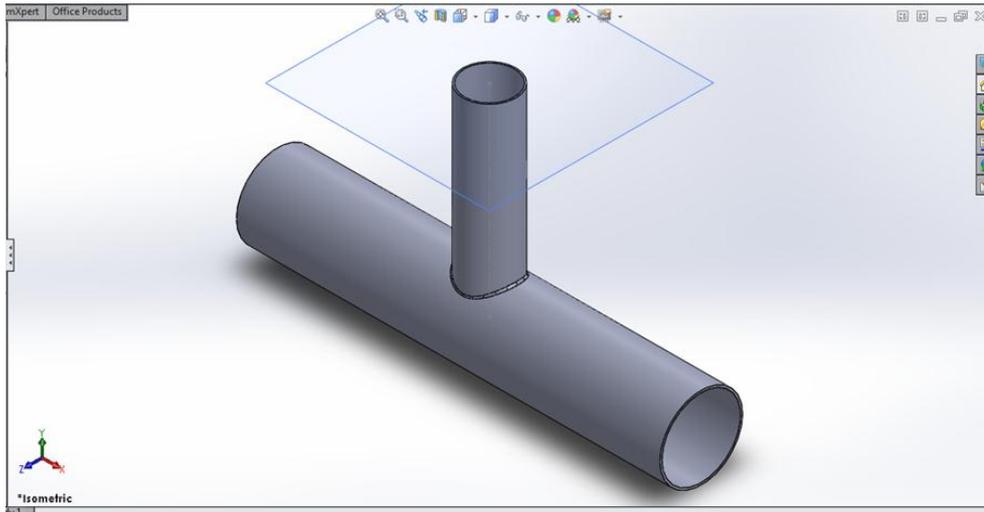


Gambar 3.2 Tampak Isometri X Platform

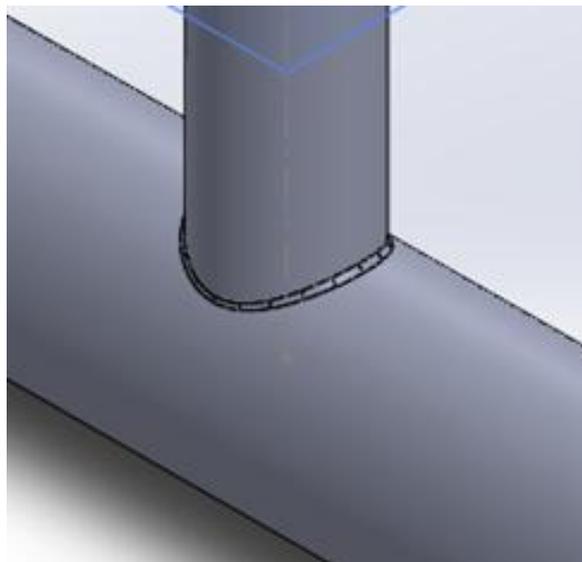
### 3.2.3 PEMODELAN GEOMETRI SAMBUNGAN TUBULAR T

Membuat geometri sambungan tubular tipe T dengan diameter dan tebal untuk masing-masing chord dan brace sesuai dengan data. Pembuatan geometri menggunakan *software* SolidWorks. Hasil pemodelan sambungan tubular T menggunakan SolidWorks tampak pada Gambar 3.3.

Setelah pembuatan model sambungan tubular T, daerah las atau kampuh las dibagi menjadi beberapa area kecil untuk memudahkan pemberian beban *heat flux* saat dilakukan analisa termal. Area las atau kampuh las dimodelkan dengan model *champer* dan dibagi menjadi 20 area kecil seperti pada Gambar 3.4.



Gambar 3.3 Hasil pembuatan sambungan geometri sambungan tubular T



Gambar 3.4 Pemodelan pembagian area las

### 3.2.4 **INPUT GEOMETRI SAMBUNGAN TUBULAR TIPE T KE SOFTWARE ANSYS MECHANICAL APDL 16.0**

Setelah pemodelan geometri dilakukan, maka *output* geometri dari *software* SolidWorks di masukkan *software* ANSYS Mechanical APDL 16.0. Setelah di-*input*, geometri harus tampak seperti ketika pemodelan di SolidWorks. Untuk *input* geometri sambungan tubular T ke *software* ANSYS Mechanical APDL 16.0 maka ekstensi file dari SolidWorks harus berupa **.IGS**.

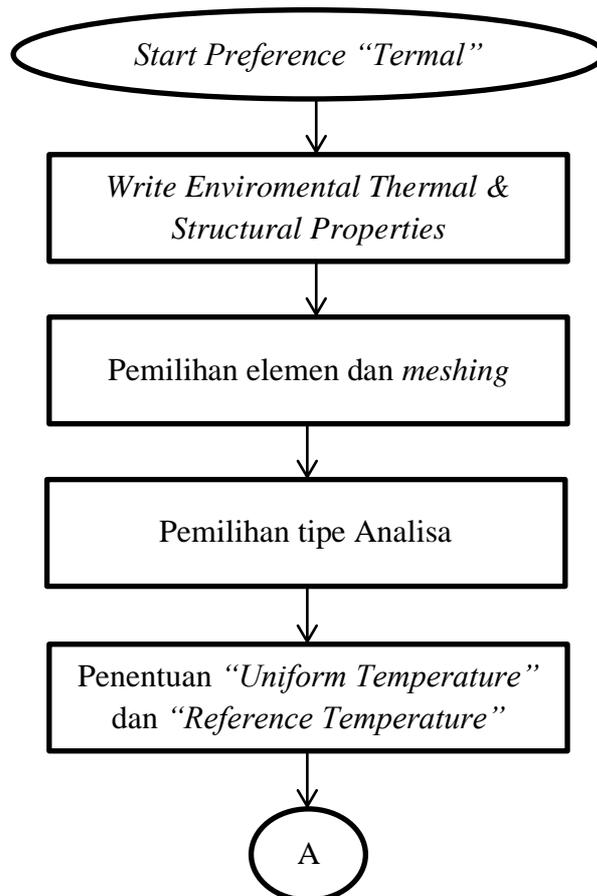
Setelah file pemodelan SolidWorks diubah ke **.IGS** maka selanjutnya dapat dilakukan *import* ke *software* ANSYS Mechanical APDL 16.0. Setelah membuka, lebih baik menentukan nama file dengan cara **File → Change Jobname** dan menentukan direktori untuk file *output* dengan cara **File → Change Directory**. Untuk *import* dapat dilakukan dengan cara seperti berikut

***File → Import → IGS → Browse File***

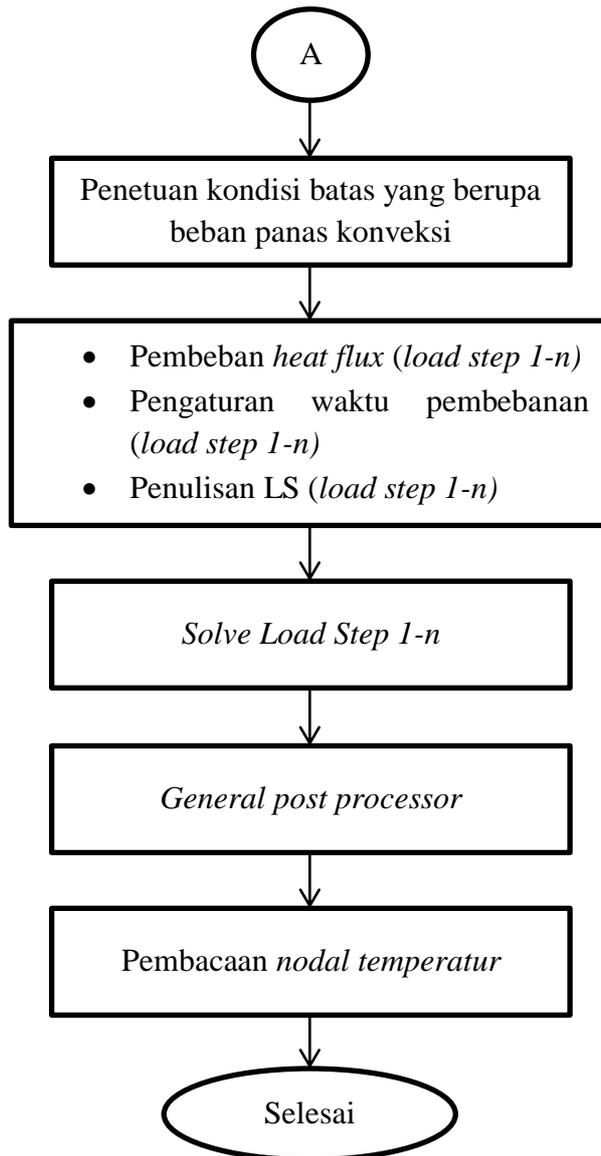
Hasil *import* file dari SolidWorks ketika dibuka di *software* ANSYS Mechanical APDL 16.0 harus memiliki bentuk yang sama persis. Hal ini untuk menghindari terjadinya eror ketika dilakukan analisa thermal dan struktural.

### **3.2.5 ANALISA TERMAL MENGGUNAKAN SOFTWARE BERBASIS METODE ELEMEN HINGGA**

Proses analisa thermal dapat dilihat dalam diagram alir Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Diagram alir analisa termal



Gambar 3.5 Diagram alir analisa termal (lanjutan)

Penjelasan dari diagram alir analisa termal adalah sebagai berikut:

a. *Start Preference "Thermal"*

Sebelum memulai analisa harus dipilih jenis penyelesaian masalah yang akan digunakan pemodelan. Dalam pemodelan pengelasan, pada kotak dialog *Preference* dapat dipilih *Thermal*, yang berarti dalam analisa ini dapat dilakukan pemberian beban panas pada model. Dapat dilihat pada Lampiran A Gambar A1

***Preferences → Centang Thermal → OK***

b. *Write Enviromental Thermal & Structural Properties*

Tahap ini adalah tahapan untuk memasukkan semua sifat atau spesifikasi material yang digunakan. Hal ini perlu dilakukan karena untuk analisa termal dan struktural dibutuhkan sifat-sifat material. Sifat material yang dimasukkan berhubungan dengan termal adalah konduktifitas, masa jenis, dan *spesific heat*. Sedangkan untuk untuk sifat material yang berhubungan dengan struktural berupa *yield strength*. Memasukkan sifat material dapat dilakukan sebagai berikut (seperti Lampiran A Gambar A2)

***Preprocessor → Material Props → Material Models***

Setelah sifat material dimasukkan, maka data sifat material tersebut perlu disimpan dalam *environment*. *Environment* sendiri adalah fasilitas *library* atau penyimpanan data untuk mendukung analisa. Penulisan *environment* dapat dilakukan sebagai berikut

***Preprocessor → Material Props → Write to File***

c. Pemilihan elemen dan meshing

Model geometri sambungan tubular yang telah diinputkan pada *software* ANSYS Mechanical APDL 16.0 harus ditentukan jenis elemennya terlebih dahulu agar dapat dilakukan *meshing* nantinya. Dalam pemodelan pengelasan sambungan tubular dapat digunakan elemen SOLID70 dan SOLID 90, yang merupakan elemen untuk *couple analysis*. *Meshing* dilakukan dengan membagi keseluruhan model menjadi elemen-elemen kecil yang sama agar analisa dapat dilakuakn secara detail pada setiap titik/nodal keseluruhan model.

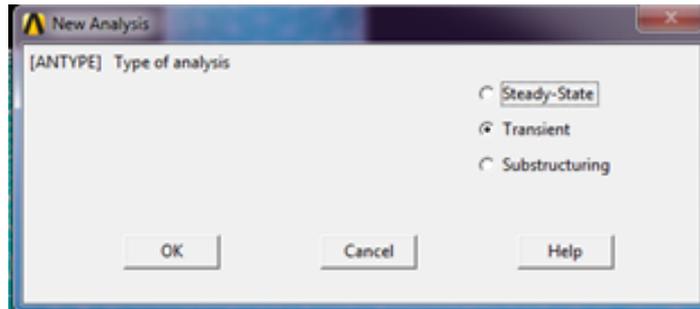
Dalam analisa ini, bentuk meshing yang digunakan adalah hexahedral dengan menggunakan SOLID70 dan tetrahedral dengan menggunakan SOLID90. Meshing dapat dilakukan dengan menu Mesh Tool.

***Preprocessor → Meshing → Mesh Tool → Global → Set → Volume → Mesh***

d. Pemilihan tipe analisa

Pengelasan merupakan sebuah proses yang memiliki fungsi lokasi dan fungsi waktu. Memperhatikan dua fungsi tersebut, maka dalam analisa ini dipilih tipe analisa *transient* seperti pada Gambar 3.6

***Solution → New Analysis → Analysis Type → Transient → OK***



Gambar 3.6 Tipe Analisa

e. Penentuan “*Uniform Temperature*” dan “*Reference Temperature*”

Pada tahap ini menentukan referensi temperatur yang digunakan dalam analisa. Referensi temperatur yang digunakan adalah suhu ruang 300 K.

***Solution → Define Loads → Setting → Uniform Temperature***

***Solution → Define Loads → Setting → Reference Temperature***

f. Penentuan kondisi batas yang berupa beban konveksi

Pada pemodelan pengelasan ini terjadi proses konveksi antara permukaan sambungan tubular yang berhubungan langsung dengan udara. Kondisi batas yang digunakan adalah beban konveksi, dengan memasukkan nilai *Convective Film Coefficient* sebesar  $15 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Sedangkan untuk *bulk temperatur* yang digunakan adalah 300 K.

***Solution → Define Loads → Thermal → Apply → Convection***

- g. Proses pembebanan *heatflux*, pengaturan waktu pembeban, dan penulisan *load step* (1-n)

Proses pembebanan menggunakan beban *heat flux*. Beban diaplikasikan pada *weld area*, sehingga dapat mewakili beban panas pengelasan. Beban *heat flux* ini diberikan di setiap elemen yang dilewati selama proses pengelasan. Durasi pemberian beban berdasarkan panjang elemen per kecepatan pengelasan. Setelah pemberian beban dilakukan, maka waktu pembebanan harus ditentukan, agar beban panas berjalan sesuai waktu simulasi pengelasan. Waktu dan langkah pembebanan direncanakan dari *step* 1-n. Agar pemberian beban terekam, dilakukan penulisan *load step* 1-n.

***Solution → Define Loads → Thermal → Apply → Heat Flux***

***Solution → Load Step Opts → Write LS***

- h. *Solve load step* (1-n)

Langkah selanjutnya ketika pembebanan dan waktu pembebanan sudah selesai dilakukan adalah melakukan solusi pembebanan. Waktu dalam proses *solve* ini tergantung dari jumlah node pada model, kapasitas hard disk dan memori komputer yang dipakai. Langkah *solve* dapat dilihat pada Lampiran A Gambar A3.

***Solution → Solve → From LS File***

- i. *General post processor*

Tahap ini merupakan pembacaan hasil dari hasil *solving*. Untuk tahapan pembacaan hasil dapat dilihat pada Lampiran A Gambar A4

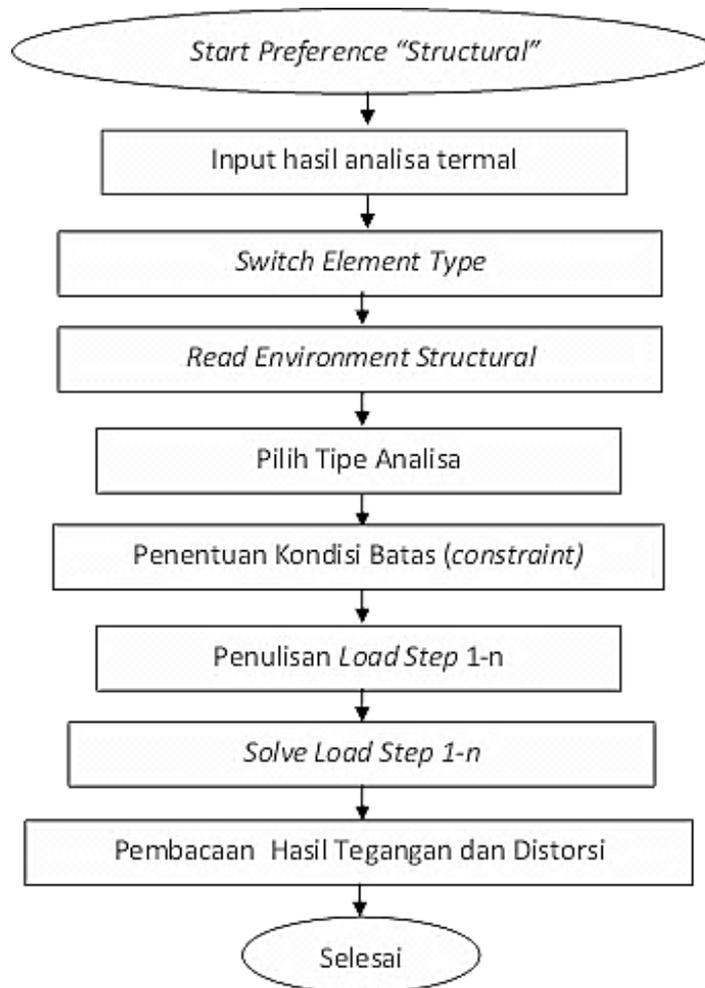
***General Postproc → Read Result → Last Set***

- j. Pembacaan *nodal temperature*

Setelah dilakukan tahap pembacaan hasil dari *running*, dapat dilakukan pembacaan hasil termal. Hasil dari tahap *solve* analisa thermal berupa distribusi panas yang terjadi pada material. Distribusi panas ini dapat dilihat berdasarkan fungsi waktu dan fungsi posisi. Hasil analisa termal berupa gambar distribusi panas pada model dan grafik fungsi waktu pada node yang dipilih.

### 3.2.6 ANALISA STRUKTURAL MENGGUNAKAN *SOFTWARE* ANSYS MECHANICAL APDL 16.0

Proses analisa struktural dapat dilihat pada diagram alir Gambar 3.7



Gambar 3.7 Diagram alir analisa struktural

Penjelasan dari diagram alir analisa termal adalah sebagai berikut:

a. *Start preference "Structural"*

Setelah analisa termal dilakukan untuk mendapatkan distribusi panas, dilakukan analisa struktural yang berhubungan dengan fenomena mekanik akibat beban panas. Dalam pemodelan pengelasan untuk mendapatkan tegangan sisa, pada kotak dialog *Preference* dapat dipilih *Structural*.

***Preferences → Centang Structural → OK***

b. Input hasil analisa termal

Hasil dari *solving* pada analisa termal digunakan sebagai input untuk analisa struktural.

***General Postproc → Data & File Opts → Browse → file .rth***

c. *Switch element type*

Jenis elemen yang digunakan pada analisa struktural berbeda dengan elemen yang digunakan pada analisa termal, sehingga jenis elemen harus diganti terlebih dahulu. Jenis elemen yang semula SOLID70 pada analisa termal diganti SOLID185 untuk analisa struktural. Sedangkan untuk elemen SOLID90 berubah menjadi SOLID186.

***Preprocessore → Element Type → Switch Element Type → Thermal to Structural***

d. *Read environment structural*

Sebelum dilakukan pemberian beban, perlu dilakukan pembacaan sifat material yang berhubungan dengan sifat mekanik. Sebelumnya pada analisa termal telah dilakukan *write environment* sehingga pada analisa struktural cukup membaca kembali *environment* yang telah dibuat. dilakukan pembacaan *environment* yang telah dibuat.

e. Pilih tipe analisa

Pada analisa struktural, tipe analisa yang dipilih adalah analisa jenis *static*.

***Solution → Analysis Type → New Analysis → Static → OK***

f. Penentuan kondisi batas

Kondisi batas yang digunakan dalam analisa ini berupa tumpuan agar proses perhitungan dapat dilakukan dan tegangan dapat ditampilkan. Tumpuan jepit pada model diletakkan pada salah satu ujung *chord tubular* sebagai kondisi batas.

***Solution → Define Load → Apply → Structural → Displacement → On Area***

- g. Pembacaan hasil analisa termal dan penulisan *load step* 1-n

Input analisa struktural adalah data pembebanan termal dari analisa termal. Beban yang digunakan berupa beban termal yang dikenakan pada analisa struktural. Proses pembebanan ini dilakukan secara berulang dari load step 1 sampai load step ke-n. Agar pembebanan terekam, perlu dilakukan penulisan *load step* 1-n seperti pada analisa termal.

***Solution → Define Load → Apply → Structural → Temperature → From Therm Analy***

***Solution → Loadstep Opts → Write LS File***

- h. *Solve load step* 1-n

Tahap ini merupakan proses solusi untuk mendapatkan reaksi terhadap pembebanan. Reaksi yang didapatkan berupa tegangan sisa dan distorsi.

***Solution → Solve → From LS File***

- i. Pembacaan hasil tegangan sisa dan distorsi

Hasil dari tahap *solve* analisa struktural berupa tegangan dan deformasi yang terjadi pada material. Deformasi ini dapat dilihat berdasarkan fungsi waktu dan fungsi posisi. Hasil analisa struktural berupa tegangan sisa yang dapat ditinjau pada daerah tertentu dengan bantuan *pathline*.

***General Postproc → Read Result → Last Set***

### **3.2.7 ANALISA POST WELD HEAT TREATMENT DENGAN VARIASI SUHU DAN WAKTU TAHAN**

Setelah dilakukan pemodelan untuk mendapatkan tegangan sisa pada sambungan tubular tipe T. Tahap selanjutnya adalah memberi perlakuan *post weld heat treatment (PWHT)*. *PWHT* ini dilakukan dengan memberikan beban panas kembali selama waktu tahan tertentu. *PWHT* dilakukan dengan variasi suhu dan waktu tahan. Variasi suhu dan waktu tahan yang digunakan terinci pada Tabel 3.5

Tabel 3.5 Variasi suhu dan waktu tahan *post weld heat treatment*

No.	Suhu ( $^{\circ}\text{C}$ )	Suhu (K)	Waktu tahan ( jam)
1.	593	866	1
2.	482	755	1
3.	427	700	1
4.	315	588	1
5.	285	558	2
6.	255	528	4

Untuk variasi *post weld heat treatment* no.4 sampai no.6 mengacu pada *alternate PWHT section 3.14 AWS D.1.1*. Sedangkan untuk variasi no.1 sampai no.3 mengacu pada penelitian oleh G.E. Linnert (1997)

### 3.2.8 ANALISA DAN PEMBAHASAN

Dalam tahap ini akan dilakukan pembahasan hasil tegangan sisa sambungan tubular tipe T *as-welded* dan hasil tegangan sisa ketika sambungan diberi perlakuan *post weld heat treatment*. Hasil analisa tanpa dan dengan *post weld heat treatment* tentunya akan menghasilkan nilai tegangan sisa yang berbeda.

### 3.2.9 KESIMPULAN

Hasil analisa pada tugas akhir ini merupakan tegangan sisa dan distorsi yang terjadi pada sambungan tubular T hasil pengelasan. Sehingga dapat dihasilkan kesimpulan berdasarkan tujuan analisa.

### 3.2.10 PENYUSUNAN LAPORAN

## BAB IV

### ANALISIS DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 SIMULASI PENGELASAN

Pengelasan pada sambungan tubular T disimulasikan menggunakan *software* ANSYS Mechanical APDL 16.0 dengan *heat flux* sebagai beban panas yang diterima oleh sambungan tubular. *Heat flux* merupakan beban persatuan luas yang didapat dari besar *heat input*. *Heat input* sendiri dipengaruhi oleh arus listrik pengelasan, tegangan/voltage yang digunakan, dan jenis pengelasan. Untuk simulasi panas pengelasan, *heat input* ini akan diubah menjadi beban panas yang dikenakan pada tiap elemen dan berjalan dengan fungsi waktu. Karena berjalan dengan fungsi waktu, maka kecepatan pengelasan juga akan mempengaruhi waktu berlangsungnya beban yang dikenai pada tiap elemen.

##### 4.1.1 DATA-DATA UNTUK SIMULASI PENGELASAN

Beberapa parameter pengelasan yang digunakan dalam simulasi pengelasan sambungan tubular T adalah:

1. *Heat Input* (Q). Merupakan masukan panas bersih dalam pengelasan, diperoleh dengan perkalian antara kuat arus, tegangan, dan efisiensi jenis pengelasan.
2. Kuat Arus Pengelasan (I). Besar arus pengelasan dari *Welding Procedure Specification* adalah 148 - 209 Ampere, untuk simulasi ini digunakan arus pengelasan 165 Ampere.
3. Tegangan Pengelasan (U). Besar tegangan pengelasan dari *Welding Procedure Specification* adalah 20 – 26 Volts, untuk simulasi ini digunakan tegangan pengelasan 22 Volts.
4. Efisiensi Pengelasan ( $\eta$ ). Besar nilai efisiensi dimabil dari tabel koefisien pengelasan, untuk pengelasan FCAW menggunakan nilai efisiensi sebesar 0,8 – 0,9.
5. Waktu Pembebanan (t). Waktu pembebanan merupakan lamanya elemen menerima beban *heat flux*. Waktu ini didapatkan dari panjang daerah las/ elemen dibagi dengan kecepatan pengelasan.

6. Kecepatan Pengelasan. Nilai kecepatan pengelasan digunakan untuk menentukan berapa lama beban panas mengenai elemen. Besar kecepatan pengelasan dari *Welding Procedure Specification* adalah 148-182 mm/min, untuk simulasi ini digunakan kecepatan pengelasan sebesar 182 mm/min.
7. Luas Pembebanan (A). Luas yang dikenai beban heat flux adalah luas tiap elemen. Luas tiap elemen didapatkan dari pembagian luas area pengelasan dengan jumlah elemen yang dalam area las an tersebut.
8. *Heat Flux* (q). Merupakan besar beban panas yang diterima tiap elemen.
9. Kondisi Batas. Saat proses pengelasan terjadi proses konveksi antara permukaan sambungan tubular dengan udara sekitar. Untuk mensimulasikan proses konveksi yang terjadi maka dilakukan input koefisien konveksi. Koefisien yang di input kan adalah *Film Coeficient* yang bernilai 15 dengan udara sekitar dianggap pada suhu kamar 300 K. Kondisi batas konveksi berlaku pada analisa thermal, sedangkan untuk analisa struktural kondisi batas yang diberikan adalah pemberian tumpuan jepit pada sambungan tubular.

#### 4.1.1.1 PERHITUNGAN BEBAN *HEAT FLUX*

Dalam simulasi pengelasan sambungan tubular T beban akan diberikan pada tiap luasan elemen yang akan ditransfer menjadi beban tiap nodal. Beban yang diberikan merupakan *heat flux*, dimana besarnya diperoleh dari *heat input* bersih yang mengenai tiap elemen.

- *Heat Input* Bersih

$$Q = \eta \cdot U \cdot I \quad (4.1)$$

Dimana:

Q : *net heat input / effective thermal power* (watt)

$\eta$  : koefisien efesiensi pengelasan

U : tegangan busur (Volt)

I : arus listrik (Ampere)

dengan data parameter pengelasan yang digunakan adalah,

$$\eta = 0,85$$

$$U = 22 \text{ Volts}$$

$$I = 165 \text{ Ampere}$$

maka,

$$Q = \eta \cdot U \cdot I$$

$$Q = 0,85 \times 22 \times 165$$

$$Q = 3085,5 \text{ watt}$$

- *Heat Flux* tiap elemen. *Heat input* yang diperoleh sebelumnya adalah *heat input* bersih dari elektroda dan belum dikenai pada elemen. Sehingga perlu dihitung beban akibat panas dari elektroda yang mengenai elemen. Beban *heat flux* dapat dihitung sebagai berikut:

$$q_1 = q_e \frac{A_1}{A_f} \quad (4.2)$$

Dimana:

$q_1$  : *heat flux* pada elemen ( $\text{J}/\text{mm}^2$ )

$q_e$  : *heat flux* yang dihasilkan elektroda ( $\text{J}/\text{mm}^2$ )

$A_1$  : luas permukaan elemen ( $\text{mm}^2$ )

$A_f$  : luasan fluks yang dihasilkan elektroda ( $\text{mm}^2$ )

➤ Menghitung *Heat Flux* Elektroda

$$q_e = \frac{Q}{A_f} \quad ; \quad A_f : \text{luasan fluks yang dihasilkan elektroda}$$

$$q_e = \frac{Q}{\pi r^2} \quad ; \quad r : \text{jari-jari elektroda}$$

$$q_e = \frac{3085,5}{\pi 0,6^2}$$

$$q_e = 2729,565 \text{ watt}/\text{mm}^2$$

➤ Menghitung Luas Elemen

Luas elemen dihitung menggunakan dengan pendekatan trapesium untuk satu area las dibagi dengan jumlah elemn pada area las tersebut.

$$A_1 = \frac{\left(\frac{p_1 + p_2}{2}\right) \times l}{n \text{ elemen}} \quad (4.3)$$

dengan,

$$p_1 = 51,26 \text{ mm}$$

$$p_2 = 54,92 \text{ mm}$$

$$l = 16,46 \text{ mm}$$

$$n \text{ elemen} = 55$$

maka,

$$A_1 = \frac{\left(\frac{51,26 + 54,92}{2}\right) \times 16,46}{55}$$

$$A_1 = 15,888 \text{ mm}^2$$

➤ Menghitung Luasan *Flux* yang Dihasilkan Elektroda

$$A_f = b \cdot v \cdot t \quad (4.4)$$

dengan,

$$b = 54,92 \text{ mm}$$

$$v = 3,033 \text{ mm/s}$$

$$t = 18,1 \text{ s}$$

maka,

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

$$A_f = 54,92 \times 3,033 \times 18,1$$

$$A_f = 3016,206 \text{ mm}^2$$

Setelah melakukan perhitungan-perhitungan di atas, selanjutnya adalah melakukan perhitungan *heat flux*.

$$q_1 = q_e \frac{A_1}{A_f} \quad (4.5)$$

$$q_1 = 2729,565 \frac{15,888}{3016,206}$$

$$q_1 = 14,378 \text{ watt/mm}^2$$

$$q_1 = 14,378 \times 10^6 \text{ watt/m}^2$$

Dari perhitungan di atas diketahui besar beban *heat flux* yang mengenai elemen adalah  $14,378 \times 10^6 \text{ watt/m}^2$ . Beban *heat flux* ini akan diaplikasikan pada tiap elemen secara *transient*.

Selain pengaplikasian beban *heat flux*, dilakukan pemberian beban konveksi sesuai dengan kondisi batas analisa termal. Kondisi batas pada analisa termal

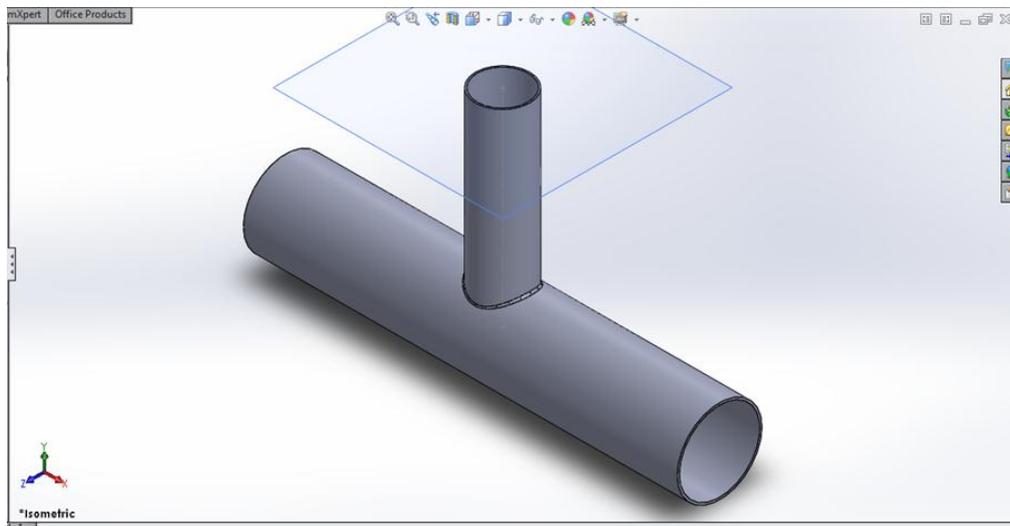
berupa proses konveksi antara permukaan sambungan tubular dengan udara sekitar. Untuk mensimulasikan proses konveksi yang terjadi maka dilakukan *input* koefisien konveksi, yang bernilai

$$\begin{aligned} \text{Film Coefficient} &= 15 \text{ W/m}^2\text{K} \\ \text{Bulk Temperatur} &= 300 \text{ K} \end{aligned}$$

Nilai koefisien konveksi ini menggambarkan seberapa besar panas dari udara sekitar yang mengenai permukaan sambungan tubular secara langsung. *Bulk temperatur* merupakan temperatur saat pengelasan dilakukan, diasumsikan sebesar suhu ruang 300 K.

#### 4.2 ANALISA PEMODELAN GEOMETRI DAN SENSITIFITAS MESHING

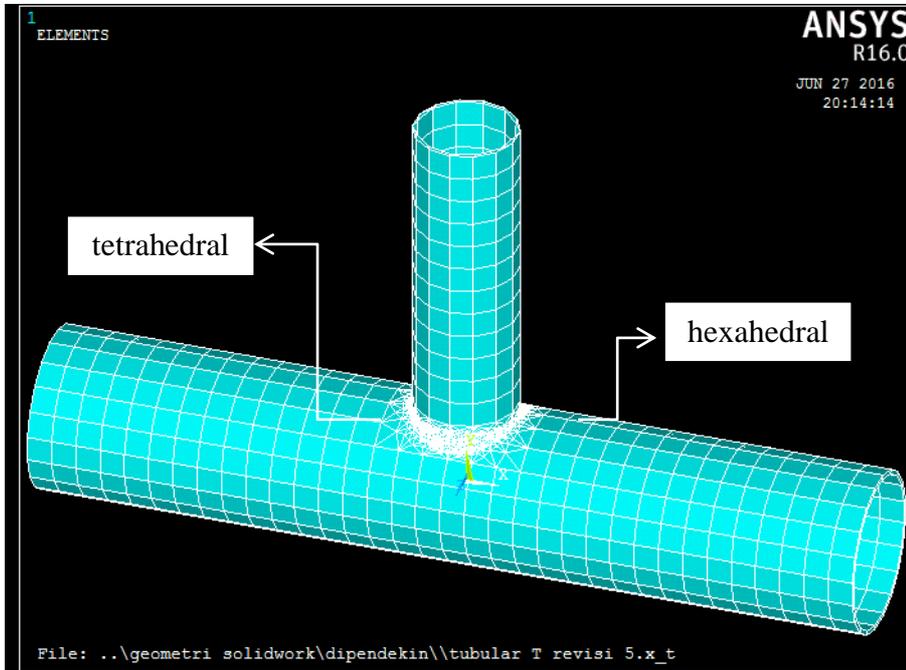
Geometri sambungan tubular T dibuat menggunakan *software* SolidWorks dengan hasil seperti pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1. Pemodelan geometri sambubngan tubular T

Sebelum dilakukan pembebanan *heat flux* pada model perlu dilakukan *meshing*. *Meshing* adalah membagi model menjadi elemen-elemen kecil. Variasi panjang meshing akan menghasilkan jumlah node yang berbeda. Variasi panjang meshing dan jumlah node ini digunakan untuk memilih panjang meshing yang paling tepat, guna memperoleh hasil yang mendekati dengan hasil nyata.

Pemilihan bentuk dan ukuran *meshing* akan mempengaruhi hasil, waktu *solving*, jumlah elemen, dll. Dalam simulasi ini digunakan *meshing* bentuk hexahedral dan tetrahedral, seperti yang tampak pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Pemodelan dengan *meshing* hexahedral dan tetrahedral

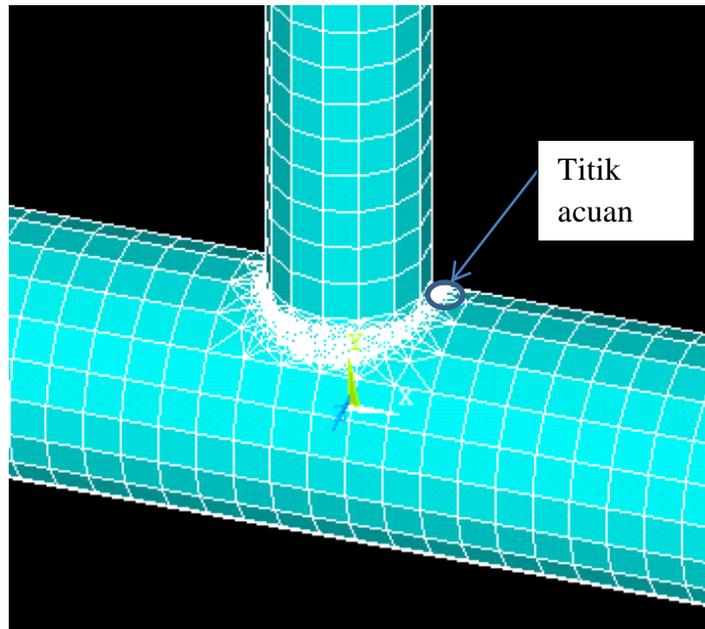
Sensitifitas *meshing* adalah melakukan variasi ukuran elemen untuk mendapatkan hasil yang konstan dengan cara merubah ukuran *meshing*. Ukuran *meshing* divariasikan dari ukuran yang besar sampai ke ukuran yang kecil dan menghasilkan elemen lebih banyak. Variasi ukuran *meshing* dan jumlah elemen yang digunakan untuk *meshing* sensitifitas dapat dilihat pada Tabel 4.1. Dari variasi ukuran *meshing*, akan didapatkan nilai tegangan yang berbeda di satu titik acuan pengukuran tegangan. Titik acuan pengukuran tegangan dapat dilihat pada Gambar 4.3. Nilai tegangan pada titik acuan untuk tiap variasi ukuran *meshing* dapat dilihat pada Gambar 4.4

Tabel 4.1 Variasi ukuran *meshing* dan jumlah elemen

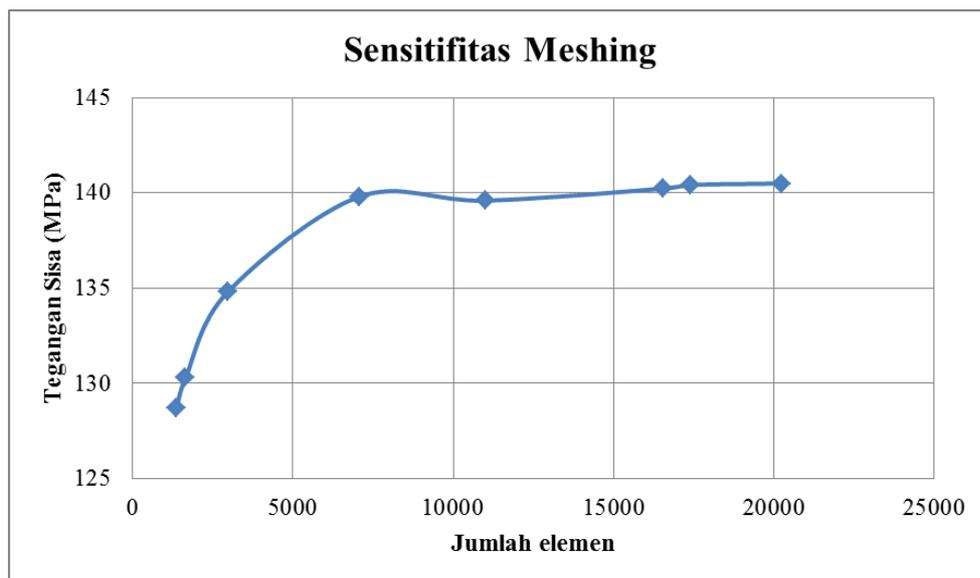
Panjang <i>meshing</i> hexahedral	Panjang <i>meshing</i> tetrahedral	Jumlah elemen
8 cm	8 cm	1370
8 cm	5 cm	1657

Tabel 4.1 Variasi ukuran *meshing* dan jumlah elemen (lanjutan)

8 cm	3 cm	2969
8 cm	1 cm	7065
4 cm	8 mm	10992
4 cm	7 mm	16545
4 cm	6 mm	17405
3 cm	7 mm	20250

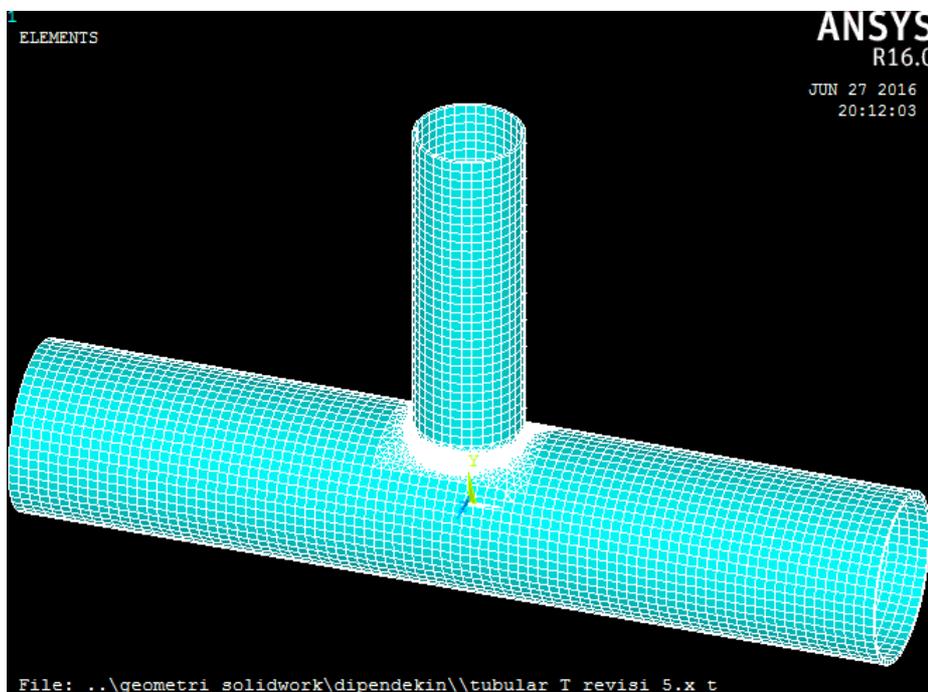


Gambar 4.3 Titik acuan untuk pengukuran tegangan sensitifitas *meshing*



Gambar 4.4 Grafik sensitifitas *meshing*

Dari grafik sensitifitas *meshing* Gambar 4.4 dapat dilihat bahwa semakin banyak jumlah elemen, semakin besar tegangan sisa. Nilai tegangan sisa semakin konstan ketika jumlah elemen semakin banyak, yaitu pada jumlah elemen 16545, 17405 dan 20250. Nilai tegangan sisa semakin tinggi karena diskritisasi elemen model semakin banyak. Tetapi pada akhirnya grafik tidak akan naik terus melainkan akan mendatar. Kondisi ini menandakan nilai tegangan sisa tidak berubah meskipun dilakukan penambahan jumlah elemen. Sehingga *meshing* yang digunakan untuk simulasi numerik ini adalah *meshing* dengan ukuran 3 cm bentuk hexahedral dan 7 mm bentuk tetrahedral. Ukuran *meshing* yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 4.5.



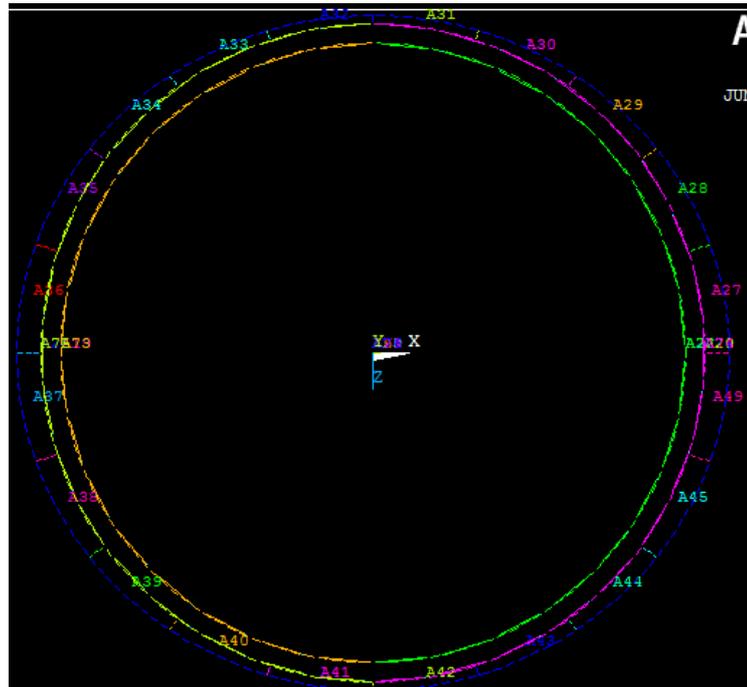
Gambar 4.5 *Meshing* (20250 elemen)

### 4.3 ANALISA DISTRIBUSI PANAS/TEMPERATUR

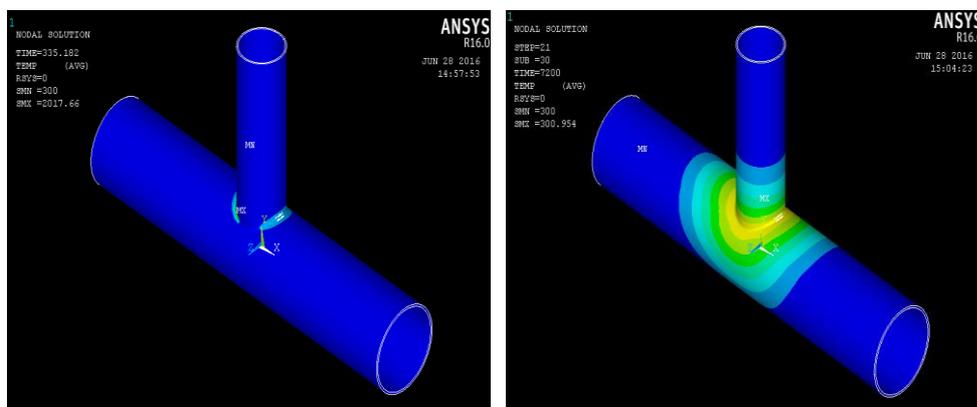
Analisa termal yang dilakukan saat simulasi pengelasan akan menghasilkan distribusi panas dan regangan panas. Simulasi pengelasan dilakukan dengan membagi area pengelasan menjadi 20 area pembebanan seperti pada Gambar 4.6. Pada simulasi pengelasan dilakukan 21 *load step*, yang termasuk satu *load step* untuk pendinginan setelah pengelasan. *Load step* untuk

simulasi pengelasan dapat dilihat pada Tabel 4.2 sedangkan ilustrasi simulasi pengelasan terdapat pada Gambar 4.7.

Distribusi panas ditinjau di titik awal pengelasan untuk mendapatkan suhu pengelasan yang terjadi, yaitu pada nodes 12487. Hasil yang didapatkan berupa grafik antara increment waktu pengelasan dengan suhu pada waktu tersebut. Untuk hasil distribusi temperatur pengelasan atau distribusi panas dapat dilihat pada Gambar 4.7.



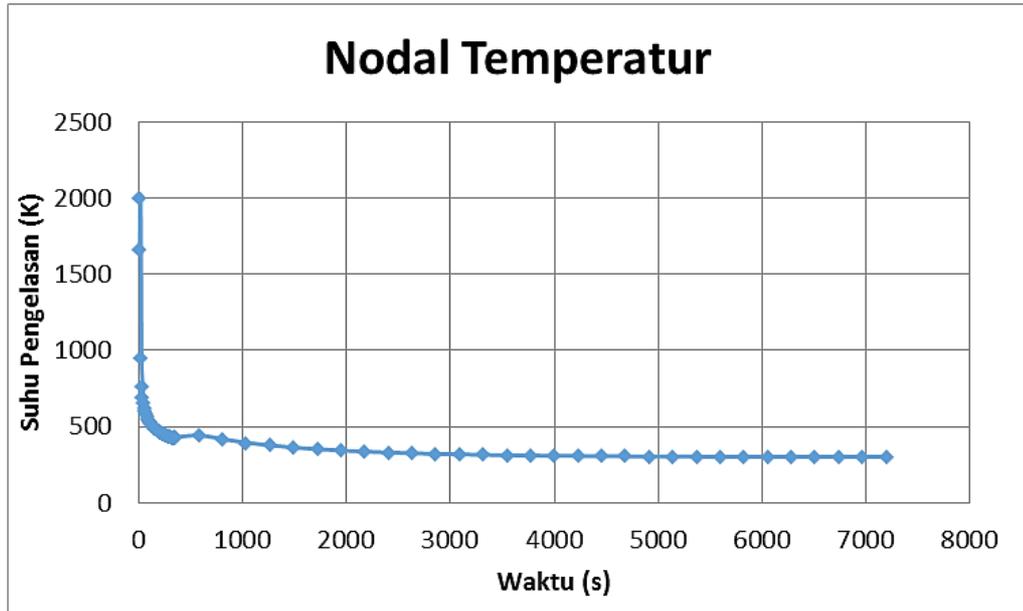
Gambar 4.6 Area pembebanan panas



Gambar 4.7 Ilustrasi pengelasan (kiri) kondisi akhir pendinginan (kanan)

Tabel 4.2 *Load step* simulasi pengelasan

<b><i>Load step</i></b>	<b>Area Pembebanan</b>	<b>Waktu Pembebanan (s)</b>
<i>Load step 1</i>	A42	18
<i>Load step 2</i>	A43	36
<i>Load step 3</i>	A44	54
<i>Load step 4</i>	A45	72
<i>Load step 5</i>	A49	90
<i>Load step 6</i>	A27	108
<i>Load step 7</i>	A28	126
<i>Load step 8</i>	A29	144
<i>Load step 9</i>	A30	162
<i>Load step 10</i>	A31	180
<i>Load step 11</i>	A32	198
<i>Load step 12</i>	A33	216
<i>Load step 13</i>	A34	234
<i>Load step 14</i>	A35	252
<i>Load step 15</i>	A36	270
<i>Load step 16</i>	A37	288
<i>Load step 17</i>	A38	306
<i>Load step 18</i>	A39	324
<i>Load step 19</i>	A40	342
<i>Load step 20</i>	A41	360
<i>Load step 21</i>	Semua area	7200



Gambar 4.8 Distribusi temperatur pada node 12487 *load step 1*.

Dari Gambar 4.8 dapat diketahui bahwa temperatur pada node 12487 daerah awal pengelasan (*load step 1*) adalah 2001,06 K. Secara perlahan suhu menurun ke 300 K sampai akhir waktu pendinginan.

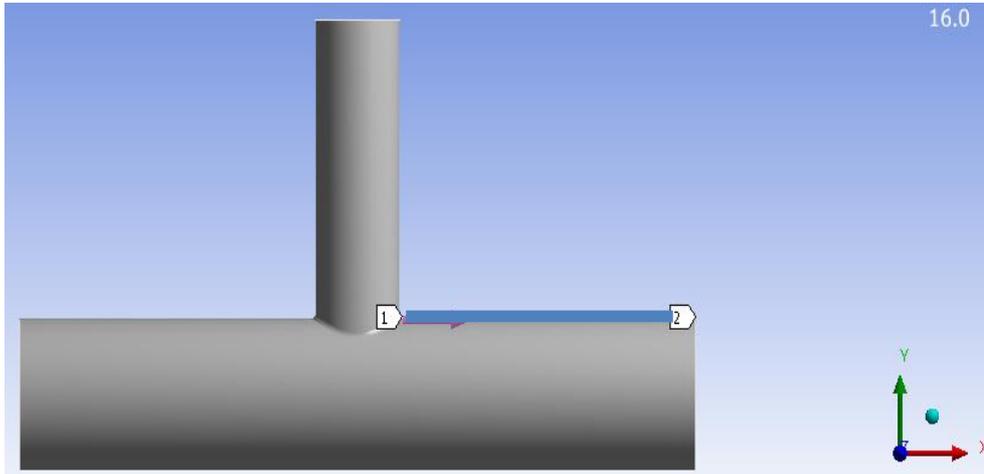
#### 4.4 HASIL ANALISA TEGANGAN SISA

Analisa tegangan sisa dilakukan untuk tegangan sisa pada daerah *chord*. Nilai-nilai dari tegangan tersebut di dapatkan pada titik-titik acuan yang telah ditentukan. Tegangan sisa akan ditinjau pada bagian atas, tengah, dan bawah *chord*. Untuk melihat tegangan sisa pada daerah yang ditentukan dapat menggunakan fasilitas *pathline operations* pada saat pembacaan hasil setelah *solving*.

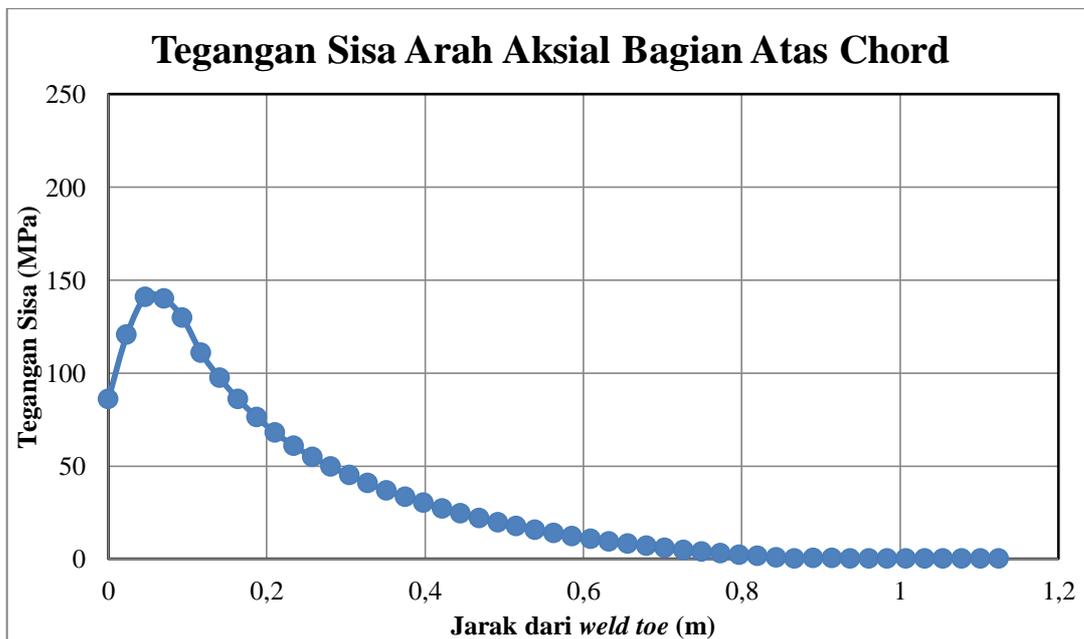
Jenis tegangan sisa pada pipa yang paling signifikan meliputi tegangan sisa arah aksial dan tegangan sisa arah tangensial. Pada tugas akhir ini akan dianalisa tegangan sisa arah aksial pada *chord* sambungan tubular T, sesuai dengan referensi yang digunakan untuk validasi.

#### 4.4.1 DISTRIBUSI TEGANGAN SISA BAGIAN ATAS *CHORD*

Untuk melihat tegangan sisa bagian atas *chord*, maka digunakan *pathline* seperti yang terlihat pada Gambar 4.9. Dengan menggunakan *pathline* tersebut akan didapatkan distribusi tegangan sisa di sepanjang *pathline* bagian atas *chord*.



Gambar 4.9 *Pathline* untuk pembacaan tegangan sisa bagian atas *chord*



Gambar 4.10 Distribusi tegangan sisa arah aksial bagian atas *chord*.

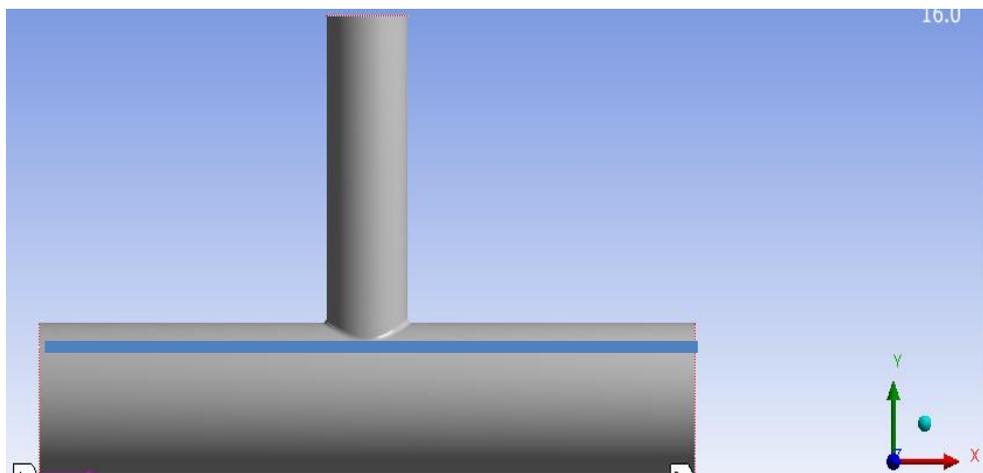
Pada Gambar 4.10 terdapat grafik yang menunjukkan distribusi tegangan sisa arah aksial bagian atas *chord*. Distribusi tegangan sisa arah aksial berupa tegangan tarik. Tegangan sisa yang terjadi di dekat *weld toe* cenderung bernilai

besar. Akan tetapi nilai tegangan sisa arah aksial terbesar tidak terdapat pada alur pengelasan, melainkan pada daerah sekitar pengelasan. Tegangan tarik akan semakin mengecil ketika semakin menjauhi *weld toe*. Pada daerah yang semakin jauh dari *weld toe* akan memiliki nilai tegangan sisa yang mendekati 0.

Tegangan sisa pada daerah *weld toe* dan sekitarnya memiliki tegangan yang besar karena mendapat pengaruh langsung dari beban panas pengelasan. Sedangkan daerah yang jauh dari *weld toe* memiliki nilai tegangan yang lebih rendah dan mendekati 0 karena tidak mendapat pengaruh langsung dari beban panas pengelasan. Nilai tegangan sisa arah aksial terbesar bernilai 141,02 MPa, di titik yang berjarak 4,69 cm dari *weld toe*. Sedangkan nilai tegangan sisa arah aksial terkecil terjadi pada ujung *chord* yaitu 0,12 MPa.

#### 4.4.2 DISTRIBUSI TEGANGAN SISA BAGIAN TENGAH *CHORD*

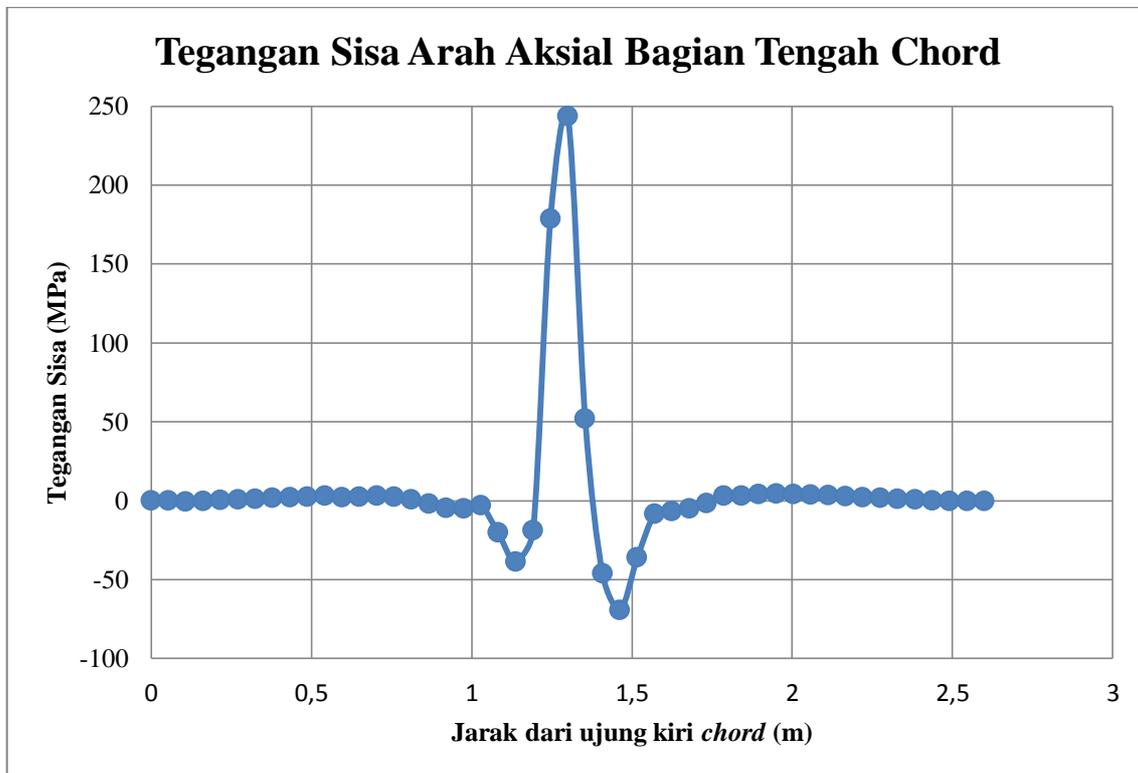
Untuk melihat tegangan sisa bagian tengah *chord*, maka digunakan *pathline* seperti yang terlihat pada Gambar 4.11. Dengan menggunakan *pathline* tersebut akan didapatkan distribusi tegangan sisa di sepanjang *pathline* bagian tengah *chord*.



Gambar 4.11 *Pathline* untuk pembacaan tegangan sisa bagian tengah *chord*

Dalam Gambar 4.12 terdapat grafik yang menunjukkan distribusi tegangan sisa arah aksial bagian tengah *chord*. Distribusi tegangan berupa tegangan tarik dan tekan. Tegangan sisa yang terjadi di daerah dekat area pengelasan merupakan tegangan tarik dan memiliki nilai tegangan terbesar. Sedangkan di titik yang

berjarak 21,67 cm dari titik tengah *chord* tegangan berubah menjadi tegangan tekan. Titik ini merupakan titik yang tegak lurus *weld toe* pada *pathline* bagian atas *chord*.

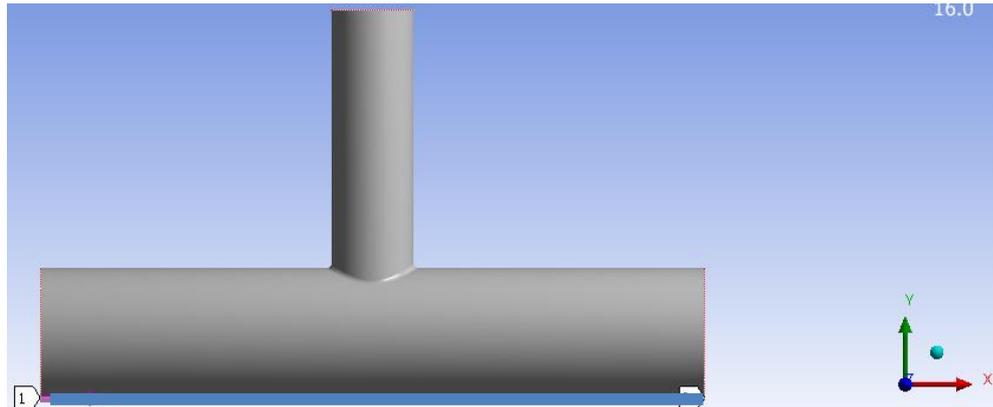


Gambar 4.12 Distribusi tegangan sisa arah aksial bagian tengah *chord*.

Semakin mendekati daerah ujung *chord* nilai tegangan menjadi 0. Nilai tegangan sisa arah aksial terbesar bernilai 243,58 MPa di titik yang berjarak 130 cm dari ujung kiri *chord*. Sedangkan untuk tegangan tekan bernilai -69,6 MPa di titik yang berjarak 146,25 cm dari ujung kiri *chord*.

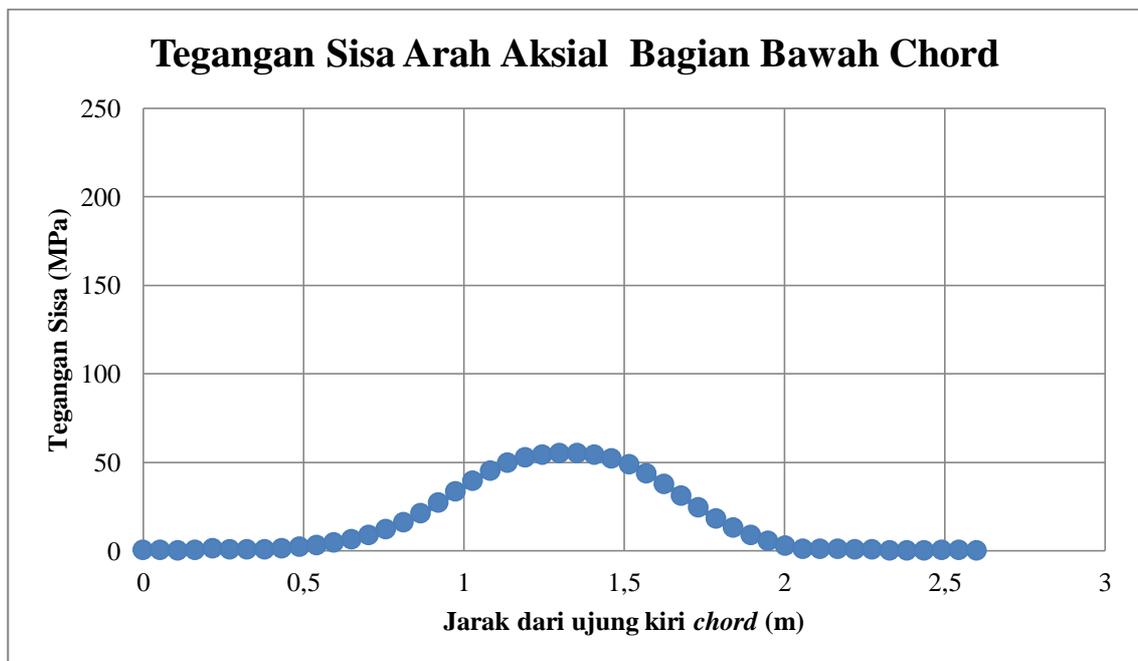
#### 4.4.3 DISTRIBUSI TEGANGAN SISA BAGIAN BAWAH *CHORD*

Untuk melihat tegangan sisa bagian bawah *chord*, maka digunakan *pathline* seperti yang terlihat pada Gambar 4.13. Dengan menggunakan *pathline* tersebut akan didapatkan distribusi tegangan sisa di sepanjang *pathline* bagian bawah *chord*.



Gambar 4.13 *Pathline* untuk pembacaan tegangan sisa bagian bawah *chord*

Dalam Gambar 4.14 terdapat grafik yang menunjukkan distribusi tegangan sisa arah aksial bagian bawah *chord*. Distribusi tegangan arah aksial pada bagian bawah *chord* berupa tegangan tarik. Tegangan sisa yang terjadi di daerah dekat area pengelasan memiliki nilai tegangan terbesar. Nilai tegangan semakin mendekati 0 pada daerah ujung *chord*. Nilai tegangan sisa arah aksial terbesar bernilai 60,1 MPa di titik yang berjarak 130 cm dari ujung kiri *chord*. Nilai tegangan sisa aksial pada bagian bawah *chord* memiliki nilai yang terkecil karena sudah jauh dari area pengelasan.



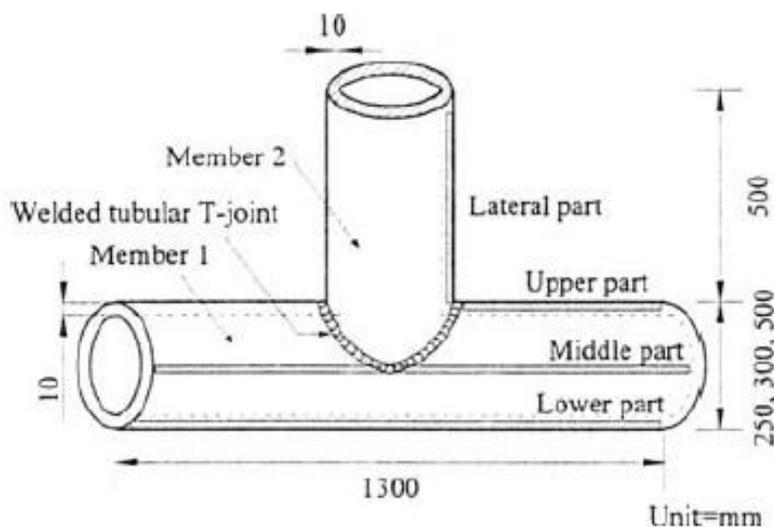
Gambar 4.14 Distribusi tegangan sisa arah aksial bagian bawah *chord*.

#### 4.5 VALIDASI HASIL TEGANGAN SISA

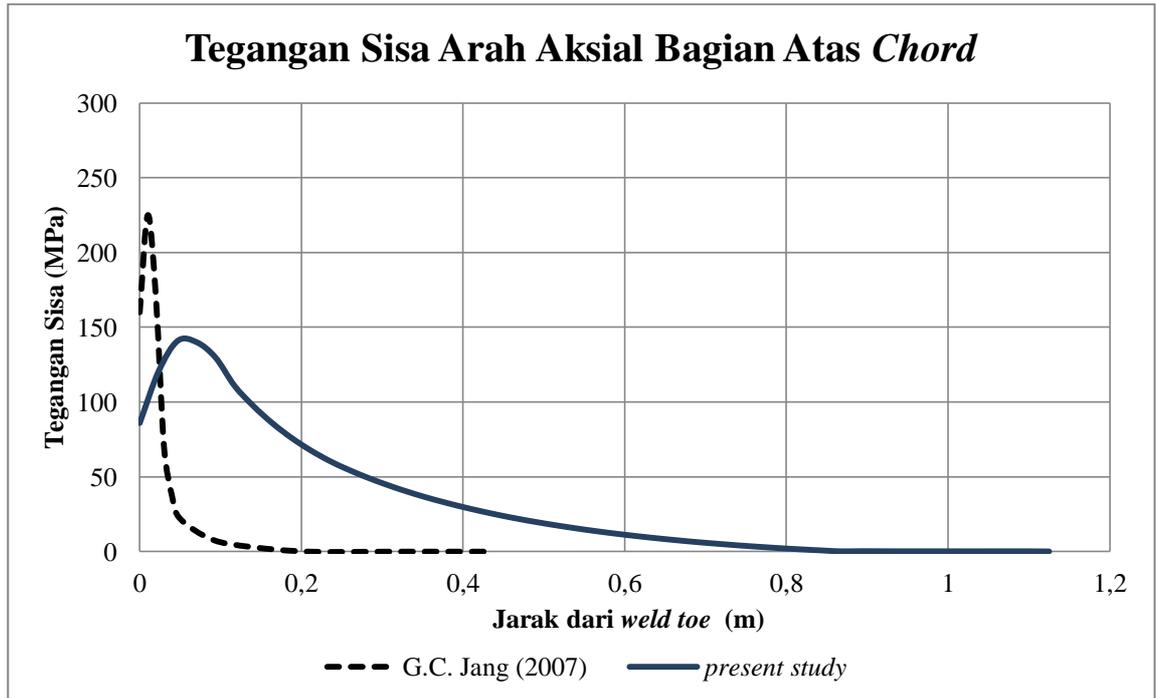
Untuk validasi hasil tegangan sisa, penulis menggunakan penelitian mengenai karakteristik distribusi tegangan sisa pada sambungan tubular T yang dilakukan oleh G.C.Jang dkk pada tahun 2007. Untuk data parameter pengelasan yang digunakan dalam penelitian untuk referensi validasi adalah sebagai berikut

- Arus: 300 Ampere
- Voltase: 30 V
- Kecepatan: 6 mm/s
- Efisiensi pengelasan: 0,8
- Jenis material: SM 400.

Pada referensi validasi, tegangan sisa dilihat pada 3 bagian observasi yaitu, bagian atas, bagian tengah, dan bagian bawah *chord*. Dalam melihat distribusi tegangan sisa pada tugas akhir ini juga digunakan 3 bagian observasi yang sama untuk memudahkan validasi. Ukuran model dan parameter pengelasan dalam referensi validasi berbeda dengan tugas akhir. Oleh karena itu, akan ada perbedaan nilai tegangan sisa antara referensi validasi dan tugas akhir. Untuk validasi akan dilihat dari kesamaan trend distribusi tegangan sisa. Pada Gambar 4.15 menunjukkan geometri model referensi dan *pathline* untuk pembacaan tegangan sisa.

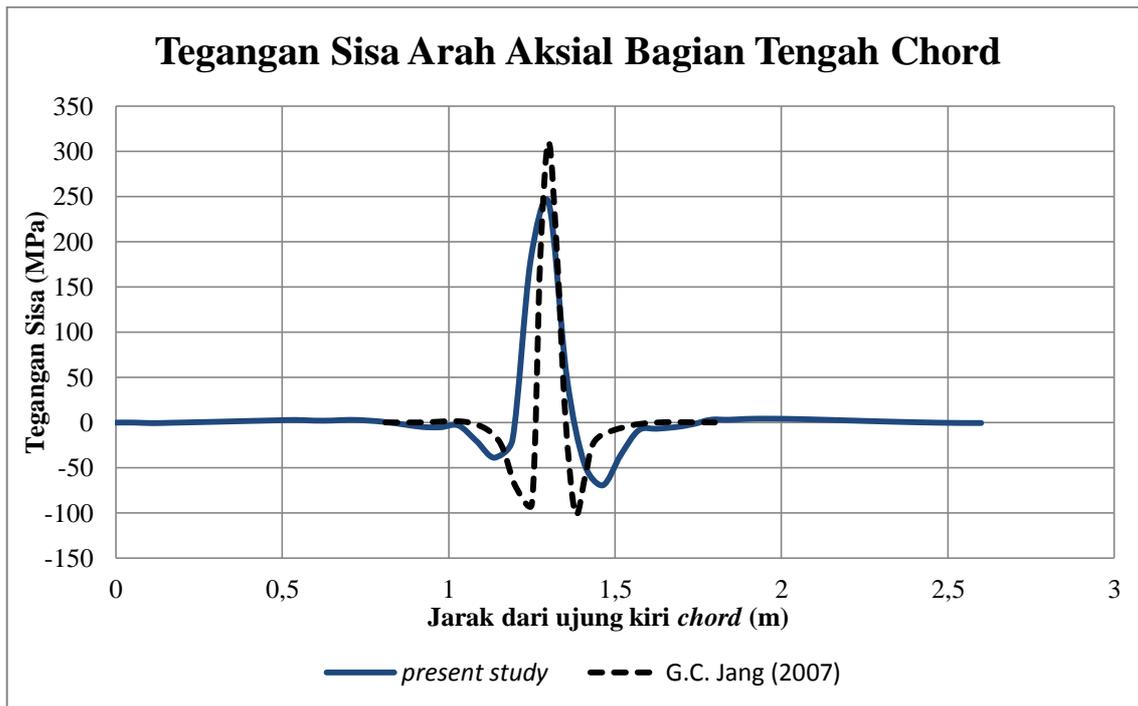


Gambar 4.15 Model geometri yang digunakan referensi G.C. Jang dkk (2007)



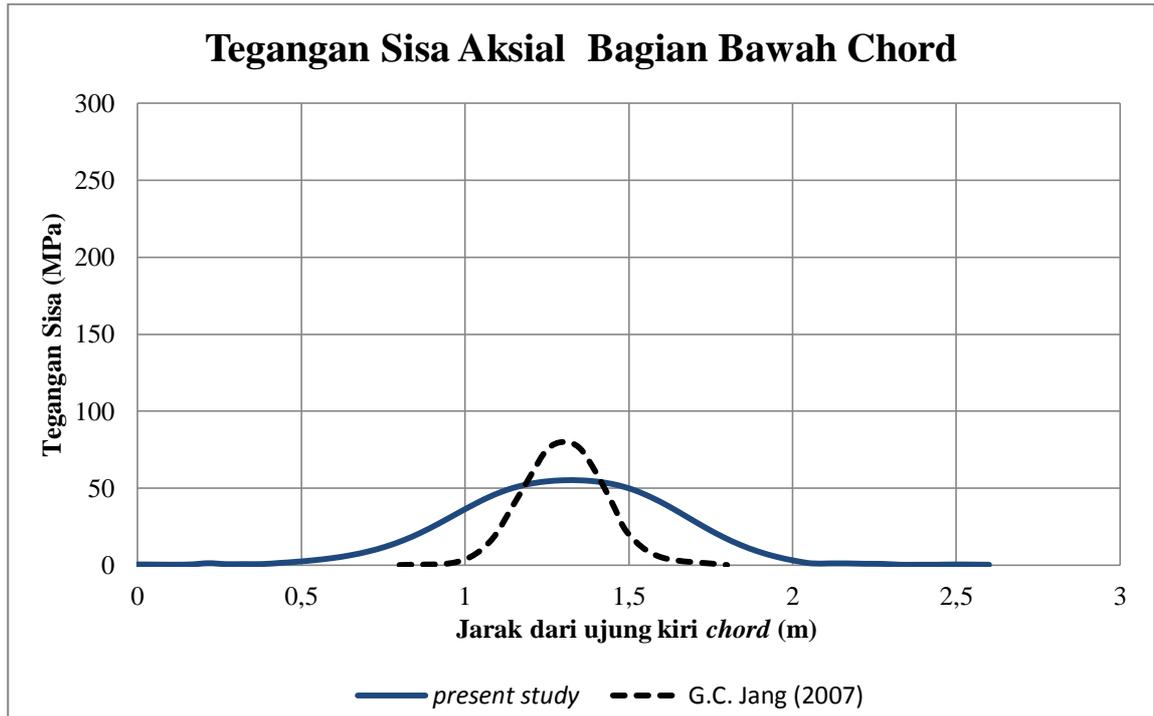
Gambar 4.16 Validasi distribusi tegangan sisa arah aksial bagian atas *chord*

Gambar 4.16 menunjukkan perbandingan tegangan sisa arah aksial bagian atas *chord*. Dari grafik tersebut menunjukkan bahwa tegangan sisa dari referensi dan tugas akhir memiliki trend distribusi yang sama. Trend distribusi tegangan sisa menunjukkan tegangan pada daerah weld toe memiliki nilai yang besar dan mengecil di jarak yang menjauhi weld toe. Nilai tegangan sisa terbesar referensi memiliki nilai yang lebih besar karena nilai parameter pengelasan yang lebih besar. Selain itu juga dipengaruhi oleh ukuran geometri yang lebih kecil, sehingga ketika dikenai beban yang lebih besar akan mengakibatkan tegangan yang besar pula.



Gambar 4.17 Validasi distribusi tegangan sisa arah aksial bagian tengah *chord*

Gambar 4.17 menunjukkan perbandingan tegangan sisa arah aksial bagian tengah *chord*. Dari grafik tersebut menunjukkan bahwa tegangan sisa dari referensi dan tugas akhir memiliki trend distribusi yang sama. Trend distribusi tegangan sisa menunjukkan tegangan berupa tegangan tarik dan pada daerah yang tegak lurus *weld toe* (pada *pathline* bagian atas *chord*) akan berubah menjadi tegangan tekan. Selain itu semakin ke arah ujung *chord*, nilai tegangan sisa akan menjadi 0. Nilai tegangan sisa terbesar referensi memiliki nilai yang lebih besar karena nilai parameter pengelasan yang lebih besar. Nilai tegangan arah aksial ini pada bagian tengah *chord* ini memiliki nilai paling besar diantara yang lain karena *pathline* melewati alur las. Sehingga tegangan sisa pada referensi memiliki nilai yang besar karena pengaruh langsung dari beban panas pengelasan.

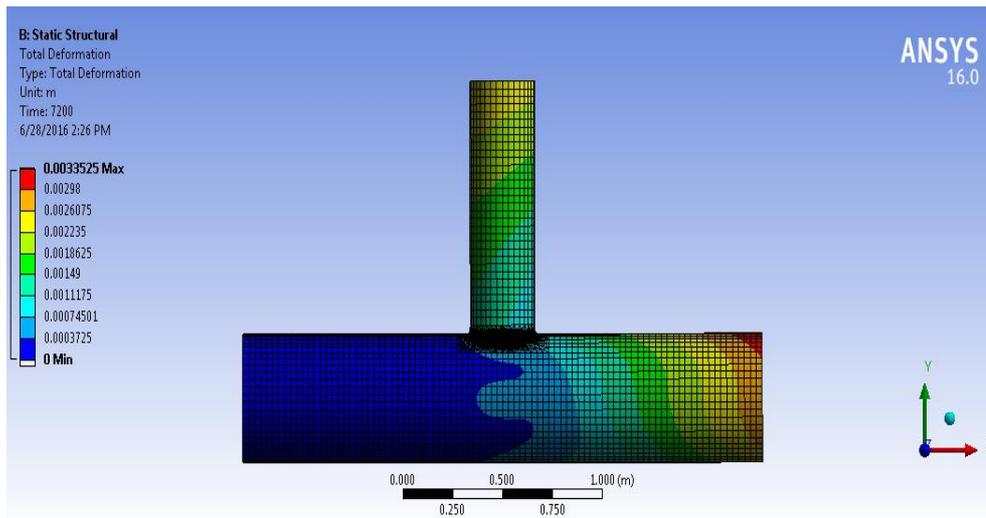


Gambar 4.18 Validasi distribusi tegangan sisa arah aksial bagian bawah *chord*

Gambar 4.18 menunjukkan perbandingan tegangan sisa arah aksial bagian bawah *chord*. Dari grafik tersebut menunjukkan bahwa tegangan sisa dari referensi dan tugas akhir memiliki trend distribusi yang sama. Trend distribusi tegangan sisa menunjukkan tegangan di dekat area pengelasan memiliki nilai yang besar dan mengecil ketika mendekati ujung *chord*. Nilai tegangan sisa terbesar referensi memiliki nilai yang lebih besar karena nilai parameter pengelasan yang lebih besar.

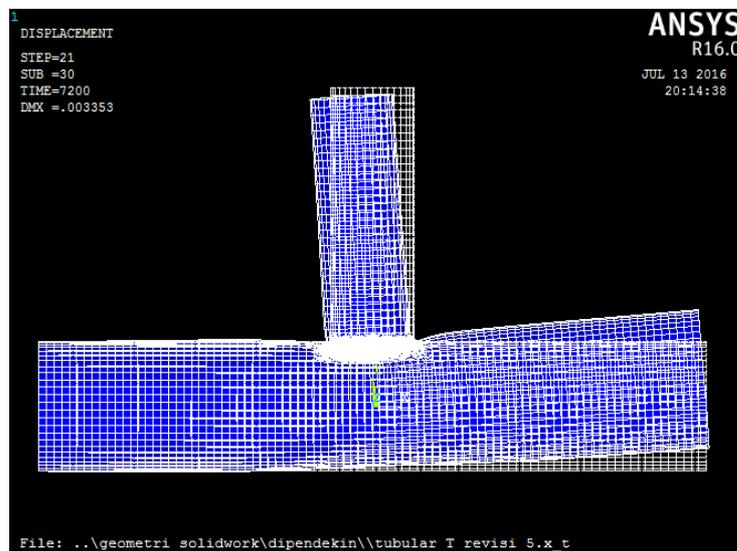
#### 4.6 ANALISA TOTAL DEFORMASI

Untuk analisa total deformasi dilihat berdasarkan hasil analisa struktural seperti yang terlihat pada Gambar 4.19. Dari Gambar 4.19 dapat dilihat bahwa deformasi total yang terjadi pada *chord* semakin besar ketika semakin menjauhi *weld toe*. Deformasi total terbesar terjadi pada ujung *chord* yang memiliki tumpuan bebas. Sedangkan untuk ujung *chord* yang memiliki tumpuan jepit tidak terjadi deformasi karena ditahan oleh tumpuan tersebut.



Gambar 4.19 Total deformasi

Pada pipa *brace* deformasi total terbesar juga terjadi pada ujung *brace* yang menjauhi weld toe. Untuk sisi *brace* yang berdekatan dengan ujung *chord* tumpuan bebas, total deformasinya lebih kecil dibandingkan sisi *brace* yang berdekatan dengan ujung *chord* yang memiliki tumpuan. Gambar perbandingan sebelum dan sesudah terjadi deformasi terlihat pada Gambar 4.20, skala dalam gambar merupakan *auto scale* bukan *true scale*



Gambar 4.20 Perbandingan sambungan tubular *undeformed* dan *deformed*

Deformasi total yang terjadi pada sambungan tubular T ini memiliki nilai minimal deformasi yaitu 0 mm. Sedangkan untuk nilai total deformasi maksimal adalah 0,33 cm atau 3,3 mm.

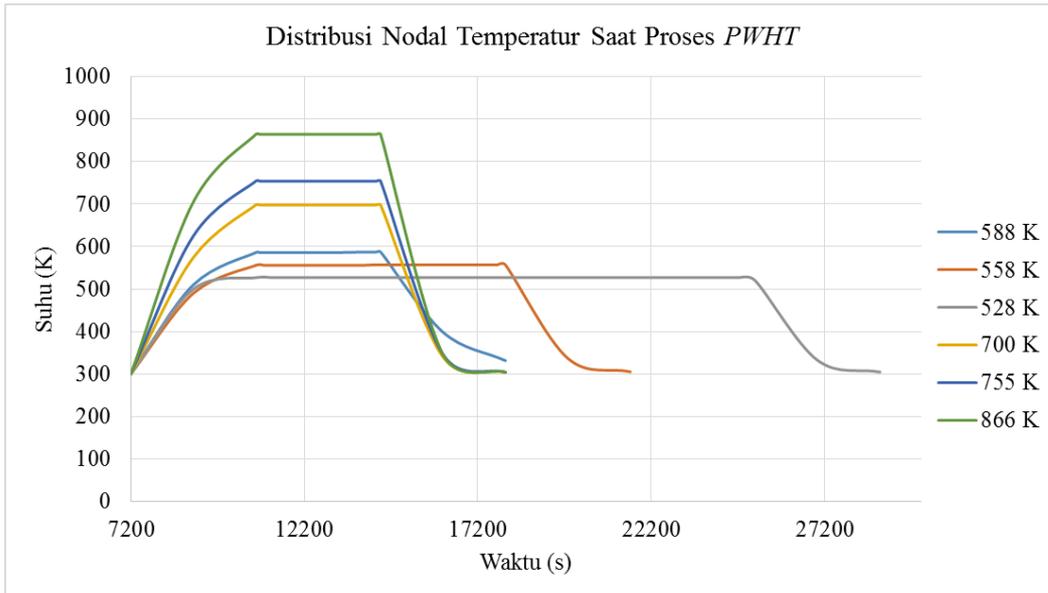
#### **4.7 ANALISA TEGANGAN SISA SETELAH PERLAKUAN *POST WELD HEAT TREATMENT (PWHT)***

Simulasi *PWHT* ini dilakukan pada model dengan memberikan beban panas kembali sampai mencapai suhu tertentu dengan waktu tahan tertentu di daerah pengelasan. Dalam tugas akhir ini dilakukan 6 variasi *PWHT* seperti yang terinci pada Tabel 4.3 untuk melihat suhu dan waktu tahan yang membuat tegangan sisa berkurang banyak.

Tabel 4.3 Variasi suhu dan waktu tahan untuk simulasi *PWHT*

No.	Suhu ( $^{\circ}\text{C}$ )	Suhu (K)	Waktu tahan ( jam)
1.	593	866	1
2.	482	755	1
3.	427	700	1
4.	315	588	1
5.	285	558	2
6.	255	528	4

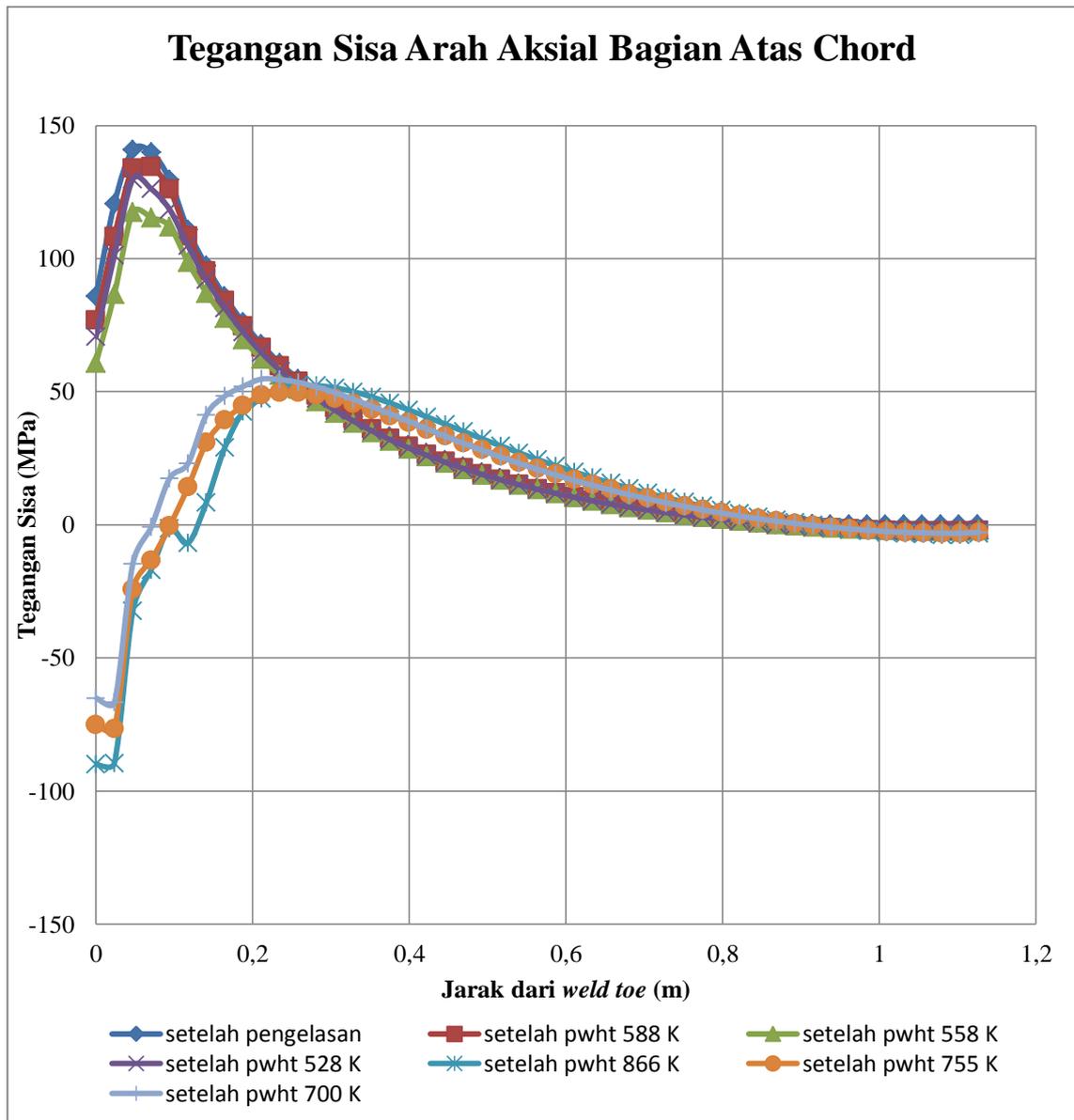
Dalam simulasi *PWHT* dilakukan mulai analisa termal dan analisa struktural. Dari analisa termal di dapatkan distribusi temperatur pada saat proses *PWHT* dilakukan. Pada Gambar 4.21 menunjukkan distribusi temperatur dari awal pengelasan hingga akhir proses *PWHT* untuk semua variasi *PWHT*.



Gambar 4.21 Distribusi temperatur saat proses *PWHT* pada semua variasi suhu

Grafik pada Gambar 4.21 pada variasi suhu *PWHT* 588 K menunjukkan bahwa *heating rate* dimulai setelah pengelasan dengan memakan waktu 1 jam. Suhu setelah pengelasan 300 K, menuju 588 K ketika *heating rate* selesai. Setelah itu suhu 588 K ditahan selama 1 jam dan diturunkan kembali menuju suhu ruang 300 K setelah waktu tahan habis.

Setelah dilakukan analisa termal maka selanjutnya analisa tegangan sisa. Untuk analisa tegangan sisa setelah *PWHT* hanya akan ditinjau pada bagian atas *chord*. Tujuan dari *PWHT* adalah pengurangan tegangan sisa, sehingga analisa tegangan berfokus pada berkurangnya tegangan sisa. Pada Gambar 4.22 menunjukkan grafik perbandingan tegangan sisa setelah pengelasan dan setelah proses *PWHT*.



Gambar 4.22 Distribusi tegangan sisa setelah pengelasan dan setelah proses *PWHT*

Pada grafik terlihat bahwa *PWHT* dengan suhu 588 K, 558 K, dan 528 K memiliki trend distribusi tegangan sisa yang sama dengan tegangan sisa setelah pengelasan. Setelah proses *PWHT* terjadi pengurangan tegangan sisa di titik terjadinya tegangan sisa maksimum. Akan tetapi mulai jarak 20 cm setelah *weld toe*, tegangan sisa setelah *PWHT* cenderung sama dengan tegangan sisa hasil pengelasan.

Sedangkan untuk *PWHT* dengan suhu 700 K, 755K, dan 866 K memiliki trend distribusi tegangan sisa yang berbeda dengan distribusi tegangan sisa setelah pengelasan. Didaerah *weld toe* sampai 9,3 cm setelah *weld toe*, tegangan sisa

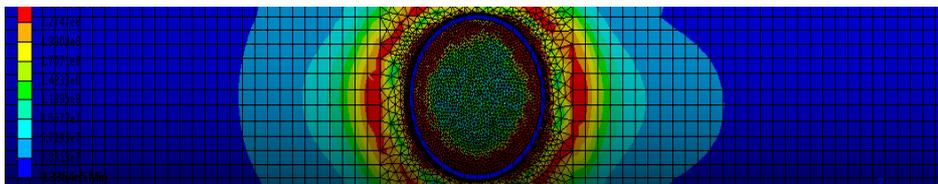
yang awalnya berupa tegangan tarik, berubah menjadi tegangan tekan. Perubahan jenis tegangan ini diikuti dengan berkurangnya nilai tegangan sisa. Di jarak 9,3 cm sampai 28,175 cm pengurangan tegangan sisa mencapai 112,5 MPa. Setelah jarak 28,175 cm sampai ujung chord, tegangan sisa setelah proses *PWHT* cenderung bernilai sama dengan tegangan sisa setelah pengelasan.

Pengurangan tegangan sisa setelah *PWHT* di titik terjadinya tegangan sisa maksimum dapat dilihat pada Tabel 4.

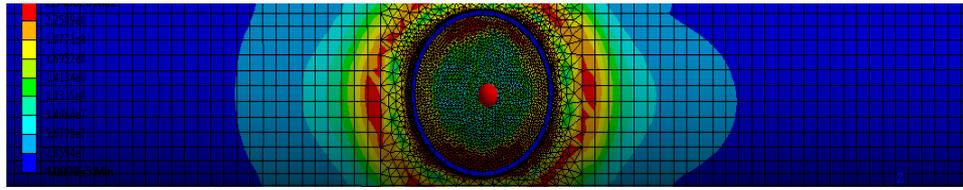
Tabel 4.4 Pengurangan tegangan sisa setelah *post weld heat treatment*

Kondisi	Tegangan Sisa
Setelah pengelasan	141 MPa
Setelah <i>PWHT</i> 866 K	-32,3 MPa
Setelah <i>PWHT</i> 755 K	-24,2 MPa
Setelah <i>PWHT</i> 700 K	-14,6 MPa
Setelah <i>PWHT</i> 588 K	134 MPa
Setelah <i>PWHT</i> 558 K	117 MPa
Setelah <i>PWHT</i> 528 K	126 MPa

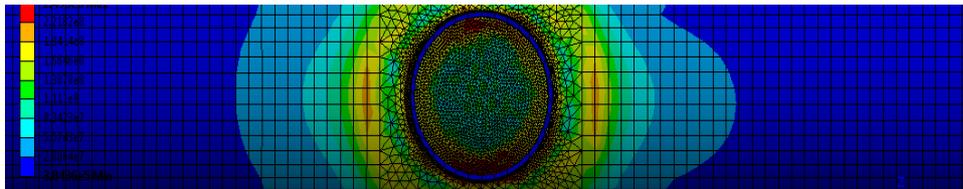
Dari tabel terlihat bahwa proses *PWHT* dengan suhu 700K atau 427<sup>0</sup> C menyebabkan tegangan sisa berkurang banyak akan tetapi di daerah dekat *weld toe* mengubah tegangan yang awalnya tarik menjadi tegangan tekan. Ilustrasi distribusi tegangan sisa setelah pengelasan dan setelah proses *PWHT* dapat dilihat pada Gambar 4.23 (a)-(f)



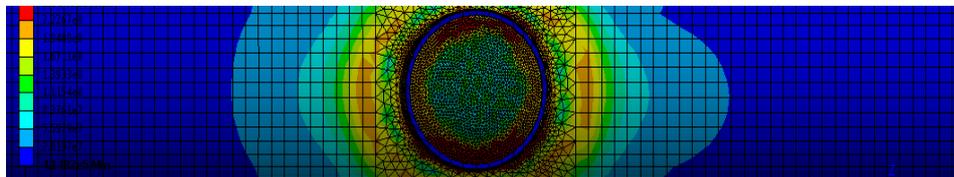
(a)



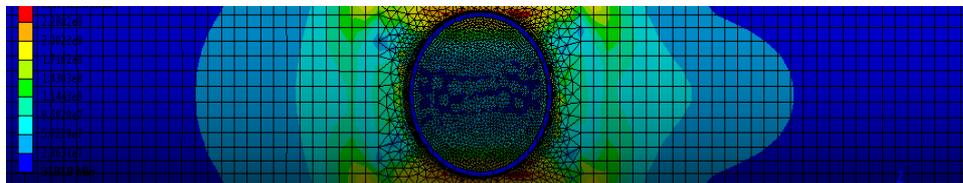
(b)



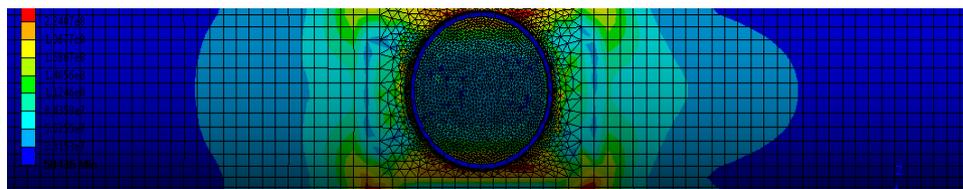
(c)



(d)



(e)

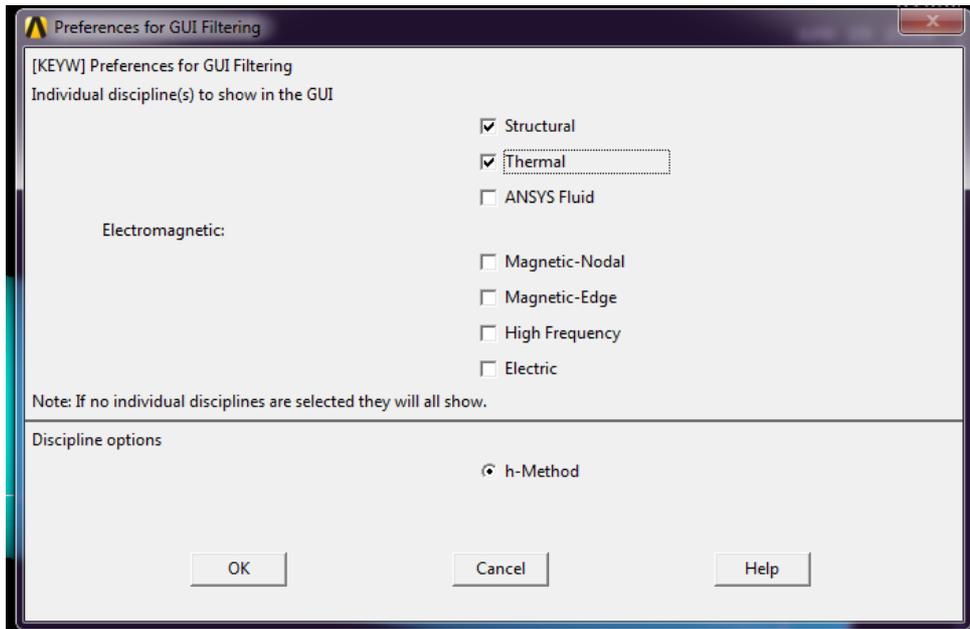


(f)

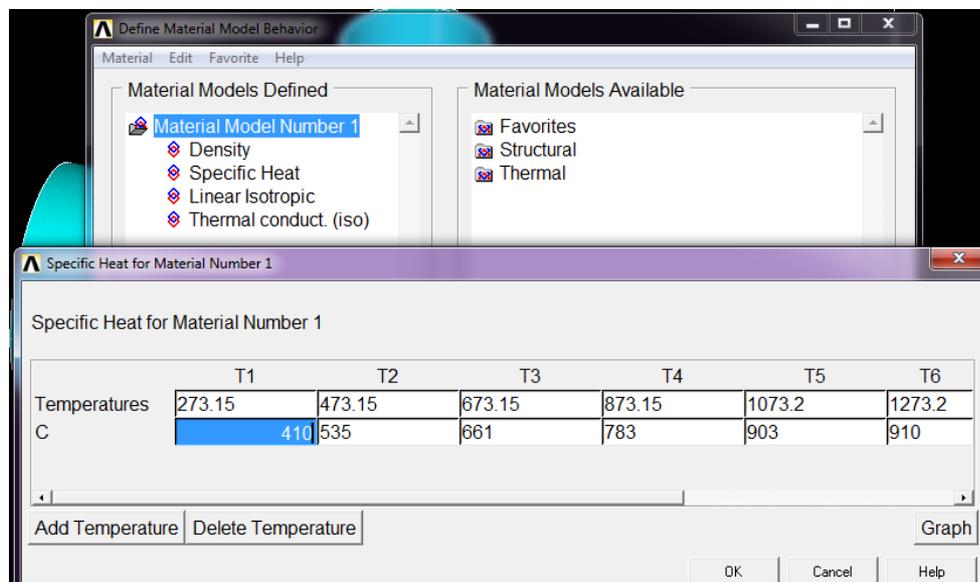
Gambar 4.21 Distribusi tegangan sisa bagian atas *chord* tampak atas :  
 (a) setelah pengelasan (b) PWHT 588 K (c) PWHT 558 K (d) PWHT 528 K (e)  
 PWHT 700 K (f) PWHT 755 K

**LAMPIRAN A**

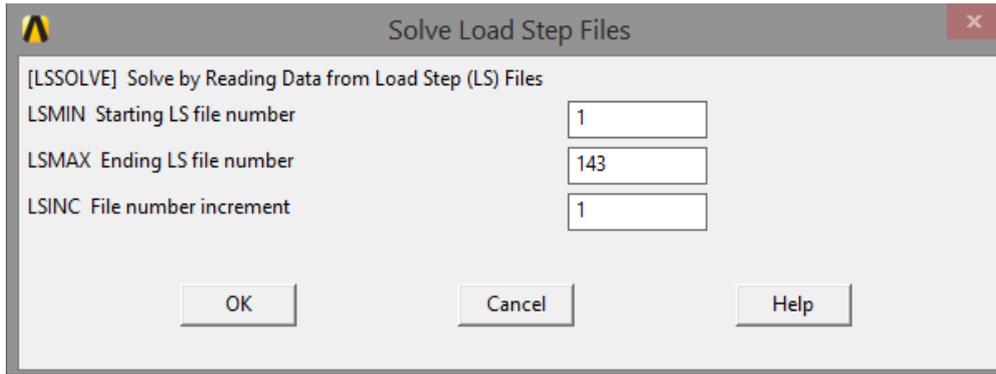
**TAHAP SIMULASI NUMERIK PADA *SOFTWARE*  
ANSYS MECHANICAL APDL 16.0**



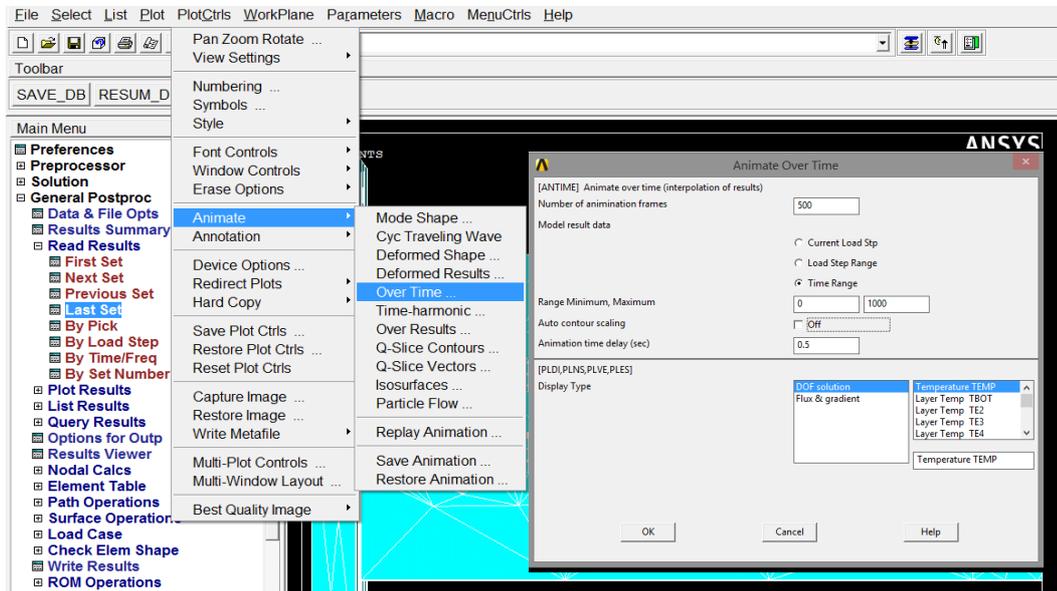
Gambar A1



Gambar A2



Gambar A3



Gambar A4

**LAMPIRAN B**

**INPUT FILE ANALISA TERMAL PADA *SOFTWARE*  
ANSYS MECHANICAL APDL 16.0**

```
!!!! LOADSTEP 1
FLST,2,51,5,ORDE,11
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,12
FITEM,2,18
FITEM,2,-24
FITEM,2,27
FITEM,2,-45
FITEM,2,49
FITEM,2,55
FITEM,2,57
FITEM,2,-76
/GO
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,300
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,42
/GO
!*
SFA,P51X,1,HFLUX,14378000
!*
TIME,18
AUTOTS,0
NSUBST,2, , ,0
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,1,
FLST,2,51,5,ORDE,11
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,12
FITEM,2,18
FITEM,2,-24
FITEM,2,27
FITEM,2,-45
FITEM,2,49
FITEM,2,55
FITEM,2,57
FITEM,2,-76
SFADELE,P51X,1,CONV
FLST,2,51,5,ORDE,11
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,12
FITEM,2,18
FITEM,2,-24
FITEM,2,27
FITEM,2,-45
FITEM,2,49
FITEM,2,55
FITEM,2,57
FITEM,2,-76
SFADELE,P51X,1,HFLUX
```

```
!!!! LOADSTEP 2
FLST,2,51,5,ORDE,11
```

```
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,12
FITEM,2,18
FITEM,2,-24
FITEM,2,27
FITEM,2,-45
FITEM,2,49
FITEM,2,55
FITEM,2,57
FITEM,2,-76
/GO
!*
SFA,P51X,1,CONV,15,300
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,43
/GO
!*
SFA,P51X,1,HFLUX,14378000
!*
TIME,36
AUTOTS,0
NSUBST,2, , ,0
KBC,1
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,2,
FLST,2,51,5,ORDE,11
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,12
FITEM,2,18
FITEM,2,-24
FITEM,2,27
FITEM,2,-45
FITEM,2,49
FITEM,2,55
FITEM,2,57
FITEM,2,-76
SFADELE,P51X,1,CONV
FLST,2,51,5,ORDE,11
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,12
FITEM,2,18
FITEM,2,-24
FITEM,2,27
FITEM,2,-45
FITEM,2,49
FITEM,2,55
FITEM,2,57
FITEM,2,-76
SFADELE,P51X,1,HFLUX
```

```
!!!! LOADSTEP 3
FLST,2,51,5,ORDE,11
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
```

FITEM,2,12  
FITEM,2,18  
FITEM,2,-24  
FITEM,2,27  
FITEM,2,-45  
FITEM,2,49  
FITEM,2,55  
FITEM,2,57  
FITEM,2,-76  
/GO  
!\*  
SFA,P51X,1,CONV,15,300  
FLST,2,1,5,ORDE,1  
FITEM,2,44  
/GO  
!\*  
SFA,P51X,1,HFLUX,14378000  
!\*  
TIME,54  
AUTOTS,0  
NSUBST,2, , ,0  
KBC,1  
!\*  
TSRES,ERASE  
LSWRITE,3,  
FLST,2,51,5,ORDE,11  
FITEM,2,1  
FITEM,2,-2  
FITEM,2,12  
FITEM,2,18  
FITEM,2,-24  
FITEM,2,27  
FITEM,2,-45  
FITEM,2,49  
FITEM,2,55  
FITEM,2,57  
FITEM,2,-76  
SFADELE,P51X,1,CONV  
FLST,2,51,5,ORDE,11  
FITEM,2,1  
FITEM,2,-2  
FITEM,2,12  
FITEM,2,18  
FITEM,2,-24  
FITEM,2,27  
FITEM,2,-45  
FITEM,2,49  
FITEM,2,55  
FITEM,2,57  
FITEM,2,-76  
SFADELE,P51X,1,HFLUX  
  
!!!! LOADSTEP 4  
FLST,2,51,5,ORDE,11  
FITEM,2,1  
FITEM,2,-2  
FITEM,2,12  
FITEM,2,18

FITEM,2,-24  
FITEM,2,27  
FITEM,2,-45  
FITEM,2,49  
FITEM,2,55  
FITEM,2,57  
FITEM,2,-76  
/GO  
!\*  
SFA,P51X,1,CONV,15,300  
FLST,2,1,5,ORDE,1  
FITEM,2,45  
/GO  
!\*  
SFA,P51X,1,HFLUX,14378000  
!\*  
TIME,72  
AUTOTS,0  
NSUBST,2, , ,0  
KBC,1  
!\*  
TSRES,ERASE  
LSWRITE,4,

**LAMPIRAN C**

**INPUT FILE ANALISA STRUKTURAL PADA  
*SOFTWARE* ANSYS MECHANICAL APDL 16.0**

!!!! KONDISI BATAS

FLST,2,2,5,ORDE,2

FITEM,2,2

FITEM,2,57

!\*

/GO

DA,P51X,UX,0

FLST,2,2,5,ORDE,2

FITEM,2,2

FITEM,2,57

!\*

/GO

DA,P51X,UY,0

FLST,2,2,5,ORDE,2

FITEM,2,2

FITEM,2,57

!\*

/GO

DA,P51X,UZ,0

!!!! LOADSTEP 1

LDREAD,TEMP,1,LAST, , , '1cm','rth',''

!\*

OUTPR,ALL,ALL,

/GST,1

!\*

OUTRES,ALL,ALL,

!\*

NEQIT,5000

!\*

!\*

TIME,18

AUTOTS,0

NSUBST,2, , ,0

KBC,1

!\*

TSRES,ERASE

LSWRITE,1,

!!!! LOADSTEP 2

LDREAD,TEMP,2,LAST, , , '1cm','rth',''

!\*

OUTPR,ALL,ALL,

/GST,1

!\*

OUTRES,ALL,ALL,

!\*

NEQIT,5000

!\*

!\*

TIME,36

AUTOTS,0

NSUBST,2, , ,1

KBC,1

!\*

TSRES,ERASE

LSWRITE,2,

!!!! LOADSTEP 3

LDREAD,TEMP,3,LAST, , , '1cm','rth',''

!\*

OUTPR,ALL,ALL,

/GST,1

!\*

OUTRES,ALL,ALL,

!\*

NEQIT,5000

!\*

!\*

TIME,54

AUTOTS,0

NSUBST,2, , ,1

KBC,1

!\*

TSRES,ERASE

LSWRITE,3,

!!!! LOADSTEP 4

LDREAD,TEMP,4,LAST, , , '1cm','rth',''

!\*

OUTPR,ALL,ALL,

/GST,1

!\*

OUTRES,ALL,ALL,

!\*

NEQIT,5000

!\*

!\*

TIME,72

AUTOTS,0

NSUBST,2, , ,1

KBC,1

!\*

TSRES,ERASE

LSWRITE,4,

**LAMPIRAN D**

**DATA PARAMETER PENGELASAN BERDASARKAN  
*WELDING PROCEDURE SPESIFICATION (WPS)***



## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1 KESIMPULAN

Dari simulasi numerik pengelasan pada sambungan tubular tipe T yang telah dilakukan, didapatkan hasil berupa deformasi dan tegangan sisa yang terjadi. Berdasarkan pembahasan yang telah dilakukan pada Bab IV maka didapatkan beberapa kesimpulan yang menjawab permasalahan pada penelitian Tugas Akhir. Berikut ini adalah kesimpulan yang dapat dirangkum dari penelitian ini:

1. Setelah dilakukan simulasi numerik pengelasan pada model sambungan tubular tipe T distribusi suhu pada area pengelasan meningkat hingga 2001,06 K saat pengelasan.
2. Hasil untuk tegangan sisa setelah pengelasan pada sambungan tubular tipe T dibagi menjadi tiga yaitu pada bagian atas *chord*, bagian tengah *chord*, dan bagian bawah *chord*. Berikut ini adalah hasil yang diperoleh:
  - a. Distribusi tegangan sisa arah aksial pada bagian atas *chord* berupa tegangan tarik. Tegangan sisa yang terjadi di dekat *weld toe* cenderung bernilai besar. Tegangan tarik akan semakin mengecil ketika semakin menjauhi *weld toe*. Nilai tegangan sisa arah aksial terbesar bernilai 141,02 MPa. Sedangkan nilai tegangan sisa arah aksial terkecil terjadi pada ujung *chord* yaitu 0,12 MPa.
  - b. Distribusi tegangan arah aksial pada bagian tengah *chord* berupa tegangan tarik dan tekan. Tegangan sisa yang terjadi di daerah dekat area pengelasan merupakan tegangan tarik dan memiliki nilai tegangan terbesar. Sedangkan di titik yang berjarak 21,67 cm dari titik tengah *chord* tegangan berubah menjadi tegangan tekan. Nilai tegangan sisa arah aksial terbesar bernilai 243,58 MPa.
  - c. Distribusi tegangan arah aksial pada bagian bawah *chord* berupa tegangan tarik. Tegangan sisa yang terjadi di daerah dekat area pengelasan memiliki nilai tegangan terbesar. Nilai tegangan semakin

mendekati 0 pada daerah ujung *chord*. Nilai tegangan sisa arah aksial terbesar bernilai 60,1 MPa.

3. Tegangan sisa setelah perlakuan *post weld heat treatment (PWHT)* ditinjau pada *pathline* bagian atas *chord*. Besar nilai tegangan sisa setelah perlakuan *PWHT* memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan nilai tegangan sisa setelah pengelasan (tanpa *PWHT*). Hal ini dapat dilihat pada Tabel 4.4 dimana dalam tabel ditampilkan *resume* nilai tegangan sisa setelah pengelasan dan setelah variasi *PWHT*. Dari tabel dapat disimpulkan bahwa nilai tegangan sisa setelah *PWHT* memiliki selisih yang cukup signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan *PWHT* memberikan efek pengurangan tegangan sisa yang cukup efektif pada pengelasan. Sedangkan untuk variasi suhu dan waktu tahan *PWHT* menunjukkan bahwa dengan variasi suhu *post weld heat treatment* semakin tinggi maka akan terjadi pengurangan tegangan sisa yang semakin banyak untuk waktu tahan yang sama. Dalam tugas akhir ini suhu tertinggi *PWHT* adalah 600 K. Sedangkan untuk waktu tahan yang semakin lama dengan variasi suhu yang makin rendah, pengurangan tegangan sisa tidak terlalu signifikan, hanya sekitar 7 MPa – 24 MPa.

## 5.2 SARAN

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian lebih lanjut mengenai Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Dianjurkan melakukan eksperimen untuk pengukuran tegangan sisa sambungan tubular yang selanjutnya dapat dibandingkan dengan pengukuran tegangan sisa hasil simulasi numerik. Hal ini akan memudahkan untuk validasi tegangan sisa hasil simulasi dengan kondisi real hasil pengelasan.
2. Dianjurkan untuk eksperimen *PWHT* sehingga dapat dibandingkan dengan tegangan sisa *PWHT* hasil simulasi numerik. Hal ini akan menunjukkan seberapa *error* antara hasil eksperimen dengan simulasi numerik
3. Dianjurkan untuk menambahkan beban aksial pada sambungan tubular untuk mengetahui efek beban tambahan pada tegangan sisa yang terjadi.

4. Dianjurkan untuk simulasi numerik pengelasan menggunakan *multi pass* jika dalam *WPS* menggunakan pengelasan *multi pass*.

## DAFTAR PUSTAKA

- Andika, Awang Dwi. 2009. "Penentuan *Welding Sequence* Terbaik Pada Pengelasan Sambungan T Pada Sistem Perpipaan Kapal Menggunakan Metode Elemen Hingga". Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- ANSYS. 2010. "ANSYS *Manual*". Release 12, ANSYS Inc.
- ANSYS. 2013. "ANSYS *Mechanical APDL Element Reference*" Edisi 15, ANSYS Inc.
- ANSYS. 2013. "ANSYS *Mechanical APDL Theory Reference*" Edisi 15, ANSYS Inc.
- AWS. 2000. "*Structural Welding Code – Steel*". Edisi 17.
- Bandriyana, B. 2006. "Perhitungan Distribusi Tegangan Sisa Dalam Pengelasan Sambungan-T Pada Sistem Pipaan". Prosiding Semiloka Teknologi Simulasi dan Komputasi Serta Aplikasi.
- Bang, I.W., Son, Y.P., Kim, Y.P., Kim, W.S., 2002. "Numerical Simulation of Sleeve Repairs Welding In-Service Gas Pipelines". *Welding Journal*.
- Cao, X., Rivaux, B., Jahazi, M., Cuddy, J., Birur, A. 2009. "Effect of Pre- and Post-weld Heat Treatment on Metallurgical and Tensile Properties of Inconel 718 alloy Butt Joints Welded Using 4 kW Nd:YAG Laser". *Journal Material Science*. Vol 44.
- Dewangga, Dimas Valditya. 2012. "Analisa Pengaruh *Flank Angle, Toe Radius, dan Preparation Angle* Terhadap Deformasi dan Tegangan Sisa Pada Pengelasan *Butt Joint* Dengan Kampuh V Ganda Menggunakan Metode Elemen Hingga" . Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Dong, Pingsha., Song, Shaopin., Zhang, Jinmiao. 2014. "Analysis of Residual Stress Relief Mechanisms in Post-Weld Heat Treatment". *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 122.
- Hidajat, R. Lullus Lambang G., Budiana, Eko Prasetya. 2009. "Pengembangan Program Pembangunan MESH Triangulasi Adaptif Sebagai Domain Masukan Analisis Elemen Hingga Untuk Penyelesaian Persoalan Teknik Mesin Umum". *Mekanika*. Vol 8.
- Jang, G.C., Chang, K.H., Lee, C.H. 2007. "Characteristic of The Residual Stress Distribution in Welded Tubular T-joints". *Journal of Mechanical Science and Technology*.
- Kanga, H.T., Leeb, Y.L., Sun, X.J. 2007. "Effects of Residual Stress and Heat Treatment on Fatigue Strength of Weldments". *Materials Science and Engineering A*. Vol. 497, pp. 37-43.

- Linnert, G.E., 1997. "*Welding Metallurgy - Carbon and Alloy Steels*", 3rd edition, American Welding Society.
- Paradowska, A.M., Price, J.W.H., Kerezsi, B., Dayawansa, P., Zhao, X.L. 2010. "*Stress Relieving and Its Effect on Life of Welded Tubular Joints*". *Engineering Failure Analysis*. Vol. 17, pp.320-327.
- Rodrigues, Telmo Viana. 2010. "*Modelling Post Weld Heat Treatment For Residual Stress Relieving In Welded Steel Plates Using The Finite Element Method*". *VI National Congress Of Mechanical Engineering*.
- Saputra, Benny Yarlis. 2012. "Prediksi Tegangan Sisa Pada Pengelasan Bada Logam (*Dissimilar Metal*) Dengan Menggunakan Analisa Metode Elemen Hingga". Depok: Universitas Indonesia.
- Wirjosumarto H, Okumura T. 1994. "Teknologi Pengelasan Logam=Welding Engineering". Jakarta : Pradnya Paramita.
- Zacharia, T., Vitek, J.M., Goldak, J.A., Debroy, T.A., Rappaz, M., Bhadeshia, H.K.D.H. 1995. "*Modeling The Fundamental Phenomena in Welds*". *Modeling Simulation Material Science Engineering*. Vol.3.

## BIODATA PENULIS



Anggi Aprilia Pangesti dilahirkan di Kota Malang pada 3 April 1995. Penulis menempuh pendidikan di SDN Ngadilangkung 02, SMPN 4 Kepanjen dan SMAN 3 Malang. Setelah itu, tahun 2012 penulis melanjutkan pendidikan di Jurusan Teknik Kelautan ITS Surabaya. Selama di bangku perkuliahan penulis sempat aktif mengikuti berbagai kepanitiaan dan organisasi mahasiswa. Penulis aktif sebagai Sekretaris di UKM Sinematografi CLICK ITS Periode 2013-2014 dan Sekretaris I di UKM Sinematografi CLICK ITS Periode 2014-2015. Selain itu penulis juga aktif di Himpunan Mahasiswa Teknik Kelautan sebagai Sekretaris Kabinet Periode 2014-2015. Pada tahun 2015 penulis sempat melakukan kerja praktek di PT. Biro Klasifikasi Indonesia (Persero). Bidang yang diambil penulis adalah produksi bangunan lepas pantai, sehingga penulis mengambil tugas akhir yang berhubungan dengan pengelasan struktur lepas pantai. Motto penulis ialah *always do your best, and let Allah do next..*

*Contact Person: anggiewaap@gmail.com*