



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PREDIKSI TEGANGAN SISA PADA PENGELASAN BEDA  
LOGAM (*DISSIMILAR METAL*) DENGAN MENGGUNAKAN  
ANALISA METODA ELEMEN HINGGA**

**SKRIPSI**

**BENNY YARLIS SAPUTRA**

**0706268341**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA**

**TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL**

**DEPOK**

**FEBRUARI 2012**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.**

**Nama : Benny Yarlis Saputra**

**NPM : 0706268341**

**Tanda Tangan : .....** 

**Tanggal : Juni 2011**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Benny Yarlis Saputra  
NPM : 0706268341  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Prediksi Tegangan Sisa Pada Beda Logam  
(*Dissimilar Metal*) Dengan Menggunakan Analisa  
Metoda Elemen Hingga

**Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia**

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Winarto, M.Sc

()

Penguji 1 : Dr. Ir. Dedi Priadi, D.E.A

()

Penguji 2 : Dr. Badrul Munir, ST, M.Sc

()

Ditetapkan : Depok, Juli 2011

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur senantiasa saya panjatkan kehadiran Allah SWT karena dengan berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan Tugas Akhir dan skripsi ini dengan sebaik-baiknya. Skripsi yang berjudul “**Prediksi Tegangan Sisa Pada Beda Logam (*Dissimilar Metal*) Dengan Menggunakan Analisa Metoda Elemen Hingga**” ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan akademis dalam meraih gelar Sarjana Teknik di Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan, dukungan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Ir. Winarto, M.Sc, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini.
2. Prof. Dr-Ing. Ir. Bambang Suharno, selaku Kepala Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI.
3. Dr. Ir. Muhammad Anis M.Met, selaku Pembimbing Akademis penulis.
4. Bapak Abdul Hafid yang selalu memberikan ilmu mengenai pengelasan dan pengalamannya di dunia pengelasan.
5. Bapak Refai yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengajari saya dalam hal penggunaan alat Diraksi Neutron di BATAN.
6. Kedua orang tua tercinta Bachtiar dan Lismar yang senantiasa memberikan inspirasi serta pelajaran hidup yang sangat berharga dan mendukung, mendoakan, dan selalu ada untuk saya, serta adik saya Tika Yarlis Safitri dan Rahayu Yarlis Pratiwi, semoga kita bisa meraih masa depan yang lebih baik dan mendapatkan semua apa yang kita cita-citakan.
7. Untuk Duratul Baida yang selalu memberikan bantuan, masukan, semangat kepada saya. Orang yang menjadi tempat saya mencurahkan “uneg-uneg” yang ada didalam hati, serta selalu sabar dalam menghadapi sikap saya ketika saya labil. Mudah-mudahan kita bisa mnggapai impian untuk bisa

membuat industri yang selalu kita rencanakan didalam tulisan-tulisan yang kita buat bersama yang belum terealisasi.

8. Rekan seperjuangan tugas akhir, Arya Pradipta Wijayamurti yang saat ini sedang berjuang untuk mendapatkan harapan kosong terhadap Abel. “Mudah-mudahan harapan kosong lo terpenuhi, pokonya kalo lo dijodohkan ama Ortu plus Jilbong, gw bakal Ngakak ampe dongok.”
9. Rekan ANSYS, David (Bercel) yang mengajarkan saya ANSYS.
10. Rekan-rekan Laboratorium Pengecoran Logam : Arya (Te-Ler), A-Butt, David (Bercel), Juris (si De-Best), Hesti (Incerin sang kegelapan tapi belum dapet-dapet juga), Hendro (otot kawat tulang Besi), Andra (si Jagoan alay dari Bekasi), Diwang (si Buku meledak), serta Kepala Laboratorium kami tercinta Pak Dwi Marta Nurjaya, telah membuat kami para asisten menjadi “sumringah” *pas* ditraktir habis-habisan di Hanamasa.
11. “Jendral DOTA 07” : Reza a.k.a Ja’ul freak, Teman seperlunaan, baik voting ataupun daouble login, Arya sang guru Dota yang sekarang saya “ucup-ucupin”, Adhi a.k.a Monyet metal a.k.a lemur, Arri (bristleback/ si pembohong), Kennedy (si rambut top collection!!+ itu bukan jokes dah!!!), Abud (A-butt) Andra, Bastian (si Bijak), Rangga (poldur), Dika (lawak berjalan).
12. “Geng pondok Lambang” yang selalu memberikan tempatnya sebagai ladang curhat dan “sumur” bagi orang-orang yang haus akan informasi. Dan terima kasih atas tempatnya, karena mantap sekali tidur disana.
13. Teman-teman dunia malam Lendi (dengan prinsip sate kambingnya dan penyedia hiburan bernuansa “cinta”) dan David (Bercel dengan “keimboannya”, tapi tetap “culun”) yang menunjukkan betapa indahnyanya kehidupan Jakarta di Malam Hari. “kalo udah pada kerja adain proyek kek gituan lagi bro-da, wkwkwk)
14. Rekan-rekan seperjuangan yang berada di Pulau Jawa : Khairul yang selalu memberikan tumpangan untuk tidur kalo lagi dibandung, Aida yang selalu menginspirasi saya, dan selalu bikin saya iri, Dila (walau sering cek-cok tapi tetap menginspirasi), Bayuih yang selau satu kosan dari awal kuliah sampai lulus, EdoSU teman sebangku waktu SMA, Arif teman dalam menggapai

impian untuk kuliah di Jawa (Arif akhirnya kita menyelesaikan kuliah di Jawa, Ternyata kita orang yang hebat), Dan Faizah (walau hubungan kita sedikit renggang selama dua tahun terakhir tapi kita tetap teman yang hebat), Bambang yang merupakan teman sepergame-an ketika SMA.

15. Teman-teman seperjalanan di SMA Cendekia yang telah memberikan perubahan dalam sikap saya, khususnya dalam hal ke-*jaiman* saya
16. Teman-teman SMA Lambah yang membuat kenangan indah dan pengalaman tidak terlupakan. Mari kita gapai impian kita yang telah kita rencanakan di masa-masa indah di SMA.
17. Teman-teman seperjalanan di Metalurgi dan Material angkatan 2007 yang memberikan pelajaran mental yang hebat.
18. Film YES MAN yang membuat saya berubah dalam menghadapi tantangan di dalam hidup.
19. Film HIM yang menginspirasi saya dalam bersosialisasi, khususnya Barney Stinson (High Five!)
20. Film Big Bang Theory yang memberikan lawakan keilmuannya.
21. Serta pencipta Dota, sungguh anda memberikan kesenangan dan pengalaman hebat selama perkuliahan.

Akhir kata, saya berharap Allah SWT membalas semua kebaikan kalian. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu metalurgi dan material ke depannya.

Depok, Juli 2011

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR  
UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini, :

Nama : Benny Yarlis Saputra  
NPM : 0706268341  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Departemen : Metalurgi dan Material  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**Prediksi Tegangan Sisa Pada Beda Logam (*Dissimilar Metal*) Dengan  
Menggunakan Analisa Metoda Elemen Hingga**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini, Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia atau formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis atau pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada Tanggal : Juli 2011

Yang menyatakan

  
(.....)

## ABSTRAK

Nama : Benny Yarlis Saputra  
NPM : 0706268341  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Prediksi Tegangan Sisa Pada Beda Logam  
(*Dissimilar Metal*) Dengan Menggunakan Analisa  
Metoda Elemen Hingga

GTAW adalah proses penggabungan material yang banyak digunakan dalam banyak aplikasi industri termasuk aplikasi pada PLTN. Dalam proses pengelasan, temperatur yang diberikan kepada suatu logam menyebabkan distribusi suhu yang tidak seragam yang nantinya akan menyebabkan tegangan sisa dan distorsi, khususnya pada material plat baja SUS 304 dan SS 400.. Dalam rangka untuk mengendalikan penyimpangan dan meningkatkan kualitas plat yang dilas, Finite element Methode dapat digunakan sebagai metode praktis dan biaya rendah dengan efisiensi tinggi. Dalam studi ini, termo-mekanis dimodelkan ke dalam ANSYS, perangkat lunak untuk mensimulasikan perilaku pengelasan antara dua logam yang berbeda, SUS 304 dan SS 400. Untuk memvalidasi prediksi, hasil dari permodelan ini dibandingkan dengan tegangan sisa yang diukur dengan teknik difraksi neutron dan hasil yang didapat cukup memberikan hasil yang dapat diterima.

Kata kunci : Tegangan Sisa; Metode Elemen Hingga; GTAW; Distribusi Temperatur



## ABSTRACT

Name : Benny Yarlis Saputra  
NPM : 0706268341  
Major : Metallurgy and Material Engineering  
Title : Finite Element Method Analysis for Residual Stress Prediction In Welding Dissimilar Metals

GTAW is a process of combining materials are widely used in many industrial applications including applications in nuclear power plants. In the process of welding, heat input is given to a metal causes non-uniform temperature distribution that would cause the residual stress and distortion, especially on the material steel plate SUS 304 and SS 400. In order to control deviation and improve the quality of the welded plate, Finite element Method can be used as a method of practical and low cost with high efficiency. In this study, thermo-mechanical modeled into the ANSYS software to simulate the behavior of the welding between two different metals, SUS 304 and SS 400. To validate the prediction, the results from modeling are compared with the residual stresses measured by neutron diffraction technique and the results can be sufficient to provide acceptable results.

Keyword : Residual Stress; Finite element method; GTAW; Temperature distribution

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINILITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	vii
ABSTRAK.....	viii
<i>ABSTRACT</i> .....	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiii
NOMENCLATURE .....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN .....	xvi
<b>1. PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Ruang Lingkup Penelitian.....	3
1.5. Hipotesa .....	4
1.6. Kegunaan Penelitian.....	4
1.7. Sistematika Penulisan .....	4
<b>2. TEORI PENUNJANG .....</b>	<b>6</b>
2.1. Baja Struktural JIS G3101- SS400.....	6
2.2. Baja Tahan Karat SUS 304.....	6
2.3. Pengelasan Gas Tungsten Arc Welding.....	7
2.4. Butt Joints.....	8
2.5. Distribusi Temperatur Pada Pengelasan .....	9
2.6. Tegangan Sisa.....	13

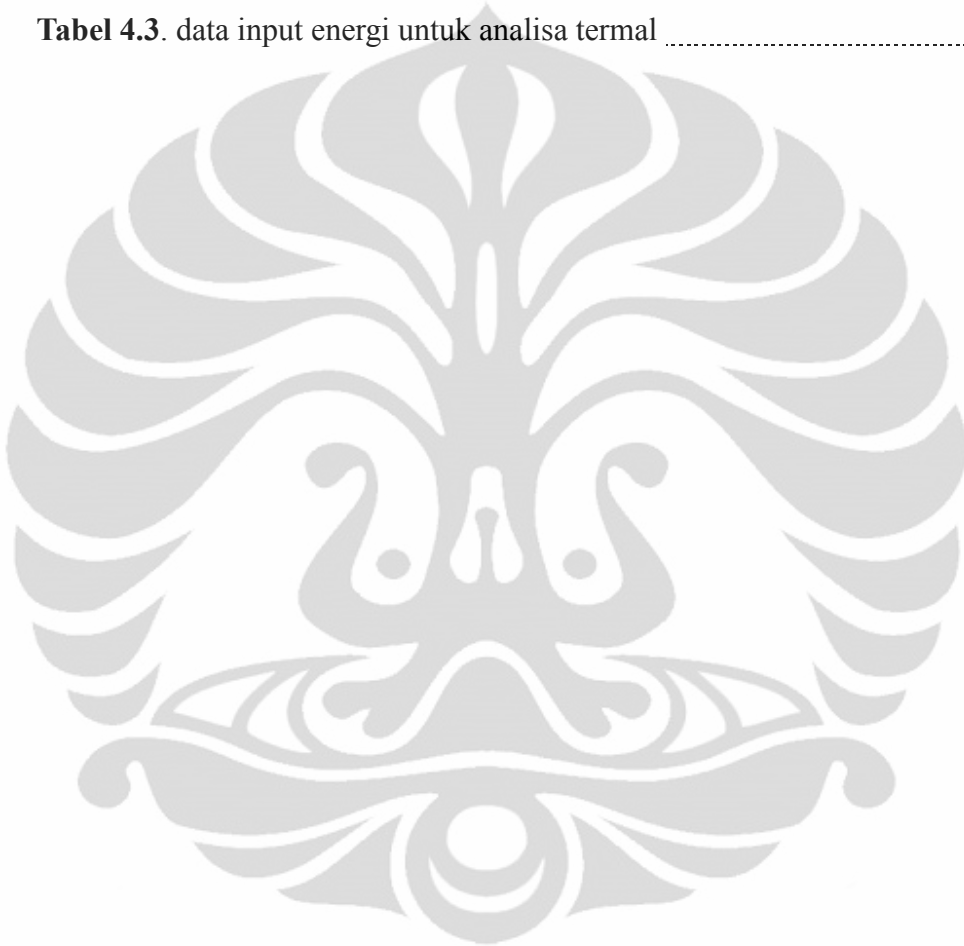
2.6.1. Pengaruh Tegangan Sisa Terhadap Sifat Mekanis .....	15
2.6.2. Pengukuran Tegangan Sisa.....	16
2.7. Konsep Metode Elemen Hingga.....	17
<b>3. METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>20</b>
3.1. Diagram Alir Penelitian.....	20
3.2. Rancangan Penelitian .....	21
3.2. Bentuk dan Spesifikasi Spesimen .....	22
3.2. Peralatan.....	22
<b>4. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>23</b>
4.1. Data Penelitian .....	23
4.2. Permodelan.....	25
4.3. Pembebanan .....	28
4.3.1. Pembebanan Termal .....	28
4.3.2. Pembebanan Struktural .....	29
4.4. Hasil Penelitian .....	29
4.5. Pembahasan.....	31
4.5.1. Analisa Termal .....	31
4.5.2. Analisa Struktural.....	32
4.5.3. Hasil Keluaran (Tegangan Sisa).....	33
<b>5. KESIMPULAN.....</b>	<b>35</b>
 DAFTAR PUSTAKA .....	 36
 LAMPIRAN.....	 37

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1.</b> Peralatan dan proses manual GTAW .....	8
<b>Gambar 2.2.</b> Butt Joints .....	9
<b>Gambar 2.3.</b> Sambungan jenis butt joint tipe V-groove .....	9
<b>Gambar 2.4.</b> Penyusutan dan penyusutan yang terhambat sebagai akibat dari distribusi temperatur yang tidak merata .....	14
<b>Gambar 2.5.</b> Menunjukkan tegangan sisa yang terjadi pada pengelasan tumpul (butt welding), yang dilas dari ujung keujung .....	15
<b>Gambar 2.6.</b> Bentuk dari pemakaian ANSYS 11.0 pada proses GTAW .....	17
<b>Gambar 3.1.</b> Alur proses FEA ( <i>finite element analysis</i> ) dengan ANSYS 11.0 .....	20
<b>Gambar 3.2.</b> Bentuk dan Spesifikasi spesimen .....	22
<b>Gambar 4.1.</b> Sifat material baja karbon ASTM A36 bergantung temperatur .....	23
<b>Gambar 4.2.</b> Sifat material Stainless Steel SUS304 bergantung temperatur .....	23
<b>Gambar 4.3.</b> Proses permodelan .....	25
<b>Gambar 4.4.</b> Geometri pemodelan pengelasan dan diskritisasi yang telah terbentuk dari meshing program .....	26
<b>Gambar 4.5.</b> Plane 55 2-D <i>Thermal Solid</i> .....	27
<b>Gambar 4.6.</b> Plane 42 2-d <i>structural solid</i> .....	27
<b>Gambar 4.7.</b> <i>Boudary condition</i> pada analisa termal .....	28
<b>Gambar 4.8.</b> Distribusi temperatur pada saat pemanasan ( <i>butt joint</i> ) .....	39
<b>Gambar 4.9.</b> Distribusi temperatur disetiap nodal .....	28
<b>Gambar 4.10.</b> Perkiraan bentuk weld toe selama pengelasan dan tempat terjadinya dilusi. (a) modelling dan (b) eksperimental .....	32
<b>Gambar 4.11.</b> Constraint pada permodelan untuk analisa struktural .....	32
<b>Gambar 4.12.</b> Distorsi yang terjadi akibat beban termal .....	33
<b>Gambar 4.13.</b> Perbandingan Distribusi tegangan sisa hasil Permodelan dan eksperimental .....	33

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1.</b> komposisi SUS 304 .....	7
<b>Tabel 2.2.</b> Sifat mekanik SUS .....	7
<b>Tabel 2.3.</b> Sifat termal SUS 304 .....	7
<b>Tabel 4.1.</b> Sifat Termal baja SS 400 .....	24
<b>Tabel 4.2.</b> Sifat Termal SUS 304 .....	24
<b>Tabel 4.3.</b> data input energi untuk analisa termal .....	28



## NOMENCLATURE

- $Q$  : Net heat input / effective thermal power ( watt )
- $\eta$  : Koefisien efisiensi ( - )
- $U$  : Tegangan Busur ( volt )
- $H_{net}$  : Energi input bersih. ( J/mm )
- $E$  : Tegangan (V).
- $I$  : Arus (A).
- $f_1$  : Efisiensi pemindahan panas. ( - )
- $v$  : Kecepatan pengelasan ( mm/s )
- $c$  : Specific heat ( J/kg.K )
- $\lambda$  : Konduktivitas termal ( W/m.K )
- $Q_G$  : Debit perubahan temperatur ( W/m<sup>3</sup> )
- $\rho$  : Massa jenis ( kg/m<sup>3</sup> )
- $T$  : Temperatur ( K )
- $t$  : Waktu ( sekon )
- [ D ] : Matrik 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 )
- $q_1$  : Heat fluks pada elemen ( J/mm<sup>2</sup> )
- $q_e$  : Heat fluks yang dihasilkan elektroda ( J/mm<sup>2</sup> )
- $A_1$  : Luasan permukaan elemen ( mm<sup>2</sup> )
- $A_f$  : Luasan fluke yang dihasilkan elektroda ( mm<sup>2</sup> )
- $b$  : Panjang kaki las ( mm )
- $t_e$  : Waktu yang diperlukan pada satu elemen.( s )
- $\sigma$  : Tegangan sisa yang terjadi ( Pa )
- $E$  : Modulus elastic ( Pa )
- $\Delta l$  : Perubahan panjang yang terjadi ( m )
- $\sigma_x$  : Tegangan tegak lurus sumbu las( Pa )
- $\sigma_y$  : Tegangan searah sumbu las ( Pa )

$\varepsilon_x$  : Regangan tegak lurus sumbu las ( - )

$\varepsilon_y$  : Regangan searah sumbu las ( - )



## DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1. Data Penelitian .....	38
LAMPIRAN 2. Formula .....	40
LAMPIRAN 3. Log Ansys.....	44





# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pada dasarnya pengelasan adalah penggabungan setempat dari beberapa logam atau bukan logam yang melibatkan pencairan logam di daerah sambungan dengan atau tanpa logam pengisi. Perbedaan temperatur yang sangat besar di daerah busur las dengan daerah logam induk mengakibatkan distribusi temperature yang tidak merata. Semakin besar masukan panas maka regangan termal juga semakin besar. Akibatnya terjadi perubahan bentuk dan ukuran. Dengan adanya masukan panas ketika melakukan pengelasan maka terbentuk tegangan internal dan distorsi.

Pengelasan secara luas digunakan dalam berbagai industri. Bagian terpenting dari proses ini adalah proses pengelasan bergantung pada masukan panas lokal yang akan menghasilkan tegangan sisa yang tidak diinginkan dan deformasi dalam struktur las-lasan, terutama dalam kasus pelat logam. Oleh karena itu, memperkirakan besarnya deformasi dan karakterisasi las-lasan yang dipengaruhi oleh kondisi pengelasan sangat diperlukan. Dengan komputasi modern fasilitas, elemen hingga (FE) teknik telah menjadi efektif metode untuk prediksi dan penilaian pengelasan tegangan sisa dan distorsi<sup>[1]</sup>.

Pada PLTN, komponen-komponen yang berkerja pada temperatue tinggi dibuat dari *stainless steel* dan sebaliknya, komponen yang beroperasi pada temperatur rendah dibuat dari *feritic steel*. Oleh karena itu penggabungan antara dua jenis material dalam bentuk pengelasan *dissimilar metal* tersebut perlu untuk dilakukannya misalnya antara *feritic steel* dengan *austenitic steel* yang digunakan pada pembangkit uap<sup>[2]</sup>. Adanya kebijakan pengembangan material maju yang diarahkan pada upaya pengembangan teknologi material baru untuk meningkatkan fungsi kandungan lokal, serta memperkuat industri pendukung dan pohon industri nasional, maka dengan pola yang serupa, pengelasan beda logam antara *austenitic steel* SUS 304 dan baja karbon rendah JIS 31011 SS 400 dilakukan.

Tidak diragukan lagi, penyambungan dua logam berbeda ini lebih memberikan tantangan yang lebih besar karena perbedaan karakteristik atau sifat

material. Perbedaan cukup menyolok dari segi konduktivitas panas, untuk SUS 304 adalah 25 W/(m.K) sedangkan baja karbon JIS 31011 SS 400 berkisar 51.5 W/(mK) sedangkan koefisien ekspansi termal SUS 304 adalah  $17 \times 10^{-6}/K$  dan baja karbon  $11.5 \times 10^{-6} K^{[2]}$  pada suhu kamar. Dalam penelitian ini akan dilakukan pengelasan antara SUS 304 buatan jepang dengan baja karbon lokal yang mengacu pada standar JIS 31011 SS 400. Austenitic *steel* jenis SUS 304 memiliki ketahanan korosi yang cukup baik dan kuat pada temperature tinggi. Secara ekonomis SUS 304 merupakan yang termurah diantara *stainless steel*. Tetapi, *austenitic stainless steel* memiliki koefisien ekspansi termal lebih tinggi dan konduktivitas termal lebih rendah dibanding baja karbon dan baja paduan oleh karena itu sejumlah besar penyusutan, distorsi, dan tegangan sisa dapat terjadi setelah fabrikasi las<sup>[3]</sup>.

Dalam proses pengelasan, bagian yang dilas menerima panas pengelasan setempat, sehingga distribusi temperatur tidak merata. Distribusi panas yang tidak merata ini mengakibatkan temperatur logam las hingga daerah terpengaruh panas (HAZ) lebih tinggi dibanding dengan base metal. Pada saat logam las membeku, penyusutan terjadi dan logam melakukan gaya penyusutan terhadap daerah sekelilingnya dan daerah HAZ. Pada awal pembekuan, gaya yang diadukan relatif kecil karena logam las masih panas. Akan tetapi pada saat lasan mencapai temperatur ruang maka tegangan penyusutan meningkat. Tegangan penyusutan, yang tertinggal dalam logam lasan ini menyebabkan tegangan sisa. Tegangan sisa menyebabkan dua efek berbahaya, yaitu distorsi dan kerusakan dini dari lasan<sup>[4]</sup>.

Banyak teknik yang telah digunakan untuk mengukur tegangan sisa pada logam termasuk *stress relaxation techniques*, *diffraction technique*, *cracking technique*, dan *stress sensitive techniques*. Teknik ini tidak cukup handal untuk mengetahui distribusi tegangan sisa secara lengkap dan kebanyakan dari teknik ini membutuhkan waktu yang lama dan biaya yang mahal dan beberapa dari mereka bersifat destruktif. Dalam penelitian ini, analisa dengan metode elemen hingga digunakan untuk melakukan simulasi pengelasan dan untuk memprediksi distribusi temperatur dan distribusi tegangan sisa dalam pengelasan butt dari dua pelat logam yang berbeda.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini meliputi estimasi tegangan sisa dan analisa tegangan sisa menggunakan metode elemen hingga pada proses GTAW *dissimilar metal* SUS 304 dengan JIS 31011 SS 400. Pengamatan yang dilakukan adalah melihat besarnya tegangan sisa dan besar distribusi masukan panas saat pengelasan dan membandingkan tegangan sisa yang hadir pada logam dasar, HAZ dan kampuh las.

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui distribusi panas saat terjadi pengelasan.
2. Mengetahui hubungan tegangan sisa dengan besarnya masukan panas.

## 1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Adapun Ruang lingkup penelitian ini adalah :

1. Bahan Dasar Logam yang Dilas  
Baja JIS G3101 SS400 dan SUS 304 dengan dimensi panjang 40 mm dengan ketebalan 8 mm
2. Batasan Proses

Untuk mendapatkan hasil akhir perhitungan yang benar dan sesuai dengan referensi serta tidak menyimpang dari permasalahan yang ditinjau, maka terdapat beberapa batasan yang perlu diperhitungkan diantaranya sebagai berikut :

- a. Material yang dimodelkan dianggap sempurna dalam artian tidak terdapat cacat.
- b. Perpindahan panas karena radiasi tidak begitu berpengaruh sehingga dalam permodelan diabaikan dan perpindahan panas hanya secara konduksi dan konveksi.
- c. Geometri pemodelan dianggap sama jenisnya pada setiap daerah lasan (*weld metal*, dan *base metal*).

- d. Temperatur increment awal dianggap sama dengan temperatur yang tercipta pada filler karena energi busur listrik yang dihasilkan.

## **1.5 Hipotesa**

Hipotesa dari penelitian ini adalah dengan menggunakan metoda finite element analysis atau bisa disebut metoda elemen hingga dapat memprediksi berapa besaran tegangan sisa yang terjadi serta distribusi panas yang terjadi disaat pengelasan dengan menggunakan proses pengelasan GTA.

## **1.6 Kegunaan Penelitian**

Kegunaan dari penelitian ini adalah sebagai rujukan informasi dalam melakukan pengelasan dissimilar anatra baja tahan karat SUS 304 dengan baja karbon JIS 31011 SS 400 secara tepat sehingga dapat digunakan untuk mendukung program-program pembangunan nasional dalam bidang teknologi material yang mendukung semua fokus iptek nasional pada umumnya, dan fokus pada bidang energi pada khususnya, guna memnuhi syarat tentang kewajiban penggunaan produk dalam negeri yang maksimal.

## **1.7 Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan Tugas Akhir ini terbagi dalam lima bab, yaitu :

### **BAB I PENDAHULUAN**

Bab ini berisi latar belakang dibuatnya penelitian, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan laporan hasil penelitian.

### **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Bab ini berisi teori – teori yang berkaitan dengan penelitian sehingga dapat diperoleh pengertian dan pengetahuan yang menunjang analisa permasalahan dalam penelitian ini.

### BAB III METODOLOGI

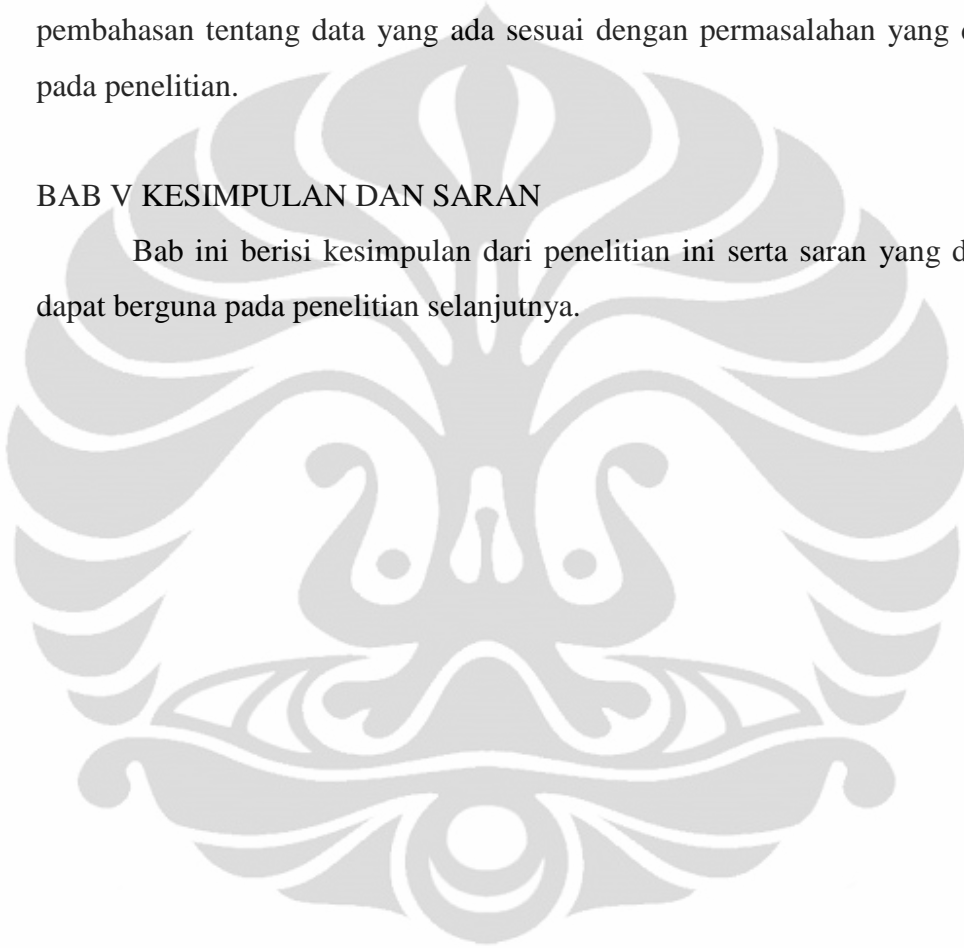
Bab ini berisi rancangan penelitian, prosedur pelaksanaan, spesifikasi peralatan, dan spesifikasi material uji.

### BAB IV DATA DAN ANALISA DATA

Bab ini berisi data – data yang diperoleh selama penelitian, dan pembahasan tentang data yang ada sesuai dengan permasalahan yang ditetapkan pada penelitian.

### BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan dari penelitian ini serta saran yang diharapkan dapat berguna pada penelitian selanjutnya.



## BAB II STUDI PUSTAKA

### 2.1 Baja Struktural JIS G3101-SS400

Baja JIS G3101 SS400 atau identik dengan ASTM A 36 termasuk kedalam *Low Carbon Steels*. *Low carbon steels* biasanya memiliki kandungan karbon hingga 0,25% C dengan 0,4 sampai 0,7% Mn, 0,1 sampai 0,5% Si, dan sedikit sulfur, pospor, dan unsur lain yang tersisa<sup>[5]</sup>. Baja ini tidak dikuatkan dengan unsur paduan selain karbon. Baja jenis ini mengandung sedikit mangan untuk stabilisasi sulfur dan silikon untuk deoksidasi.

*Low Carbon Steels* atau *Mild Steels* yang sering digunakan pada *rolles*, *forged*, atau *annealed*. Kategori mild steel yang paling sering dipakai adalah *low carbon* (C <0.08% dengan Mn ≤0.4%) yang digunakan untuk *forming* dan *packaging*. *Mild steels* memiliki kandungan Karbon dan Mangan yang lebih tinggi juga digunakan untuk produk struktural seperti pelat, lembaran, batangan, dan *structural sections*. Sebelum penggunaan HSLA (*High Strengt Low Alloy Steels*), *mild steel* jenis ini biasa digunakan untuk bagian stuktural otomotif, jembatan, dan gedung. Baja jenis ini memiliki *weldability* dan *yield strength* yang cukup baik<sup>[6]</sup>.

### 2.2 Baja Tahan Karat SUS 304

Baja tahan karat austenitic digunakan secara luas dan dikenal dengan nama 18-8 (Cr-Ni) steel. Sifat penting baja austenitik adalah memiliki ketahanan korosi sangat baik kecuali pada lingkungan klorida. Selain itu baja austenitik memiliki ketahanan panas, ketanggunhan pada temperatur tinggi dan rendah, keuletan dan mampu bentuk serta mampu las sangat baik. Selain itu memiliki kekuatan rendah hingga moderat dan bersifat nonmagnetik. Akan tetapi harganya relatif mahal karena mengandung Nikel<sup>[7]</sup>. Tingkat dasar baja Austenitic stainless steel adalah SS 304. Sedangkan menurut JIS G4304 adalah sama dengan ASTM A240 tipe 304<sup>[8]</sup>. Komposisi kimia baja tahan karat SUS 304 berdasarkan standar ASTM A368-95A (*reapproved* 2004) sebagaimana ditunjukkan pada tabel 2.1, sifat mekanis pada tabel 2.2 dan sifat fisik pada tabel 2.3

**Tabel 2.1.** Komposisi SUS 304<sup>[9]</sup>

Grade	C (max)	Mn (max)	Si (max)	P (max)	S (max)	Cr	Ni	N (max)
304	0,08	2	1,00	0,045	0,03	18-20	8-10,5	0,1

**Tabel 2.2.** Sifat mekanik SUS 304<sup>[10]</sup>

Tensile Strength (MPa) min	Yield Strength 0.2% Proof (MPa) min	Elongation (% in 50mm) min	Hardness	
			Rockwell B (HR B) max	Brinell (HB) max
515	205	40	92	201

**Tabel 2.3.** Sifat termal SUS 304<sup>[10]</sup>

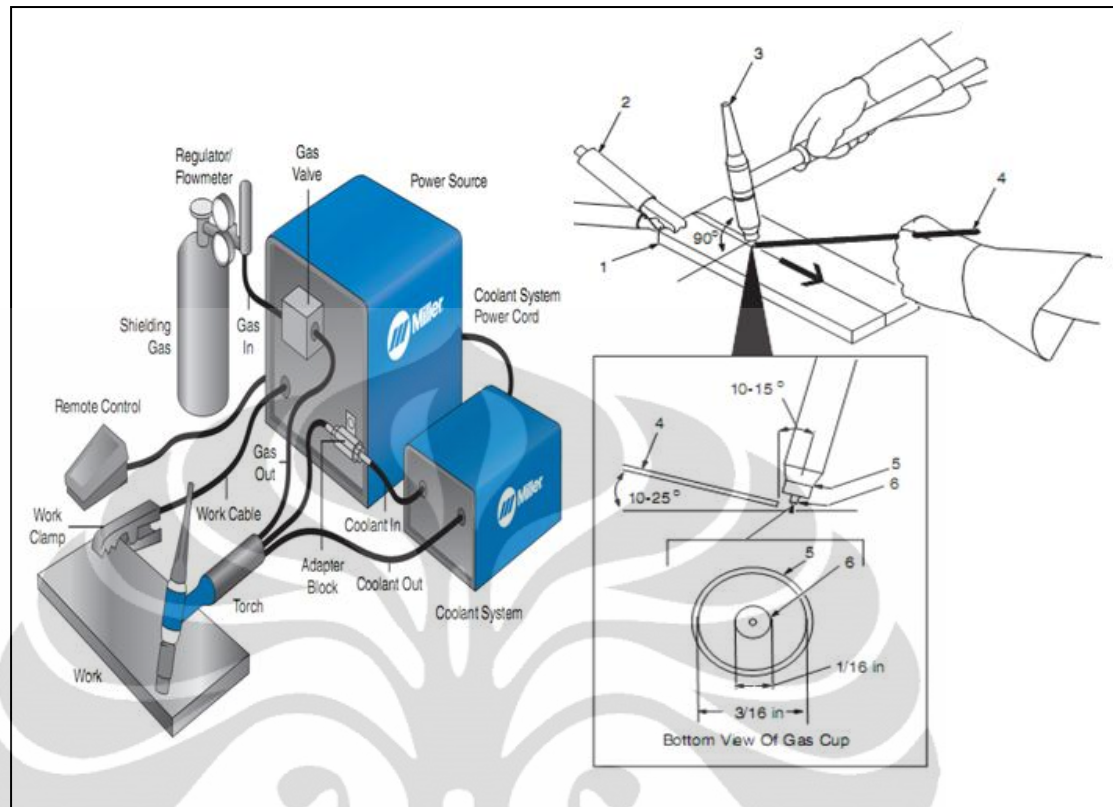
Density (kg/m <sup>3</sup> )	Elastic Modulus (GPa)	Mean Coefficient of Thermal Expansion (mm/m/°C)			Thermal Conductivity (W/m.K)		Specific Heat 0-100 °C (J/kg.K)
		0-100°C	0315°C	0-538°C	100°C	500°C	
8000	193	17,2	17,8	18,4	16,2	21,5	500

### 2.3 Pengelasan Gas Tungsten Arc Welding

Panas yang diperlukan untuk Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) diproduksi oleh busur listrik yang kemudian difokuskan antara elektroda tungsten *nonconsumable* dan bagian yang akan dilas. *Heat affected zone*, logam cair, dan elektroda tungsten dilindungi dari atmosfer oleh selimut gas inert yang diberikan melalui obor GTAW.

*Inert gas* adalah gas yang tidak aktif. Gas pelindung ini bersifat seperti selimut las yang tidak bereaksi dengan udara sekitar, terbakar, dan yang pasti tidak merusak hasil produk lasan. *Inert gas* seperti Argon dan Helium tidak bereaksi secara kimia dengan gas lainnya, tidak memiliki bau dan transparan.

Proses GTAW dapat menghasilkan suhu hingga 35.000 °F/ 19, 426 °C. Obor hanya memberikan kontribusi panas ke benda kerja<sup>[11]</sup>. Jika logam pengisi (filler) diperlukan, mungkin ditambahkan secara manual dengan cara yang sama seperti yang ditambahkan dalam proses pengelasan jenis asetilen. Gambar 2.1 menunjukkan bentuk dari peralatan dari proses GTAW.

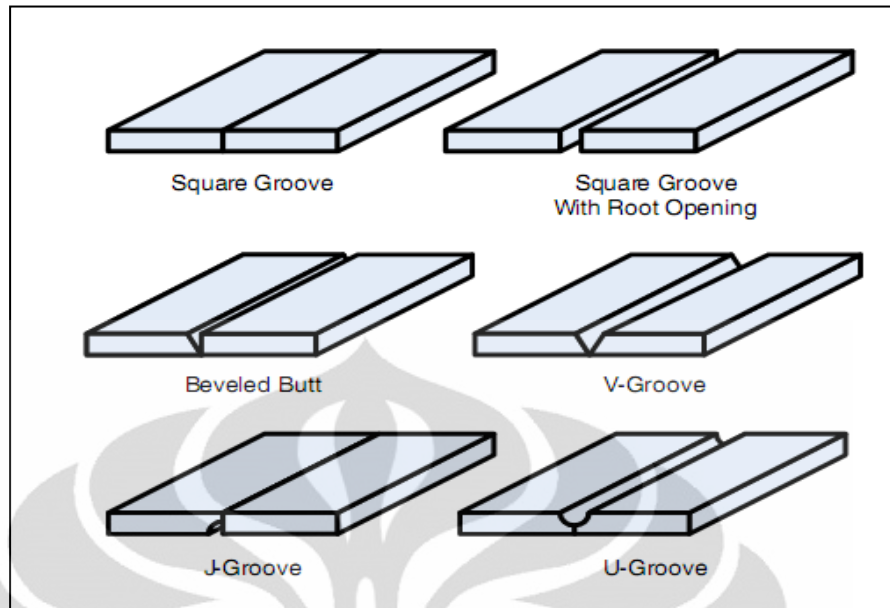


**Gambar 2.1.** Peralatan dan proses manual GTAW<sup>[12]</sup>

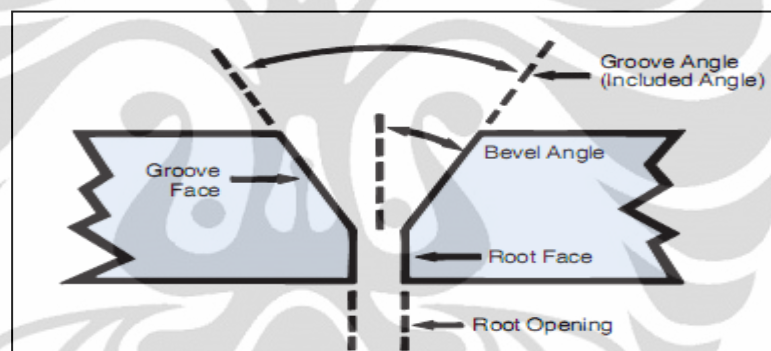
## 2.4 Butt Joints

Dikatakan butt joint dikarenakan permukaan anggota bagian yang akan dilas merupakan bidang yang sama dengan tepi yang saling bertemu. Gambar 2.2 menunjukkan bentuk dari butt joint dengan berbagai jenis alur, sedangkan bentuk detail dari butt joint tipe V-groove dapat dilihat pada gambar 2.3. Butt joint sering digunakan untuk bejana tekan, boiler, tank, plat, pipa, atau aplikasi lain di mana hasil las yang rapi diperlukan. Butt joint memiliki kelebihan dari kekuatan mekanik jika dibuat dengan benar. Jenis sambungan ini cukup mahal pada pembuatan *groove* yang bertujuan untuk mendapatkan penetrasi yang tepat dan ukuran las.





Gambar 2.2. Butt Joints<sup>[4]</sup>



Gambar 2.3. Sambungan jenis butt joint tipe V-groove<sup>[4]</sup>

Distorsi dan tegangan sisa merupakan masalah yang sering pada jenis sambungan ini. *Butt* mempunyai beberapa jenis. Jenisnya berupa alur seperti bevel, V, J, atau U. Bagian tepi ini akan diberi celah kecil yang sering dikenal dengan *root opening*. Gambar 2.3 menunjukkan berbagai bagian dari V-groove. Tujuan utama dari jenis alur dan besar *root opening* adalah untuk memungkinkan penetrasi yang tepat dan kedalaman fusi yang diinginkan.

## 2.5 Distribusi Temperatur Pada Pengelasan

Pada proses pengelasan perubahan temperatur pada daerah busur las terjadi sangat cepat dan mengakibatkan perbedaan temperatur di daerah sekitar busur. Selanjutnya panas mengalir ke daerah sekitar las yang memiliki temperatur

lebih rendah sehingga terjadi distribusi panas di daerah sekitar alur las. Pada proses pengelasan terjadi distribusi temperatur yang yang tidak sama pada hampir tiap titik pada bagian daerah lasan<sup>[13]</sup>. Hal ini mengakibatkan terjadinya siklus termal yang sangat kompleks. Siklus termal ini dapat menggambarkan laju pendinginan yang terjadi pada daerah tertentu dari lagam lasan.

Dengan laju pendinginan ini maka dapat di ketahui terjadinya perubahan struktur mikro pada bagian-bagian tertentu khususnya daerah HAZ (*Heat Affected Zone*). Dengan berubahnya struktur mikro maka sifat mekanik dari daerah tersebut juga akan mengalami perubahan.

Sumber panas pada proses pengelasan berasal dari panas elektroda yang ada. Dimana sumber panas ini secara matematis dapat dihitung dengan persamaan empiris<sup>[13]</sup>:

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

Dimana :

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

$\eta$  : Koefisien efisiensi

$U$  : Tegangan Busur ( volt )

$I$  : Arus listrik ( Amp )

Tidak semua energi panas yang terbentuk dari perubahan energi listrik diserap 100 % oleh logam lasan, akan tetapi hanya sebagian besar saja. Sehingga energi busur las dapat ditulis 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 (V).

$I$  = Aurs (A).

$f_1$  = Efisiensi pemindahan panas. ( - )

$v$  = Kecepatan pengelasan ( mm/s )

Pada pengelasan GTAW nilai efisiensi pemindahan panas berkisar antara 70%-85%. Distribusi panas yang terjadi selama proses pengelasan ialah distribusi panas secara konduksi dan konveksi. Konduksi terjadi pada bidang – bidang benda kerja yang menerima panas secara langsung dari elektroda dan transfer panas secara konveksi terjadi pada permukaan yang berkontak langsung dengan udara. Distribusi panas yang terjadi karena konduksi akan ditransferkan ke segala arah dan dikarenakan nilainya yang cukup tinggi dibandingkan dengan distribusi panas secara konveksi maka distribusi panas secara konduksi berperan lebih dominan.

Secara matematis persamaan dasar konduksi panas pada benda pejal 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>)

Persamaan distribusi panas diatas sesuai dengan ( Saeed Moaveni,2003 ) :

$$\rho c \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \{L\} T \right\} + \{ \{L\}^T \{q\} \} = q \quad (2.4)$$

Dimana:

- $\rho$  : massa jenis ( kg/m<sup>3</sup>)
- $c$  : *specific heat* ( J/kg.K)
- $T$  : temperatur ( K)
- $t$  : waktu ( sekon )

$$\{L\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{Bmatrix} : \text{operator vektor}$$

$$\{v\} = \begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{Bmatrix} : \text{vektor velocity transport massa panas}$$

$\{q\} =$  : vektor heat fluks

Untuk menghitung *heat fluks* yang ada selama proses pemanasan berlangsung maka dipergunakan hukum forier yaitu dengan dengan menghubungkan vektor heat fluk dan *termal gradien* (persamaan 2.5)

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

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

Dimana :

$[D]$  : Matrik 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 )

Apabila persamaan 2.5 disubstitusikan kedalam persamaan 2.4 akan didapatkan persamaan Saeed Moaveni :

$$\rho c \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \{L\} T \right) = \{L\}^T ([D] \{L\} T) + \bar{q} \quad (2.6)$$

Persamaan diatas senilai dengan persamaan yang sering terdapat dalam analisa perpindahan panas (persamaan 2.7) yaitu ( Frank Kreith ,1999 ):

$$\rho c \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = q + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.7)$$

Pada distribusi temperatur, transfer panas yang ada dipengaruhi oleh besarnya *heat fluks* yang mengenai elemen, secara matematis *heat fluks* dapat dihitung dengan persamaan 2.8 ( Mahrlein,1999 ) :

$$q_1 = q_e \frac{A_l}{A_f} \quad (2.8)$$

Dimana :

- $q_1$  : heat fluks pada elemen ( J/mm<sup>2</sup> )
- $q_e$  : heat fluks yang dihasilkan elektroda ( J/mm<sup>2</sup> )
- $A_l$  : luasan permukaan elemen ( mm<sup>2</sup> )
- $A_f$  : luasan fluke yang dihasilkan elektroda ( mm<sup>2</sup> )

$$q_e = \frac{H_{net}}{A_e} = \frac{f_1 \cdot E \cdot I}{A_e} = \frac{f_1 \cdot E \cdot I}{\pi \cdot r_e^2} \quad (2.9)$$

Jika persamaan 2.9 disederhanakan maka didapat persamaan 2.10

$$A_f = b \times v \times t \quad (2.10)$$

Dimana :

- $b$  : Panjang kaki las ( mm )
- $v$  : Kecepatan pengelasan ( mm/s )
- $t$  : Waktu yang diperlukan pada satu elemen.( s )

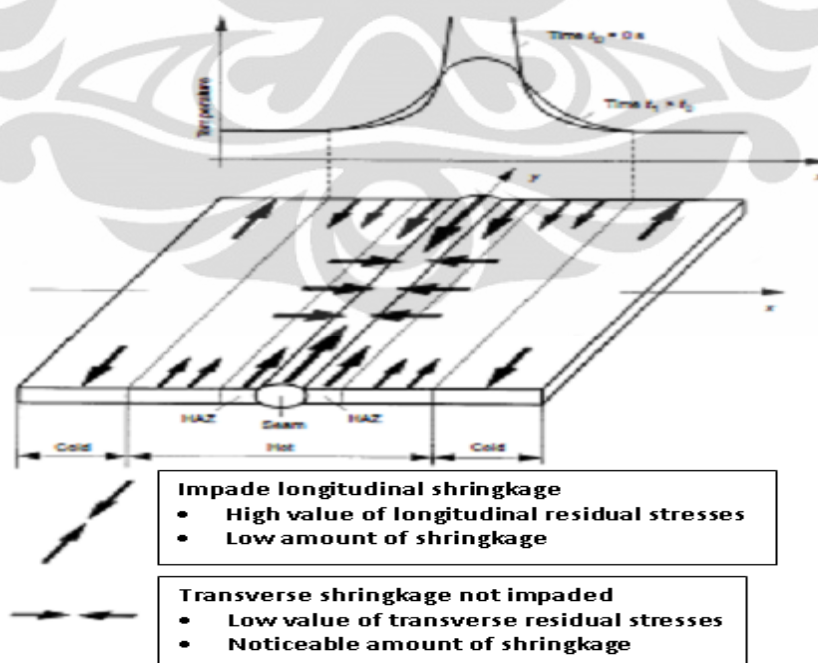
## 2.6 Tegangan Sisa

Tegangan sisa merupakan tegangan yang terjadi dalam suatu benda setelah gaya luar ditiadakan<sup>[13]</sup>. Tegangan sisa yang terjadi dalam suatu benda yang

diakibatkan oleh distribusi temperatur yang tidak merata, seperti ketika pengelasan, sering juga disebut tegangan termal<sup>[14]</sup>.

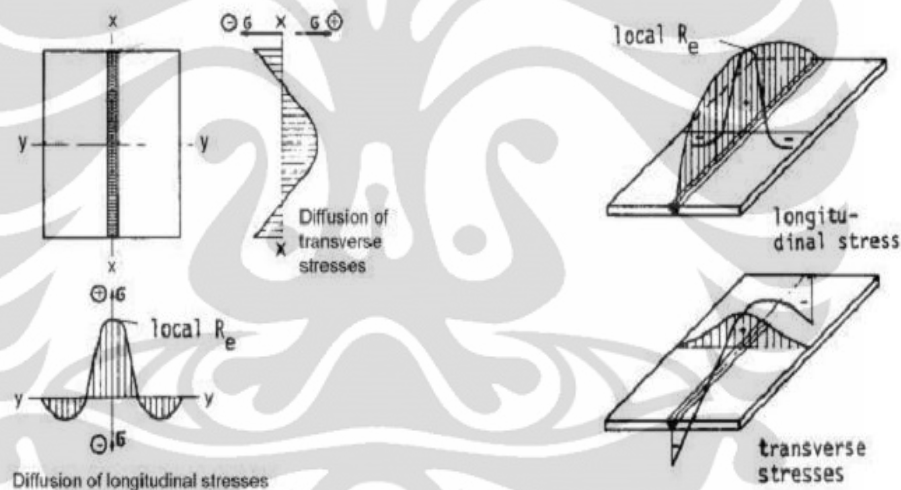
Tegangan sisa terjadi beragam mulai dari struktur logam yang luas hingga atomik. Tegangan sisa merupakan tegangan internal yang tersisa selama proses pengelasan yang terjadi akibat siklus pemanasan dan pendinginan pengelasan. Tegangan sisa terjadi pada daerah pengelasan akibat deformasi plastis lokal. Proses yang menyebabkan tegangan sisa antara lain adalah pengerolan, pengecoran, pengubahan bentuk logam, dan pengelasan<sup>[14]</sup>.

Ada berbagai faktor yang mempengaruhi jumlah dan distribusi tegangan sisa, seperti proses penyusutan, proses pendinginan cepat, dan transformasi fasa<sup>[14]</sup>. Prinsip dasarnya adalah volum yang dipanaskan mengalami penyusutan selama proses pendinginan berdasarkan pada koefisien ekspansi termal material yang dilas dan perbedaaa temperatur yang ada. Diasumsikan bahwa volum yang mengalami peleburan tidak memberikan gaya kepada volum sekitar. Akibatnya, sambungan las dan volum sekitar yang tidak meleleh selama proses pengelasan memiliki suhu yang berbeda dan tegangan sisa pun terjadi<sup>[15]</sup>. Hal ini bisa diilustrasikan pada Gambar 2.4



**Gambar 2.4.** Penyusutan dan penyusutan yang terhambat sebagai akibat dari distribusi temperatur yang tidak merata<sup>[15]</sup>

Adanya tegangan sisa (gambar 2.5) akan menyebabkan material terdeformasi (distorsi) atau mengalami penyusutan. Dan jika proses ini tidak diawasi dan diantisipasi, maka tegangan sisa yang ada akan hilang atau berkurang. Pada sambungan las, mulai dari keadaan bebas tegangan mulai dari logam las, tegangan termal tarik yang terbentuk selama proses pendinginan, yang mencapai *temperature-dependent yield strength* material. Akibatnya, pada akhir proses pendinginan, tegangan sisa tarik muncul pada sambungan las. Jika besar penyusutan yang ditahan cukup besar, tegangan sisa bisa saja mencapai kekuatan luluh dari material sambungan las. Volum material yang berada pada jarak tertentu dari logam las dan tidak melebur selama proses pengelasan mengalami regangan termal yang tertahan selama periode pemanasan.



**Gambar 2.5.** Menunjukkan tegangan sisa yang terjadi pada pengelasan tumpul (butt welding), yang dilas dari ujung keujung<sup>[15]</sup>

### 2.6.1 Pengaruh Tegangan Sisa Terhadap Sifat Mekanis

Tegangan sisa menyebabkan dua efek utama. Pertama, tegangan sisa akan menyebabkan distorsi, dan kedua, tegangan sisa akan menyebabkan kerusakan dini pada logam las. Terhadap kekuatan statik, tegangan sisa dapat dikatakan tidak mempengaruhi kekuatan statik logam selama logam induk dan logam las memiliki keuletan yang cukup baik. Selain itu, tegangan sisa juga bisa menyebabkan HIC (Hydrogen Induced Cracking), *brittle fracture* jika dikombinasikan dengan tegangan tarik, kegagalan *fatigue*, dan *Stress Corrosion*<sup>[16]</sup>.

### 2.6.2 Pengukuran Tegangan Sisa

Untuk menghitung tegangan sisa dapat dilakukan dengan menggunakan teknik pengukuran destruktif dan non-destruktif teknik.

Beberapa metoda pengukuran tegangan sisa dengan menggunakan metoda destruktif, yaitu :<sup>[17]</sup>

1. Metoda Hole-drilling
2. Metoda Ring core technique
3. Metoda Bending deflection
4. Metoda Sectioning

Teknik non-destruktif, merupakan pengukuran yang dilakukan tanpa merusak sampel. Teknik ini memberikan hasil yang lebih akurat daripada metoda destruktif. Teknik yang paling umum digunakan untuk pengukuran non-destruktif, yaitu :

1. X-ray/ neutron/ synchrotron diffraction
2. Ultrasonic technique (UT)
3. Magnetic methods.

Teknik difraksi didasarkan pada menggunakan kisi jarak sebagai strain gauge. UT menggunakan variasi rambat gelombang ultrasonik dalam bahan-bahan di bawah aksi stres mekanik. Sedangkan metode magnetik bergantung pada interaksi antara magnetisasi dan regangan elastis dalam bahan ferro-magnetik<sup>[18]</sup>.

Dalam beberapa tahun terakhir, dengan pengembangan fasilitas komputasi yang kuat, metode analisis elemen hingga telah diterapkan untuk model proses pengelasan dan untuk memperkirakan tegangan sisa.

## 2.7 Konsep Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga adalah prosedur numerik untuk memecahkan masalah mekanika kontinum. *Steady*, *transient*, linier, atau permasalahan nonlinear pada analisis tegangan, perpindahan kalor, aliran fluida, dan permasalahan elektromagnetik dimungkinkan dapat dianalisa dengan metode elemen hingga.

*Finite Element Analisis* (FEA) atau bisa disebut metoda elemen hingga (MEH), pertama kali diperkenalkan oleh Turner. Sejarah Metode elemen hingga

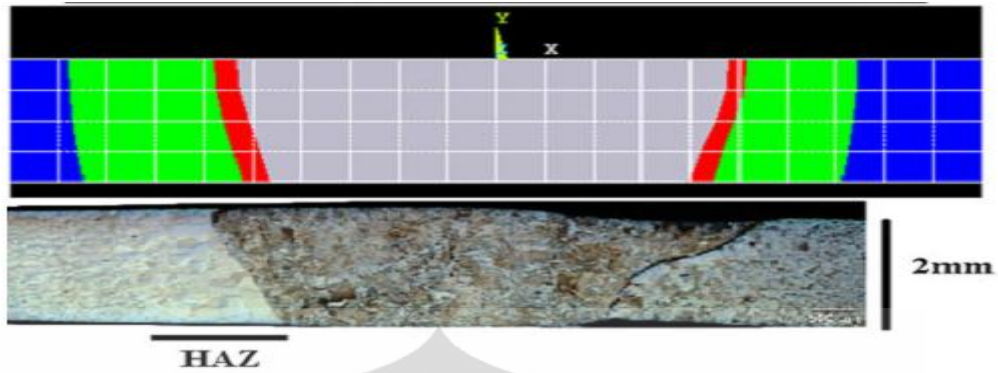


diawali pada tahun 1906 ketika para ahli riset mengusulkan metode “analogi *lattice*” untuk memecahkan masalah kontinum. Disini kontinum didekati dengan jaringan yang teratur yang berbentuk batang–batang elastis. Pada tahun 1943 Courant mengusulkan interpolasi polinomial bagian demi bagian pada daerah segitiga sebagai cara untuk mendapatkan solusi pendekatan numerik. Solusi ini lebih dikenal dengan nama Rayleigh–Ritz untuk masalah varisional dan mengantarkan Courant sebagai orang pertama yang mengembangkan metode elemen hingga. Mulai dari saat itu metode elemen hingga terus berkembang hingga saat ini.

Metoda ini merupakan teknik komputasi yang sangat bagus untuk solusi dalam memperkirakan pengaruh yang diakibatkan oleh radiasi panas. FEA telah menjadi tahapan proses yang penting dalam desain atau pemodelan untuk fenomena fisik di berbagai variabel disiplin ilmu rekayasa. Sebuah fenomena fisik biasanya terjadi dalam kontinum materi (padat, cair, atau gas) yang melibatkan beberapa variabel lapangan.

Metode Elemen Hingga (MEH) memberikan cara untuk memecahkan masalah yang kompleks ke dalam serangkaian masalah yang saling terkait dan sederhana. MEH ini paling sering digunakan dalam analisis numerik untuk memperoleh perkiraan solusi untuk berbagai permasalahan didalam rekayasa. Dalam studi ini, penggunaan program elemen hingga, ANSYS 11.0 digunakan untuk simulasi numerik pada pengelasan GTAW.

ANSYS memiliki banyak kemampuan analisis elemen hingga, mulai dari yang sederhana, linear, analisis statik ke analisis nonlinier yang kompleks, dan *transient dynamic analysis*. Pengaruh termal dan perubahan sifat mekanik material selama proses pengelasan dapat diselidiki oleh simulasi elemen hingga. Penggunaan ANSYS dapat dilihat pada gambar 3.2.



**Gambar 2.6.** Bentuk dari pemakaian ANSYS 11.0 pada proses GTAW<sup>[19]</sup>

Teng dan Lin mengembangkan model untuk mengevaluasi efek dari kecepatan pengelasan, ukuran spesimen, mechanical constraint, dan preheating terhadap tegangan sisa. Pada studi yang lain, Teng dan yang lain juga mengevaluasi tegangan sisa terhadap pengelasan *single pass*. Katsareas dan Yostous mengembangkan model dua dimensi dan tiga dimensi untuk memprediksi distribusi tegangan sisa pada pengelasan beda logam antara baja A508 dan baja 14301. Sahin dan yang lain juga menggunakan *finite element model* untuk memprediksi tegangan sisa pada brazed joint antara 1.0402 dan brass (BS CZ107)<sup>[19]</sup>.

Pada dasarnya elemen hingga merupakan bagian-bagian kecil dari struktur yang aktual akan tetapi dalam pembentukan elemen-elemen tersebut harus memperhatikan *nodal forces* sehingga didapatkan berbagai ragam deformasi elemen. Hal ini dilakukan agar struktur aktual yang telah ada tidak melemah dan tidak terjadi konsentrasi tegangan pada titik-titik pertemuannya dimana akan cenderung menjadi tumpang tindih atau terpisah disepanjang elemen.

Metode elemen hingga ini dapat digunakan untuk menyelesaikan berbagai masalah. Daerah yang dianalisa dapat mempunyai bentuk, beban, dan kondisi batas yang sembarang. Jaringan – jaringannya yang terbentuk dapat terdiri atas elemen yang berbeda jenis, bentuk dan besar fisiknya. Kemudahan berbagai hal ini pada saat ini ada dalam satu program komputer seperti ABAQUS, ANSYS, SAAP, CATIA.

Keunggulan lainya dari metode elemen hingga adalah hasil yang terbentuk sangat dekat dengan struktur aktual yang akan dikaji. keunggulan ini juga disertai keterbatasan metoda ini berupa hasil yang bersifat numerik bukan suatu persamaan bentuk tertutup yang dapat dipakai dalam memecahkan berbagai kasus, data-data yang dimasukkan cenderung cukup banyak sehingga data output pun yang dijalankan oleh program komputer pun lebih banyak. Sebenarnya kelemahan seperti ini dapat dimaklumi.

Prediksi siklus termal dalam operasi pengelasan adalah bagian utama dalam menentukan tegangan sisa yang terjadi akibat pengelasan, permasalahan konduksi panas harus diselesaikan terlebih dahulu. Persamaan 2.11 dapat digunakan untuk menggambarkan variasi suhu di dalam bagian las-lasan<sup>[20]</sup>:

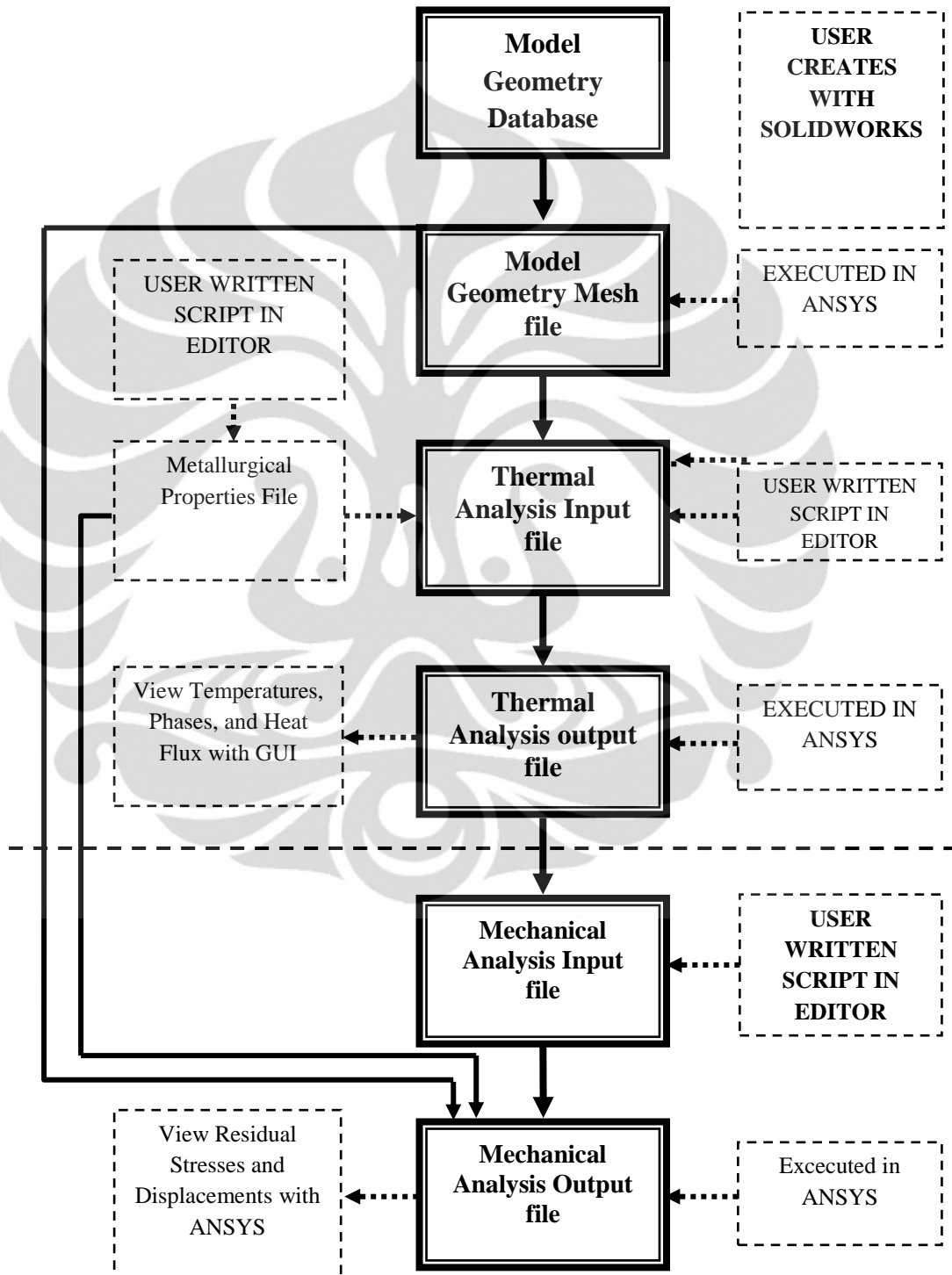
$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.11)$$

Dimana  $T$  merupakan temperatur,  $k$  adalah konduktivitas termal bahan,  $C$  adalah *specific heat*,  $\rho$  adalah densitas bahan,  $t$  merupakan waktu pengelasan, dan  $z$ ,  $x$ , dan  $y$  menunjukkan arah pengelasan.

Pada awal proses, tepatnya pada  $t=0$  model berada pada temperatur kamar dan ini dimasukkan kedalam permodelan sebagai *boundary condition*. Konveksi-konduksi juga dimasukkan kedalam permodelan sebagai *boundary condition* yang diasumsikan berada di daerah permukaan model, terkecuali bagian las-lasan.

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Penelitian



**Gambar 3.1.** Alur proses FEA (finite element analisis) dengan ANSYS 11.0

### 3.2 Rancangan penelitian

Pada permodelan ini yang diteliti adalah besarnya tegangan sisa dan distribusi temperatur pada material hasil proses pengelasan. Tegangan sisa dan distribusi temperatur diukur dengan suatu perhitungan dengan menggunakan software Ansys 11.0 dimana program ini berbasis metode elemen hingga. Pada permodelan ini prinsip dasar yang digunakan ialah menghitung data – data yang telah dimasukkan sesuai dengan analisa yang telah ditentukan, dengan kata lain hasil yang akan didapatkan pada permodelan ini ialah berupa respon suatu material akibat dari adanya suatu perlakuan tertentu. Khusus pada permodelan distribusi temperatur dan tegangan sisa ini respon yang ada diakibatkan oleh adanya pemanasan dan pendinginan karena proses pengelasan. Untuk memperjelas uraian diatas, metodologi tugas akhir ini dapat digambarkan dengan diagram alir seperti pada gambar 3.

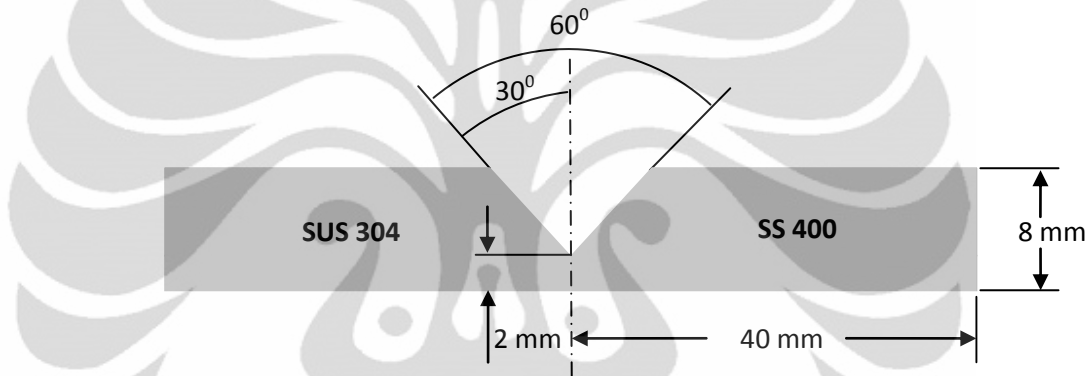
Adapun tahap-tahap yang perlu dilakukan sebelum memulai permodelan adalah :

1. Mengumpulkan data input yang akan digunakan dalam permodelan yaitu meliputi geometri lasan, material properties dari , input panas dan waktu pengelasan.
2. Pembuatan sampel pemodelan distribusi panas dengan menggunakan bantuan software Ansys 11.0
3. Pembuatan sampel pemodelan distribusi tegangan sisa dengan menggunakan bantuan software Ansys 11.0 yaitu dengan menggunakan data input yang sama pada pemodelan distribusi panas.
4. Pembuatan pemodelan distribusi panas pada *butt joint* dan *cross joint* dengan menggunakan bantuan software Ansys 11.0 dengan memasukkan data – data input yang ada. Pada sambungan *cross joint* pertama –tama dilakukan penyambungan dua plat kemudian dilakukan penyambungan tiga plat sekaligus pada pada tahap kedua
5. Pembuatan pemodelan distribusi tegangan sisa dengan menggunakan bantuan software Ansys 11.0 yaitu dengan menggunakan hasil inputan dan output pada pemodelan distribusi panas.

6. Membandingkan output dari sample pemodelan dengan hasil eksperimental.
7. Menganalisa hasil pemodelan dan menarik kesimpulan.

### 3.3 Bentuk dan spesifikasi specimen

Dalam permodelan ini digunakan material baja SUS 304 dimana merupakan material yang mempunyai ketahanan terhadap korosi dan Material ini ialah SS 400 yang merupakan golongan *low carbon steel*. Adapun dimensi yang digunakan untuk membangun geometri dalam permodelan ini ialah 40mm x 8 mm.



**Gambar 3.2.** Bentuk dan Spesifikasi specimen

### 3.4 Peralatan

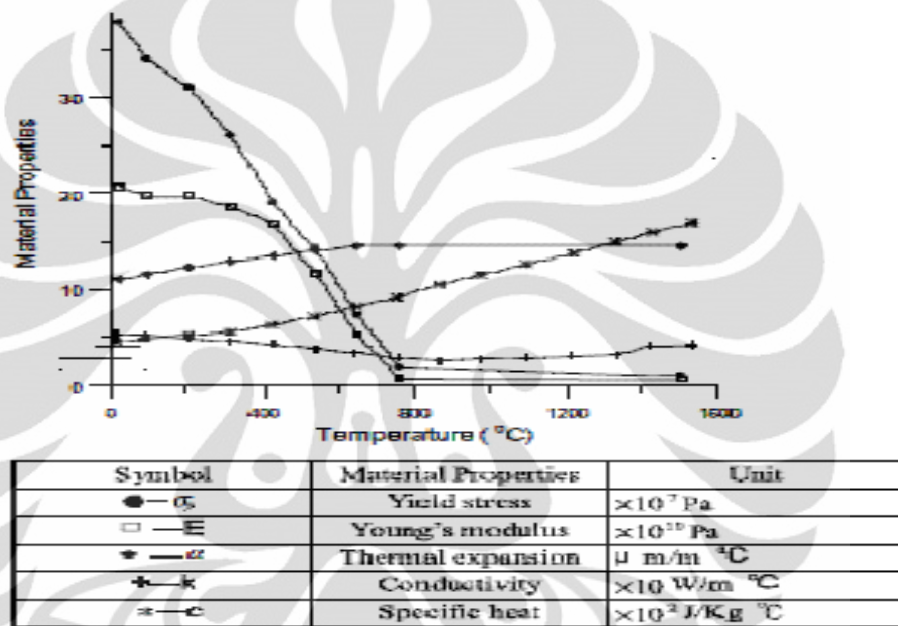
Adapun peralatan yang dibutuhkan untuk penelitian ini adalah :

1. Seperangkat Komputer dengan spesifikasi :
  - Core 2 Duo
  - Momory 2GB
2. Softwere Solidworks
3. Softwere ANSYS 11.0

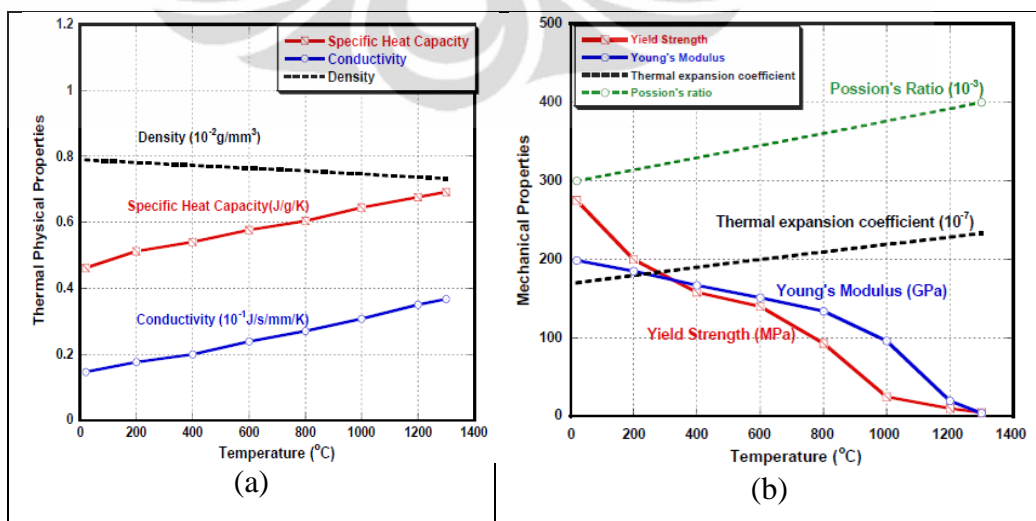
## BAB IV DATA DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Data Penelitian

Berdasarkan hasil penelusuran literatur telah diperoleh data tentang sifat fisik material SS400 (setara dengan ASTM A36) dalam bentuk grafik seperti Gambar 4.2 dan Gambar 4.3 untuk SUS304.



Gambar 4.1. Sifat material baja karbon ASTM A36 bergantung temperatur<sup>[18]</sup>



Gambar 4.2. Sifat material Stainless Steel SUS304 bergantung temperatur<sup>[19]</sup>

Data grafik tersebut harus diubah menjadi bentuk angka, oleh karena ANSYS tidak dapat mengolah data grafik. Dengan menggunakan program simulasi polinomial data grafik diubah menjadi angka Tabel 4 dan tabel 4.2.

**Tabel 4.1** Sifat Termal baja SS 400<sup>[18]</sup>

Sifat Termal SS400				
Temperatur	Konduktivitas Termal	Kapasitas panas	Ekspansi Termal	Koef. heat transfer
T	k	cp	$\alpha$	a
Kelvin	W/(m.K)	J/(kg.K)	$\mu$ m/m. C	(J/mm <sup>2</sup> /s/C)x10 <sup>-5</sup>
300	48,8	435	11,5	1,0005
450	45,5	536	12,7	1,7016
550	43,8	554	13,5	2,1014
600	42,1	573	13,7	2,5608
650	40,4	593	14,2	2,8562
850	33,7	713	14,8	5,1031
900	32,2	761	14,9	6,1205
990	29,7	871	14,9	7,1005
1073	25,2	995	14,9	8,9501
1373	25	1255	14,9	8,9501
1423	25,1	1290	14,9	8,9501
1473	25,2	1380	14,9	8,9501
1523	25,3	1450	14,9	8,9501
1573	25,5	1500	14,9	8,9501
1773	27,5	1675	14,9	8,9501
1873	27,5	1730	14,9	8,9501

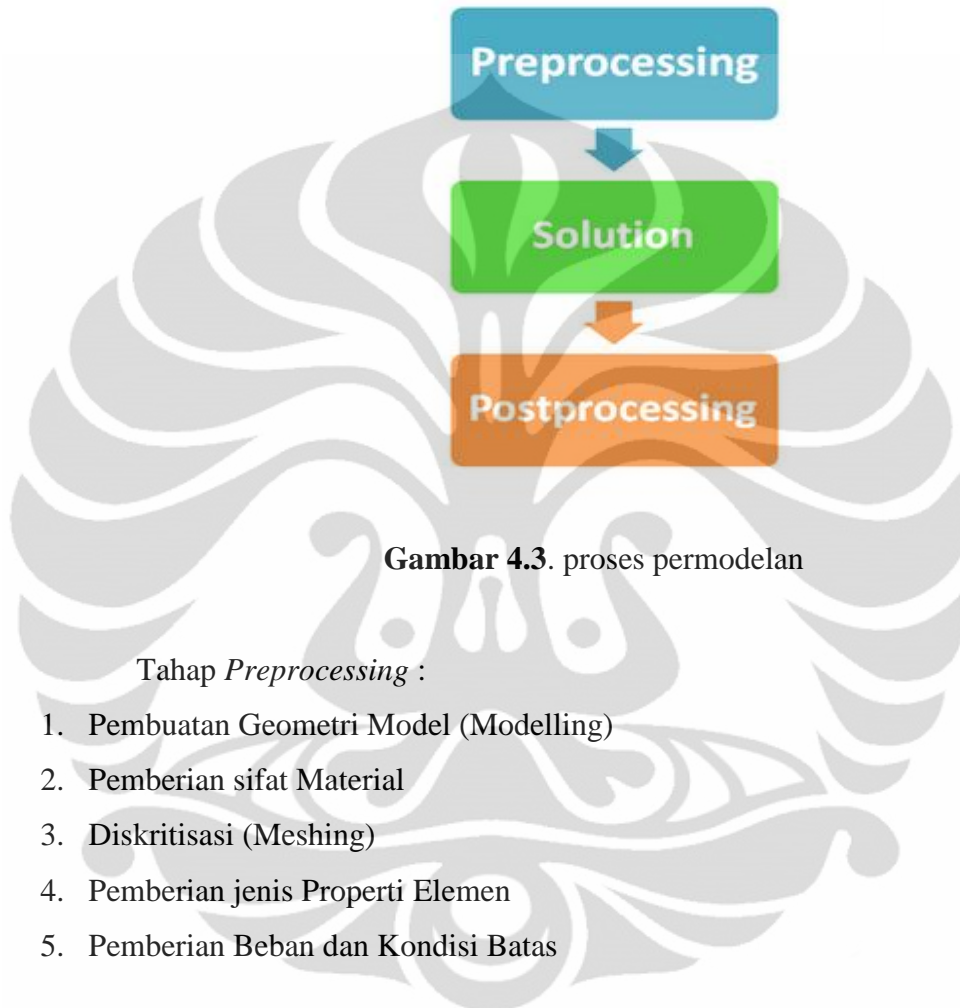
**Tabel 4.2.** Sifat Termal SUS 304<sup>[19]</sup>

Sifat Termal SUS304				
Temperatur	Kapasitas Panas	Konduktivitas	Expansion thermal	Poison ratio
T	Cp	$\alpha$	$\nu$	$\alpha$
K	J/(kg. K)	$\mu$ m/(m. <sup>o</sup> C)	x10 <sup>3</sup>	$\mu$ m/(m. <sup>o</sup> C)
293	458	16,93	0,300885	16,93
473	510	17,82	0,313274	17,82
673	540	18,88	0,330088	18,88
873	573	19,86	0,346903	19,86
1073	604	20,83	0,361062	20,83
1273	642	21,72	0,376991	21,72
1473	671	22,78	0,393805	22,78
1573	694	23,14	0,402655	23,14
1773	728	24,27	0,416699	24,27
2273	815	26,75	0,456146	26,75



## 4.2 Permodelan

Dalam aplikasi software finite element, ada tiga prosedur yang dilakukan, yaitu *Preprocessing*, *Solution*, dan *Postprocessing* (gambar 4.3)



**Gambar 4.3.** proses permodelan

Tahap *Preprocessing* :

1. Pembuatan Geometri Model (Modelling)
2. Pemberian sifat Material
3. Diskritisasi (Meshing)
4. Pemberian jenis Properti Elemen
5. Pemberian Beban dan Kondisi Batas

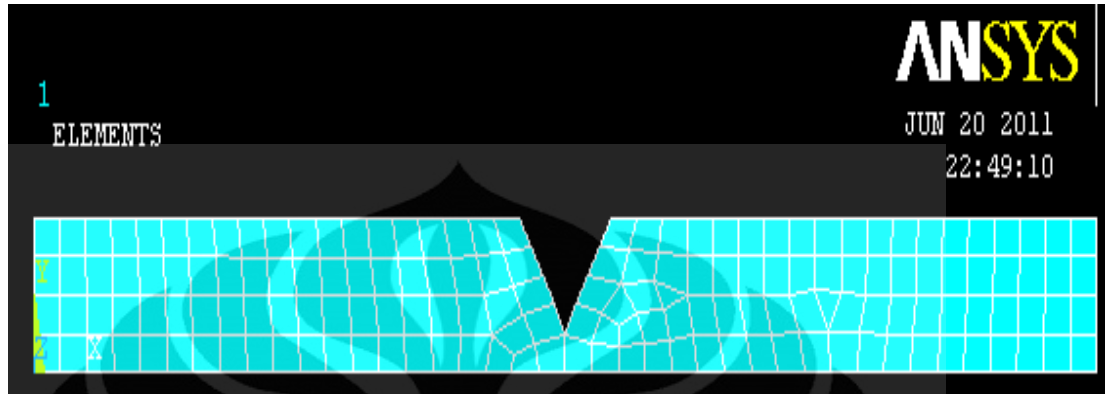
Tahap *Solution* :

1. Penentuan Matriks Kekakuan Lokal
2. Penggabungan Matriks Kekakuan Lokal menjadi Matriks Kekakuan Global

Tahap *Postprocessing* :

1. Menampilkan solusi dari perhitungan numerik, sehingga lebih mudah dilihat/dibaca dan diinterpretasikan.

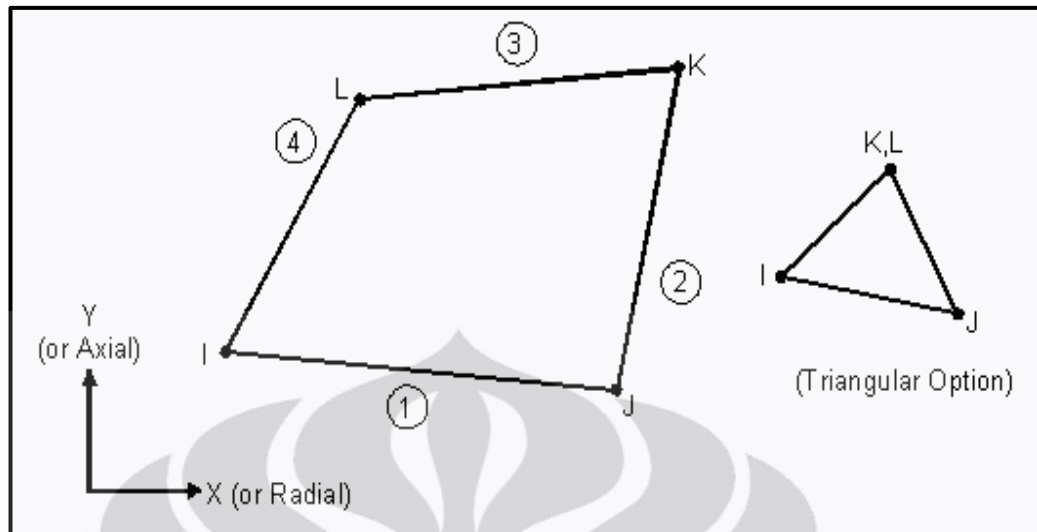
Penelitian ini dilakukan terhadap satu macam bentuk geometri pengelasan. Geometri pengelasan pertama berupa geometri las dengan jenis sambungan *Butt joint*.



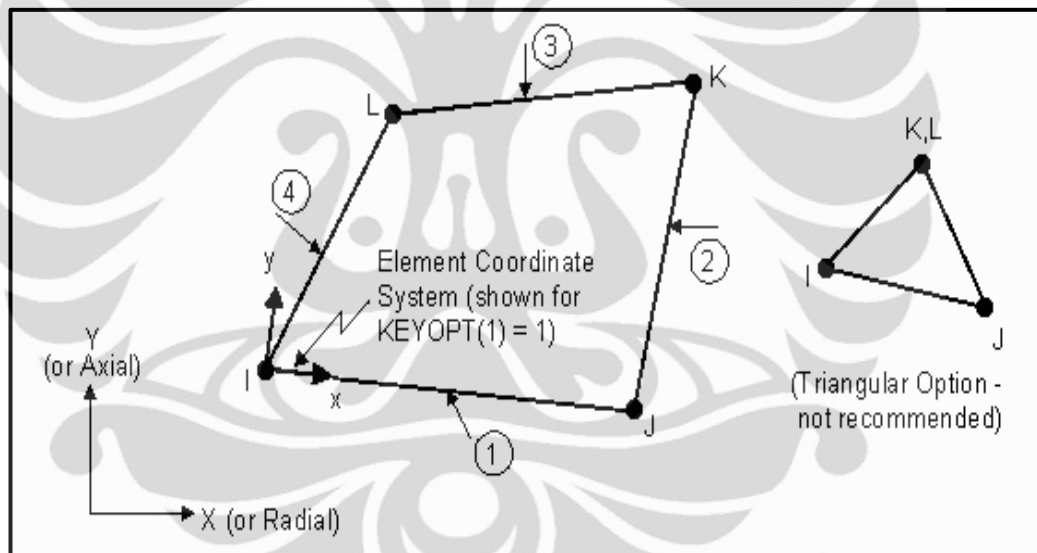
**Gambar 4.4.** Geometri pemodelan pengelasan dan diskritisasi yang telah terbentuk dari meshing program

Geometri las dengan menggunakan jenis sambungan *butt joint* terbagi atas beberapa elemen dan nodes. Elemen dan nodal (203 nodal) yang ada merupakan bentuk dari elemen hingga yang membagi daerah analisa menjadi beberapa bagian yang lebih kecil. Dengan pembentukan elemen ini maka analisa termal dan struktural dapat dilakukan lebih mudah dan mendetail. Pembentukan elemen ini dilakukan dengan metode elemen hingga yaitu dengan jalan proses diskritisasi yang telah tersedia pada program ANSYS 11.0.

Pada pemodelan geometri las menggunakan tipe elemen 4node plane 55 (Gambar 4.5) untuk analisa termal dan 4node plane 42 (Gambar 4.6) untuk analisa struktural. Pada analisa termal pemilihan elemen 4node plane 55 didasarkan pada korelasi antara analisa termal dan derajat kebebasan. Jenis elemen ini memiliki empat buah nodal dan satu derajat kebebasan berupa temperatur. Pada analisa termal, input yang diinginkan ialah temperatur dan dalam perhitungan terdapat konduksi serta konveksi, pemilihan jenis elemen ini juga harus mendekati dengan spisemen aktual yang ada yaitu logam. Dari karakteristik logam yang *isotropic* maka 4node plane 55 sangat sesuai untuk analisa termal. Keuntungan menggunakan 4node plane 55 yaitu jika dilakukan perubahan elemen dari termal menuju struktural maka secara otomatis tipe elemen 4node plane 55 akan berubah menjadi 4node plane 42.



**Gambar 4.5.** Plane 55 2-D Thermal Solid<sup>[20]</sup>



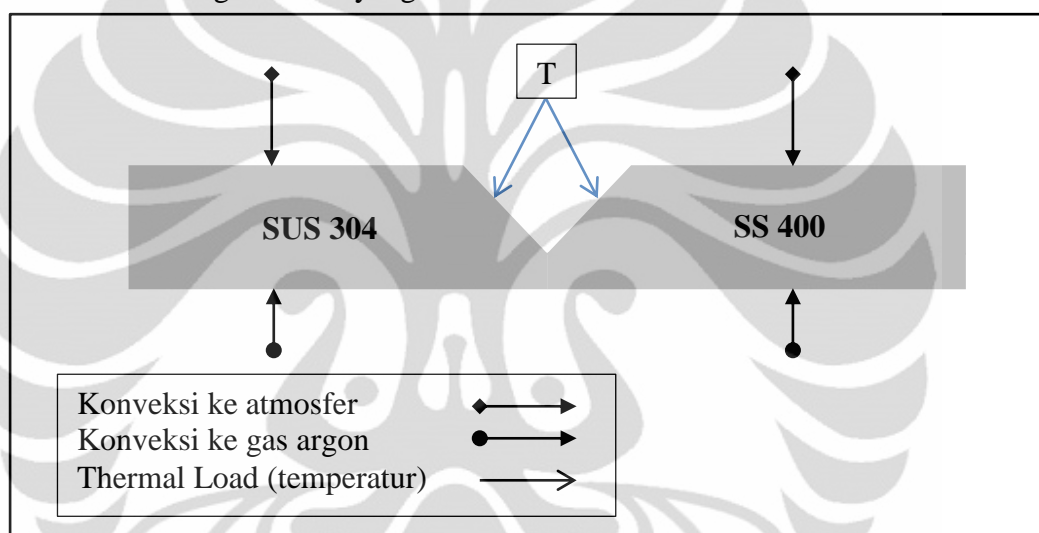
**Gambar 4.6.** Plane 42 2-d structural solid<sup>[20]</sup>

Untuk analisa struktural digunakan tipe elemen 4 node plane 42. Elemen ini mempunyai 4 nodal dan mempunyai dua derajat kebebasan pada arah x dan arah y disetiap nodal. Penggunaan elemen ini juga didasarkan pada analisa struktural output yang diharapkan ialah tegangan dan harus dihubungkan dengan analisa termal yang telah dilakukan dari awal sehingga tipe elemen yang paling sesuai ialah 4node plane 42. Pada analisa struktural ini selain tegangan nilai yang dapat dihitung ialah distorsi

### 4.3 Pembebanan

#### 4.3.1 Pembebanan termal

Pada analisa termal akan didapatkan distribusi temperatur pada seluruh daerah analisa, dengan pembebanan input berupa *heat fluks*. Perhitungan distribusi temperatur akan dilakukan secara otomatis oleh program ANSYS sehingga pemasukkan input harus tepat sesuai dengan empiris perhitungan termal yang ada dalam ANSYS. Perhitungan secara sistem untuk tiap node menggunakan persamaan distribusi temperatur pada benda pejal sehingga propertis material harus sesuai dengan aktual yang ada.



**Gambar 4.7.** *Boudary condition* pada analisa termal

Pembebanan berupa *heat fluks* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.3. Dengan perhitungan ini akan didapatkan suatu *heat fluks* yang bergantung pada arus, kecepatan pengelasan diameter wire dan tegangan yang digunakan yang nantinya akan menghasilkan temperatur pada daerah lasan. Dengan perbedaan parameter yang digunakan maka akan didapatkan *heat fluks* dan *temperatur*.sesuai dengan tabel 4.3.

**Tabel 4.3.** data input energi untuk analisa termal.

Tebal Pelat (mm)	Arus Las (A)	Tegangan (V)	Total Heat Input (kJ)	Temperatur
8	165	11	8,08	2276

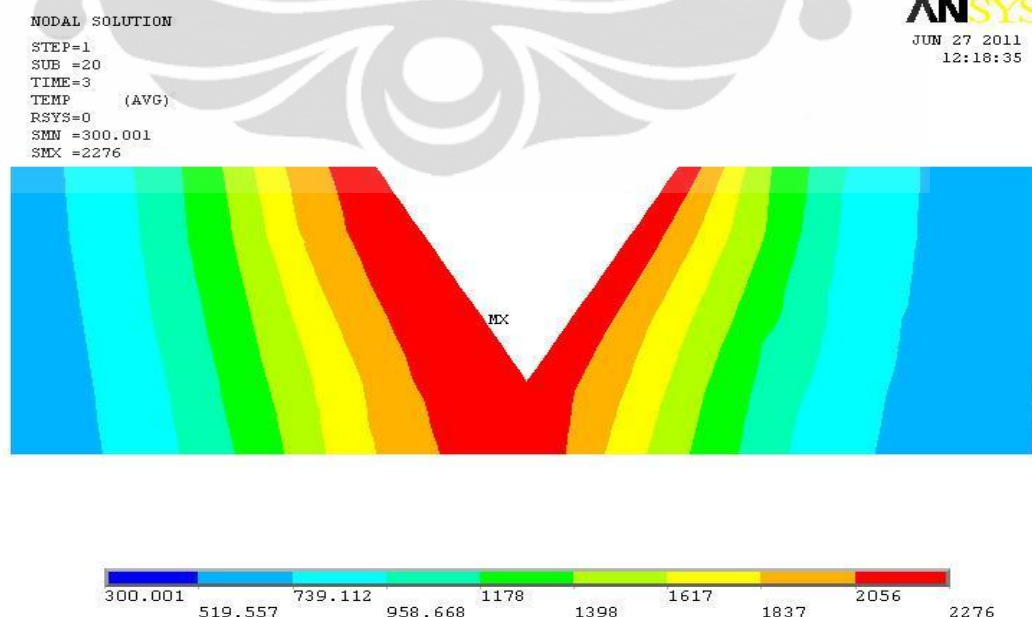
Pembebanan yang diberikan pada analisa termal dilakukan secara transient yaitu dengan memasukkan variabel waktu sehingga akan didapatkan output distribusi temperatur yang berbeda pada waktu yang berbeda untuk tiap node yang ada pada masing-masing elemen daerah analisis.

#### 4.3.2 Pembebanan Struktural

Analisa struktural yang diaplikasikan berasal dari hasil dari analisa termal. Karena material uji atau lasan diberikan *boundary condition* berupa *constraint* pada ujung-ujung material berupa pengkleman pada arah sumbu x dan sumbu y.. Hasil dari analisa struktural ini akan langsung diolah oleh program secara otomatis sehingga tidak diperlukan lagi perhitungan.

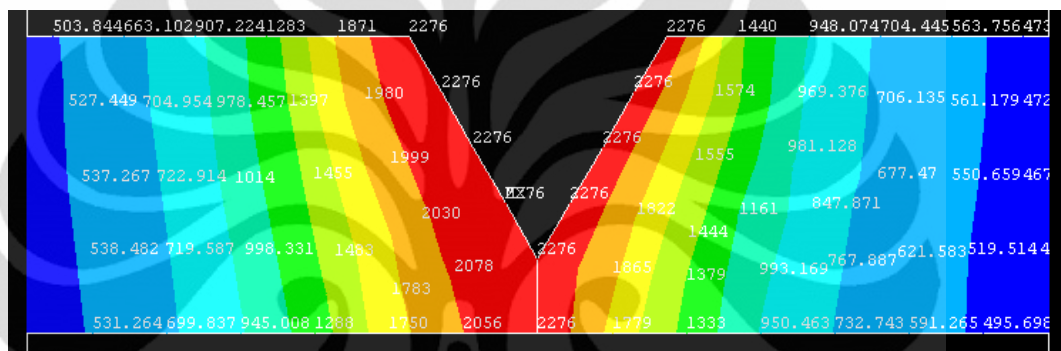
#### 4.4 Hasil Penelitian (Permodelan)

Permodelan untuk analisa termal, pembebanan dilakukan dengan memilih tipe analisis *thermal transient*. Ini bertujuan agar permodelan ini sesuai dengan proses eksperimental. Masukan panas yang berasal dari suhu pada bagian lasan yang menyentuh filler metal yang mencair yang mempunyai suhu sebesar 2276 K. Dan suhu ini seiring waktu akan menurun dikarenakan konveksi, baik pada logam ataupun atmosfer (gambar 4.6).



**Gambar 4.8.** Distribusi temperatur pada saat pemanasan (*butt joint*)

Pada gambaran siklus termal yang ada dapat diketahui bahwa semakin menjauh dari sumber panas (hal ini terdapat pada daerah yang tersentuh secara langsung oleh panas)) temperatur puncaknya akan menurun. Tepat didaerah fussion line didapatkan nilai puncak 2276 K, sedangkan pada daerah 8 mm dari daerah *weld metal* temperatur puncak menurun menjadi 945 K. Temperatur puncak semakin menurun seiring dengan jauhnya dari sumber panas. Untuk distribusi temperatur dapat dilihat pada gambar 4.7 yang menampilkan distribusi temperatur disetiap node.

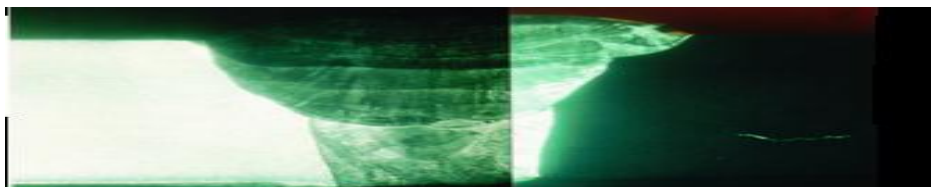


**Gambar 4.9.** Distribusi temperatur disetiap nodal

Pola siklus termalnya yang dapat menginterpretasikan laju pendinginan, pengaruh input panas dan lebar dari weld pool dan HAZ yang akan terbentuk (Gambar 4.2).



(a)



(b)

**Gambar 4.10.** Perkiraan bentuk weld toe selama pengelasan dan tempat terjadinya dilusi. (a) modelling dan (b) eksperimental

## 4.5 Pembahasan

### 4.5.1 Analisa Termal

Dalam tabel temperatur puncak untuk daerah *weld metal* pada *buttjoint* diketahui bahwa untuk setiap titik dalam daerah sumbu las mengalami temperatur puncak pada waktu yang tidak bersamaan dengan besar yang berbeda pula. Temperatur puncak terjadi ketika filler (elektroda) menyentuh titik tersebut dan akan berangsur angsur turun setelah filler berjalan melewati titik tersebut. Hal ini terjadi karena panas yang diterima titik tersebut telah ditransferkan secara konduksi pada daerah disekitarnya dan dilepas pada udara (lingkungan) secara konveksi.

Pada siklus termal yang terbentuk dapat menginterpretasikan laju pendinginan dan pemanasan pada daerah – daerah lasan( *HAZ* dan *base metal* ). Temperatur puncak tertinggi terjadi pada daerah *HAZ* dekat *fussion line* yaitu dengan temperatur puncak diatas 1300 C. Sedangkan untuk daerah *HAZ* semakin jauh dari *fussion line* temperatur puncaknya akan turun dan temperatur puncak minimum dibawah 600 C terdapat pada daerah *base metal*. Penurunan temperatur puncak dari tiap daerah ini dikarenakan penerimaan panas yang tidak merata untuk setiap titik. Pada daerah *fussion line* akan menerima panas yang paling besar dari pencairan filler dan sebagian kecil base metal hal ini karena letak *fussion line* paling dekat dengan daerah pencairan. Panas dari proses pencairan akan terus ditransferkan akan tetapi semakin jauh letak node dari daerah pencairan panas yang diterimapun akan semakin kecil hal ini karena sebagian besar panas telah terserap pada daerah yang lebih dekat. Dari siklus termal ini dapat diperkirakan berapa lebar *fussion zone* dan *HAZ* yang akan terbentuk.

Untuk laju pendinginan dapat dilihat dengan jelas pada siklus termal yang terbentuk bahwa setelah mencapai temperatur puncak laju pendinginan akan berjalan dengan cepat dan pada suatu waktu laju pendinginan akan berjalan sangat lambat. Laju pendinginan setelah temperatur puncak berjalan dengan cepat karena perbedaan temperatur yang sangat besar antara daerah lasan dengan udara sehingga penurunan temperatur secara konveksi akan berjalan sangat cepat, sebaliknya pada saat temperatur daerah lasan hampir sama dengan temperatur

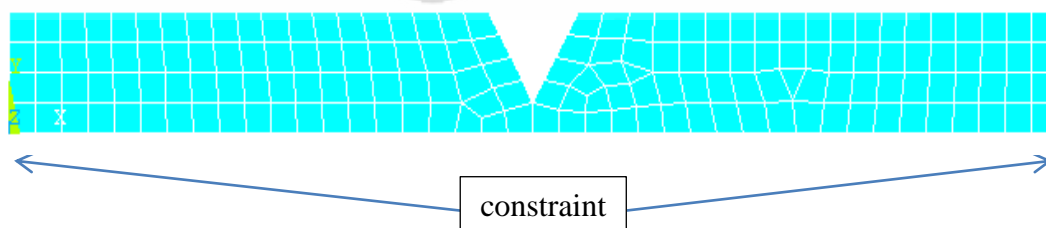
lingkungan yang ada maka laju pendinginan akan sangat lambat, hal ini terjadi pada saat temperatur daerah lasan hampir mencapai temperatur ruang.

Distribusi temperatur pada sisi kanan dan kiri untuk permodelan pengelasan *Butt joint* memiliki sebaran temperatur yang berbeda untuk jarak yang sama dari sumbu las yang ada. Sebaran yang berbeda ini dikarenakan jenis material yang digunakan berbeda dengan sifat-sifat yang berbeda pula. Dan proses penyambungan dilakukan tepat pada bagian tengah–tengah dari gabungan kedua material yang ada.

Dari gambar kontur pemanasan terlihat bahwa penyebaran panas terjadi keseluruhan daerah lasan ketika panas dari *heat fluks* yang ada telah dilepaskan. Hal ini terjadi karena penyebaran panas dalam media terjadi secara konduksi dipengaruhi oleh luasan area dan daya hantar dari material. Semakin luas area geometri yang ada maka transfer panas yang ada pun akan semakin lama sehingga untuk kembali ke temperatur kamar dibutuhkan juga waktu yang relatif lebih lama.

#### 4.5.2 Analisa Struktural

Dengan meletakkan *constraint* berupa *displacement fix* (gambar 4.9) ke segala arah (All DOF) pada tiap ujung spesimen dan perhitungan dilakukan pada saat spesimen telah mencapai temperatur kamar maka didapatkan data distribusi tegangan sisa. Perhitungan tegangan sisa dilakukan pada koordinat  $y = 0$  m dan  $y = 0.08$  m



**Gambar 4.11.** Constraint pada permodelan untuk analisa struktural.

Pada saat spesimen berada pada temperatur yang cukup tinggi, terjadi beberapa pola tegangan yang kompleks. Pada daerah *weld metal* yang memiliki temperatur paling tinggi terjadi tegangan tekan sedangkan yang telah menurun



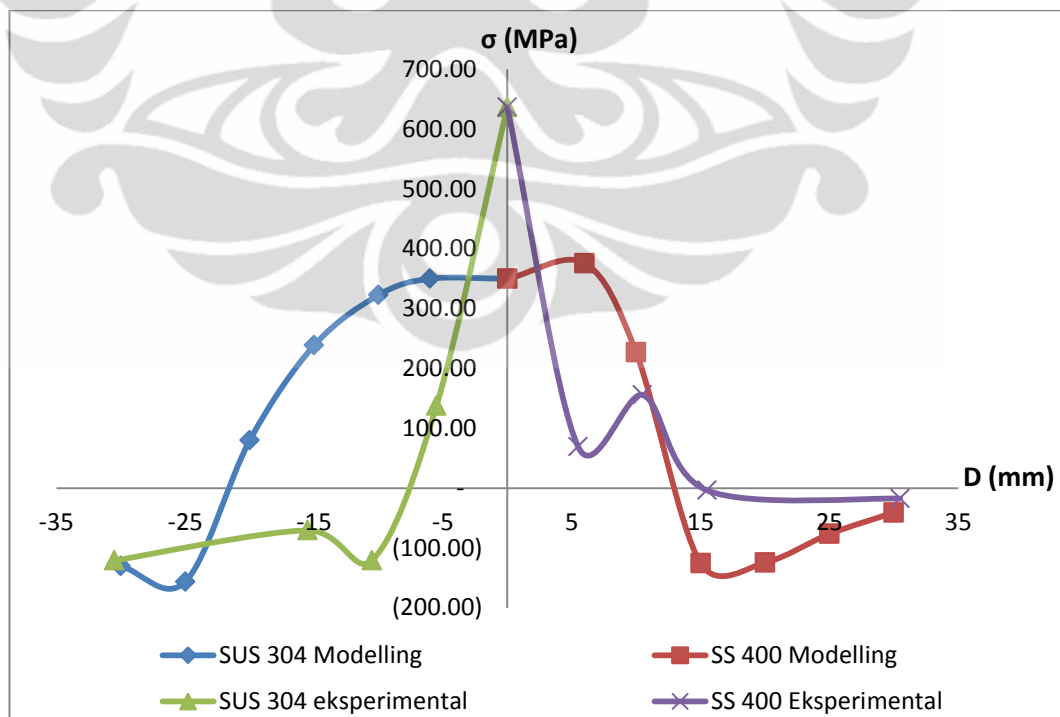
temperaurnya akan terjadi tegangan tarik. Pada *base metal* sudah mulai terjadi tegangan tekan kecuali daerah yang dekat dengan area pengekanan

Pada daerah *weld metal* dan sekitarnya terjadi tegangan tarik dimana tegangan tarik terbesar terjadi pada bagian tengah dari weld metal. Untuk daerah yang jauh dengan *weld metal* dalam hal ini *base metal* terjadi tegangan tekan, dimana semakin jauh dari sumbu las maka akan semakin besar nilai tegangan tekanya. Akan tetapi pada titik yang mengalami pengekanan memiliki tegangan tekan yang lebih rendah. Akibat dari mekanisme ini maka terjadilah distorsi ditandai dengan berubahnya bentuk geometri model (Gambar 4.5)



Gambar 4.12. Distorsi yang terjadi akibat beban termal.

#### 4.5.3 Hasil Keluaran (Tegangan sisa)



Gambar 4.13. Perbandingan Distribusi tegangan sisa hasil Permodelan dan eksperimental

Distribusi tegangan sisa pada permodelan pengelasan *butt joint* memiliki sebaran yang berbeda layaknya distribusi temperatur yang terjadi akibat pengelasan. Faktor yang menyebabkan distribusi tegangan sisa pada permodelan *butt joint* memiliki sebaran yang berbeda adalah karena distribusi temperatur yang terbentuk pada saat proses penyambungan tidak merata karena perbedaan konduktivitas dari material SUS 304 dan SS 400. Sehingga hasil dari analisa struktural didapat tegangan sisa yang tidak seragam (Gambar 4.9).

Dari grafik juga terlihat perbedaan tegangan sisa antara hasil permodelan dan hasil eksperimen yaitu pada jarak 30 mm dari sumber panas, SUS 304 sebesar 130.456 Mpa untuk permodelan dan 120.97 MPa untuk eksperimen. Sedangkan pada SS 400 pada jarak yang sama sebesar 40.84 untuk permodelan dan 17.58 Mpa untuk eksperimen.

Hasil ini bisa saja berbeda yang salah satunya disebabkan oleh Masukan panas yang diberikan tidak seideal yang diberikan oleh proses GTAW. Selain itu, permodelan dengan menggunakan ANSYS 11.0 tidak dapat memprediksi tegangan sisa yang diakibatkan oleh perubahan struktur mikro akibat masukan panas yang diberikan dan unsur-unsur yang terkandung didalam material. Ini merupakan kelemahan dari program ANSYS yang hanya bisa menggabungkan beberapa dari jenis analisa seperti thermal-structural, electric-magnetic, dan electric-thermal, atau sebaliknya.

## BAB V

### KESIMPULAN

Dari penelitian mengenai permodelan ini didapatkan kesimpulan mengenai distribusi panas/temperatur dan tegangan sisa akibat masukan panas yang diberikan selama pengelasan sebagai berikut :

1. Didapatkan perbedaan distribusi temperatur pada SUS 304 dan SS 400. Hal ini dipengaruhi oleh sifat-sifat dari material, terutama dalam hal konduktivitas dan *specific heat*. Untuk distribusi panas, pada titik yang sama pada SUS 304 dan SS 400 yaitu pada 4 mm dari sumber panas didapat suhu pada SUS 304 sebesar 1871 K dan pada SS 400 didapat 1440 K.
2. Untuk distribusi tegangan sisa pada permodelan butt joint didapatkan pola, yaitu pada daerah weld metal mengalami tegangan tarik dan base metal mengalami tegangan tekan. Nilai tegangan pada permodelan pada kedua material tersebut menghasilkan nilai yang berbeda. Ini juga disebabkan oleh distribusi temperatur yang berbeda. Didapatkan tegangan sisa terbesar terletak di bagian yang langsung terkena *thermal load* yaitu sebesar 375.76 Mpa, sedangkan pada SUS 304 yang terkena langsung oleh *thermal load* sebesar 350 Mpa.
3. Pada hasil eksperimental didapatkan tegangan sisa pada baja SUS 304 pada titik di daerah fusion zone, atau sekitar 5.5 mm dari titik tengah *weld pool* sebesar 120.65 Mpa. Sedangkan pada SS 400 didapat 17.58 Mpa.
4. Hasil penelitian menunjukkan perbedaan tegangan sisa antara hasil permodelan dan hasil eksperimental yaitu pada jarak 30 mm dari sumber panas, SUS 304 sebesar 130.456 Mpa untuk permodelan dan 120.97 MPa untuk eksperimental. Sedangkan pada SS 400 pada jarak yang sama sebesar 40.84 untuk permodelan dan 17.58 Mpa untuk eksperimental. Didapat kesalahan sebesar 23 % untuk SUS 304 dan 57% untuk SS 400.
5. Perbedaan hasil dari tegangan sisa pada permodelan dan eksperimental terjadi disebabkan proses-proses yang tidak dapat di prediksi oleh program ANSYS 11.0, seperti proses solidifikasi, struktur mikro, dan pengaruh unsur yang ada didalam material.

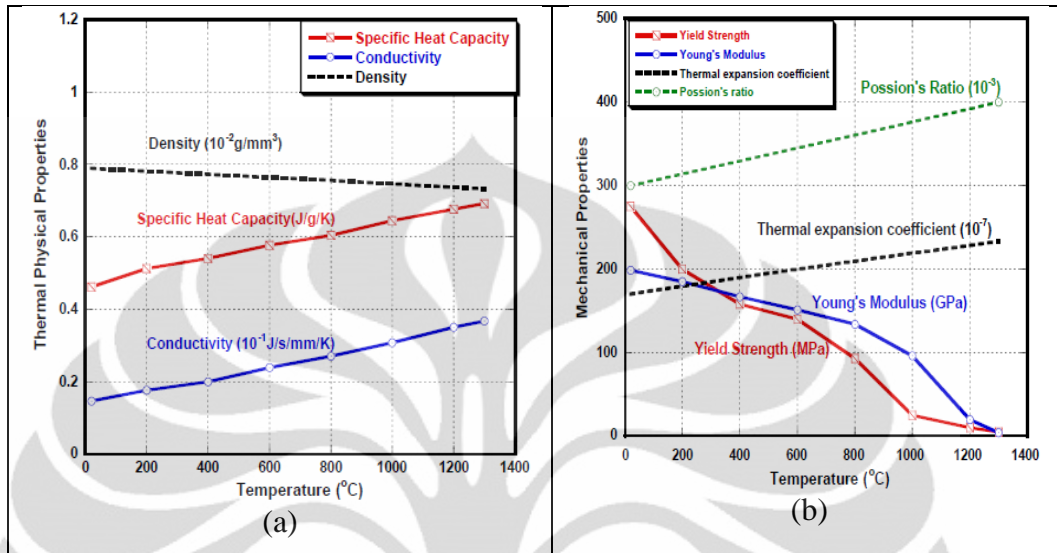
## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Dragi Stamenkovic and Ivana Vasovic, "Finite Element Analysis of Residual Stress in Butt Welding Two Similar Plates". Vol. LIX, No.1, Scientific Technical Review, 2009
- [2] A. Joseph, et al, "Evaluation of residual stresses in dissimilar weld joints". p. 700-705, Elsevier, International Journal of Pressure Vessels and Piping 82, 2005
- [3] Y.C Lin and C. P. Chou, "A New Technique for Reducing The Residual Stress Induced by Welding in Type 304 ss". p. 693-698, Elsevier, Journal of Material Processing Technology 48, 1995
- [4] Metals Handbook, (2001), Vol. 6–Welding, Brazing and Soldering, American Society For Metals International.
- [5] Callister, William D J. 2004. Materials Science and Engineering an Introduction. Singapore ; John Wiley & Sons
- [6] Metals Handbook, (2001), Vol. 1–High-Strength Structural and High-Strength, American Society For Metals International,
- [7] George E. Dieter, Materials Selection and Design, ASM Handbook Volume 20, ASM International, 1997.
- [8] <http://www.atlasmaterials.com.au>, 26 maret 2010
- [9] ASTM A368-95a, Standard Specification for Stainless Steel Wire Strand, United States, 2004
- [10] <http://www.mesit.com/tokyo%20supporting%20material.htm>, 17 Juni 2010
- [11] Welding Handbook Volume 1, eighth Ed, American Welding Society Miami, Florida, USA.

- [12] Kobelco Welding Handbook-Welding Consumables and Process, Kobe Steel, Ltd, Japan, 2008.
- [13] Sindo Kou, 2002. Welding metallurgy 2nd ed. "A Wiley-Interscience publication
- [14] Masubuchi, K, 1980. Analysis of Welded Structure, First Ed.Pergamon Press Ltd. Oxford, England.
- [15] Metals Handbook, (2002), Residual Stress and Deformation of Steel. Materials Park. USA.
- [16] J. Caron, C. Heinze, C. Schwenk, M. Rethmeier, S.S Babu, J. Lippold. Effect of Continuous Cooling Transformation Variations on Numerical Calculation of Welding-Induced Residual Stresses.
- [17] Manthan Malde. Thermomechanical Modeling and Optimization of Friction Stir Welding. Inida. 2009.
- [18] Kudryavtsev, Y.F., Residual stress, in Springer handbook of experimental solid mechanics, Sharpe, W.N., Editor. 2008, New York: Springer. p. 371-388.
- [19] E.Ranjarnodeh, S.Serajzadeh, A.H.Kokabi, A.Fischer. 2010. Effect of welding parameters on residual stresses in dissimilar Joint of stainless steel to carbon steel, P. 3225-3232, Springerlink, Journal of Maerial Processing Technology, (2010)
- [20] ANSYS Manual, "ANSYS Theory and Refference". ANSYS Inc, 2009

## LAMPIRAN 1

### Data Penelitian



Grafik Sifat material Stainless Steel SUS304 bergantung temperatur<sup>[19]</sup>

Didapat hasil konversi gambar ke dalam bentuk tabel.

Tabel Sifat Termal baja SS 400<sup>[18]</sup>

Sifat Termal SS400				
Temperatur	Konduktivitas Termal	Kapasitas panas	Ekspansi Termal	Koef. heat transfer
T	k	cp	$\alpha$	a
Kelvin	W/(m.K)	J/(kg.K)	$\mu \text{ m/m. C}$	(J/mm <sup>2</sup> /s/C)x10 <sup>-5</sup>
300	48,8	435	11,5	1,0005
450	45,5	536	12,7	1,7016
550	43,8	554	13,5	2,1014
600	42,1	573	13,7	2,5608
650	40,4	593	14,2	2,8562
850	33,7	713	14,8	5,1031
900	32,2	761	14,9	6,1205
990	29,7	871	14,9	7,1005
1073	25,2	995	14,9	8,9501
1373	25	1255	14,9	8,9501
1423	25,1	1290	14,9	8,9501
1473	25,2	1380	14,9	8,9501
1523	25,3	1450	14,9	8,9501
1573	25,5	1500	14,9	8,9501
1773	27,5	1675	14,9	8,9501
1873	27,5	1730	14,9	8,9501

Tabel Sifat Termal SUS 304<sup>[19]</sup>

Sifat Termal SUS304				
Temperatur	Kapasitas Panas	Konduktivitas	Expansion thermal	Poison ratio
T	Cp	$\alpha$	$\nu$	$\alpha$
K	J/(kg. K)	$\mu\text{m}/(\text{m}.\text{°C})$	$\times 10^3$	$\mu\text{m}/(\text{m}.\text{°C})$
293	458	16,93	0,300885	16,93
473	510	17,82	0,313274	17,82
673	540	18,88	0,330088	18,88
873	573	19,86	0,346903	19,86
1073	604	20,83	0,361062	20,83
1273	642	21,72	0,376991	21,72
1473	671	22,78	0,393805	22,78
1573	694	23,14	0,402655	23,14
1773	728	24,27	0,416699	24,27
2273	815	26,75	0,456146	26,75



## LAMPIRAN 2

### Formula

Empiris metode elemen hingga untuk menghitung distribusi temperatur dan tegangan sisa pada permodelan pengelasan *butt joint* .

$$\rho c \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \{L\} T \right\} + \{L\}^T \{q\} = \ddot{q}$$

Dimana :

$$\{L\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{Bmatrix}, \{v\} = \begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{Bmatrix}$$

Sehingga persamaan menjadi

$$\rho c \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} + \{v_x + v_y + v_z\} \cdot \begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{Bmatrix} \right\} + \left[ \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial}{\partial z} \right] \cdot [D] \begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{Bmatrix} = \ddot{q}$$

Dimana matrik matrik konduktivitasnya ialah :

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

Sehingga persamaan konduktivitas menjadi



$$\rho c \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} + \{v_x + v_y + v_z\} \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{pmatrix} \right\} + \left\{ \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{zz} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{pmatrix} \right\} = \ddot{q}$$

$$\rho c \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} + \{v_x + v_y + v_z\} \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{pmatrix} \right\} + \left\{ \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{zz} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{pmatrix} \right\} = \ddot{q}$$

$$\rho c \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \ddot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

input :  $K, \rho, c, v, x, y, z$

Output : T

Setelah terjadi konduksi maka distribusi panas pada permukaan akan dilepas keudara secara konveksi, adapun perumusanya ialah sebagai berikut:

$$q = h_c [T_B - T_s]$$

$$- [D] \left\{ \begin{pmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{pmatrix} \right\} = h_c [T_B - T_s]$$

$$[D] \begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{Bmatrix} = h_c [T_s - T_B]$$

Input :  $T$  output perhitungan konduktifitas,  $h_c, T_B$

Output :  $T_s$

Dari output temperature ini maka dapat dihitung distribusi tegangan sisa, yaitu dengan perumusan :

$$\sigma = [K][\varepsilon^{el}]$$

Dimana :

$$[K] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & \frac{-\nu_{xy}}{E_x} & \frac{-\nu_{zx}}{E_x} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{yx}}{E_y} & \frac{1}{E_y} & \frac{-\nu_{yz}}{E_y} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{zx}}{E_z} & \frac{-\nu_{zy}}{E_z} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{zx}} \end{bmatrix}$$

$$[\varepsilon^{el}] = \{\varepsilon\} - \{\varepsilon^{TH}\}$$

$$[\varepsilon^{el}] = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \Delta T \alpha_x^{SE} \\ \Delta T \alpha_y^{SE} \\ \Delta T \alpha_z^{SE} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \longrightarrow \Delta T = T - T_{ref}$$

Sehingga didapatkan tegangan untuk tiap perpindahan ( distorsi ) yaitu :

$$\sigma_x = \frac{E_x}{h} \left[ 1 - (\nu_{yz})^2 \cdot \frac{E_z}{E_y} \right] (\varepsilon_x - \alpha_x \Delta T) + \frac{E_y}{h} (\nu_{xy}) \nu_{xy} \nu_{zx} \frac{E_z}{h} (\varepsilon_y - \alpha_y \Delta T) + \frac{E_z}{h} (\nu_{zx} + \nu_{yz} \cdot \nu_{xy}) (\varepsilon_z - \alpha_z \Delta T)$$

$$\sigma_y = \frac{E_y}{h} \left[ 1 - (\nu_{xz})^2 \cdot \frac{E_z}{E_x} \right] (\varepsilon_y - \alpha_y \Delta T) + \nu_{xy} \nu_{zx} \frac{E_x}{h} (\varepsilon_x - \alpha_x \Delta T) + \frac{E_z}{h} (\nu_{yz} + \nu_{zx} \cdot \nu_{xy}) (\varepsilon_z - \alpha_z \Delta T)$$

$$\sigma_z = \frac{E_z}{h} \left[ 1 - (\nu_{xy})^2 \cdot \frac{E_y}{E_x} \right] (\varepsilon_z - \alpha_z \Delta T) + \frac{E_x}{h} (\nu_{yz} + \nu_{xz} \nu_{xy} \frac{E_y}{E_x}) (\varepsilon_y - \alpha_y \Delta T) + \frac{E_z}{h} (\nu_{zx} + \nu_{yz} \cdot \nu_{xy}) (\varepsilon_x - \alpha_x \Delta T)$$

$$\sigma_{xy} = G_{xy} \cdot \varepsilon_{xy}$$

$$\sigma_{yz} = G_{yz} \cdot \varepsilon_{yz}$$

$$\sigma_{zx} = G_{zx} \cdot \varepsilon_{zx}$$

$$h = 1 - (\nu_{xy})^2 \frac{E_y}{E_x} - (\nu_{yz})^2 \frac{E_z}{E_x} - (\nu_{xz})^2 \frac{E_z}{E_x} - 2\nu_{xy} \nu_{yz} \nu_{zx} \frac{E_z}{E_x}$$

Input : T dari Output analisa termal,  $E, \varepsilon, \alpha, \nu, T_{ref}$

Output :  $\sigma$

### Lampiran 3 Log ANSYS

```

/COM,ANSYS RELEASE 11.0SP1 UP20070830 22:18:39 06/20/2011
/NOPR
/TITLE,
_LSNUM= 1
ANTYPE, 4
TRNOPT,FULL,,DAMP
BFUNIF,TEMP, 300.000000

NSUBST, 20, 100, 20,OFF
KBC, 1
KUSE, 0
TIME, 1.00000000
TREF, 0.00000000
ALPHAD, 0.00000000
BETAD, 0.00000000
DMPRAT, 0.00000000
TIMINT,ON ,THER
TINTP,R8.1, 5.000000000E-03,,
TINTP,R8.1, -1.00000000 , 0.500000000 , -1.00000000 ,,,,
TINTP,R8.1, 5.000000000E-03, 0.00000000

CRPLIM, 0.100000000 , 0
CRPLIM, 0.000000000 , 1
NCNV, 1, 0.00000000 , 0, 0.00000000 , 0.00000000
LNSRCH,ON
NEQIT, 100

ERESX,DEFA
OUTRES, ALL, ALL,
ACEL, 0.00000000 , 0.00000000 , 0.00000000
OMEGA, 0.00000000 , 0.00000000 , 0.00000000, 0
DOMEGA, 0.00000000 , 0.00000000 , 0.00000000
CGLOC, 0.00000000 , 0.00000000 , 0.00000000
CGOMEGA, 0.00000000 , 0.00000000 , 0.00000000
DCGOMG, 0.00000000 , 0.00000000 , 0.00000000
IRLF, 0

D, 22,TEMP, 2276.00000 , 0.00000000
D, 212,TEMP, 2276.00000 , 0.00000000
D, 314,TEMP, 2276.00000 , 0.00000000
SFE, 198, 2,CONV,1,R5.0
800.000000 800.000000 0.00000000 0.00000000
SFE, 198, 2,CONV,2,R5.0
300.000000 300.000000 0.00000000 0.00000000
SFE, 199, 2,CONV,1,R5.0
800.000000 800.000000 0.00000000 0.00000000
SFE, 199, 2,CONV,2,R5.0
300.000000 300.000000 0.00000000 0.00000000
SFE, 200, 2,CONV,1,R5.0
800.000000 800.000000 0.00000000 0.00000000
SFE, 200, 2,CONV,2,R5.0
300.000000 300.000000 0.00000000 0.00000000
SFE, 201, 2,CONV,1,R5.0
800.000000 800.000000 0.00000000 0.00000000
SFE, 201, 2,CONV,2,R5.0
300.000000 300.000000 0.00000000 0.00000000
SFE, 202, 2,CONV,1,R5.0
800.000000 800.000000 0.00000000 0.00000000

```

SFE, 202, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 203, 2,CONV,1,R5.0	800.000000	800.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 203, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 204, 2,CONV,1,R5.0	800.000000	800.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 204, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 205, 2,CONV,1,R5.0	800.000000	800.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 205, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 206, 2,CONV,1,R5.0	800.000000	800.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 206, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 207, 2,CONV,1,R5.0	800.000000	800.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 207, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 208, 2,CONV,1,R5.0	800.000000	800.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 208, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 209, 2,CONV,1,R5.0	800.000000	800.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 209, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 210, 2,CONV,1,R5.0	800.000000	800.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 210, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 211, 2,CONV,1,R5.0	800.000000	800.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 211, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 212, 2,CONV,1,R5.0	800.000000	800.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 212, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 213, 2,CONV,1,R5.0	800.000000	800.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 213, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 214, 2,CONV,1,R5.0	800.000000	800.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 214, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 215, 2,CONV,1,R5.0	800.000000	800.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 215, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 219, 1,CONV,1,R5.0	800.000000	800.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 219, 1,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 220, 2,CONV,1,R5.0	15.00000000	15.00000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 220, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 220, 3,CONV,1,R5.0	800.000000	800.000000	0.00000000	0.00000000

SFE, 220, 3,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 221, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 221, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 222, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 222, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 223, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 223, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 223, 3,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 223, 3,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 224, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 224, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 225, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 225, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 226, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 226, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 227, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 227, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 228, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 228, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 229, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 229, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 230, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 230, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 231, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 231, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 232, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 232, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 233, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 233, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 234, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 234, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 235, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000

SFE, 235, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 236, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 236, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 237, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 237, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 238, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 238, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 239, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 239, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 240, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 240, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 241, 3,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 241, 3,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 281, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 281, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 282, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 282, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 283, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 283, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 284, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 284, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 285, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 285, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 286, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 286, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 287, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 287, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 288, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 288, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 289, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 289, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 290, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000

SFE, 290, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 291, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 291, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 292, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 292, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 293, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 293, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 294, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 294, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 295, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 295, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 296, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 296, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 297, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 297, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 298, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 298, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 298, 3,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 298, 3,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 299, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 299, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 300, 2,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 300, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 301, 2,CONV,1,R5.0	800.000000	800.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 301, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 301, 3,CONV,1,R5.0	15.0000000	15.0000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 301, 3,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 302, 2,CONV,1,R5.0	800.000000	800.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 302, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 303, 2,CONV,1,R5.0	800.000000	800.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 303, 2,CONV,2,R5.0	300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 304, 2,CONV,1,R5.0	800.000000	800.000000	0.00000000	0.00000000



SFE, 304, 2,CONV,2,R5.0			
300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 305, 2,CONV,1,R5.0			
800.000000	800.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 305, 2,CONV,2,R5.0			
300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 306, 2,CONV,1,R5.0			
800.000000	800.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 306, 2,CONV,2,R5.0			
300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 307, 2,CONV,1,R5.0			
800.000000	800.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 307, 2,CONV,2,R5.0			
300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 308, 2,CONV,1,R5.0			
800.000000	800.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 308, 2,CONV,2,R5.0			
300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 309, 2,CONV,1,R5.0			
800.000000	800.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 309, 2,CONV,2,R5.0			
300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 310, 2,CONV,1,R5.0			
800.000000	800.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 310, 2,CONV,2,R5.0			
300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 311, 2,CONV,1,R5.0			
800.000000	800.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 311, 2,CONV,2,R5.0			
300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 312, 2,CONV,1,R5.0			
800.000000	800.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 312, 2,CONV,2,R5.0			
300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 313, 2,CONV,1,R5.0			
800.000000	800.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 313, 2,CONV,2,R5.0			
300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 314, 2,CONV,1,R5.0			
800.000000	800.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 314, 2,CONV,2,R5.0			
300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 315, 2,CONV,1,R5.0			
800.000000	800.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 315, 2,CONV,2,R5.0			
300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 316, 2,CONV,1,R5.0			
800.000000	800.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 316, 2,CONV,2,R5.0			
300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 317, 2,CONV,1,R5.0			
800.000000	800.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 317, 2,CONV,2,R5.0			
300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 318, 2,CONV,1,R5.0			
800.000000	800.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 318, 2,CONV,2,R5.0			
300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 319, 2,CONV,1,R5.0			
800.000000	800.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 319, 2,CONV,2,R5.0			
300.000000	300.000000	0.00000000	0.00000000
SFE, 320, 3,CONV,1,R5.0			
800.000000	800.000000	0.00000000	0.00000000

```
SFE, 320, 3, CONV, 2, R5.0  
300.000000 300.000000 0.00000000 0.00000000  
SFE, 324, 1, CONV, 1, R5.0  
15.00000000 15.00000000 0.00000000 0.00000000  
SFE, 324, 1, CONV, 2, R5.0  
300.000000 300.000000 0.00000000 0.00000000  
/GOPR
```

