



UNIVERSITAS INDONESIA

**KARAKTERISASI TEGANGAN SISA DAN
STRUKTUR MIKRO HASIL LAS DISIMILAR METAL
SUS304 DENGAN JIS 3101 SS400**

TESIS

ABDUL HAFID

0806477384

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI METALURGI DAN MATERIAL
KEKHUSUSAN REKAYASA MATERIAL
DEPOK
JUNI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**KARAKTERISASI TEGANGAN SISA DAN
STRUKTUR MIKRO HASIL LAS DISIMILAR METAL
SUS304 DENGAN JIS 3101 SS400**

TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar magister teknik

ABDUL HAFID

0806477384

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI METALURGI DAN MATERIAL
KEKHUSUSAN REKAYASA MATERIAL
DEPOK**

JUNI 2011

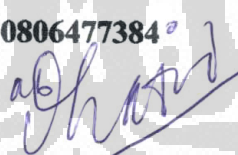
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Abdul Hafid

NPM : 0806477384

Tanda Tangan :



Tanggal : 24 Juni 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :
Nama : Abdul Hafid
NPM : 0806477384
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Tesis : **Karakterisasi Tegangan Sisa dan Struktur Mikro Hasil Las Disimilar Metal SUS304 Dengan JIS 3101 SS400**

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

DEWAN PENGUJI

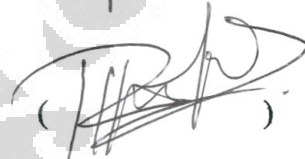
Pembimbing 1 : Dr. Ir. Winarto, M.Sc

()

Pembimbing 2 : Badrul Munir, Ph.D

()

Penguji 1 : Dr. Ir. Roziq Himawan, M.Eng

()

Penguji 2 : Dr. Ir. Muhammad Anis, M.Met

()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 24 Juni 2011

Universitas Indonesia

KATA PENGANTAR

Assalamu Alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Dengan mengucapkan syukur Alhamdulillah ke hadirat Allah SWT akhirnya tesis ini dapat terselesaikan. Tesis ini dibuat untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa untuk dapat terselesainya tesis ini saya telah dibantu oleh berbagai pihak oleh karena itu pada kesempatan ini saya menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Dr. Ir. Winarto, MSc. selaku pembimbing I yang telah membantu mengarahkan penulisan tesis ini.
2. Badrul Munir, PhD selaku pembimbing II
3. Dr. Setiyanto, M.Sc, selaku kepala PTRKN-BATAN yang telah memberikan izin untuk penggunaan peralatan di PTRKN BATAN
4. Ir. Iman Kuntoro, selaku kepala PTBIN-BATAN yang telah memberikan izin penggunaan fasilitas difraksi neutron DN1-M untuk pengukuran tegangan sisa.
5. Ir. Rifai Muslih yang telah banyak membantu saya dalam pengoperasian alat DN1-M serta proses pengambilan dan pengolahan data.
6. Ir. Darmayadi, MT. selaku General Manager PT. Danwoo Steel yang telah memberi bantuan berupa material JIS3101 SS400 untuk sampel.
7. Arya dan Benny yang telah membantu saya dalam proses pembuatan sampel di BLKI Tangerang dan proses pengambilan data serta proses pengukuran tegangan sisa di laboratorium PTBIN-BATAN
8. Anni Rahmat, ST yang telah banyak membantu saya dalam pembuatan simulasi pengelasan.
9. Istri dan anak-anakku yang telah memberikan semangat dan bantuan do'a selama penelitian dan penulisan tesis ini.
10. Dan berbagai pihak lainnya yang tidak dapat saya sebutkan satu per satu.

Semoga semua bantuan yang diberikan mendapat balasan rahmat dan karunia di sisi Allah SWT. Semoga tesis ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu. Amin.

Depok, 24 Juni 2011

Penulis

Universitas Indonesia

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

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

Nama : Abdul Hafid
NPM : 0806477384
Program Studi : Rekayasa Material
Departemen : Teknik Metalurgi Material
Fakultas : Teknik Universitas Indonesia
Jenis karya : Tesis

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:

**KARAKTERISASI TEGANGAN SISA DAN STRUKTUR MIKRO
HASIL LAS DISIMILAR METAL SUS304 DENGAN JIS 3101 SS400**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 24 Juni 2011

Yang menyatakan



Abdul Hafid

Universitas Indonesia

ABSTRAK

Nama : Abdul Hafid

Program Studi : Departemen Metalurgi dan Material

Judul :

KARAKTERISASI TEGANGAN SISIA DAN STRUKTUR MIKRO HASIL LAS DISIMILAR METAL SUS304 DENGAN JIS 3101 SS400

Tegangan sisa merupakan salah satu penyebab terjadinya retak. Pada instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN), karakterisasi tegangan sisa sangat penting karena banyak komponen PLTN dibentuk dengan sambungan las dari dua logam berbeda. Hal yang sama juga ditemukan pada kapal laut dan gerbong kereta.

Tesis ini bertujuan untuk melakukan karakterisasi pada sambungan dua logam berbeda (*disimilar metal*). Dengan mengetahui karakteristik sambungan *dissimilar metal* maka dapat dipikirkan upaya meminimalisasi terjadinya retak. Sebagai sampel dalam penelitian ini digunakan bahan SUS304 dan JIS 3101 SS400 yang dilas dengan metode GTAW atau TIG menggunakan filler AWS A5.22 DW 309L dengan sambungan V tunggal. Sampel terdiri dari 3 jenis dengan ketebalan berbeda masing-masing 8 mm, 10 mm dan 12 mm. Dalam susunan pengelasannya, sampel ditahan dengan menggunakan *tack weld* di empat posisi yang sama. Hasil las menunjukkan distorsi yang terjadi adalah $1,29^\circ$ pada pelat tebal 8 mm, kemudian $1,93^\circ$ pada pelat tebal 10 mm dan $3,22^\circ$ pada pelat tebal 12 mm.

Pengukuran tegangan sisa dilakukan dengan menggunakan alat difraksi neutron DN1-M milik PTBIN BATAN. Tiga posisi yang menjadi target pengukuran, yaitu daerah las, daerah HAZ dan logam induk. Pada daerah HAZ SUS304 pelat dengan tebal 12 mm nilai tegangan sisa sebesar 17 MPa arah transversal, 3 MPa arah axial dan -4 MPa arah normal merupakan nilai tegangan sisa terbesar dari ketiga sampel. Pada daerah las diperoleh tegangan sisa arah tekan dengan nilai -16 MPa arah transversal dan axial serta -3 MPa dalam arah normal yang juga merupakan nilai tertinggi di daerah las terletak pada sampel dengan tebal 12 mm. Pada daerah HAZ SS400 tegangan sisa tekan terjadi pada sampel dengan tebal 12 mm yaitu -16 MPa arah transversal, -47 MPa arah axial dan -35 MPa arah normal.

Pada penelitian ini juga dilakukan pengujian metalografi untuk memperoleh gambar struktur makro dan struktur mikro dari hasil las. Hasil analisis struktur makro menunjukkan dilusi yang terjadi sebesar 25 % dan dengan menggunakan diagram Schaeffler diperoleh delta ferit yang terbentuk sebesar 10%. Analisis struktur mikro menunjukkan bahwa pada daerah las tidak terbentuk martensit dan pada daerah HAZ SUS304 terjadi korosi batas butir yang ditunjukkan dengan terbentuknya endapan krom karbida pada batas butir logam. Hal ini mengakibatkan besar tegangan sisa pada daerah HAZ SUS304 menjadi lebih tinggi dibanding daerah las. Hasil ini juga diperkuat dengan hasil uji kekerasan makro yang menunjukkan bahwa daerah HAZ SUS304 lebih keras dibanding daerah las sedangkan pada logam SS400 kenaikan angka kekerasan relatif kecil antara 8 hingga 12 HV.

Hasil penelitian dengan simulasi menunjukkan bahwa distribusi temperatur dalam arah transversal pada permukaan pelat memperlihatkan bahwa kehilangan panas konduksi pada pelat dengan tebal 12 mm sangat besar. Ini menyebabkan pada sampel tersebut membutuhkan temperatur las yang lebih tinggi. Akibatnya jumlah masukan panas menjadi jauh lebih besar. Karena masukan panas yang lebih besar dengan perpindahan panas konduksi yang lebih luas maka tegangan sisa menjadi lebih tinggi.

Kata kunci: Tegangan sisa, Struktur mikro, Las disimilar metal, SUS304 dan SS400

Universitas Indonesia

ABSTRACT

Name : Abdul Hafid

Study Program : Metalurgi dan Material Departement

Title :

CHARACTERIZING RESIDUAL STRESS AND MICROSTRUCTURE OF WELDING RESULTS OF DISSIMILAR METAL SUS304 WITH JIS3101 SS400

Residual stress is one of the causes of crack. For a nuclear power plant, characterization of residual stress is very important since there are many joints welded of two different metals. Similar phenomena are also often found in ship and train.

This thesis is made available in order to describe characterization of joint of two different metals (dissimilar metal). By knowing the characteristics of dissimilar metal joint, some efforts can be considered to minimize crack from occurring. This research uses SUS304 and JIS 3101 SS400 as sample welded by technique of GTAW or TIG using filler AWS A5.22 DW 309L with single V joint. The samples consist of three types with different thickness: 8 mm, 10 mm, and 12 mm. During welding, the samples were held by tack weld at four same positions. The results showed that distortion of 1.29° , 1.93° , and 3.22° occurred on the plate of 8 mm, 10 mm, and 12 mm, respectively.

The measurement of residual stress was carried out by using a neutron diffraction device DN1-M of PTBIN BATAN. Three areas that became the target of measurement were weld area, HAZ, and main metal. On the area of HAZ of SUS304 plate of 12 mm in thickness, the residual stress is 17 MPa in transversal direction, 3 MPa in axial direction, and -4MPa in normal direction, which are the highest residual stress of the three samples. On the weld area, the residual stress in the pressing direction was -16 MPa in transversal and axial direction and -3 MPa in normal direction, which was the highest value of weld areas of the 12-mm sample. For the HAZ SS400 areas, the residual stress occurred on the 12-mm sample, as follows: -16 MPa in transversal direction, -47 MPa in axial direction, and -35 in normal direction.

This research also included metallographic examination to obtain the visualization of macro structure and micro structure of welding results. The results of macro structure analysis showed that dilution occurred as high as 25% and, by using Schaeffler diagram, ferrite delta formed as high as 10%. The analysis of micro structure indicated that in the weld areas, martensit did not occur and in the area of HAZ SUS304, corrosion of grain boundary occurred as showed by the presence of chrome carbide precipitated on grain boundary. This phenomenon causes residual stress in the area of HAZ SUS304 is higher than that in other area. This result is also supported by the results of macro hardness test, which shows that the area of HAZ SS304 is harder than that of other weld areas, meanwhile the increase of hardness value is relatively small, only between 8 and 12 HV.

The results of simulation indicate that, by examining temperature distribution in transversal direction of plate surface, the 12-mm plate experiences very much losses of conduction heat. This makes the corresponding sample require higher weld temperature. Consequently, the amount of heat input becomes much higher. Because heat input is much higher and conductive heat transfer is much larger, the residual stress becomes much higher.

Key words: residual stress, micro structure, dissimilar metal welding, SUS304, and SS400.

Universitas Indonesia

DAFTAR ISI

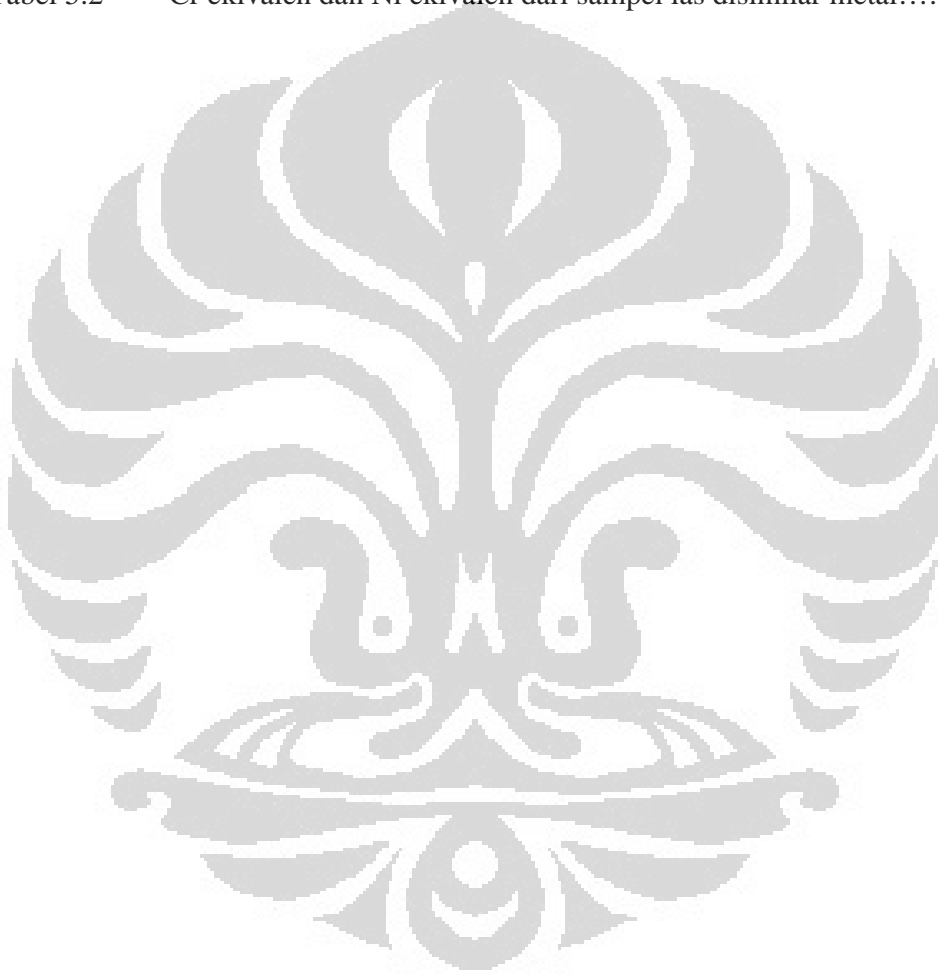
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	v
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR SIMBOL.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvii
BAB I.....	
PENDAHULUAN	1
1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 PERUMUSAN MASALAH	3
1.3 TUJUAN PENELITIAN.....	3
1.4 BATASAN MASALAH.....	4
1.5 RUANG LINGKUP.....	4
BAB II.....	
TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 PENGELASAN DISIMILAR METAL.....	7
2.2 DISTRIBUSI PANAS PADA LAS	8
2.3 DISTORSI PADA HASIL LAS	8
2.4 TEGANGAN SISA (<i>RESIDUAL STRESS</i>)	9
2.5 PENGUKURAN TEGANGAN SISA DENGAN DENGAN DIFRAKSI NEUTRON	11
2.6 INDEKS MILLER	14
2.7 DILUSI PADA HASIL LAS	17
2.8 SIMULASI DENGAN METODE ELEMEN HINGGA	18
BAB III	
METODOLOGI PENELITIAN.....	25

3.1	DIAGRAM ALIR PENELITIAN SECARA EKSPERIMENTAL	25
3.2	DIAGRAM ALIR PENELITIAN DENGAN PEMODELAN	26
3.3	PERSIAPAN	27
3.4	PENGELASAN	28
3.5	PENGUKURAN TEGANGAN SISA DENGAN DIFRAKSI NEUTRON	30
3.6	PENGUJIAN METALOGRAFI	34
3.7	PENGUJIAN KEKERASAN	35
3.8	PENELITIAN DENGAN SIMULASI	35
BAB IV		
DATA HASIL PENELITIAN		38
4.1	PENELITIAN DENGAN EKSPERIMENTAL.....	38
4.2	PENELITIAN DENGAN SIMULASI.....	54
BAB V		
PEMBAHASAN HASIL PENELITIAN.....		58
5.1	ANALISIS HASIL EKSPERIMENTAL	58
5.2	ANALISIS HASIL SIMULASI	71
BAB VI.....		
KESIMPULAN.....		74
DAFTAR PUSTAKA		76

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Sifat mekanik dan komposisi kimia SUS304 dan SS400.....	7
Tabel 2.2	Nilai faktor efisiensi pada beberapa proses pengelasan yang berbeda.....	8
Tabel 3.1	Komposisi kimia JIS3101 SS400.....	27
Tabel 3.2	Komposisi kimia JIS SUS304.....	27
Tabel 3.3	Komposisi kimia kawat las AWS A5.22 DW-309L.....	28
Tabel 3.4	Ukuran <i>slit</i> dan posisi pengukuran sampel pada setiap jenis pengukuran.....	30
Tabel 3.5	Pengaturan sampel yang biasa digunakan untuk jarak d menggunakan neutron <i>monochromator</i>	32
Tabel 4.1	Hasil perhitungan masukan panas las pada tiap-tiap sampel.....	38
Tabel 4.2	Distorsi pada sampel yang diukur berdasarkan perubahan sudut.....	39
Tabel 4.3	Pengukuran panjang gelombang neutron dengan <i>slit</i> 3x10; 3x10 mm.....	40
Tabel 4.4	Pengukuran panjang gelombang neutron dengan <i>slit</i> 3x3; 3x10 mm.....	40
Tabel 4.5	Perhitungan jarak bidang d_{0220} , d_{220} , regangan SUS304, regangan dan tegangan sisa SUS 304 sampel 1.....	41
Tabel 4.6	Perhitungan jarak bidang d_{0200} dan d_{200} , regangan SS400 dan tegangan sisa SS400 sampel 1 tebal 8 mm.....	42
Tabel 4.7	Perhitungan jarak d_{0220} , d_{220} , regangan SUS304 dan tegangan sisa SUS 304 pada sampel 2 tebal 10 mm.....	42
Tabel 4.8	Perhitungan jarak bidang d_{0200} , d_{200} , regangan SS400 dan tegangan sisa SS400 pada sampel 2 tebal 10 mm.....	43
Tabel 4.9	Hasil perhitungan jarak bidang d_{0220} , d_{220} , regangan SUS304 dan tegangan sisa SUS304 pada sampel 3 tebal 12 mm.....	43
Tabel 4.10	Hasil perhitungan jarak bidang d_{0200} , d_{200} , regangan SS400 dan tegangan sisa SS400 pada sampel 3 tebal 12 mm.....	44
Tabel 4.11	Hasil pengujian kekerasan makro.....	45

Tabel 4.12	Sifat-sifat fisik material SUS304 pada setiap perubahan Temperatur.....	54
Tabel 4.13	Sifat-sifat fisik material SS400 pada setiap perubahan Temperatur.....	55
Tabel 4.14	Distribusi panas las pada permukaan atas (<i>top</i>) sampel 1.....	56
Tabel 5.1	Luas daerah A, B dan C untuk perhitungan dilusi hasil las.....	69
Tabel 5.2	Cr ekivalen dan Ni ekivalen dari sampel las disimilar metal.....	69



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Beberapa jenis perubahan bentuk hasil las buntu (<i>butt</i>) pada plat.....	9
Gambar 2.2	Contoh dari keberadaan tegangan sisa pada suatu benda.....	9
Gambar 2.3	Skema perubahan temperatur dan tegangan termal selama pengelasan.....	10
Gambar 2.4	Ilustrasi skematik dari geometri hamburan (<i>scatter</i>) Bragg.....	11
Gambar 2.5	Diagram skematik peralatan difraktometer neutron DN1-M.....	12
Gambar 2.6	Bentuk distribusi Gauss hasil pengukuran distribusi neutron.....	13
Gambar 2.7	Indeks miller Bidang (112) memotong ketiga sumbu pada jarak satuan 1,1 dan $\frac{1}{2}$	15
Gambar 2.8	Pola difraksi neutron dari cuplikan.....	15
Gambar 2.9	Ilustrasi indeks Miller bidang (111) hingga (400) mengacu pada hasil identifikasi hamburan neutron.....	16
Gambar 2.10	Dilusi 25 % pada <i>root</i> sambungan V ditunjukkan pada besar bagian menonjol pada daerah <i>root</i> dapat melebar ke samping secara merata kanan dan kiri.....	17
Gambar 2.11	Pembagian daerah las untuk perhitungan dilusi hasil las.....	18
Gambar 2.12	Sifat fisik SUS304 berdasarkan hasil pengujian.....	22
Gambar 2.13	Sifat-sifat fisik baja lunak SS400 atau yang setara berdasarkan hasil pengujian.....	22
Gambar 3.1	Prosedur penelitian secara eksperimental.....	25
Gambar 3.2	Garis besar prosedur penelitian dengan pemodelan.....	26
Gambar 3.3	Bentuk penampang sampel las (a). SS400 (b) SUS304 (c) SS400 dan SUS304 panjang alur las 150 mm dengan panjang total 300 mm siap di las.....	27
Gambar 3.4	Susunan sampel dengan <i>tack weld</i> dan proses pengelasan.....	29
Gambar 3.5	Sampel dengan titik-titik yang akan diukur.....	31
Gambar 3.6	Tata letak sampel, pengukuran arah transversal pada meja sampel.....	32
Gambar 3.7	Tiga posisi arah pengukuran titik-titik sampel pada alat DN1-M.....	33
Gambar 3.8	Pola hamburan standar Si serbuk NBS640b.....	33

Gambar 3.9	Urutan simulasi pengelasan untuk pembuatan model sampel.....	36
Gambar 4.1	Struktur makro las dan HAZ sampel 1 tebal 8 mm.....	46
Gambar 4.2	Struktur makro las dan HAZ sampel 2 tebal 10 mm.....	46
Gambar 4.3	Struktur makro las dan HAZ sampel 3 tebal 12 mm.....	46
Gambar 4.4	Struktur mikro logam induk SUS304 tebal 8 mm.....	47
Gambar 4.5	Korosi batas butir pada HAZ sampel SUS304 tebal 8mm.....	47
Gambar 4.6	Batas las dan HAZ SUS304 tebal pelat 8 mm	47
Gambar 4.7	Struktur mikro pada inti las SUS304 tebal 8 mm	48
Gambar 4.8	Struktur mikro logam induk SUS304 tebal 10 mm	48
Gambar 4.9	Korosi batas butir pada HAZ sampel SUS304 tebal 10 mm	48
Gambar 4.10	Batas las dan HAZ SUS304 tebal pelat 10 mm	49
Gambar 4.11	Struktur mikro pada inti las SUS304 tebal 10 mm	49
Gambar 4.12	Struktur mikro logam induk SUS304 tebal 12 mm	49
Gambar 4.13	Korosi batas butir pada HAZ sampel SUS304 tebal 12 mm	50
Gambar 4.14	Batas las dan HAZ SUS304 tebal pelat 12 mm	50
Gambar 4.15	Struktur mikro pada inti las SUS304 tebal 12 mm	50
Gambar 4.16	Struktur mikro logam induk SS400 tebal 8 mm.....	51
Gambar 4.17	Batas tumbuh butir baru pada SS400 tebal 8 mm	51
Gambar 4.18	Struktur mikro batas las dan HAZ SS400 tebal 8 mm	51
Gambar 4.19	Struktur mikro logam induk SS400 tebal 10 mm.....	52
Gambar 4.20	Batas tumbuh butir baru pada SS400 tebal 10 mm	52
Gambar 4.21	Struktur mikro batas las dan HAZ SS400 tebal 10 mm	52
Gambar 4.22	Struktur mikro logam induk SS400 tebal 12 mm	53
Gambar 4.23	Batas tumbuh butir baru pada SS400 tebal 12 mm	53
Gambar 4.24	Struktur mikro batas las dan HAZ SS400 tebal 12 mm	53
Gambar 4.25	Akumulasi panas las yang besar mulai dari tengah hingga akhir.....	57
Gambar 5.1	Grafik korelasi masukan panas terhadap tebal pelat.....	58

Gambar 5.2	Pengaruh kenaikan masukan panas terhadap peningkatan derajat distorsi.....	59
Gambar 5.3	Tegangan sisa las TIG antara SUS304 dan SS400 dengan tebal 8 mm.....	60
Gambar 5.4	Tegangan sisa las TIG antara SUS304 dan SS400 dengan tebal 10 mm.....	62
Gambar 5.5	Tegangan sisa las TIG antara SUS304 dan SS400 dengan tebal 12 mm.....	64
Gambar 5.6	Tegangan sisa las TIG arah transversal antara SUS304 dan SS400 dengan tebal 8 mm, 10 mm dan 12 mm.....	66
Gambar 5.7	Tegangan sisa las TIG arah normal antara SUS304 dan SS400 dengan tebal 8 mm, 10 mm dan 12 mm.....	66
Gambar 5.8	Tegangan sisa las TIG arah axial antara SUS304 dan SS400 dengan tebal 8 mm, 10 mm dan 12 mm.....	67
Gambar 5.9	Hasil uji kekerasan Vickers makro pengelasan disimilar SUS304 dan SS400 dengan tebal 8 mm, 10 mm dan 12 mm.....	68
Gambar 5.10	Tiga bagian penting untuk analisis dilusi las A, B dan C.....	69
Gambar 5.11	Hasil 10% delta ferit untuk dilusi 25% hasil las SUS304 dengan SS400....	70
Gambar 5.12	Distribusi temperatur las pada bagian permukaan atas sampel 1, jarak 84 mm arah axial.....	71
Gambar 5.13	Distribusi temperatur las pada permukaan atas sampel 3, jarak 84 mm arah axial.....	72
Gambar 5.14	Perubahan temperatur las pada material pada daerah (a) HAZ SS400, (b) Inti las dan (c) HAZ SUS304 pada Sampel 1.....	73

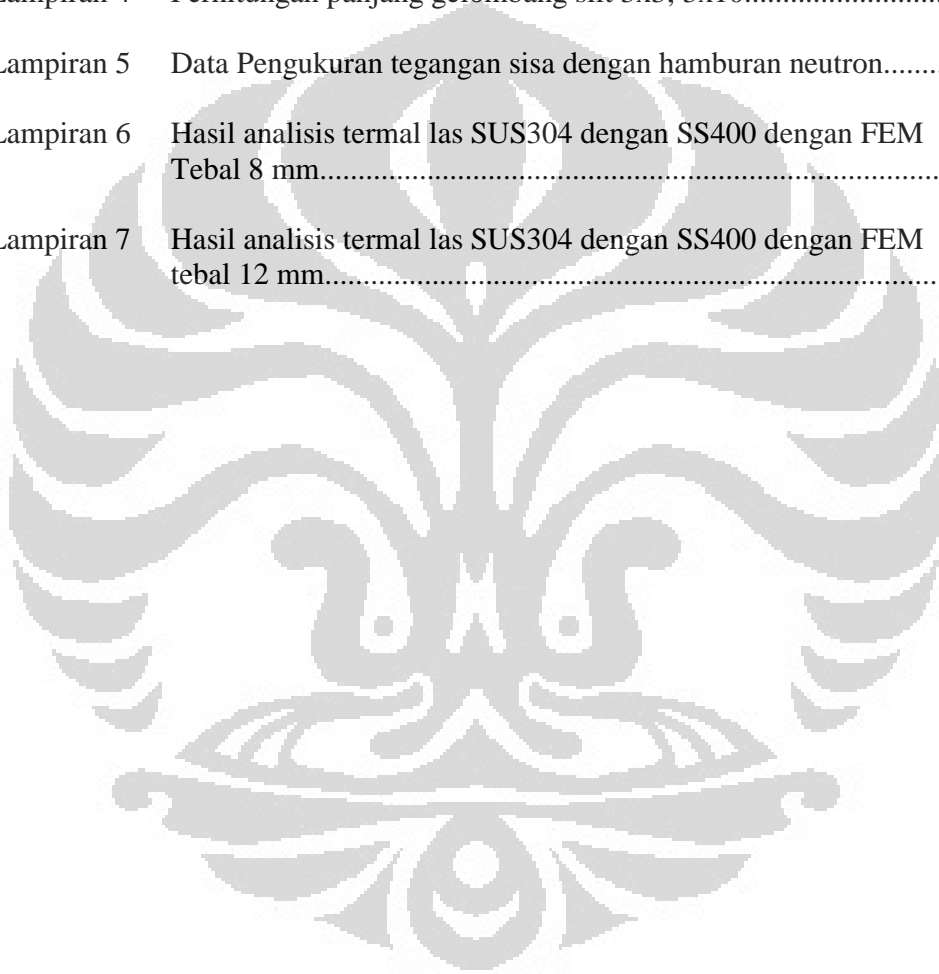
DAFTAR SIMBOL

A	Amplitudo	
Ar	Simbol kimia unsur argon	
C	Simbol kimia unsur karbon	
Cr	Simbol kimia unsur krom	
c	<i>Specific heat</i>	$\frac{J}{kg.K}$
c_p	Konduktivitas panas	
d	Jarak bidang kristal.....	μm
d_0	Jarak bidang kristal yang tidak mendapat pengaruh panas las.....	μm
d_{hkl}	Jarak antar bidang dengan indeks Miller h, k, l.....	mm
d_{200}	Jarak antar bidang dengan indeks Miller 2,0,0.....	mm
d_{220}	Jarak antar bidang dengan indeks Miller 2,2,0.....	mm
E_{hkl}	Modulus young dengan indeks Miller	
h	Entalpi.....	kJ
H, Q	Masukan panas	kJ/mm
HV	<i>Hard Vickers</i>	
HAZ	<i>Heat Affected Zone</i>	
I	Kuat arus listrik.....	Amper
Mn	Simbol kimia unsur mangan	
Ni	Simbol kimia unsur nikel	
Δl	Perubahan pertambahan panjang.....	mm
l_0	Panjang mula-mula.....	mm
v	Kecepatan.....	mm/det
V	Tegangan listrik.....	Volt

T	Temperature.....	K, °C
Q_G	Debit perubahan temperatur.....	$\frac{W}{m^3}$
SS	<i>Structural Steel</i>	
SUS	<i>Stainless Unidentified Steel</i>	
w	Lebar tengah kurva yang mengindikasikan keakuratan nilai cacahan pada distribusi gauss	
Y	Intensitas	
Y_0	Cacah latar (<i>background</i>)	
α	Ekspansi panas.....	$\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$
ϵ_{hkl}	Regangan dengan indeks Miller	
λ	Panjang gelombang	Amstrong
θ_{hkl}	Setengah dari sudut hamburan neutron	
σ	Tegangan.....	MPa
ν_{hkl}	Poisson rasio dengan indeks Miller	
ρ	Massa jenis.....	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	<i>Welding Procedure Specification</i>	79
Lampiran 2	Mill certification JIS 3101 SS400.....	80
Lampiran 3	Perhitungan panjang gelombang slit 3x10; 3x10.....	81
Lampiran 4	Perhitungan panjang gelombang slit 3x3; 3x10.....	82
Lampiran 5	Data Pengukuran tegangan sisa dengan hamburan neutron.....	86
Lampiran 6	Hasil analisis termal las SUS304 dengan SS400 dengan FEM Tebal 8 mm.....	91
Lampiran 7	Hasil analisis termal las SUS304 dengan SS400 dengan FEM tebal 12 mm.....	93



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG

Pada dasarnya ada tiga hal penyebab terjadinya retak (*crack*) pada pengelasan, yaitu faktor material, faktor lingkungan dan tegangan sisa. Pada instalasi nuklir permasalahan retak banyak ditemukan utamanya pada sambungan las antara dua atau lebih logam yang berbeda (*dissimilar metal weld = las disimilar metal*). Berdasarkan laporan hasil pemeriksaan W. Mayinger, K.J. Metzner pada SMIRT-Conference 2001 di Jerman – bahwa pada sambungan las pipa PLTN jenis reaktor air (*Light Water Reaktor, LWR*) di Jerman antara material 22 NiMoCr 37~ASTM 508 Cl.2 dengan *Stainless Steel* ditemukan terjadi retak setelah proses penggerindaan pada waktu fabrikasi ^[1]. Demikian juga dengan hasil penelitian A. Joseph dan Sanjai K. Ray di India pada tahun 2005 yang menemukan kegagalan pada daerah HAZ akibat retak pada sambungan las berbeda antara 2.25 Cr-1Mo *ferritic steel* dengan AISI type 316 pada banyak sambungan pipa dan komponen reaktor (*Fast Breeder Test Reactor (FBTR)*) akibat tegangan sisa ^[2], dan masih banyak kejadian retak lainnya pada pengelasan *disimilar metal* di instalasi PLTN. Penyambungan dua logam berbeda dengan las juga banyak terdapat pada industri kereta api maupun transportasi laut dalam hal ini adalah kapal laut. Pada penelitian ini, karakterisasi pengelasan dengan dua logam berbeda dilakukan menggunakan SUS304 dan baja karbon JIS3101-SS400. Kedua material ini dipilih untuk pendekatan terhadap material pada PLTN.

Pada proses pengelasan, panas las mencairkan ujung permukaan logam induk (*base metal*) yang dilas menyatu dengan leburan logam pengisi (*filler*) akan mengakibatkan adanya perubahan struktur mikro pada daerah lasan dan sekitarnya serta memberikan dampak perubahan sifat mekanik. Pemanasan juga dapat mengakibatkan perubahan geometri. Selain itu, pada pengelasan selalu terjadi tegangan sisa pada sambungan las akibat perbedaan distribusi temperatur. Apabila tegangan sisa dan struktur mikro yang getas terjadi pada material yang mengalami proses pengelasan maka retak tidak dapat dihindari. Oleh karena itu sangat penting mengerti tentang konsep tegangan sisa untuk mengambil langkah – langkah pencegahan guna menghindari retak. Permasalahan ini semakin kompleks

lagi pada pengelasan dua logam induk yang berbeda. Pada penelitian ini akan digunakan logam induk baja tahan karat (*Stainless Steel*) SUS304 dengan baja karbon (*Structural Steel*) JIS 3101 SS 400. Permasalahan tegangan sisa (*residual stress*) pada proses pengelasan terjadi akibat pemanasan yang tinggi pada bagian inti las (*weld metal*) dari logam las.

Anwar Ul-Hamid, dkk, dalam makalahnya menjelaskan tentang kegagalan sambungan las *disimilar metal* antara SUS304 dengan baja karbon pada sistem pemipaan di sebuah pabrik petrokimia. Berdasarkan hasil penelitian dengan menggunakan mikroskop optik dan SEM (*Scanning Electron Microscopy*), disimpulkan bahwa “sambungan antara baja karbon dan *stainless steel* pipa las gagal karena adanya lokalisasi daerah dengan kekerasan tinggi pada antarmuka (*interface*) selama pendinginan dari temperatur las. Pada daerah ini banyak mengandung gas hidrogen-dimana daerah ini merupakan awal terjadinya retak. Adanya lapisan *decarburized* yang berdekatan dengan pipa baja karbon membantu dalam mempercepat retak di bawah tekanan”^[3].

Perbedaan koefisien muai (*thermal expansion*), sifat fisik dan sifat mekanik bergantung temperatur dari kedua material memungkinkan terjadinya fluktuasi tegangan termal yang dapat mengakibatkan terjadinya besar tegangan sisa pada kedua logam setelah proses las. Perubahan bentuk (*distorsi = distorsion*) merupakan permasalahan lainnya yang juga sering dihadapi pada setiap pengelasan. Hal ini terjadi karena pengelasan adalah pemanasan secara lokal dengan sumber panas las dimana distribusi temperatur tidak merata dan berubah menurut perubahan pergerakan kemajuan las^[4]. Panas las akan mengakibatkan terjadinya perubahan struktur mikro pada daerah lasan dan sekitarnya yang juga menyebabkan perubahan sifat mekanik logam yang dilas.

Masukan panas (*heat input*) merupakan satu parameter yang memberikan kontribusi terhadap distorsi dan tegangan sisa. Semakin banyak penambahan lapisan las (pas las) maka distorsi yang terjadi semakin besar. Tetapi pada pelat-pelat tebal dengan penampang yang luas, distorsi tidak tampak namun tegangan sisa yang terbentuk sangat besar jika dilakukan pengukuran^{[5][6]}.

1.2. PERUMUSAN MASALAH

Adapun perumusan masalah dari penelitian ini adalah untuk memperoleh karakteristik tegangan sisa dan struktur mikro pada hasil las *disimilar metal* antara SUS304 dan SS400 yang dibagi dalam beberapa analisis, antara lain:

- a. Analisis pengukuran tegangan sisa pada inti las, HAZ dan logam induk dari hasil las *disimilar metal*.
- b. Analisis hasil pengujian struktur makro dan struktur mikro pada inti las, HAZ dan logam induk dari hasil las dissimilar metal.
- c. Analisis hasil pengujian kekerasan pada inti las, HAZ dan logam induk dari hasil las dissimilar.
- d. Analisis distribusi temperatur pada pelat selama proses pemanasan dan pendinginan dari pengelasan disimilar SUS304 dan SS400 dengan simulasi metode elemen hingga (FEM = *Finite Elemen Method*).

1.3. TUJUAN PENELITIAN

Penggunaan pengelasan logam berbeda antara baja karbon SS400 dengan baja tahan karat SUS304 adalah untuk meningkatkan kinerja sistem selain adanya pertimbangan ekonomis. Untuk mencapai tujuan tersebut maka secara khusus tujuan penelitian ini adalah untuk:

- Mengetahui besar tegangan sisa yang terjadi pada kedua logam induk, SS400 dan SUS304, maupun tegangan sisa pada daerah las-lasan menggunakan pengukuran regangan (*strain*) dengan alat ukur DN1-M yang menggunakan hamburan (difraksi = *diffraction*) neutron.
- Mengetahui besar distorsi yang terjadi pada sampel hasil pengelasan *disimilar metal*.
- Mengetahui besar temperatur prediksi pada hasil las *disimilar* SUS304 dan SS400 pada tiga jenis ketebalan berbeda, yaitu 8 mm (sampel 1), 10 mm (sampel 2) dan 12 mm (sampel 3) dengan cara melakukan simulasi las menggunakan sistem pemodelan dengan metode elemen hingga (FEM = *Finite Elemen Method*).

Berdasarkan hasil eksperimental dan simulasi tersebut dapat diperoleh hasil penelitian secara eksperimental dan simulasi. Dengan demikian akan dapat diperoleh hasil analisis tentang karakterisasi hasil las *disimilar* antara SUS304 dengan SS400 yang saling mendukung antara eksperimental dan simulasi.

Dari hasil karakterisasi hasil las antara SS400 dengan SUS304, diharapkan pada berbagai pihak yang membaca hasil penelitian ini, khususnya praktisi bidang las dalam berbagai profesi (*welding engineer, welding inspector, welder, dsb*) dapat mengetahui dan memahami tentang fenomena yang terjadi pada pengelasan dengan perbedaan logam induk baik sifat mekanik maupun fisiknya serta perbedaan distorsi maupun tegangan sisa yang terjadi.

1.4. BATASAN MASALAH

Batasan masalah pada penelitian ini dilakukan agar hasil penelitian yang diperoleh jadi baik sesuai perumusan masalah yang telah dibuat. Beberapa batasan yang perlu dibuat antara lain:

- a. Pengukuran tegangan sisa dilakukan pada posisi dengan hasil las yang baik pada bagian tengah tebal pelat di titik-titik tertentu pada daerah inti las, HAZ dan logam induk dengan menggunakan difraksi neutron
- b. Pengujian kekerasan juga dilakukan pada titik-titik yang sesuai dengan posisi pengukuran tegangan sisa.
- c. Pengujian metalografi dilakukan untuk mendapatkan gambaran struktur makro dan struktur mikro di daerah inti las, HAZ dan logam induk untuk selanjutnya dianalisis.
- d. Analisis distribusi temperatur pada pelat selama proses pemanasan dan pendinginan dilakukan dengan menggunakan FEM.

1.5. RUANG LINGKUP

Pada penelitian ini dilakukan batasan-batasan dengan maksud agar pembahasan yang diberikan dapat fokus pada tujuan penelitian. Ruang lingkup penelitian ini meliputi:

1.5.1. Pengujian secara experimental.

- a. Persiapan Sampel, meliputi:

- Pembuatan sampel uji. Ada 3 sampel uji yang dibuat dimana ketiganya merupakan hasil las *disimilar metal* antara SUS304 dengan SS400 menggunakan *filler* AWS A5.22 DW-309L diameter 2,4 mm. Sampel dibedakan atas 3 ketebalan logam induk, yaitu: tebal 8 mm untuk sampel 1, tebal 10 mm untuk sampel 2 dan tebal 12 mm untuk sampel 3.

- Pengelasan dengan menggunakan proses GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) atau TIG dengan parameter las sebagai berikut:

- Kuat arus listrik las : 160 – 195 Amper
- Tegangan listrik las : 10 – 14 Volt
- *Travel speed* (rata-rata) : 60 mm/menit
- *Welding & shielding Gas* : Argon (Ar)
- Jenis sambungan las : V tunggal
- Posisi pengelasan : 1 G

b. Pemeriksaan hasil las dengan radiografi.

c. Pengujian dengan pengukuran tegangan sisa menggunakan difraksi neutron.

d. Pengujian pendukung lainnya yang dilakukan adalah:

- Uji metalografi untuk pemeriksaan struktur mikro di logam induk, daerah HAZ dan daerah inti las.
- Uji kekerasan makro material pada logam induk, daerah HAZ dan daerah inti las

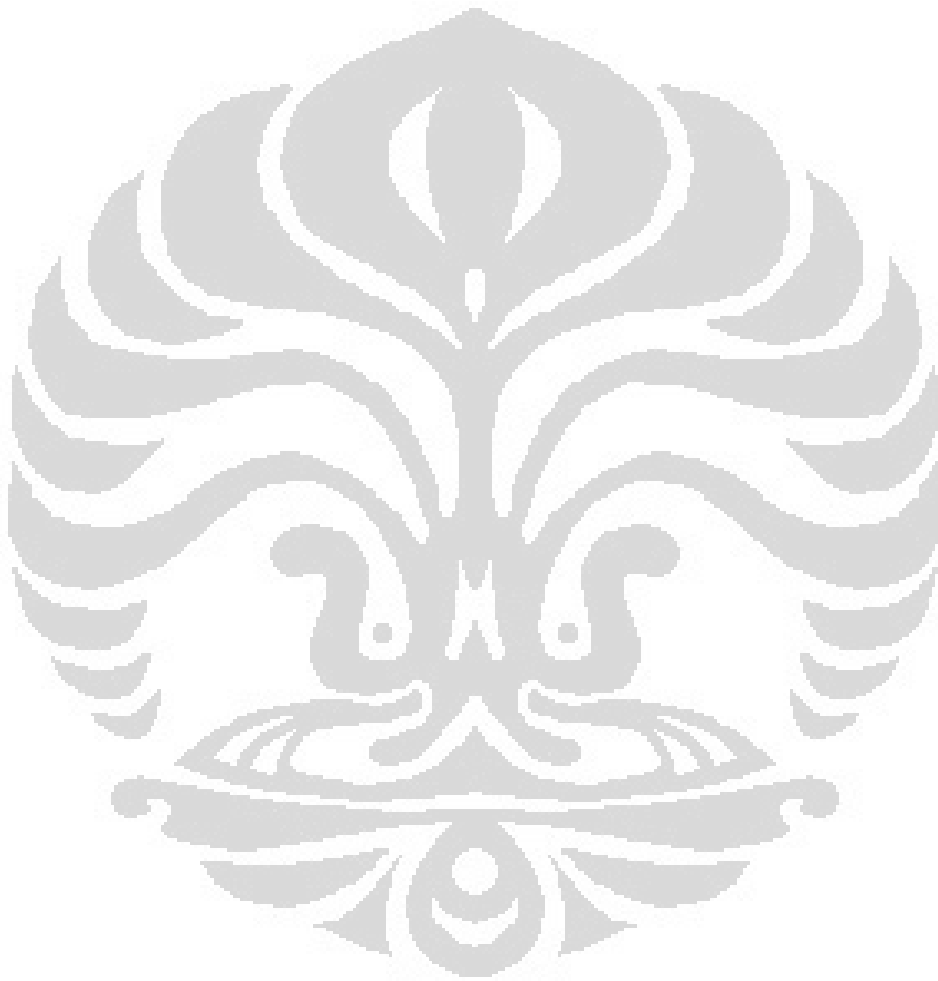
1.5.2. Simulasi

Simulasi merupakan analisis dengan metode elemen hingga. Proses kerja simulasi meliputi:

- a. Pembuatan gambar model sampel dengan menggunakan titik koordinat dan garis untuk membuat tampak lintang 2 dimensi.
- b. Masukan data kecepatan gerak jalan las, jarak pengelasan dan jumlah pas las
- c. Masukan data yang berkontribusi terhadap terjadinya proses las. Data tersebut merupakan data tentang sifat fisik dan sifat mekanik yang

bergantung pada temperatur dari 25⁰C hingga 1650⁰C dari material yang digunakan. Data tersebut adalah: entalpi, konduktivitas panas, koefisien panas ekspansi, *specific heat*, modulus Young, *poisson ratio* dan massa jenis (*density*).

Data panas tersebut kemudian di – *running* pada *software* FEM untuk memperoleh data perubahan temperatur yang terjadi.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Dalam proses pengelasan akan terjadi pemanasan yang tinggi pada bagian inti las logam lasan. Panas las akan mengakibatkan perubahan struktur mikro daerah inti lasan dan dekat las (HAZ) yang memberikan dampak perubahan sifat mekanik. Panas las juga mengakibatkan perubahan geometri. Pengelasan juga menyebabkan adanya tegangan sisa pada material las. Salah satu aspek yang perlu diperhatikan sebagai penyebab retak adalah tegangan sisa. Oleh karena itu penting untuk mengerti konsep tegangan sisa guna menghindari retak ataupun potensi bahaya lain akibat tegangan sisa.

Analisis dengan menggunakan metode elemen hingga (FEM) digunakan untuk mendapatkan hasil perpindahan panas pada hasil las sampel yang dibuat. Berdasarkan dua metode yaitu eksperimen dan simulasi akan dapat diperoleh suatu hubungan yang secara khusus untuk memberikan kemudahan analisis bagi pengguna simulasi bidang pengelasan.

2.1. PENGELASAN DISIMILAR METAL

Pengelasan antara dua logam yang berbeda sifat fisik, mekanik dan komposisi kimianya disebut pengelasan disimilar metal. Pada penelitian ini pengelasan disimilar metal yang akan ditinjau antara baja tahan karat SUS304 dengan baja karbon SS400. Adapun spesifikasi teknis dan komposisi kimia material tersebut ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Sifat Mekanik dan Komposisi kimia SUS304 dan SS400^{[7][8]}.

Sifat Mekanik										
<i>Grade</i>	Tegangan Tarik (MPa)	Tegangan luluh (MPa)	<i>Elongation</i> (%) dalam 50 mm)	<i>Poisson ratio</i>	Kekerasan Brinell					
SUS304	515	205	40	0,27 – 0,3	201					
SS400	400 – 510	205 – 245	30	0,26	160					
Komposisi Kimia										
<i>Grade</i>		C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	N
SUS304	min.	-	-	-	-	-	18.0-	-	8.0-	-
	max	0.08	2.0	0.75	0.045	0.030	20.0		10.5	0.10
SS400	min		0,6							
	max	0,26	0,9	0,4	0.05	0.05				

2.2. DISTRIBUSI PANAS PADA LAS

Pengelasan antara SUS 304 dan SS 400 dapat terjadi sebagai akibat dari masukan panas las yang diberikan pada permukaan las secara terus menerus pada saat pengelasan. Panas las tidak menyebar ke seluruh permukaan sampel. Oleh karena itu, pada proses pengelasan terjadi distribusi temperatur yang tidak sama pada hampir tiap titik pada bagian daerah lasan^[9]. Hal ini berakibat terjadinya siklus panas yang kompleks. Siklus panas dapat menggambarkan laju pendinginan yang terjadi pada logam las sehingga dapat diketahui bahwa pada daerah-daerah tertentu terjadi perubahan struktur mikro, khususnya pada bagian *Heat Affected Zone* (HAZ). Perubahan struktur mikro pada daerah HAZ menyebabkan perubahan sifat mekanik daerah tersebut. Masukan panas pada pengelasan menurut Artem Pilipenko dapat dihitung dengan rumus empiris^[10]:

$$Q = \eta UI \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana Q adalah masukan panas (*effective termal power*) dalam satuan Watt, η adalah koefisien efisiensi, U adalah tegangan busur las dalam satuan Volt dan I adalah arus listrik dalam satuan Ampere. Nilai η yang digunakan seperti ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Nilai faktor efisiensi pada beberapa proses pengelasan yang berbeda^[10]

<i>Welding process</i>	<i>SAW steel</i>	<i>SMAW, steel</i>	<i>GMAW, CO₂-steel</i>	<i>GMAW, Ar-steel</i>	<i>GTAW, Ar-steel</i>	<i>GTAW, He-steel</i>	<i>GTAW, Ar-Al</i>
h	0,91-0,99	0,66-0,85	0,75-0,93	0,66-0,70	0,25-0,75	0,55-0,80	0,22-0,46

Menurut Koichi Masubuchi masukan panas dari sumber las dihitung dengan rumus^[11]

$$H = 60 V I / v \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana H adalah masukan panas dalam satuan J/mm, V adalah tegangan busur listrik dalam satuan Volt, I adalah kuat arus listrik untuk las dalam satuan Amper dan v adalah kecepatan pengelesan dalam satuan mm/menit.

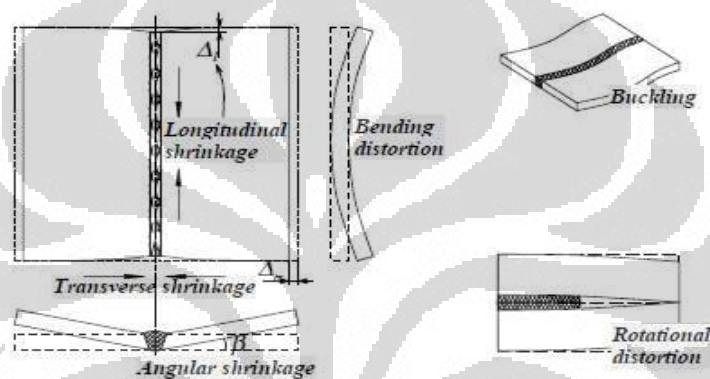
2.3. DISTORSI PADA HASIL LAS

Klasifikasi perubahan bentuk pada hasil las bukan hanya pada permukaan saja tetapi terjadi pada berbagai titik regangan dalam beragam bentuk, seperti defleksi, pergeseran sudut dan perubahan dimensi linier. Pada dasarnya ada tiga

hal penyebab perubahan dimensi pada pengelasan pelat, yaitu:

- Penyusutan transversal
- Penyusutan longitudinal
- Distorsi sudut

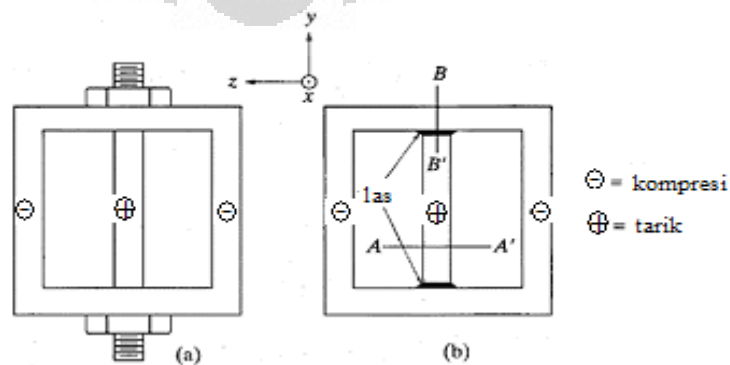
Penyusutan transversal merupakan penyusutan yang terjadi tegak lurus terhadap garis las, penyusutan longitudinal adalah searah dengan garis las dan distorsi sudut terjadi dalam bidang pelat yang mengalami kontraksi akibat ekspansi termal^[10]. Dari tiga hal tersebut dikenal beberapa perubahan bentuk hasil las, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Beberapa jenis perubahan bentuk hasil las buntu (*butt*) pada pelat^[10]

2.4. TEGANGAN SISA (*RESIDUAL STRESS*)

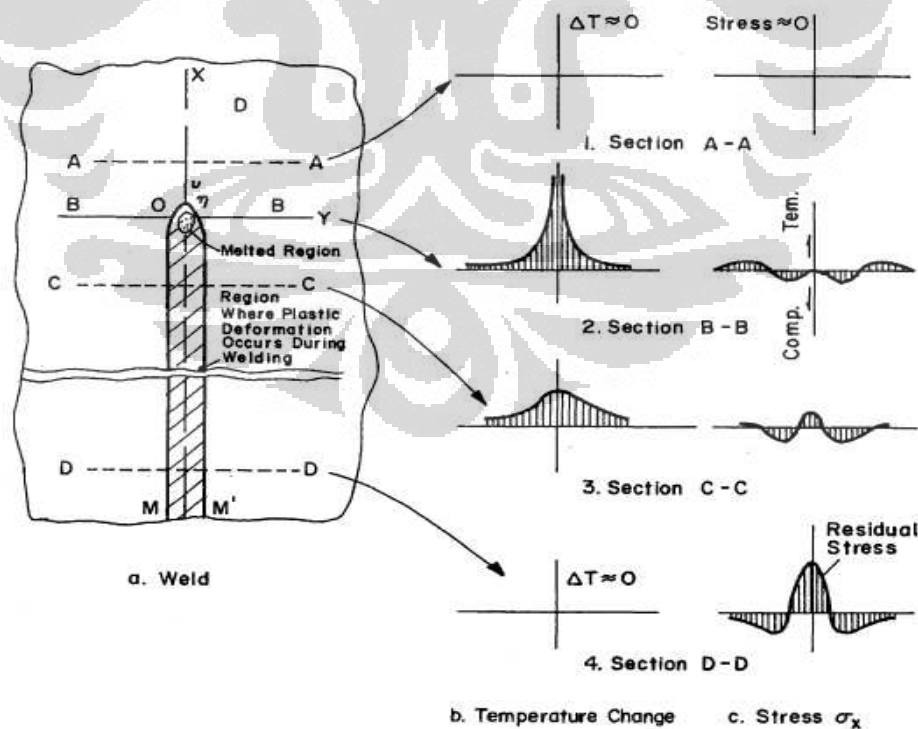
Tegangan sisa adalah tegangan yang bekerja di dalam material tanpa pengaruh dari beban luar. Contoh sederhana keberadaan tegangan sisa seperti pada Gambar 2.2. Pada Gambar 2.2a dan 2.2b ditunjukkan bahwa baut as memiliki tegangan sisa dalam bentuk tarik (*tension*) sementara kotak baut memiliki tegangan sisa tekan (*compression*).



Gambar 2.2. Contoh dari keberadaan tegangan sisa pada suatu benda

Tegangan sisa pada hasil las terjadi akibat memuai dan menyusutnya material akibat panas las. Secara sederhana tegangan sisa pada hasil las ditunjukkan pada Gambar 2.3. Pada bagian A – A merupakan daerah logam induk yang tidak dilas dan tidak dibawah pengaruh panas las oleh karena itu tidak ada perubahan temperatur (diagram 2.3b) maupun perubahan tegangan (diagram 2.3c). Pada bagian B – B adalah titik awal pengelasan dimana terjadi perubahan temperatur yang cukup tinggi tetapi perubahan tegangan sisa belum terbentuk. Pada bagian C – C adalah daerah yang baru selesai dilas, sudah tidak mendapat masukan panas dan perubahan temperatur sudah tetap sehingga mulai terbentuk tegangan sisa. Akhirnya, pada bagian D – D merupakan bagian permukaan las yang proses lasnya telah lama berlangsung, perubahan temperatur sudah tidak ada dan tegangan sisa yang terbentuk menjadi sangat besar hingga mencapai nilai maksimal.

Untuk mereduksi distorsi maka benda kerja yang dilas ditahan dengan cara dijepit atau dengan *tack weld*. Akibat ditahan maka nilai tegangan sisa menjadi besar. Oleh karena itu dapat dikatakan bahwa tegangan sisa berbanding terbalik dengan distorsi^[12]. Pada penelitian ini tegangan sisa yang diteliti adalah tegangan



Gambar 2.3. Skema perubahan temperatur dan tegangan termal selama pengelasan^[4].

sisa mikro dalam fasa. Pengukuran tegangan sisa dilakukan dengan menggunakan difraksi neutron. Simulasi dengan metode elemen hingga juga dibuat untuk dapat membandingkan secara langsung karakteristik tegangan sisa hasil eksperimental dengan simulasi.

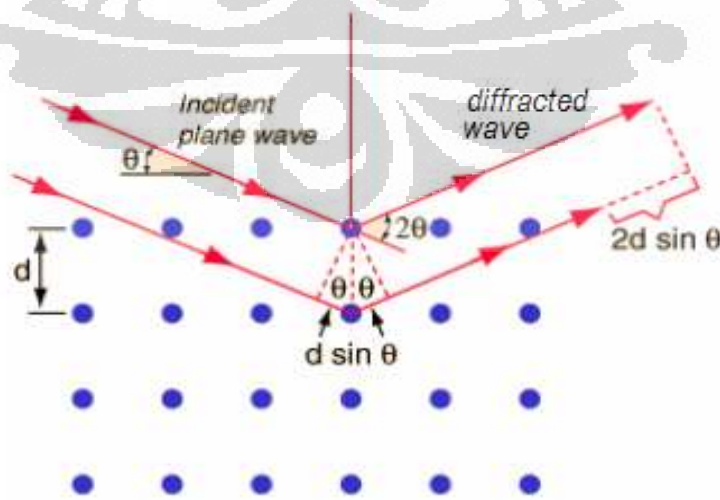
2.5. PENGUKURAN TEGANGAN SISA DENGAN DIFRAKSI NEUTRON

Pengukuran dengan difraksi neutron adalah suatu metode untuk mengukur tegangan sisa tak merusak dalam material kristal. Prosedur ini dapat digunakan untuk menentukan tegangan dalam material dekat dengan permukaan. Diperlukan sampel yang dapat dibawa ke sumber neutron. Pengukuran jarak bidang (*lattice spacing*) atau parameter bidang yang diperoleh diubah menjadi regangan dan tegangan.^[12] Pada saat paparan (*illuminate*) radiasi dengan panjang gelombang yang sama mengenai daerah antar bidang material kristal akan menghamburkan radiasi ini sebagai puncak Bragg. Sudut yang mengakibatkan terbentuknya puncak dapat dihitung dengan hukum Bragg (Bragg's Law), yaitu^[12]:

$$d_{hkl} = \lambda / (2 \sin \theta_{hkl}) \dots \dots \dots (2.3)$$

dimana λ adalah panjang gelombang yang digunakan, d_{hkl} adalah jarak antar bidang dengan indeks Miller h, k, l dan θ_{hkl} adalah setengah dari sudut hamburan neutron, $2\theta_{hkl}$ seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4.

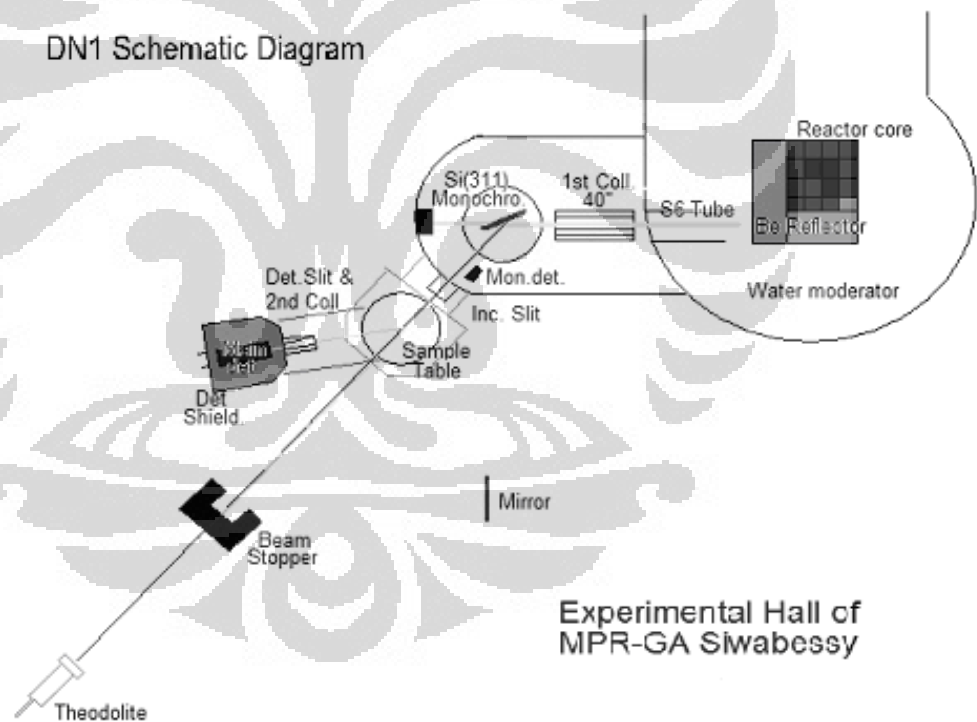
Sumber neutron yang digunakan pada penelitian ini berasal dari reaksi fisi yang bersumber dari reaktor riset RSG – G.A. Siwabessy BATAN Serpong.



Gambar 2.4 Ilustrasi skematik dari geometri hamburan (*scatter*) Bragg^[13].

Difraksi neutron yang digunakan merupakan hamburan dengan satu panjang gelombang yang disebut *monochromator*. Hamburan neutron untuk pengukuran diperoleh dari hasil pengarahannya material silikon (Si) dalam arah orientasi bidang 311 ke *incident slit* yang akan digunakan. Hamburan neutron dari reaktor diperoleh setelah melalui kolimator berukuran 40 inci. Secara skematik difraktometer neutron untuk pengukuran tegangan sisa DN1-M yang terletak di dalam balai percobaan RSG – G.A. Siwabessy BATAN Serpong seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5. Pengukuran sampel dilakukan dalam 3 arah, yaitu transversal, normal dan aksial terhadap sumbu las. Perletakan sampel pada meja sampel diatur berdasarkan orientasi dari permukaan bidang kristalnya.

Apabila jarak bidang kristal dibawah pengaruh tegangan sisa pengaruh panas las d_{hkl} dikurangi dengan jarak bidang kristal yang tidak mendapat pengaruh panas las d_0 maka akan diperoleh selisih nilai keduanya sebagai Δd . Perbandingan



Gambar 2.5 Diagram skematik peralatan difraktometer neutron DN1-M^[14]

antara Δd dengan d_0 , akan menghasilkan nilai regangan (ϵ) yang terdapat di dalam material, dirumuskan^[12]:

$$\epsilon_{hkl} = \frac{d_{hkl} - d_0}{d_0} = \frac{\Delta d}{d_0} \dots\dots\dots (2.7)$$

Jika hukum Bragg pada persamaan 2.3 digunakan untuk menghitung nilai d_0 maka akan diperoleh persamaan

$$d_0 = \lambda / (2 \sin \theta_0) \dots\dots\dots (2.8)$$

Apabila nilai d_{hkl} dan d_0 disubstitusikan ke persamaan 2.7 maka akan diperoleh:

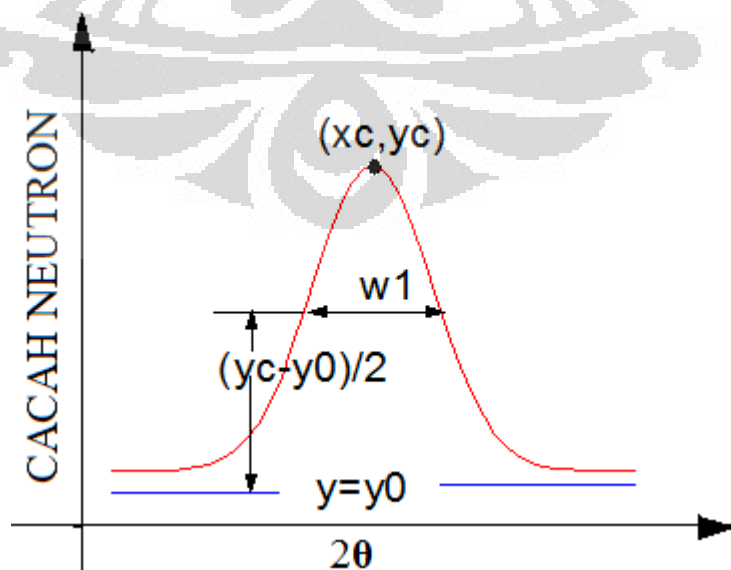
$$\epsilon_{hkl} = \frac{\sin \theta_0}{\sin \theta_{hkl}} - 1 \dots\dots\dots (2.9)$$

dimana nilai ϵ_{hkl} merupakan regangan pada bidang indeks miller 200 dan 220 yang diukur. Masing masing adalah ϵ_{200} untuk SS400 dan ϵ_{220} untuk daerah lasan dan SUS304.

Untuk menentukan posisi berkas neutron digunakan distribusi Gauss. Penggunaan distribusi Gauss dilakukan dengan menggunakan *software* Origin ® 7. Bentuk distribusi Gauss sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.6 dan persamaan distribusi Gauss adalah:

$$Y = Y_0 A \exp\left[\frac{-(X - X_c)^2}{2w^2}\right] \dots\dots\dots (2.10)$$

dimana Y adalah intensitas, Y_0 adalah cacah latar (*background*), A adalah amplitudo, w adalah lebar tengah kurva yang mengindikasikan keakuratan nilai cacahan dan X_c adalah posisi puncak sudut 2θ .



Gambar 2.6 Bentuk distribusi Gauss hasil pengukuran distribusi neutron

Pada pengelasan pelat, panas menyebabkan memuai dan menyusutnya pelat. Akibatnya regangan yang terjadi ke segala arah. Oleh karena itu pengukuran regangan dibuat dalam tiga arah sumbu ko-ordinat, yaitu x, y dan z pada satu satu titik yang sama. Nilai regangan diperoleh dari hasil pengukuran dengan alat DN1-M. Selanjutnya dengan memasukkan nilai *modulus young* (E_{hkl}) dan *poisson rasio* (ν_{hkl}) untuk masing-masing logam induk maka besar tegangan dapat dihitung dengan persamaan^[12]:

a. Untuk arah transversal

$$\sigma_{xx} = \frac{E_{hkl}}{(1 + \nu_{hkl})(1 - 2\nu_{hkl})} [(1 - \nu_{hkl})\epsilon_{xx} + \nu_{hkl}(\epsilon_{yy} + \epsilon_{zz})] \dots \dots \dots (2.11)$$

b. Untuk arah normal

$$\sigma_{yy} = \frac{E_{hkl}}{(1 + \nu_{hkl})(1 - 2\nu_{hkl})} [(1 - \nu_{hkl})\epsilon_{yy} + \nu_{hkl}(\epsilon_{xx} + \epsilon_{zz})] \dots \dots \dots (2.12)$$

c. Untuk arah axial

$$\sigma_{zz} = \frac{E_{hkl}}{(1 + \nu_{hkl})(1 - 2\nu_{hkl})} [(1 - \nu_{hkl})\epsilon_{zz} + \nu_{hkl}(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy})] \dots \dots \dots (2.13)$$

Pada persamaan 2.11 hingga 2.13 terlihat bahwa untuk perhitungan tegangan sisa mikro besar *modulus young* (E) dan *poisson rasio* (ν) juga merupakan parameter yang diukur dan dihitung. Tetapi pada penelitian ini karena keterbatasan waktu dalam penggunaan sumber neutron di reaktor BATAN maka kedua parameter tersebut diperoleh dari hasil perhitungan konstanta elastisitas mekanik dengan pemodelan Kroner.

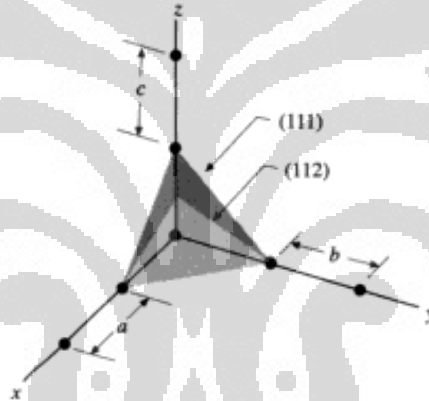
2.6. INDEKS MILLER

Indeks Miller menunjukkan bidang datar yang dibatasi oleh garis-garis perpotongan pada sumbu tiga dimensi x, y dan z. Orientasi atom-atom kristal pada indeks mengandung arti bahwa posisi atom-atom mayoritas kristal terdapat pada luasan bidang diagonal datar a,b,c yang dibentuk dari perpotongan garis sumbu x, y, dan z.

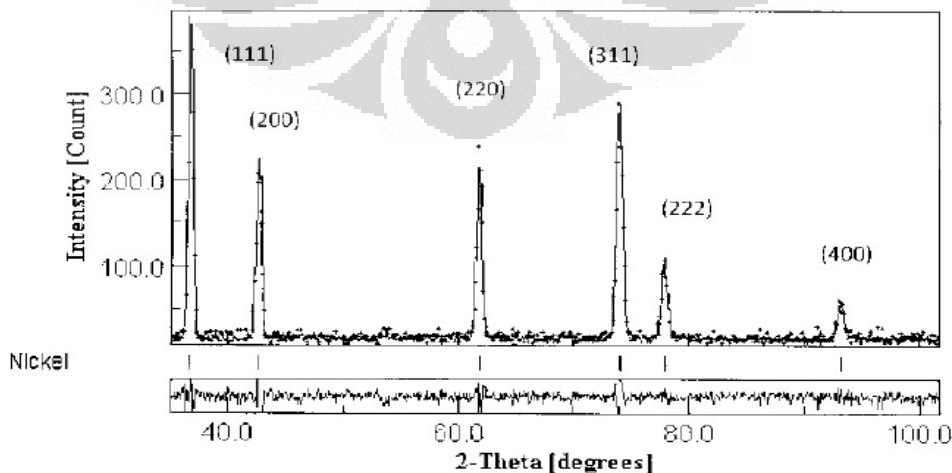
Indeks Miller merupakan bidang kristalografi yang sering dinyatakan dalam bentuk (h, k, l). Prosedur dalam menentukan Indeks Miller adalah:

1. Jika bidang melalui titik awal, buat bidang paralel lainnya di dalam sel satuan dengan translasi. Atau dengan membuat titik awal lain di sudut lain sel satuan.
2. Bidang yang dicari bisa berpotongan atau sejajar dengan sumbu. Panjang bidang yang berpotongan ditulis dalam satuan parameter kisi a, b dan c.
3. Ambil kebalikan dari angka-angka perpotongan tersebut. Bidang yang sejajar dengan sumbu dianggap berpotongan di tak berhingga sehingga kebalikannya adalah nol.
4. Bila perlu ubah ketiga bilangan ini ke bilangan bulat terkecil dengan mengali atau membaginya dengan suatu faktor tertentu.
5. Tulis indeks ini tanpa koma dengan diapit tanda kurung biasa, (h k l).

Gambar 2.7 menunjukkan contoh gambar Indeks Miller bidang (111) dan (112) dimana bidang (112) memotong ketiga sumbu pada jarak 1,1 dan $\frac{1}{2}$.

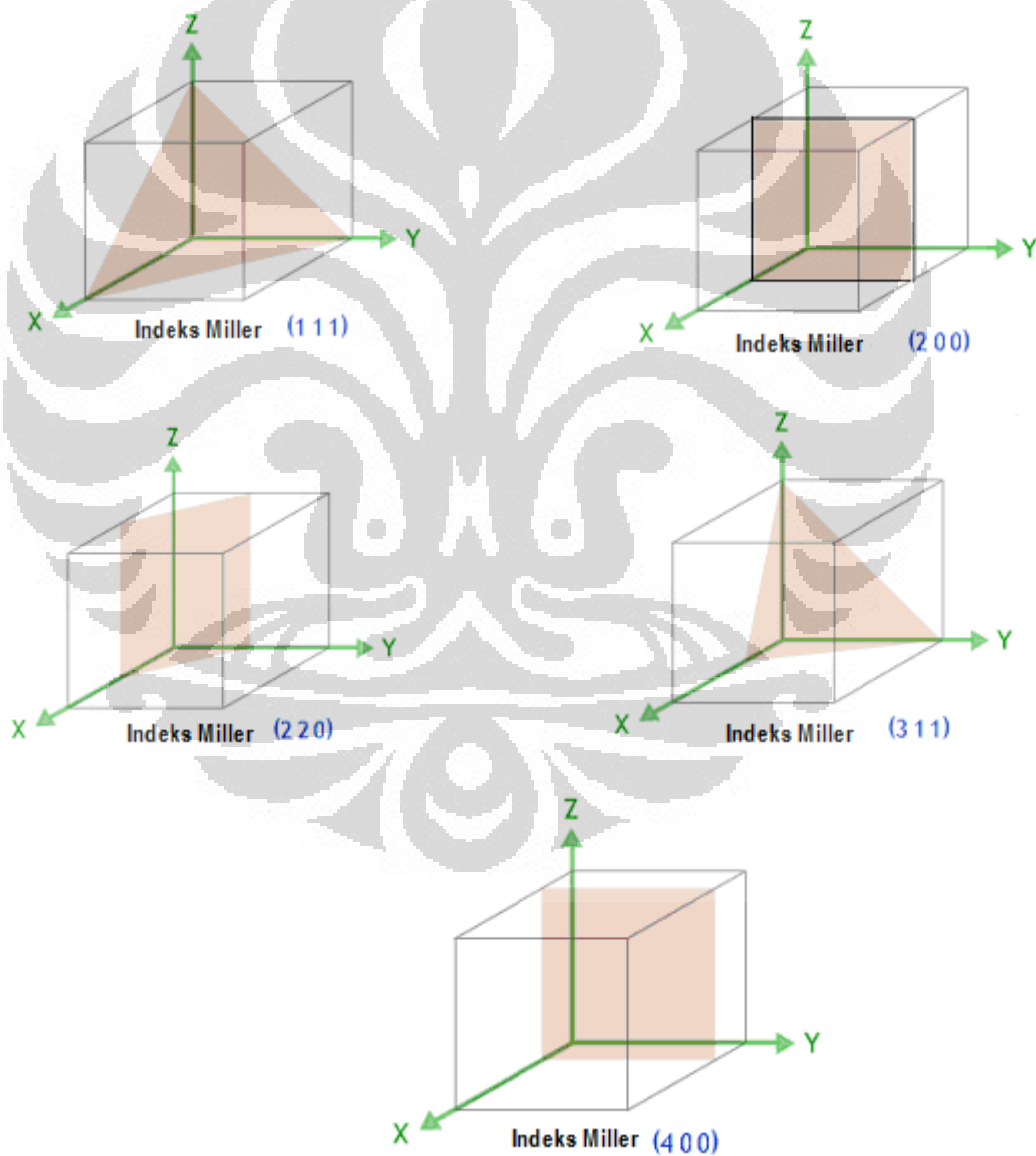


Gambar 2.7 Indeks miller. Bidang (112) memotong ketiga sumbu pada jarak satuan 1,1 dan $\frac{1}{2}$ ^[15]



Gambar 2.8 Pola difraksi neutron dari cuplikan

Untuk pengukuran difraksi neutron pada pengelasan dissimilar stainless steel dan baja karbon ada 4 jenis bidang Indeks Miller yang teridentifikasi berdasarkan hasil pembacaan hamburan yaitu indeks Miller (111), (200), (220), (311) dan (400) seperti ditunjukkan pada Gambar 2.8. Dengan menggunakan simulasi *online* Indeks Miller^[16] dapat diperoleh gambar ilustrasi Indeks Miller untuk kelima jenis Indeks Miller tersebut sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.9. Nilai Indeks Miller digunakan untuk menentukan penempatan letak sudut hamburan neutron terhadap sampel pada saat pengukuran di tiga sumbu simetri yang diukur.



Gambar 2.9. Ilustrasi Indeks Miller bidang (111) hingga (400) mengacu pada hasil identifikasi difraksi neutron

2.7. DILUSI PADA HASIL LAS

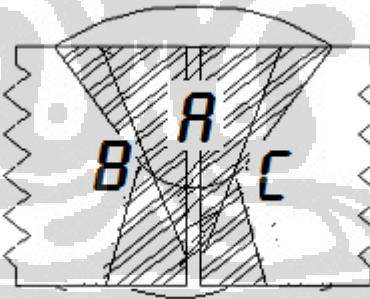
Pada pengelasan dua material yang berbeda perhitungan dilusi perlu dilakukan untuk selanjutnya dapat dilakukan pengukuran pemeriksaan pada hasil uji foto makronya. Dengan melakukan perhitungan Ni (nikel) ekivalen dan Cr (krom) ekivalen yang kemudian diplotkan pada diagram Schaeffler maka dapat diperoleh besar dilusi yang mungkin terbentuk pada hasil las. Persamaan Ni ekivalen seperti ditunjukkan pada persamaan 2.14, yaitu^[17]:

$$\text{Nickel Equivalent} = \%Ni + 30\%C + 0.5\%Mn \quad 2.14$$

Kemudian persamaan Cr ekivalen seperti ditunjukkan pada persamaan 2.15, yaitu^[17]:

$$\text{Chrome Equivalent} = \%Cr + Mo + 1.5\%Si + 0.5\%Nb \quad 2.15$$

Pengamatan hasil las dapat terlihat bahwa hasil las dengan dilusi yang baik apabila *root* yang dihasilkan dan *top* yang dihasilkan seperti ditunjukkan pada Gambar 2.10. Dalam hal ini dilusi minimal dapat mencapai nilai optimum sebesar 25% dan dilusi yang sangat baik seperti ditunjukkan pada Gambar 2.10.

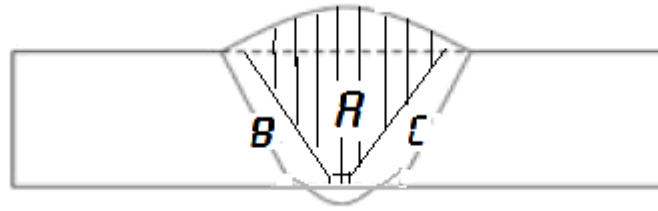


Gambar 2.10 Dilusi 25 % pada sambungan V ditunjukkan pada besar bagian menonjol pada daerah *root* dapat melebar ke samping secara merata kanan dan kiri.

Untuk melakukan perhitungan pendekatan besar dilusi yang terbentuk dapat digambarkan sebagai berikut:

- Daerah inti las dari atas ke bawah dibagi atas 3 bagian, yaitu A, B dan C.
- Daerah A merupakan tebal pelat dan daerah *top*, B adalah sisi sebelah kiri yang terbentuk dan C adalah sisi sebelah kanan yang terbentuk.

Bentuk pembagian tersebut seperti ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Pembagian daerah las untuk perhitungan dilusi hasil las

Dilusi logam pengisi dirumuskan^[18]:

$$Filler\ Dilution = \frac{B + C}{A + B + C} \times 100\% \dots\dots\dots(2.16)$$

2.8 SIMULASI DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

Metode elemen hingga (*Finite element Method*=FEM) merupakan suatu upaya penyelesaian masalah-masalah mekanika. Permasalahan kondisi *transient*, *steady*, statis tak tentu, linier maupun *nonlinear* pada mekanika, perpindahan panas, dinamika fluida maupun kondisi *electromagnetic* adalah mungkin untuk dapat diselesaikan dengan cara ini. Penyelesaian dengan melakukan pemodelan FEM sering dikenal dengan nama simulasi.

Sejarah FEM dimulai tahun 1906 oleh para ahli dalam bidang penelitian. Pada saat itu, para ahli mengusulkan metode “analogi bidang” untuk menyelesaikan masalah kontinum. Selanjutnya, pada tahun 1943 FEM didekati dengan interpolasi polinomial yang diperkenalkan oleh Courant untuk mendapatkan solusi pendekatan numerik. Solusi ini dikenal dengan nama Rayleigh – Ritz. Pada saat itu, keberhasilan Courant menjadikannya sebagai orang pertama yang mengembangkan FEM. Sejak saat itu FEM terus dikembangkan untuk berbagai macam penyelesaian masalah keteknikan hingga saat ini.

Artem Pilipenko, pada tahun 2001 melakukan penelitiannya tentang tegangan sisa dan distorsi pada pelat tipis dengan pengelasan SAW (*Sub-merge Arc Welding*) *multi electrode* menggunakan simulasi dengan FEM untuk teknik mitigasinya. Untuk memodelkan sampel, Artem Pilipenko menggunakan perangkat lunak (*software*) ABAQUS. Berdasarkan hasil penelitiannya, Artem Pilipenko menyatakan bahwa selama proses pengelasan berlangsung material akan mengalami deformasi plastis pada saat pemanasan dan akan mengalami distorsi pada saat pendinginan^[10].

Pada simulasi, distribusi panas las maksimal terjadi pada saat proses pengelasan berlangsung hal ini akan dialami oleh *node* elemen yang menerima masukan panas dari elektroda maupun pada *node* elemen yang telah menerima masukan panas sebelumnya

yang kemudian berangsur – angsur turun akan tetapi masih diatas temperatur kamar. Tegangan sisa akan terbentuk pada daerah yang mengalami pemanasan tinggi yang juga berimbans pada daerah yang mengalami panas rambatan.

Persamaan pokok dari konduktivitas panas pada suatu logam pejal adalah^[11]:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = Q_G + \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right] \dots\dots\dots(2.17)$$

dengan ρ adalah massa jenis dalam satuan $\frac{kg}{m^3}$, c adalah *specific heat* dalam

satuan $\frac{J}{kg.K}$, λ adalah konduktivitas panas dalam satuan $\frac{W}{m.K}$ dan Q_G adalah

debit perubahan temperatur dalam satuan $\frac{W}{m^3}$.

Jika permukaan lapisan batas volume dari benda pejal pada posisi sembarang dalam arah x , y dan z maka hubungan kesetimbangan masukan panas dapat ditunjukkan sebagai^[19]:

$$-\left(\frac{\partial R_x}{\partial x} + \frac{\partial R_y}{\partial y} + \frac{\partial R_z}{\partial z} \right) + Q(x, y, z, t) = \rho c \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} \dots\dots\dots(2.18)$$

dengan R_x , R_y dan R_z sebagai rata-rata dari masukan panas per satuan luas, $T(x,y,z,t)$ temperatur arus listrik, $Q(x,y,z,t)$ adalah tambahan panas internal rata-rata, ρ adalah densitas, c adalah *specific heat* dan t adalah waktu.

Bentuk persamaan 2.18 selanjutnya dapat ditulis lengkap dengan menggunakan aliran panas Fourier, yaitu^[19]:

$$R_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \dots\dots\dots(2.19a)$$

$$R_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \dots\dots\dots(2.19b)$$

$$R_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \dots\dots\dots(2.19c)$$

dengan mensubstitusikan persamaan 2.19a, 2.19b dan 2.19c ke dalam persamaan 2.21 maka persamaan 2.15 akan menjadi sama dengan persamaan 2.20.

Selanjutnya, oleh karena sejak proses pengelasan siklus temperatur tinggi dijalani maka sifat material yang bergantung pada temperatur tinggi, temperatur transien dapat dihitung dengan metode ekstrapolasi dengan dua kali interval, dirumuskan^[19]:

$$T(\tau) = T(t - \Delta t) + \frac{\tau}{\Delta t} [T(t - \Delta t) - T(t - 2\Delta t)] \dots\dots\dots(2.20)$$

Sedangkan tegangan sisa karena pengaruh pemanasan dapat dihitung dengan menggunakan hubungan antara tegangan dan regangan yang disebabkan oleh panas.

Penyelesaian empiris dari bentuk simulasi FEM untuk perhitungan distribusi temperatur dan tegangan sisa pada sambungan *butt joint* dari persamaan 2.20 disederhanakan oleh Saeed Moaveni pada tahun 2003^[20] adalah:

$$\rho c \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \{L\} T \right\} + \{L\}^T \{q\} = \ddot{q} \dots\dots\dots(2.21)$$

Dimana :

$$\{L\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{Bmatrix}, \{v\} = \begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(2.22)$$

Sehingga persamaan menjadi^[21]

$$\rho c \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} + \{v_x + v_y + v_z\} \cdot \begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{Bmatrix} \right\} + \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix} \cdot -[D] \begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{Bmatrix} = \ddot{q} \dots\dots\dots(2.23)$$

Dimana matrik matrik konduktivitasnya ialah :

$$[D] = \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.24)$$

Sehingga persamaan konduktivitas menjadi:

$$\rho c \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} + \{v_x + v_y + v_z\} \cdot \begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{Bmatrix} \right\} + \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{Bmatrix} = \ddot{q} \dots\dots\dots(2.25)$$

Selanjutnya:

$$\rho c \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} + \{v_x + v_y + v_z\} \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{pmatrix} \right\} + \left[\frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial}{\partial z} \right] = \begin{bmatrix} k_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{zz} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{pmatrix} + \dot{q} \dots\dots\dots(2.26)$$

Maka:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \dots\dots\dots(2.27)$$

Data input adalah : K, ρ, c, v, x, y, z

Output yang diperoleh adalah: T (temperatur)

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

$$q = h_c [T_B - T_s] \dots\dots\dots(2.28)$$

Substitusi nilai q ke persamaan 2.28, maka:

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

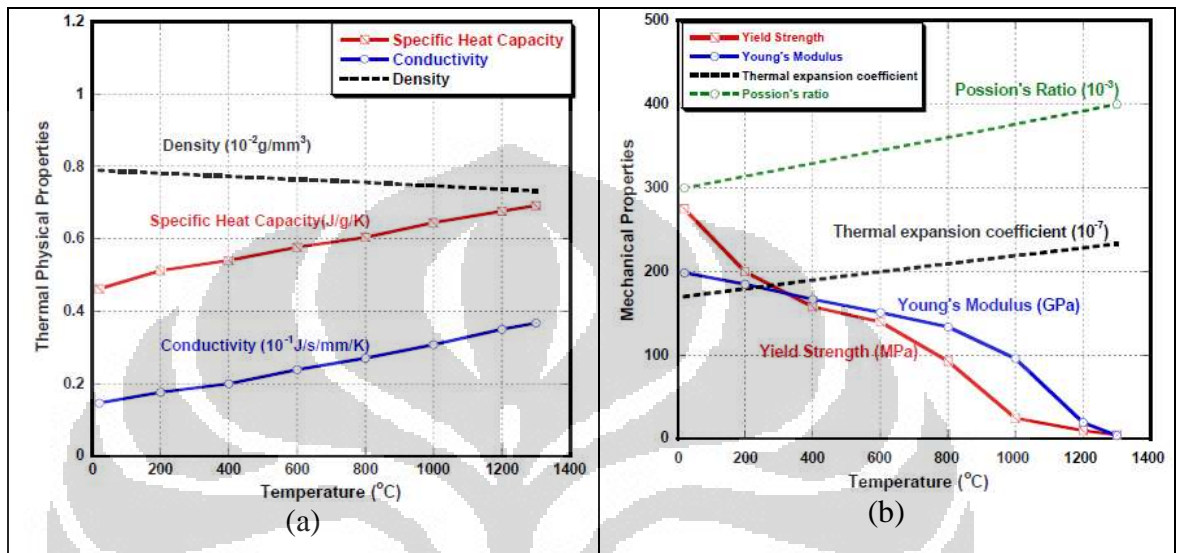
atau:

$$[D] \begin{pmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{pmatrix} = h_c [T_s - T_B] \dots\dots\dots(2.29)$$

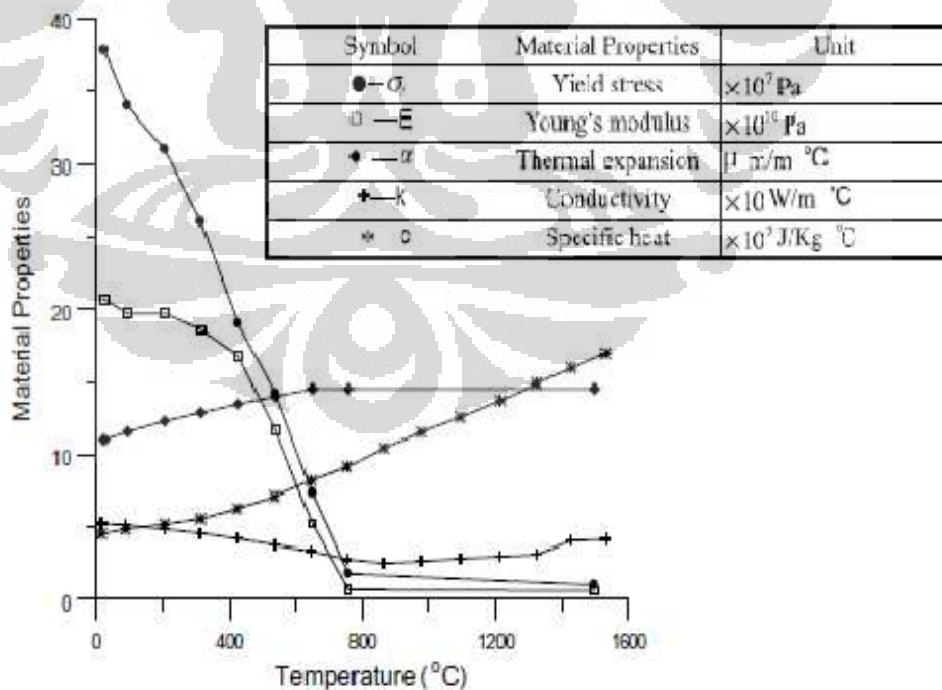
Nilai T hasil output pada persamaan 2.27 menjadi input pada persamaan 2.29, dan akan diperoleh output T_s .

Sampai dengan penggunaan persamaan 2.29 secara berkelanjutan dengan iterasi berdasarkan kenaikan temperatur terhadap perubahan sifat-sifat fisik material yang dilas pada setiap tambahan waktu simulasi menganalisis perubahan sifat termal. Oleh karena pada proses simulasi tidak dilakukan eksperimental secara khusus untuk mendapatkan sifat-sifat fisik material SUS304 maupun

SS400 maka data input diambil berdasarkan studi literatur. Berdasarkan hasil penelitian Bogaard R.H., dkk^[22], diperoleh sifat-sifat fisik bergantung temperatur dari material SUS304 seperti panas spesifik, konduktivitas termal, koefisien panas ekspansi, *poission ratio* dan densitas sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12. Sifat fisik SUS304 berdasarkan hasil pengujian^[22]



Gambar 2.13 Sifat-sifat fisik baja lunak SS400 atau yang setara berdasarkan hasil pengujian^[23]

Sifat-sifat fisik dan mekanik dari material SS400 juga diperoleh berdasarkan hasil penelusuran literatur. Menurut Gayle F.W., dkk^[23] sifat-sifat fisik material SS400 dan baja lunak lainnya yang sekelas ASTM A36 yang bergantung pada temperatur adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 2.13. Oleh karena data-data yang diperoleh dalam bentuk grafik maka dengan menggunakan pemrograman C maka data-data dalam bentuk *pixel* tersebut diubah menjadi angka digital sehingga dapat diperoleh nilai-nilai pendekatan untuk dapat digunakan pada proses simulasi dengan FEM.

Tegangan sisa karena pengaruh panas dapat dihitung berdasarkan hubungan tegangan dan regangan yang disebabkan oleh panas. Secara matematis regangan dinyatakan sebagai perubahan pertambahan panjang (Δl) dibagi panjang mula-mula, dirumuskan:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \dots \dots \dots (2.30)$$

dimana:

$$\Delta l = l_0 \alpha \Delta t \dots \dots \dots (2.31)$$

Pada pelat tebal, regangan terjadi ke segala arah sehingga perhitungan regangan harus meliputi bidang tiga dimensi, x, y dan z.

Dari output temperatur pada persamaan 2.29, distribusi tegangan sisa dapat dihitung dengan persamaan:

$$\sigma = [K] \{\varepsilon^{el}\} \dots \dots \dots (2.32)$$

dimana:

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

dan

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

$$[\boldsymbol{\varepsilon}^{el}] = \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_x \\ \boldsymbol{\varepsilon}_y \\ \boldsymbol{\varepsilon}_z \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{xy} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{yz} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta T \alpha_x^{SE} \\ \Delta T \alpha_y^{SE} \\ \Delta T \alpha_z^{SE} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \longrightarrow \Delta T = T - T_{ref}$$

Sehingga diperoleh besar tegangan sisa utama untuk setiap perpindahan atau distorsi dalam arah x, y dan z, masing-masing adalah:

$$\sigma_x = \frac{E_x}{h} \left[1 - (v_{yz})^2 \cdot \frac{E_z}{E_y} \right] (\boldsymbol{\varepsilon}_x - \alpha_x \Delta T) + \frac{E_y}{h} (v_{xy}) v_{yz} v_{zx} \frac{E_z}{h} (\boldsymbol{\varepsilon}_y - \alpha_y \Delta T) + \frac{E_z}{h} (v_{zx} + v_{yz} \cdot v_{xy}) (\boldsymbol{\varepsilon}_z - \alpha_z \Delta T) \quad \dots\dots\dots(2.33)$$

$$\sigma_y = \frac{E_y}{h} \left[1 - (v_{xz})^2 \cdot \frac{E_z}{E_x} \right] (\boldsymbol{\varepsilon}_y - \alpha_y \Delta T) + v_{xy} v_{zx} \frac{E_x}{h} (\boldsymbol{\varepsilon}_x - \alpha_x \Delta T) + \frac{E_z}{h} (v_{yz} + v_{zx} \cdot v_{xy}) (\boldsymbol{\varepsilon}_z - \alpha_z \Delta T) \quad \dots\dots\dots(2.34)$$

$$\sigma_z = \frac{E_z}{h} \left[1 - (v_{xy})^2 \cdot \frac{E_y}{E_x} \right] (\boldsymbol{\varepsilon}_z - \alpha_z \Delta T) + \frac{E_z}{h} \left(v_{yz} + v_{xz} v_{xy} \frac{E_y}{E_x} \right) (\boldsymbol{\varepsilon}_y - \alpha_y \Delta T) + \frac{E_z}{h} (v_{zx} + v_{yz} \cdot v_{xy}) (\boldsymbol{\varepsilon}_x - \alpha_x \Delta T) \quad \dots\dots\dots(2.35)$$

dan besar tegangan sisa dalam arah geser adalah:

$$\sigma_{xy} = G_{xy} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{xy} \quad \dots\dots\dots(2.36)$$

$$\sigma_{yz} = G_{yz} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{yz} \quad \dots\dots\dots(2.37)$$

$$\sigma_{zx} = G_{zx} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{zx} \quad \dots\dots\dots(2.38)$$

dengan perubahan entalpi pada sebagai:

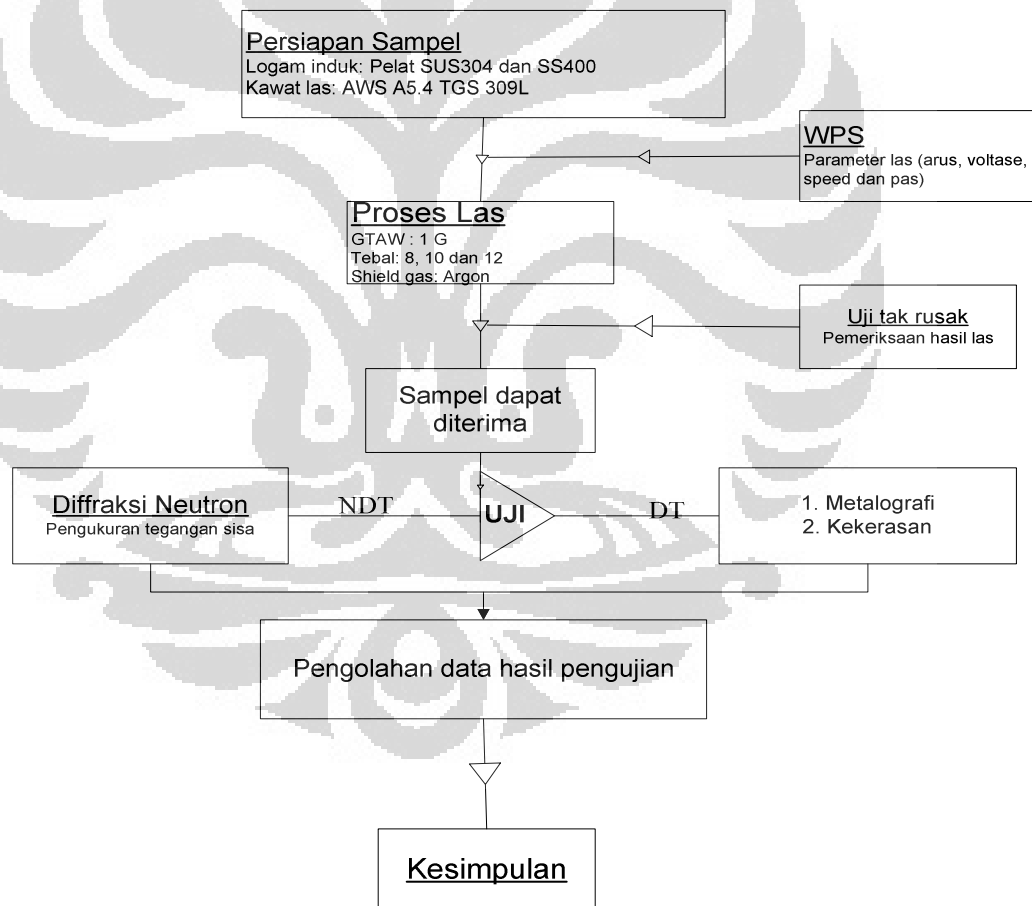
$$h = 1 - (v_{xy})^2 \frac{E_y}{E_x} - (v_{yz})^2 \frac{E_z}{E_x} - (v_{xz})^2 \frac{E_z}{E_x} - 2v_{xy} v_{yz} v_{zx} \frac{E_z}{E_x} \quad \dots\dots\dots(2.39)$$

Dalam hal ini, data-data input untuk program FEM adalah T dari Output analisa termal, $E, \boldsymbol{\varepsilon}, \alpha, v, T_{ref}$ dan outputnya adalah tegangan.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian ini dilakukan dengan dua metode, pertama penelitian tegangan sisa dilakukan secara eksperimental dan kedua penelitian dilakukan dengan pemodelan menggunakan metode elemen hingga. Adapun urutan kegiatan pada penelitian ini masing-masing adalah secara eksperimental yang ditunjukkan pada Gambar 3.1 dan secara pemodelan ditunjukkan pada Gambar 3.2. Adapun masing-masing prosedur adalah sebagai berikut:

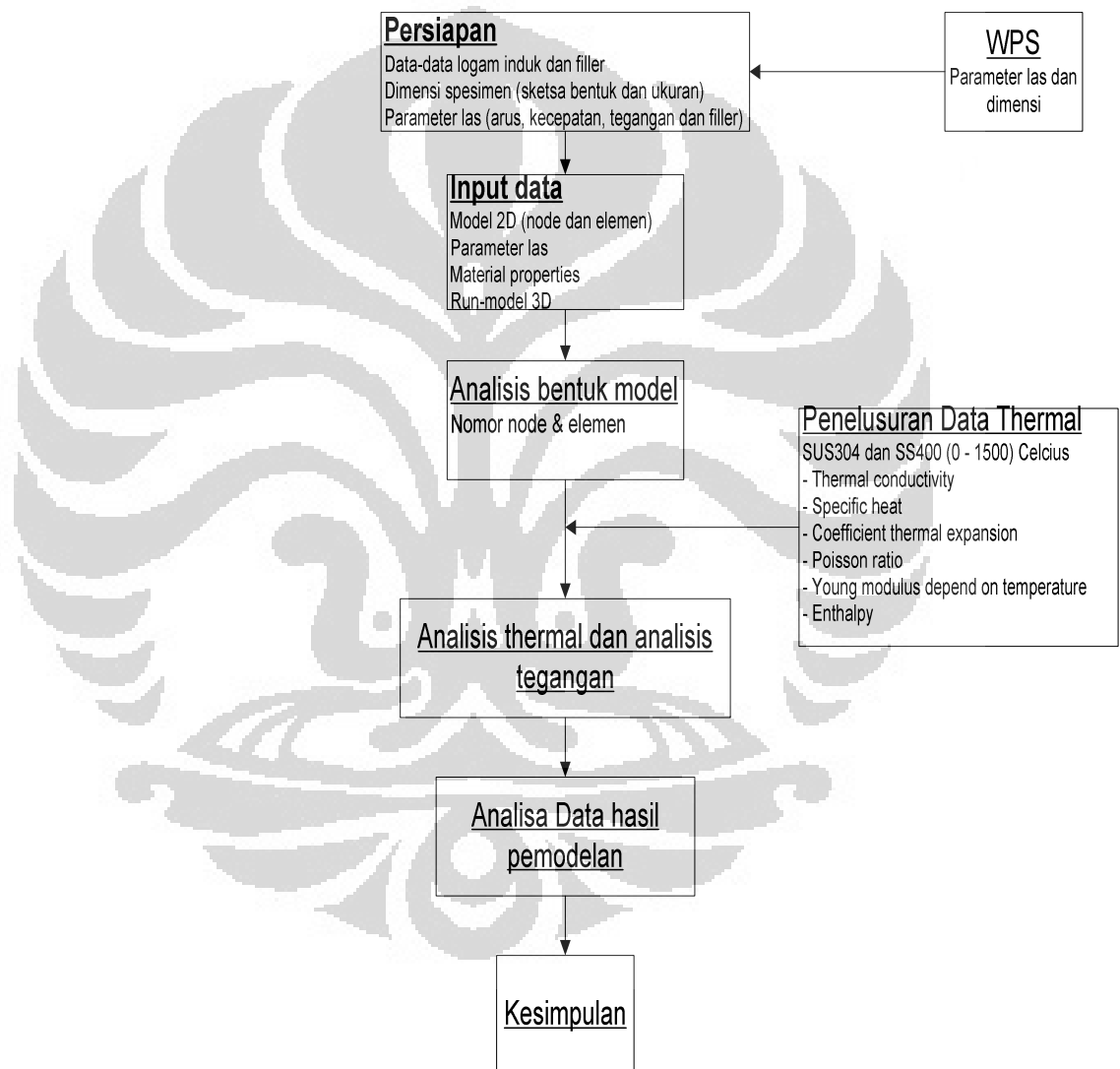
3.1 DIAGRAM ALIR PENELITIAN SECARA EKSPERIMENTAL



Gambar 3.1 Prosedur penelitian secara eksperimental

Secara paralel pemodelan dibuat untuk bentuk sampel yang serupa dengan beberapa data pendekatan, seperti jumlah pas yang sama dengan proses las tetapi kecepatan las dibuat dalam bentuk kecepatan rata-rata oleh karena pada proses pengelasan manual sangat sulit untuk membuat kecepatan konstan. Urutan pemodelan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.2.

3.2 DIAGRAM ALIR PENELITIAN DENGAN PEMODELAN



Gambar 3.2 Garis besar prosedur penelitian dengan pemodelan

3.3 PERSIAPAN

3.3.1 Logam Induk

Ada dua jenis logam induk yang digunakan, masing-masing adalah baja karbon dengan kode standar JIS 3101 SS400 dan baja tahan karat SUS304. Komposisi kimia logam induk baja karbon SS400 berdasarkan *mill certificate* pembuatnya adalah seperti ditunjukkan pada Tabel 3.1 dan baja tahan karat SUS304 seperti ditunjukkan pada Tabel 3.2.

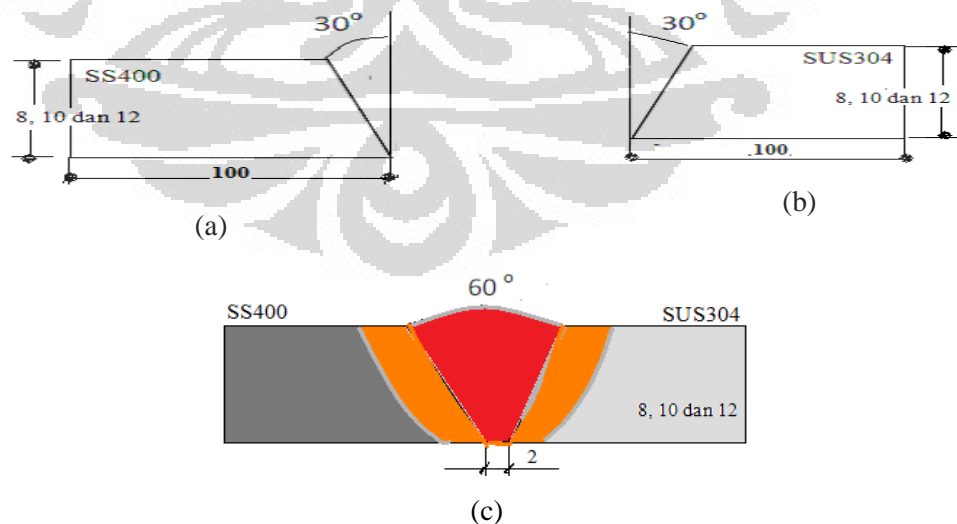
Tabel 3.1 Komposisi kimia JIS 3101 SS400

Grade	C	Mn	Si	P	S
Mill certificate	0.16	0.64	0.19	0.01	0.07
SS 400 (standar)	-	-	-	0.05 max	0.05 max

Tabel 3.2 Komposisi kimia JIS SUS304

Grade		C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	N
SUS304 (standar)	min.	-	-	-	-	-	18.0		8.0	-
	max	0.08	2.0	0.75	0.045	0.030	20.0		10.5	0.10

Dimensi yang digunakan berukuran 10 x 30 mm dengan variasi ketebalan 8, 10 dan 12 mm untuk masing-masing sampel dengan batas alur las 150 mm pada setiap sampel. Untuk setiap sampel terdiri atas satu potong SS400 dan satu potong SUS304. Bentuk sampel las adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 3.3



Gambar 3.3 Bentuk penampang sampel las (a). SS400 (b) SUS304 (c) SS400 dan SUS304 panjang alur las 150 mm dengan panjang total 300 mm siap di las

3.3.2 Kawat las

Pada pengelasan dengan dua logam induk yang berbeda (*dissimilar metal*) pemilihan kawat las yang tepat akan sangat menentukan kualitas hasil las. Untuk pengelasan baja karbon SS400 dengan *stainless steel* SUS304 akan digunakan kawat las AWS A5.22 DW-309L. Komposisi kimia kawat las yang digunakan adalah seperti ditunjukkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Komposisi kimia kawat las AWS A5.22 DW-309L

<i>Grade</i>	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	N
DW-309L (standar)	0.03	1.24	0.48	0.016	0.011	12.49	23.73	0.018

Adanya unsur Mn (mangan) pada kawat las AWS A5.22 DW-309L berfungsi sebagai deoksidator dan mengurangi oksigen pada saat pengelasan sehingga porositas dapat dicegah.

Unsur Si (silikon) akan meningkatkan fluiditas sehingga sangat cocok untuk pengelasan posisi datar (*flat*). Selain itu unsur Si dapat mengurangi porositas dan memudahkan logam las menempati alur las sehingga dapat meningkatkan kekuatan lasan.

3.4 PENGELASAN

3.4.1 Alat untuk proses las

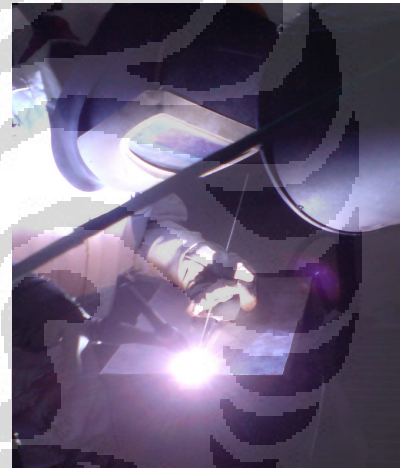
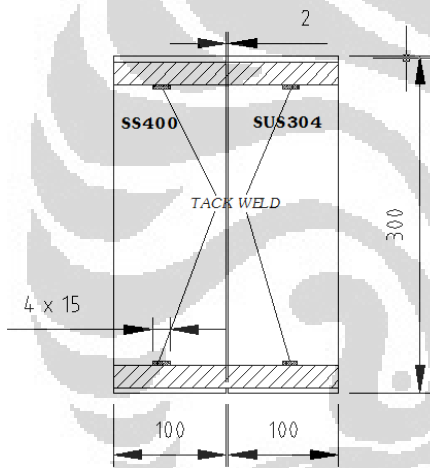
Untuk proses pengelasan digunakan alat berupa seperangkat mesin las dan alat-alat bantu lainnya. Secara rinci jenis-jenis peralatan yang digunakan selama pengerjaan las adalah:

- a. Satu set mesin las TIG (travo las TIG, selang dan tabung gas Ar, dsb).
- b. Alat keselamatan kerja las (topeng las, apron, sarung tangan las, dsb).
- c. Multimeter
- d. Tang amper
- e. *Stop watch*
- f. Sikat kawat
- g. Mesin gerinda *portable*
- h. *Water pass*

Selama proses pengelasan pengukuran arus dan tegangan dilakukan juga secara manual dengan menggunakan tang amper dan multimeter. Data tegangan, arus listrik dan kecepatan digunakan untuk menghitung masukan panas las.

3.4.2 Proses las

Pada dasarnya proses las yang dilakukan mengacu pada WPS (*Welding Procedure Specification*). Pelat berukuran 100 x 300 mm ditahan dengan menggunakan tack weld pada 4 tempat dengan panjang tack weld 15 mm seperti ditunjukkan pada Gambar 3.4(a). Selanjutnya pelat penahan dihubungkan dengan pelat lain di bawahnya. Sehingga terbentuklah sistem penahan berbentuk U atau antara penahan dan sampel membentuk kotak seperti Gambar 3.4(d).



(a) Susunan *tack weld* dilihat dari bawah

(b) Pengelasan dilihat dari depan



(c) Pengelasan dilihat dari samping



(d) Hasil las dilihat dari atas

Gambar 3.4. Susunan sampel dengan *tack weld* dan proses pengelasan

Pengelasan yang dilakukan merupakan pengelasan *dissimilar metal*. Metode las yang digunakan adalah GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) atau TIG. Posisi pengelasan bawah tangan (*down hand*) yang dinyatakan pada standar sebagai 1 G. Parameter las yang digunakan antara lain arus las 165 – 200 Ampere dengan tegangan 10 – 15 Volt. Waktu las diukur dengan menggunakan *stop watch* dengan panjang las ± 150 mm. Gas pelindung (*shielding gas*) yang digunakan adalah Ar (argon) dengan kecepatan alir 20 hingga 25 liter/menit.

3.4.3 Uji tak rusak dengan radiografi

Setelah proses las selesai hasil las diperiksa dengan menggunakan uji tak rusak. Jenis uji tak rusak yang dilakukan menggunakan radiografi. Berdasarkan hasil uji hasil las sampel dapat diterima. Dari hasil uji radiografi dipilih daerah hasil las yang cukup baik untuk diteliti pada jarak 85 mm dari posisi awal las.

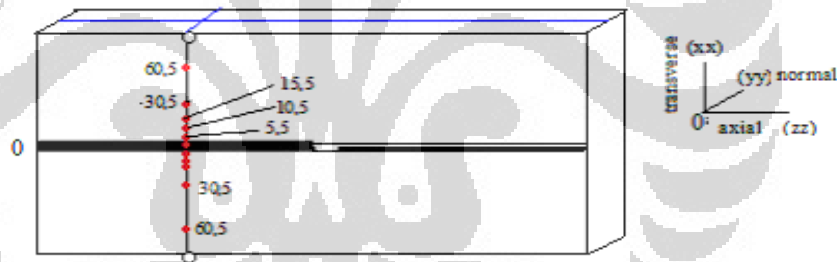
3.5 PENGUKURAN TEGANGAN SISA DENGAN DIFRAKSI NEUTRON

Untuk menghitung besar tegangan sisa yang terjadi pada sampel dilakukan dengan pengukuran regangan di sekitar pengelasan. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan alat difraktometer neutron (DN1 – M) yang terpasang pada tabung berkas no.6 (S – 6) di RSG GAS (Reaktor Serba Guna G. A. Siwabessi) BATAN Serpong. Titik-titik pengukuran sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.5. Celah (*slit*) jalan neutron yang digunakan selama pengukuran ada dua, yaitu pada *incident slit* dan pada detektor. Penggunaan *incident slit* untuk setiap pengukuran seperti ditunjukkan pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Ukuran slit dan posisi pengukuran sampel pada setiap jenis pengukuran

No	Jenis Pengukuran	Ukuran <i>Slit</i> (mm)		Jarak Sampel ke (mm)	
		<i>Incident</i>	Detektor	<i>Incident</i>	Detektor
1	Tansversal	3 x 10	3 x 10	140	100
2	Normal	3 x 10	3 x 10	140	100
3	Axial	3 x 3	3 x 10	140	100
4	Si ₁₁₁ , Si ₂₂₀ , Si ₃₁₁ , Si ₃₁₁ , Si ₄₀₀	3 x 10	3 x 10	140	100
5	Si ₁₁₁ , Si ₂₂₀ , Si ₃₁₁ , Si ₃₁₁ , Si ₄₀₀	3 x 3	3 x 10	140	100

Pada pengukuran dengan menggunakan DN1-M, prosedur standar pengoperasian peralatan harus diikuti. Persiapan merupakan langkah awal yang mula-mula dilakukan. Persiapan dimulai dari kalibrasi untuk memastikan apakah ketelitian peralatan yang akan digunakan cukup akurat atau tidak. Dengan melakukan pemeriksaan kelurusan titik nol (titik referensi) meja sampel terhadap titik tengah dari posisi *incident slit* dengan bantuan *theodolite* dan instrument berupa *center tools* berbentuk tirus. Posisi meja sampel terhadap *incident slit* harus segaris. Selain pemeriksaan dan pengaturan secara manual, pemeriksaan dan pengaturan juga dilakukan dengan menggunakan hamburan neutron dan alat detektor dan *center tools* yang diberi celah sebesar celah *incident slit* dan dibungkus dengan todolinium. Manfaat todolinium untuk menyerap neutron sehingga pengaturan posisi titik nol dapat terkoreksi dengan benar menggunakan neutron. Proses persiapan alat DN1-M diakhiri dengan memeriksa sudut θ dan 2θ . Setelah referensi titik nol DN1-M diperoleh maka sampel siap diatur pada meja sampel untuk proses pengukuran.



Gambar 3.5 Sampel dengan titik-titik yang akan diukur

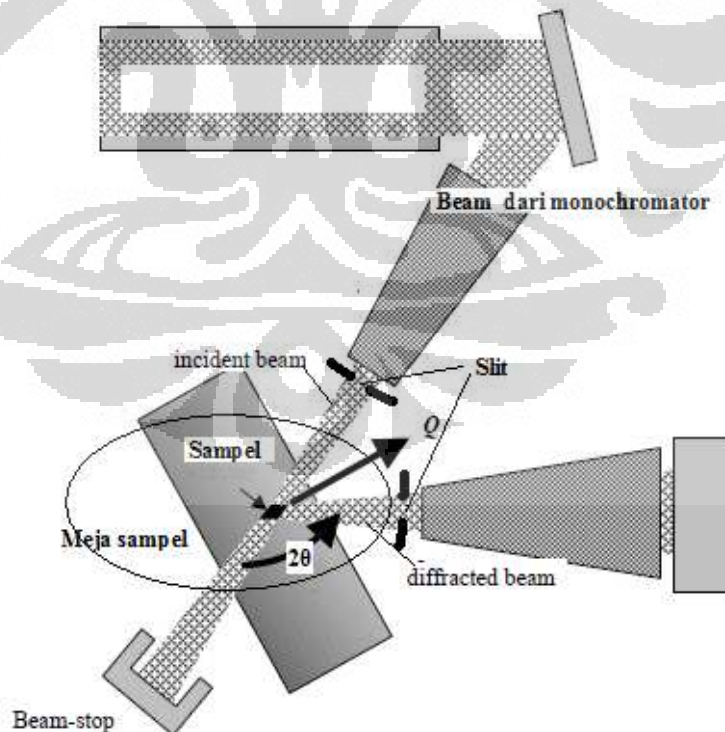
Pada penelitian ini pengukuran dilakukan pada jarak 85 mm dari ujung awal las kemudian secara tegak lurus ke arah samping yang tegak lurus sumbu las, titik 0 pada sumbu las, kemudian ke arah SUS304 pada jarak 5, 5 mm, 10,5 mm, 15,5 mm, 30,5 mm dan 60,5 mm dari titik nol. Demikian juga selanjutnya untuk pengukuran SS400 pada jarak 5, 5 mm, 10,5 mm, 15,5 mm, 30,5 mm dan 60,5 mm. Pada setiap titik, ada 3 arah pengukuran, yaitu arah transversal, normal dan aksial. Posisi daerah yang diukur terletak ditengah-tengan sampel pada jarak-jarak tersebut di atas. Hal ini dapat dilakukan oleh karena neutron memiliki kemampuan daya tembus terhadap material yang cukup besar..

Sampel diletakkan pada meja sampel berdasarkan sudut inklinasi sesuai indeks miller yang digunakan. Untuk material SS400 indeks miller 200 sedangkan untuk SUS304 indeks miller 220. Sudut 2θ untuk indek miller 200 dan indeks miller 220 seperti pada Tabel 3.5. Indeks miller 311, 331 dan 400 juga diperoleh pada pengukuran sampel standar Si pada saat kalibrasi panjang gelombang. Tata letak sampel untuk arah transversal pada meja sampel seperti pada Gambar 3.5. Untuk arah normal adalah tegak lurus arah transversal. Dan untuk arah axial adalah sampel diputar 90^0 . Secara lengkap letak posisi sampel seperti ditunjukkan pada Gambar 3.6 dan 3.7.

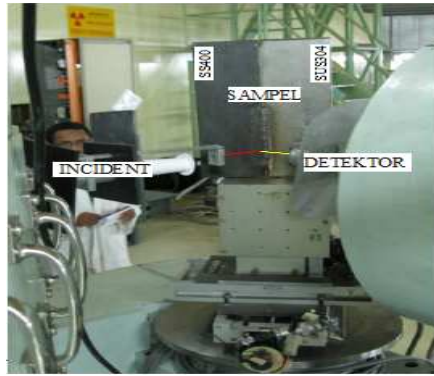
Tabel 3.5 Pengaturan sampel yang biasa digunakan untuk jarak d menggunakan neutron monochromator.^[18]

Sampel	hkl	d_s (nm)	1 Diperlukan untuk $2\theta = 90^0$ (nm)	Pilihan sudut TOF* Si 220
Mild steel	200	0,118	0,167	52
Baja paduan rendah	111	0,204	0,288	97
Stainless Steel, Ni based alloy dan Cu	220	0,127	0,180	56

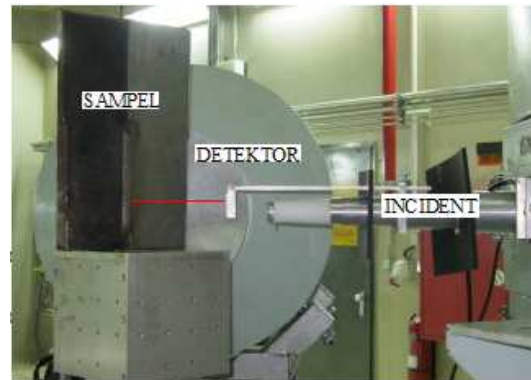
*) Time Of Flight methods



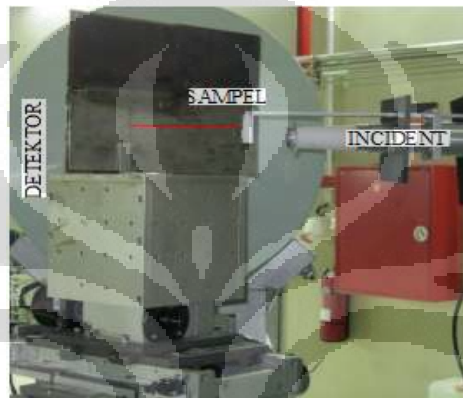
Gambar 3.6. Tata letak sampel, pengukuran arah transversal pada meja sampel^[18]



a. Pengukuran arah transversal



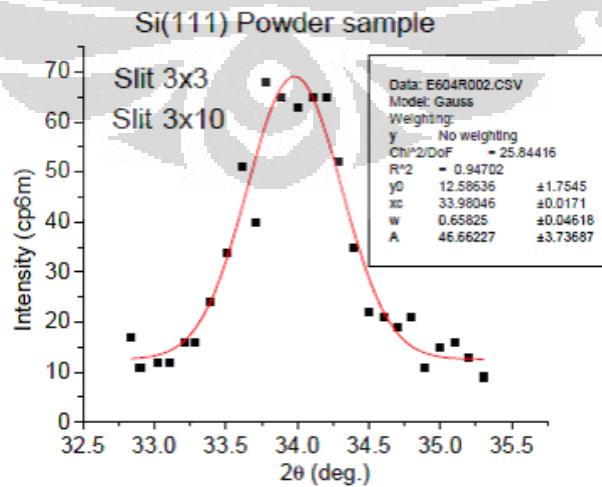
b. Pengukuran arah normal



c. Pengukuran arah axial

Gambar 3.7 Tiga posisi arah pengukuran titik-titik sampel pada alat DN1-M

Kalibrasi panjang gelombang dilakukan dengan material sampel standar. Pada penelitian ini digunakan Silikon serbuk NBS640b. Pola hamburan sampel standar berdasarkan distribusi gauss salah satunya seperti ditunjukkan pada Gambar 3.8. Titik - titik pada gambar merupakan hasil pengukuran. Hasil perhitungan



Gambar 3.8 Pola hamburan standar Si serbuk NBS640b

ditunjukkan oleh garis kurva yang merupakan hasil distribusi Gauss. Proses pengolahan data untuk hasil pengukuran neutron pada tiap-tiap titik yang diukur regangannya dapat dianalisis.

Berdasarkan hasil pengukuran akan dapat diperoleh besar nilai $2\theta_{hkl}$ dan panjang gelombang λ sehingga jarak antar bidang atom (*lattice spacing*) d_{hkl} dapat dihitung dengan menggunakan persamaan Bragg's yang ditunjukkan pada persamaan 2.3. Nilai ini disebut sebagai nilai bidang d_{200} untuk material SS400 dan nilai bidang d_{220} untuk material SUS304 dan las. Jarak bidang d_{200} maupun d_{220} merupakan jarak bidang untuk material yang tidak mengalami proses las dan terhindar dari pengaruh panas las. Dengan menggunakan persamaan 2.3 untuk menghitung d_{200} dan d_{220} kemudian menggunakan persamaan 2.8 untuk d_{0200} dan d_{0220} . Selanjutnya, besar regangan dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan 2.7. Cara lain yang dapat digunakan adalah dengan memasukkan langsung nilai-nilai θ_{hkl} yang diperoleh dari perhitungan $2\theta_{hkl}$ seperti ditunjukkan pada persamaan 2.9. Pada penelitian ini nilai regangan akan dihitung dengan persamaan 2.9 kemudian dikoreksi dengan persamaan 2.7. Dari hasil perhitungan regangan kemudian dilakukan perhitungan tegangan dengan menggunakan persamaan 2.11, 2.12 dan 2.13. Pengolahan data hasil pengukuran untuk memperoleh nilai $2\theta_{hkl}$ dilakukan dengan bantuan *software* Origin[®] 7 dan *microsoft excel*.

3.6 PENGUJIAN METALOGRAFI

Pengujian metalografi dilakukan untuk melihat hasil permukaan las-lasan secara makro dan mikro. Pengamatan struktur dilakukan pada daerah las-lasan, HAZ dan kedua logam induk yang digunakan. Proses kerja yang dilakukan untuk pemeriksaan metalografi adalah bagian material yang ditinjau dipotong pada tampak lintangnya. Setelah selesai dipotong, permukaan dihaluskan dengan menggunakan amplas dan dipoles hingga *grid* 1200. Pemeriksaan struktur kemudian dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik. Untuk pemeriksaan struktur makro dilakukan dengan pembesaran 7X sedangkan untuk pemeriksaan struktur mikro dengan pembesaran 200X. Dengan pemeriksaan mikro struktur

akan dapat terlihat adanya kemungkinan terbentuknya pertumbuhan butir baru pada SS400 dan terjadinya korosi batas butir (sensitasi) pada SUS304. Pengujian ini dilakukan untuk mendukung analisis hasil pengukuran tegangan sisa yang diperoleh.

3.7 PENGUJIAN KEKERASAN

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui nilai kekerasan pada permukaan pada daerah las, HAZ dan logam induk. Pengujian kekerasan dilakukan pada titik-titik dimana pengukuran tegangan sisa dilakukan. Pengukuran kekerasan dilakukan dengan menggunakan alat uji kekerasan Vickers. Pengujian ini dilakukan untuk mendukung analisis hasil pengukuran dengan neutron.

3.8 PENELITIAN DENGAN SIMULASI.

Tahapan – tahapan pada saat pengelasan dibuat, menjadi bahan pertimbangan dalam pembuatan data masukan. Secara sistematis, tahap simulasi dengan FEM dibuat dengan menggunakan *code program* Marc Mentat 2010. Tahapan yang dilakukan meliputi:

3.8.1 Persiapan

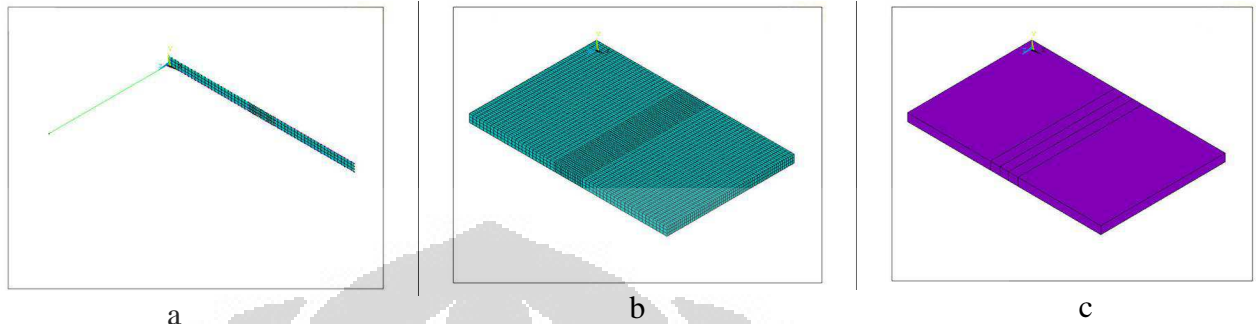
Pada tahap ini data berupa bentuk geometri sampel, ukuran panjang, lebar dan tebal, bentuk sambungan V, kecepatan jalan proses las (*heat input*) dan masukan panas las disiapkan. Data-data tersebut diperoleh sesuai proses las yang dilakukan.

Data lainnya adalah sifat-sifat material (*material properties*) seperti, *young modulus*, *thermal conductivity*, *specific heat* dan *enthalpy* dicari berdasarkan penelusuran literatur.

3.8.2 Pembuatan geometri struktur las

Pembuatan geometri struktur las dimulai dari pembuatan bentuk penampang dua dimensi dari sampel. Selanjutnya, dilakukan pembuatan satu titik lalu dihubungkan dengan penampang dua dimensi dengan satu garis sesuai dengan panjang sampel. Dengan memasukkan data kecepatan gerak jalan las,

selanjutnya *code program* di jalankan hingga akhirnya diperoleh bentuk sampel tiga dimensi. Proses pembuatan geometri struktur las sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.9



Gambar 3.9. Urutan simulasi pengelasan untuk pembuatan model sampel

3.8.3 Pengolahan data material properties SS400 dan SUS304

Material properties SS400 dan SUS304 yang akan digunakan pada proses simulasi las dengan *code program* merupakan properties yang bergantung pada temperatur. Berdasarkan penelusuran literatur, data-data simulasi diperoleh dalam bentuk grafik. *Code program* tidak dapat mengolah data grafik. Oleh karena itu, dengan menggunakan model matematis polinomial, grafik diubah menjadi bentuk angka. Simulasi polinomial dibuat dengan menggunakan bahasa C. Data yang diperoleh kemudian ditabelkan dengan menggunakan program *microsoft excel*.

3.8.4 Syarat-syarat batas, pembebanan dan perhitungan distribusi temperatur

Pemberian syarat batas diperlukan untuk mengkondisikan proses simulasi sebagaimana pelaksanaan proses las pada saat pembuatan sampel. Syarat-syarat batas tersebut meliputi, penempatan jepitan sampel atau *tack weld* pada sampel, penentuan jenis analisis dan pemberian *heat flux*. Setelah data-data tersebut dimasukkan selanjutnya program di-*run* untuk dapat memperoleh hasil analisis termal dengan melakukan perhitungan distribusi temperatur.

3.8.5 Analisis distribusi panas las

Analisis distribusi panas las ditujukan untuk mengetahui masukan panas las yang terjadi pada logam las baik di daerah lasan, HAZ maupun logam induk.

Karena perbedaan konduktivitas panas dari kedua material maka ada kemungkinan terjadi perbedaan proses penerimaan panas maupun pendinginannya. Ini dilakukan untuk lebih memperkuat berbagai argumen tentang karakteristik dari pengelasan dissimilar antara SUS304 dengan JIS3101 SS400. Analisis ini dilakukan dengan simulasi karena pada saat pembuatan sampel pengukuran perubahan temperatur pada sampel dan daerah lasan sangat sulit untuk dilakukan. Oleh karena itu analisis dengan simulasi diharapkan dapat mendekati keadaan perubahan temperatur pada sampel guna melengkapi hasil karakterisasi hasil las antara material stainless steel SUS304 dengan baja karbon JIS3101 SS400.

3.8.6 Kesimpulan

Sebagai bagian akhir dari penelitian ini adalah diperolehnya kesimpulan yang menjelaskan tentang karakterisasi tegangan sisa hasil las dissimilar metal antara SUS304 dengan SS400.

BAB IV DATA HASIL PENELITIAN

4.1 PENELITIAN DENGAN EKSPERIMENTAL

4.1.1 Masukan Panas (*Heat Input*) Las

Masukan panas las dihitung dengan menggunakan persamaan 2.2. Dari hasil perhitungan untuk tiap pas las diperoleh nilai yang berbeda dipengaruhi oleh kecepatan proses las. Perbedaan tersebut karena proses las yang dilakukan secara manual. Hasil perhitungan masukan panas las seperti ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil perhitungan masukan panas las pada tiap-tiap sampel

TEBAL PELAT (mm)	NO. PAS LAS	JARAK mm	ARUS LAS Amper	TEGANGAN LISTRIK Volt	KECEPATAN mm/menit	HEAT INPUT kJ/mm	TOTAL HEAT INPUT kJ/mm
8	1	140	165	11	38	2,86	8,08
	2	140	165	11	51	2,15	
	3	140	165	11	77	1,42	
	4	140	165	11	66	1,65	
10	1	140	165	11	36	3,06	10,71
	2	140	165	11	47	2,33	
	3	140	165	11	66	1,66	
	4	140	165	11	57	1,91	
	5	140	165	11	62	1,75	
12	1	143	170	12	41	3,01	15,41
	2	143	190	12	41	3,32	
	3	143	195	13	65	2,34	
	4	143	195	13	59	2,57	
	5	143	195	13	85	1,79	
	6	143	195	13	64	2,38	

4.1.2 Distorsi Pada Sampel

Sampel las pada saat akan dilas ditahan pada empat titik dengan menggunakan *tack weld* pada bagian bawah sampel dengan menggunakan pelat tebal (25 mm) seperti ditunjukkan pada Gambar 3.4. Berdasarkan hasil pengukuran diperoleh perubahan besar sudut seperti Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Distorsi pada sampel yang diukur berdasarkan perubahan sudut

No	Sampel	Panjang Awal (mm)	Panjang Hasil (mm)	Sudut Distorsi ($^{\circ}$)
1	Sampel 1 (8 mm)	200	199,98	1,29
2	Sampel 2 (10 mm)	200	199,94	1,93
3	Sampel 3 (12 mm)	200	199,84	3,22

4.1.3 Pengukuran Tegangan Sisa

Pengukuran tegangan sisa DN1-M menggunakan sumber neutron *monochromatic*. Berdasarkan Standar Operasi Prosedur (SOP) alat DN1-M, setiap kali melakukan pengukuran sampel kalibrasi panjang gelombang harus dilakukan. Pada penelitian ini, perhitungan panjang gelombang menggunakan silikon (Si) standar dengan bidang Indeks Miller 111, 220, 311 dan 331 dan 400.

Ada 2 ukuran *slit* yang digunakan pada pengukuran sampel di penelitian ini, yaitu, pertama: Ukuran *slit* 3x10 mm pada *incident beam* dan 3x10 mm pada detektor untuk arah transversal dan normal. Kedua, ukuran *slit* 3x3 pada *incident beam* dan 3x10 pada detektor untuk arah aksial. Berdasarkan hasil pengukuran, besar panjang gelombang yang menjadi acuan pada pengolahan data penelitian ini adalah:

1. Untuk arah transversal dan normal dengan menggunakan sampel standar Si dan ukuran *slit* 3x10 pada *incident beam* pada jarak 100 mm dan ukuran *slit* 3x10 pada detektor pada jarak 140 mm diperoleh nilai panjang gelombang (λ) sebesar 1,836461 nm dengan ketidakpastian (*uncertainty*) 0,000293 nm.
2. Untuk arah aksial menggunakan sampel standar Si yang sama dengan ukuran *slit* 3x3 pada *incident beam* pada jarak 100 mm dan dengan ukuran *slit* 3x10 pada detektor pada jarak 140 mm diperoleh panjang gelombang 1,839875 nm dengan ketidakpastian 0,001043 nm.

Pengukuran Perhitungan dilakukan dengan bantuan *software* Origin (R) 7 dan *microsoft excel*. Keakuratan hasil pengukuran cukup baik. Perhitungan Hasil pengukuran panjang gelombang seperti ditunjukkan pada Tabel 4.3 dan Tabel 4.4.

Tabel 4.3 Pengukuran panjang gelombang neutron dengan *slit* 3x10; 3x10 mm

Calculation of DN1 Lambda at 2011/1/18								Slit 3 x 10; 3x10 mm			
RSG-GAS Serpong											
	Si	a=	5,43094	Used Si : (NBS 640b)		$\lambda_0 = 1,825$		slit 3x10			
		u(a)=	0,000011	(J Appl. Cryst. (2007) 40, 232-240)							
h	k	l	d	2 θ	u (2 θ)	λ	2 θ cal	1/d · cos θ	$\Delta 2 \theta$	u (λ)	
1	1	1	3,13555	34,0464	0,006	1,8359	33,84	0,3335	0,2086	0,000171	
2	2	0	1,920127	57,1409	0,00679	1,8366	56,75	0,5930	0,3924	0,000109	
3	1	1	1,637490	68,2228	0,00915	1,8366	67,73	0,7376	0,4904	0,000118	
3	3	1	1,245943	94,9684	0,02195	1,8368	94,17	1,1877	0,7964	0,000176	
			Lambda(avr) 111 to 331 = 1,836461								
			u(lambda)= 0,000293								

Tabel 4.4 Pengukuran panjang gelombang neutron dengan *slit* 3x3; 3x10 mm

Calculation of DN1 Lambda at 2011/1/18								Slit 3 x 3; 3 x 10			
RSG-GAS Serpong											
	Si	a=	5,43094	Used Si : (NBS 640b)		$\lambda_0 = 1,825$		slit 3x3			
		u(a)=	0,000011	(J Appl. Cryst. (2007) 40, 232-240)							
h	k	l	d	2 θ	u (2 θ)	λ	2 θ cal	1/d · cos θ	$\Delta 2 \theta$	u (λ)	
1	1	1	3,1356	34,109	0,02837	1,8392	33,8377	0,3336	0,2718	0,000807	
2	2	0	1,9201	57,286	0,02579	1,8408	56,7485	0,5934	0,5377	0,000412	
3	1	1	1,6375	68,347	0,03234	1,8396	67,7324	0,7381	0,6141	0,000416	
4	0	0	1,3577	85,307	0,03234	1,8399	84,4549	1,0014	0,8518	0,000306	
								Intercept= -0,042254			

Calculation of DN1 Lambda at 2011/1/18											
RSG-GAS Serpong											
	Si	a= 5,43094	Used Si : (NBS 640b)		$\lambda_0 = 1,825$		slit 3x3				
		u(a)= 0,000011	(J Appl. Cryst. (2007) 40, 232-240)								
h	k	l	d	2 θ	u (2 θ)	λ	2 θ cal	1/d · cos θ	$\Delta 2 \theta$	u (λ)	
1	1	1	3,1356	34,109	0,02837	1,8392	33,8377	0,3336	0,271759	0,000807	
2	2	0	1,9201	57,286	0,02579	1,8408	56,7485	0,5934	0,537722	0,000412	
3	1	1	1,6375	68,347	0,03234	1,8396	67,7324	0,7381	0,614113	0,000416	
4	0	0	1,3577	85,307	0,03234	1,8399	84,4549	1,0014	0,851791	0,000306	
								Intercept= 0,000114			
			Lambda(avr) 111 to 331 = 1,839875			2Theta correction = -0,042254					
			u(lambda)= 0,001043								

Setelah perhitungan panjang gelombang dilakukan terhadap sampel. Pengukuran dimulai dari sampel dengan tebal 8 mm pada bagian las dan HAZ SUS304, kemudian dilanjutkan ke sampel dengan tebal 10 mm dan sampel dengan tebal 12 mm. Selanjutnya dilakukan pada bagian HAZ SS400. Hasil pengukuran 2θ dan perhitungan regangan sesuai persamaan 2.9 dan hasil perhitungan jarak bidang (d_{hkl}) terlampir, sedangkan hasil perhitungan jarak bidang, regangan dan tegangan Tabel 4.5 untuk sampel dengan tebal 8 mm, 4.6 untuk sampel dengan tebal 10 mm dan 4.7 untuk sampel dengan tebal 12 mm.

Tabel 4.5 Perhitungan jarak bidang d_{0220} , d_{220} , regangan SUS304, regangan dan tegangan sisa SUS 304 sampel dengan tebal 8 mm

SAMPSEL	ARAH	JARAK	d_{0220}	d_{220}	e_{220}	s_x
		(mm)	(μm)	(μm)		MPa
1	2	3	4	5	6	8
(8 mm)	Transv.	0	1,271755	1,271377	-29,7131	-25
SUS304	sumbu -X	5,5	1,269343	1,270487	16,79485	-4
		10,5		1,270463	14,86809	-4
		15,5		1,270686	32,45512	-3
		30,5		1,2706	25,65444	8
		60,5		1,270282	0,666958	11
SAMPSEL	ARAH	JARAK	d_{0220}	d_{220}	e_{220}	s_y
1	2	3	4	5	6	8
(8 mm)	Normal	0	1,270403	1,270836	-72,2095	-31
SUS304	sumbu-Y	5,5		1,269029	-24,9044	-7
		10,5		1,269098	-19,4725	-6
		15,5		1,269022	-25,4784	-9
		30,5		1,269552	16,3277	-1
		60,5		1,269881	42,24751	8
SAMPSEL	ARAH	JARAK	d_{0220}	d_{220}	e_{220}	s_z
1	2	3	4	5	6	8
(8 mm)	Axial	0	1,269337	1,270678	-84,6384	-34
SUS304	sumbu- Z	5,5		1,269083	-20,0089	-6
		10,5		1,269078	-20,3589	-6
		15,5		1,268614	-56,9593	-14
		30,5		1,268434	-71,1335	-14
		60,5		1,268914	-33,3329	-4

Tabel 4.6 Perhitungan jarak bidang d_{0200} dan d_{200} , regangan SS400 dan tegangan sisa SS400 sampel dengan tebal 8 mm

Sampel	ARAH	JARAK	d_{0200}	d_{200}	e_{200}	s_x
(8 mm)	Transv.	-5,5	1,43331	1,433355	2,990063	-13
SS400	sumbu- X	-10,5		1,432785	-36,8155	-31
		-15,5		1,434382	74,64589	-17
		-30,5		1,434272	66,96822	-17
		-60,5		1,434296	68,64397	-14
Sampel	ARAH	JARAK	d_{0200}	d_{200}	e_{200}	s_y
(8 mm)	Normal	-5,5	1,433224	1,432255	-67,6335	-22
SS400	sumbu-Y	-10,5	1,433224	1,432931	-20,4618	-29
		-15,5	1,433224	1,431934	-90,029	-23
		-30,5	1,433224	1,432319	-63,157	-19
		-60,5	1,433224	1,43252	-49,1395	-17
Sampel	ARAH	JARAK	d_{0200}	d_{200}	e_{200}	s_z
(8 mm)	Axial	-5,5	1,432563	1,432015	-38,2359	-18
SS400	sumbu-z	-10,5		1,431308	-87,6112	-30
		-15,5		1,431487	-75,1065	-21
		-30,5		1,431334	-85,8057	-22
		-60,5		1,431116	-101,019	-24

Tabel 4.7 Perhitungan jarak d_{0220} , d_{220} , regangan SUS304 dan tegangan sisa SUS 304 pada sampel dengan tebal 10 mm

Sampel	ARAH	JARAK	d_{0220}	d_{220}	e_{220}	s_x
(10 mm)	Transv.	0	1,271755	1,2711	-53,15	-46
SUS304	sumbu-x	5,5	1,269209	1,2707	117,77	16
		10,5		1,2705	104,39	14
		15,5		1,2706	107,39	8
		30,5		1,2704	95,86	8
		60,5		1,2702	76,68	3
Sampel	ARAH	JARAK	d_{0220}	d_{220}	e_{220}	s_y
(10 mm)	Normal	0	1,270438	1,2671	-365,26	-94
SUS304	sumbu-y	5,5		1,2685	-152,64	-26
		10,5		1,2690	-109,38	-19
		15,5		1,2689	-120,30	-27
		30,5		1,2690	-110,16	-24
		60,5		1,2694	-82,22	-21
Sampel	ARAH	JARAK	d_{0220}	d_{220}	e_{220}	s_z
(10 mm)	Axial	0	1,270779	1,2726	63,41	-28
SUS304	sumbu-z	5,5		1,2709	12,61	0
		10,5		1,2706	-14,79	-4
		15,5		1,2700	-64,38	-18
		30,5		1,2701	-51,96	-15
		60,5		1,2698	-73,70	-20

Tabel 4.8 Perhitungan jarak bidang d_{0200} , d_{200} , regangan SS400 dan tegangan sisa SS400 pada sampel dengan tebal 10 mm

Sampel	ARAH	JARAK	d_{0200}	d_{200}	e_{200}	s_x
(10 mm)	Transv.	-5,5	1,43380	1,4345	45,51	6
SS400	sumbu-x	-10,5		1,4342	27,37	0
		-15,5		1,4338	-2,31	-20
		-30,5		1,4339	6,66	-29
		-60,5		1,4336	-15,11	-10
Sampel	ARAH	JARAK	d_{0200}	d_{200}	e_{200}	s_y
(10 mm)	Normal	-5,5	1,432651	1,4318	-61,35	-8
SS400	Sumbu-y	-10,5		1,4324	-14,36	-6
		-15,5		1,4318	-58,53	-28
		-30,5		1,4321	-41,42	-35
		-60,5		1,4325	-12,21	-10
Sampel	ARAH	JARAK	d_{0200}	d_{200}	e_{200}	s_z
(10 mm)	Axial	-5,5	1,432874	1,4331	15,67	2
SS400	Sumbu-z	-10,5		1,4323	-43,25	-9
		-15,5		1,4315	-96,60	-33
		-30,5		1,4300	-198,54	-56
		-60,5		1,4323	-38,24	-13

Tabel 4.9 Hasil perhitungan jarak bidang d_{0200} , d_{200} , regangan SUS304 dan tegangan sisa SUS304 pada sampel dengan tebal 12 mm

Sampel	ARAH	JARAK	d_{0220}	d_{220}	e_{220}	s_x
(12 mm)	Transv.	0	1,271755	1,2711	-50,63	-16
SUS304	sumbu-x	5,5	1,269965	1,2711	86,53	13
		10,5		1,2710	84,14	17
		15,5		1,2707	56,31	9
		30,5		1,2706	50,89	4
		60,5		1,2706	47,69	17
Sampel	ARAH	JARAK	d_{0220}	d_{220}	e_{220}	s_y
(12 mm)	Normal	0	1,270015	1,2722	33,20	-3
SUS304	sumbu-y	5,5		1,2692	-61,99	-10
		10,5		1,2694	-46,42	-4
		15,5		1,2694	-45,12	-7
		30,5		1,2696	-28,92	-8
		60,5		1,2699	-9,68	8
Sampel	ARAH	JARAK	d_{0220}	d_{220}	e_{220}	s_z
(12 mm)	Axial	0	1,271525	1,2710	-55,89	-16
SUS304	sumbu-z	5,5		1,2711	-30,30	-5
		10,5		1,2715	-4,01	3
		15,5		1,2714	-10,34	-2
		30,5		1,2708	-56,97	-13
		60,5		1,2722	50,83	17

Tabel 4.10 Hasil perhitungan jarak bidang d_{0200} , d_{200} , regangan SS400 dan tegangan sisa SS400 pada sampel dengan tebal 12 mm

Sampel	ARAH	JARAK	d_{0200}	d_{200}	e_{200}	s_x
--------	------	-------	------------	-----------	-----------	-------

(12 mm)	Transv.	-5,5	1,43362	1,4348	81,95	3
SS400	sumbu-x	-10,5		1,4345	63,57	-16
		-15,5		1,4351	102,66	-11
		-30,5		1,4343	49,91	-18
		-60,5		1,4349	88,93	-13
Sampel	ARAH	JARAK	d ₀₂₀₀	d ₂₀₀	e ₂₀₀	sy
(12 mm)	Normal	-5,5	1,433672	1,4324	-91,32	-19
SS400	Sumbu-y	-10,5		1,4325	-81,25	-35
		-15,5		1,4321	-109,09	-39
		-30,5		1,4326	-74,56	-34
		-60,5		1,4337	-0,41	-25
Sampel	ARAH	JARAK	d ₀₂₀₀	d ₂₀₀	e ₂₀₀	sz
(12 mm)	Axial	-5,5	1,435585	1,4349	-48,37	-14
SS400	Sumbu-z	-10,5		1,4331	-175,48	-47
		-15,5		1,4329	-189,28	-50
		-30,5		1,4331	-169,98	-47
		-60,5		1,4315	-284,83	-62

4.1.4 Pengujian Kekerasan Makro

Pengujian kekerasan yang dilakukan pada sampel tebal 8 mm, 10 mm dan 12 mm dilakukan pada bagian tengah material sebagaimana posisi pengukuran tegangan sisa yang dilakukan. Tujuan dilakukan pengukuran kekerasan untuk membandingkan secara langsung pengaruh tegangan terhadap kekerasan logam. Dari hasil pengujian kekerasan akan terlihat bahwa pada daerah yang memiliki besar tegangan sisa cukup besar akan memiliki nilai kekerasan yang tinggi. Pada material SUS304 potensi kekerasan yang tinggi berada pada daerah HAZ. Ini terjadi karena terbentuknya korosi batas butir yang membentuk krom karbida. Pada SS400, bagian yang keras juga terjadi pada daerah HAZ setelah melewati daerah pertumbuhan butir. Hal ini disebabkan oleh karena terjadinya rekristalisasi pada butir baja karbon SS400. Hasil pengujian kekerasan makro dilakukan dengan metode Vickers. Hasil pengujian kekerasan makro tersebut sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11. Hasil pengujian kekerasan makro

Metode : Vickers
Beban : 20 kgf

Waktu : 10 detik

Bahan Uji: Pengelasan dissimilar metal, SUS304, SUS309 dan JIS-SS400

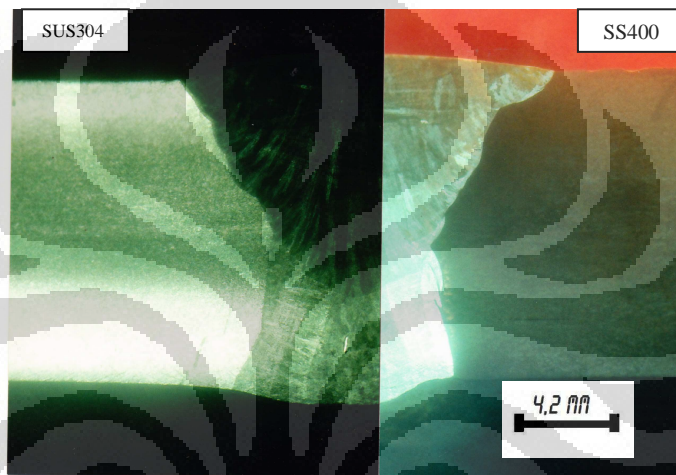
Jenis/Sampel	Jarak dari las	d1	d2	\bar{d}	HV	Keterangan
SAMPEL 1	-60,5	0,48	0,49	0,485	158	JIS-SS400
	-30,5	0,49	0,49	0,49	154	JIS-SS400
Tebal 8 mm	-20,5	0,47	0,48	0,475	164	JIS-SS400
	4 pas las	-15,5	0,47	0,47	0,47	168
	-10,5	0,47	0,48	0,475	164	JIS-SS400
	-5,5	0,46	0,47	0,465	171	JIS-SS400
	0	0,43	0,44	0,435	196	JIS-SUS309
	5,5	0,40	0,40	0,400	232	JIS-SUS304
	10,5	0,40	0,41	0,405	226	JIS-SUS304
	15,5	0,40	0,41	0,405	226	JIS-SUS304
	20,5	0,43	0,43	0,43	201	JIS-SUS304
	30,5	0,43	0,43	0,43	201	JIS-SUS304
	60,5	0,44	0,44	0,44	192	JIS-SUS304
SAMPEL 2	-60,5	0,49	0,50	0,495	151	JIS-SS400
	-30,5	0,48	0,48	0,48	161	JIS-SS400
Tebal 10 mm	-20,5	0,48	0,48	0,48	161	JIS-SS400
	5 pas las	-15,5	0,47	0,48	0,475	164
	-10,5	0,47	0,47	0,47	168	JIS-SS400
	-5,5	0,47	0,47	0,47	168	JIS-SS400
	0	0,42	0,42	0,42	210	JIS-SUS309
	5,5	0,39	0,40	0,395	238	JIS-SUS304
	10,5	0,41	0,41	0,41	221	JIS-SUS304
	15,5	0,41	0,42	0,415	215	JIS-SUS304
	20,5	0,41	0,42	0,415	215	JIS-SUS304
	30,5	0,41	0,41	0,41	221	JIS-SUS304
	60,5	0,40	0,40	0,40	232	JIS-SUS304
SAMPEL 3	-60,5	0,48	0,48	0,48	161	JIS-SS400
	-30,5	0,47	0,47	0,47	168	JIS-SS400
Tebal 12 mm	-20,5	0,47	0,48	0,475	164	JIS-SS400
	6 pas las	-15,5	0,46	0,47	0,465	171
	-10,5	0,45	0,46	0,455	179	JIS-SS400
	-5,5	0,48	0,46	0,47	168	JIS-SS400
	0	0,41	0,42	0,415	215	JIS-SUS309
	5,5	0,38	0,38	0,38	257	JIS-SUS304
	10,5	0,39	0,39	0,39	244	JIS-SUS304
	15,5	0,40	0,40	0,40	232	JIS-SUS304
	20,5	0,40	0,40	0,40	232	JIS-SUS304
	30,5	0,39	0,40	0,395	238	JIS-SUS304
	60,5	0,40	0,40	0,40	232	JIS-SUS304

4.1.5 Pengujian Metalografi

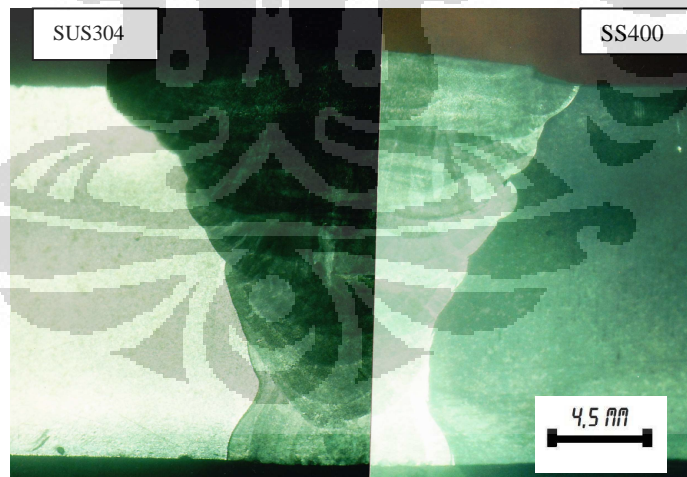
4.1.5.1 Hasil foto makro



Gambar 4.1. Struktur makro las dan HAZ sampel 1 tebal 8 mm

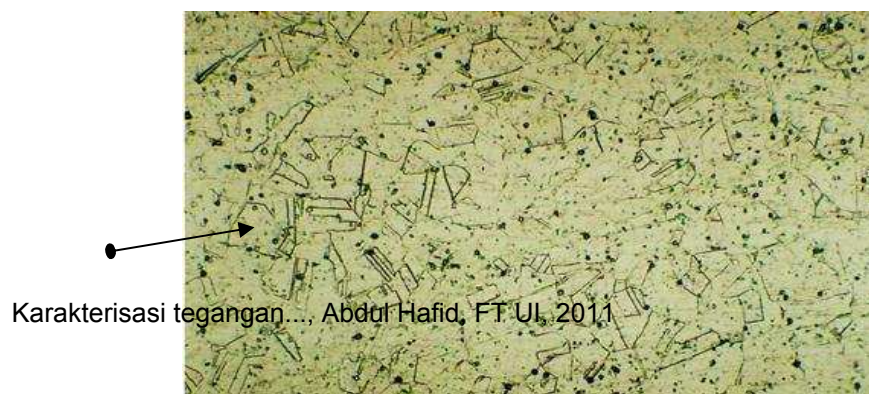


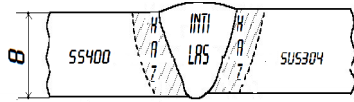
Gambar 4.2. Struktur makro las dan HAZ sampel 2 tebal 10 mm



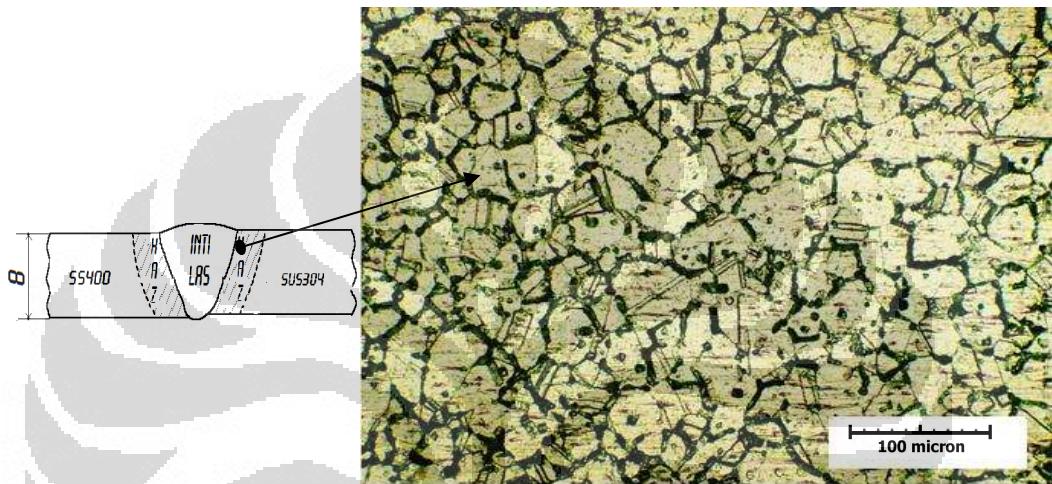
Gambar 4.3. Struktur makro las dan HAZ sampel 3 tebal 12

4.1.5.2 Hasil foto mikro SUS304

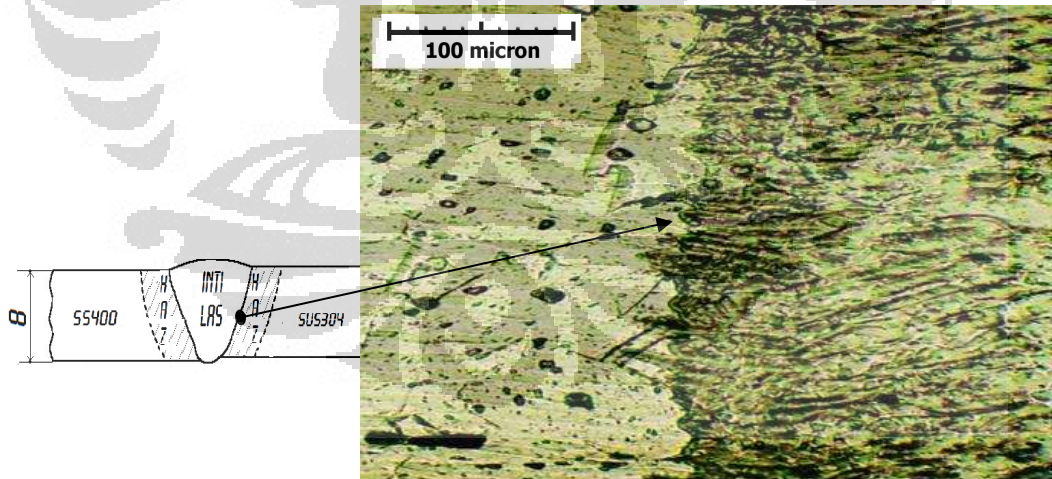




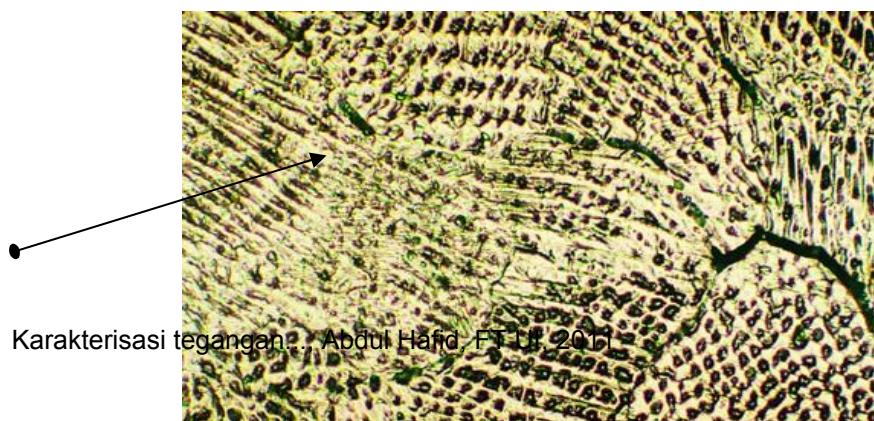
Gambar 4.4. Struktur mikro logam induk SUS304 tebal 8 mm



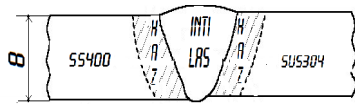
Gambar 4.5. Korosi batas butir pada HAZ sampel SUS304 tebal 8mm



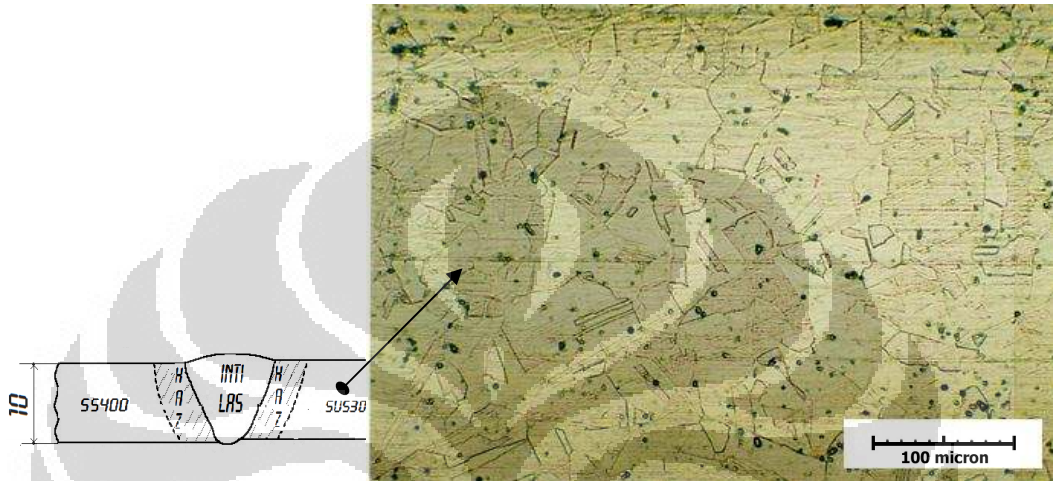
Gambar 4.6 Batas las dan HAZ SUS304 tebal pelat 8 mm



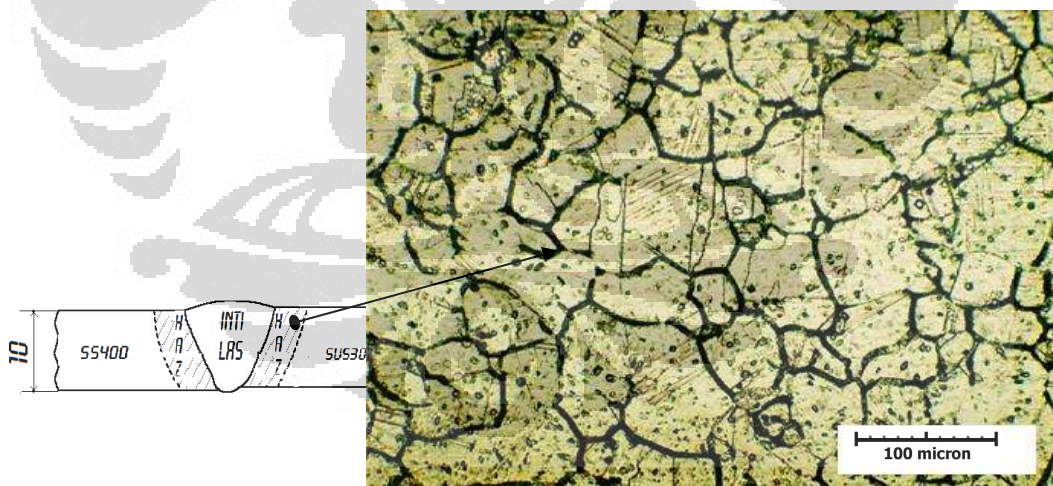
Karakterisasi tegangan: . Abdul Hafid, FTU, 2015



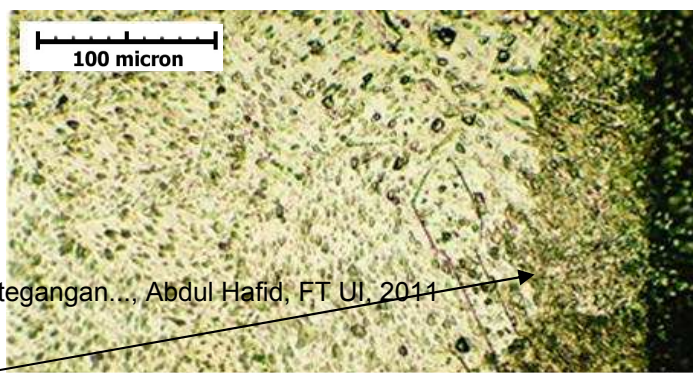
Gambar 4.7 Struktur mikro pada inti las SUS304 tebal 8 mm

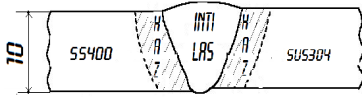


Gambar 4.8 Struktur mikro logam induk SUS304 tebal 10 mm

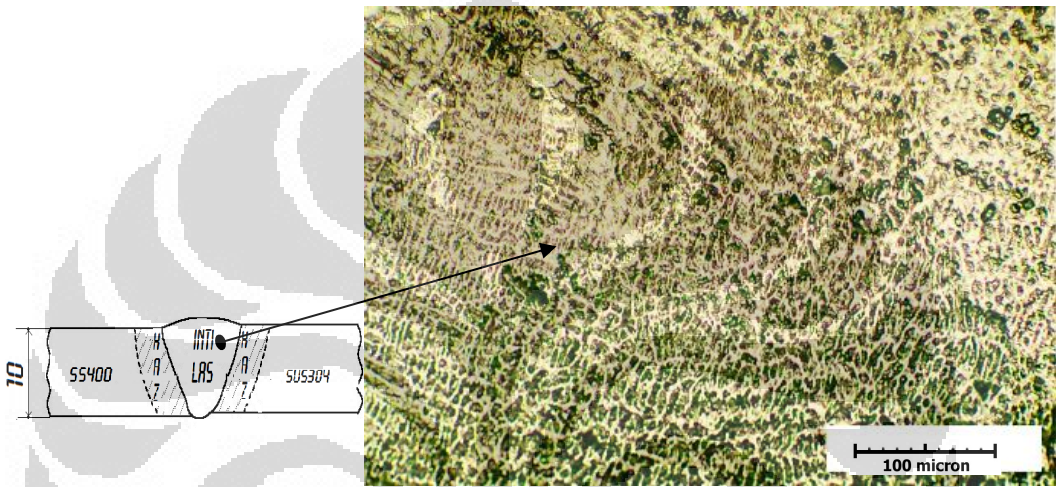


Gambar 4.9 Korosi batas butir pada HAZ sampel SUS304 tebal 10 mm

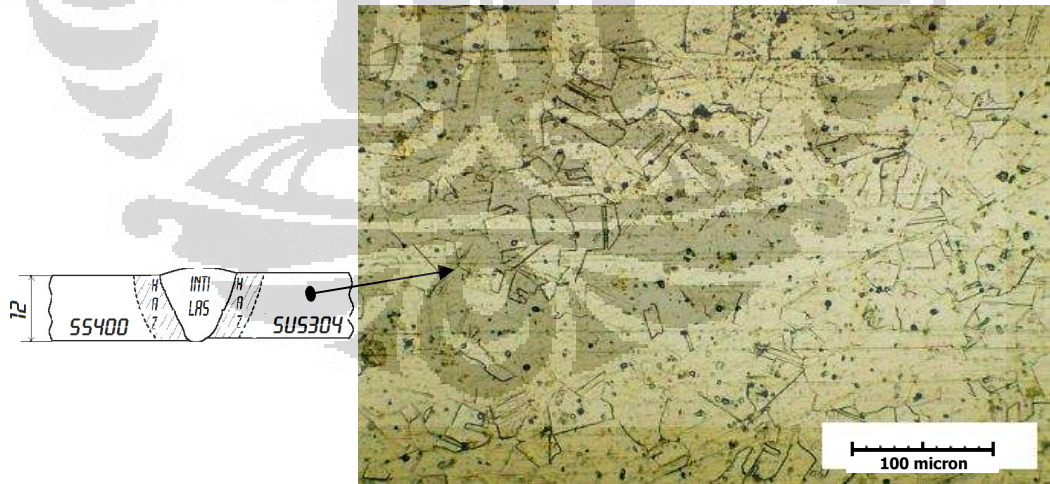




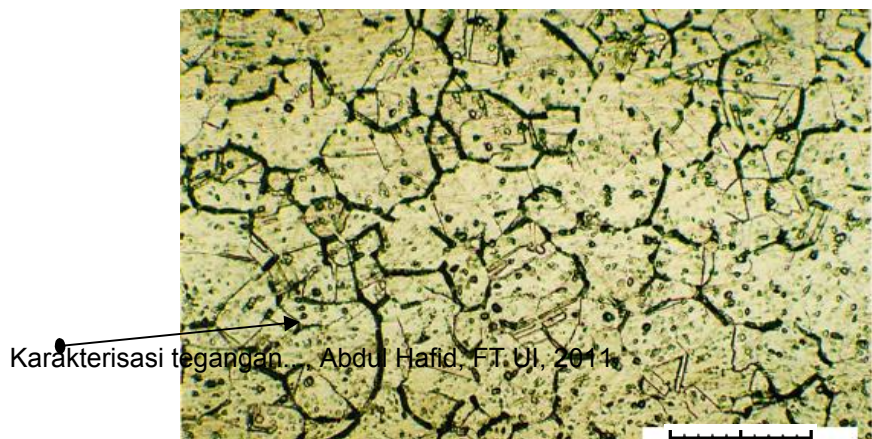
Gambar 4.10 Batas las dan HAZ SUS304 tebal pelat 10 mm

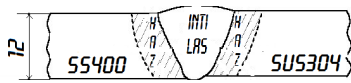


Gambar 4.11 Struktur mikro pada inti las SUS304 tebal 10 mm

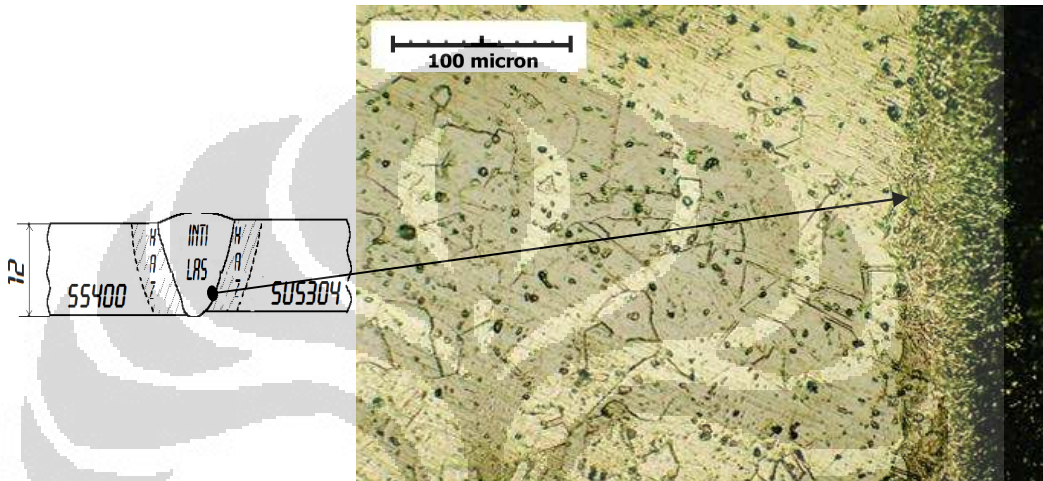


Gambar 4.12 Struktur mikro logam induk SUS304 tebal 12 mm

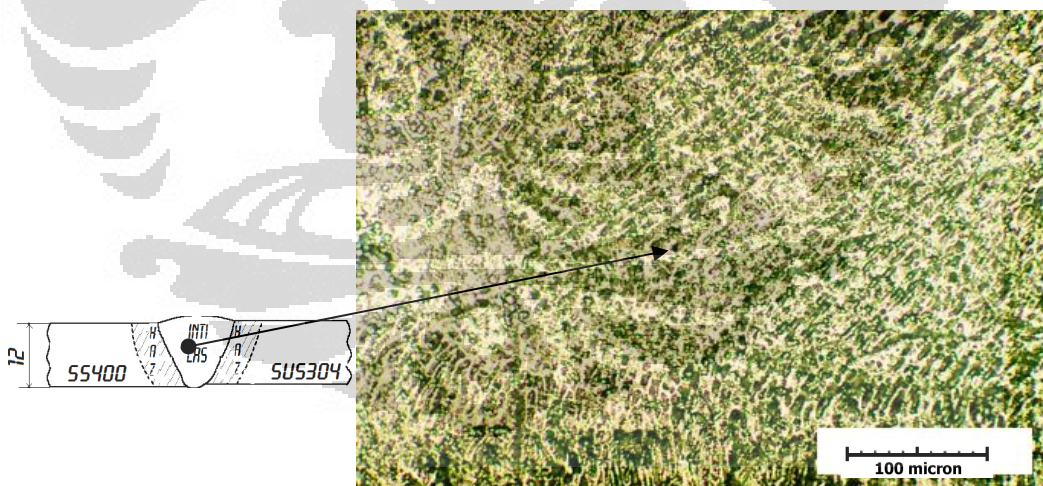




Gambar 4.13 Korosi batas butir pada HAZ sampel SUS304 tebal 12 mm

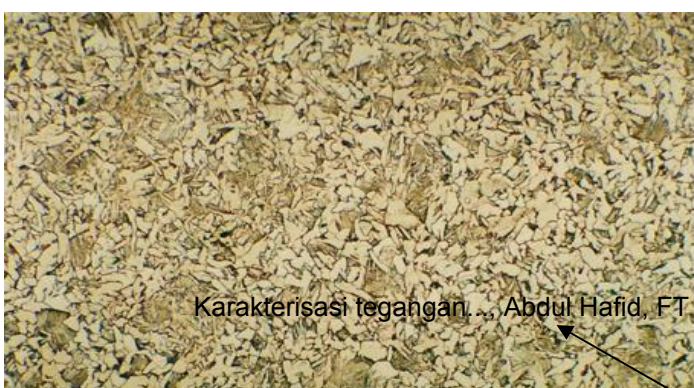


Gambar 4.14 Batas las dan HAZ SUS304 tebal pelat 12 mm



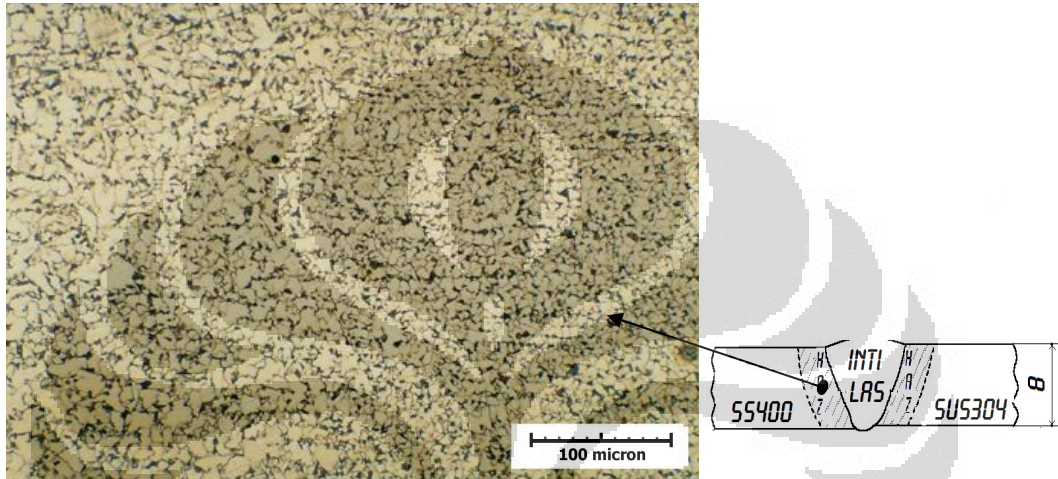
Gambar 4.15 Struktur mikro pada inti las SUS304 tebal 12 mm

4.1.5.3 Hasil foto mikro SS400

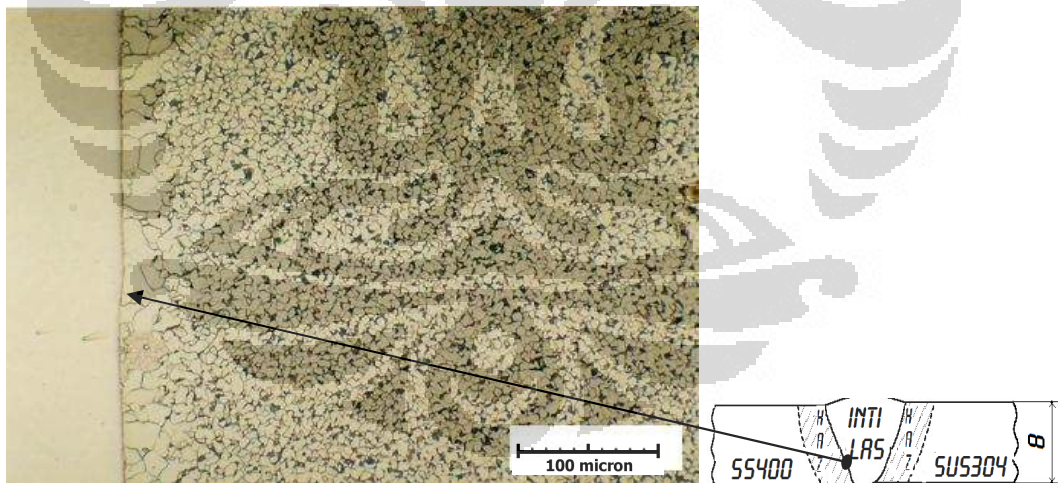




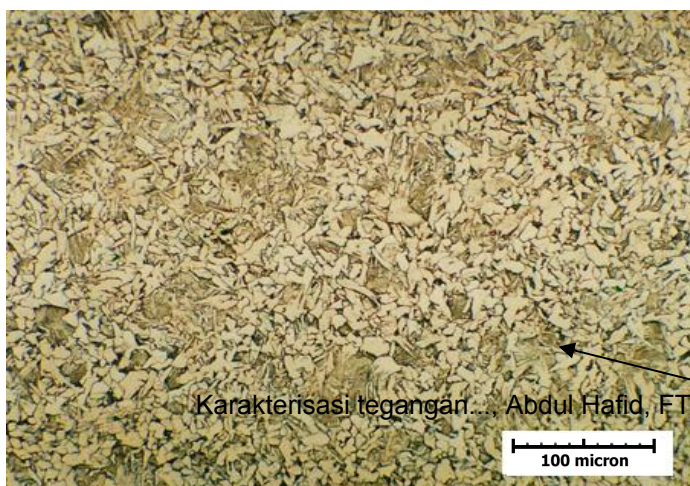
Gambar 4.16 Struktur mikro logam induk SS400 tebal 8 mm

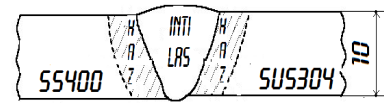


Gambar 4.17 Batas tumbuh butir baru pada SS400 tebal 8 mm

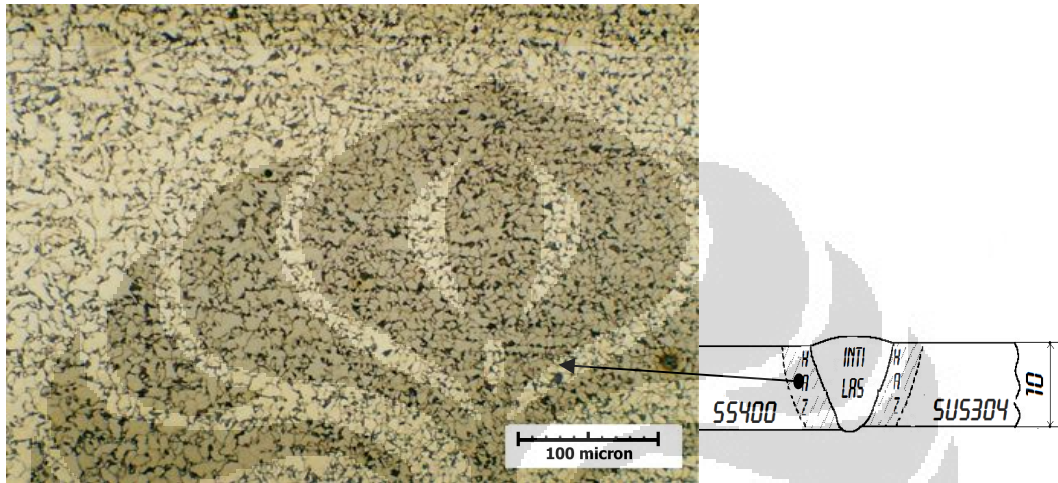


Gambar 4.18. Struktur mikro batas las dan HAZ SS400 tebal 8 mm

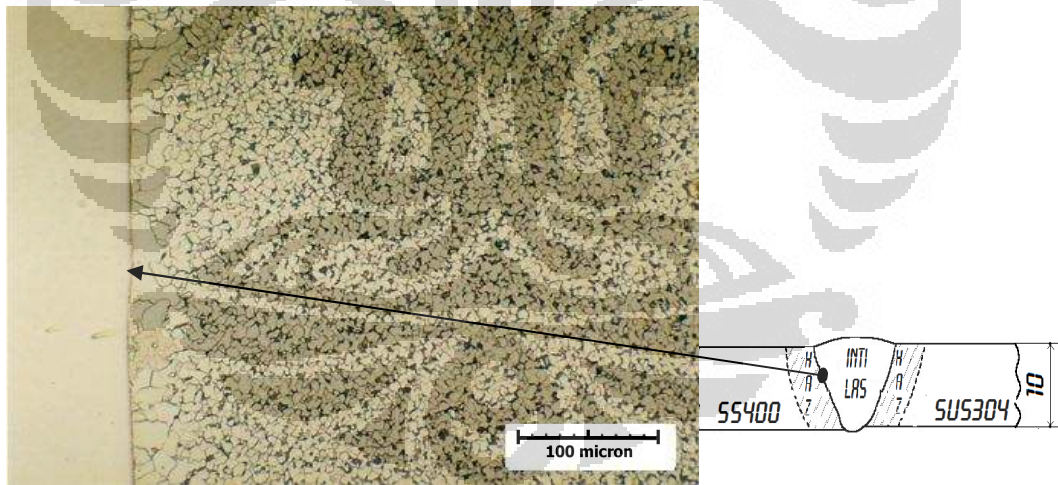




Gambar 4.19. Struktur mikro logam induk SS400 tebal 10 mm



Gambar 4.20 Batas tumbuh butir baru pada SS400 tebal 10 mm

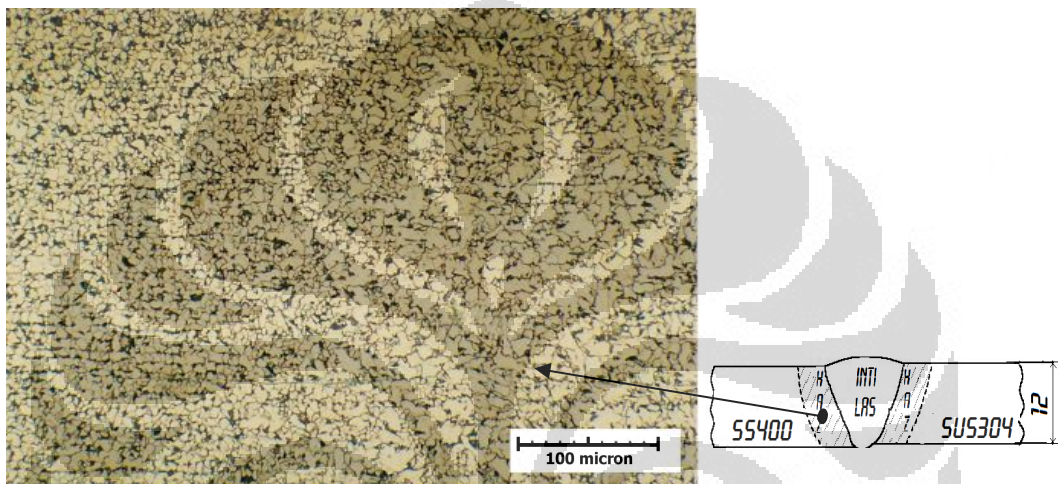


Gambar 4.21 Struktur mikro batas las dan HAZ SS400 tebal 10 mm

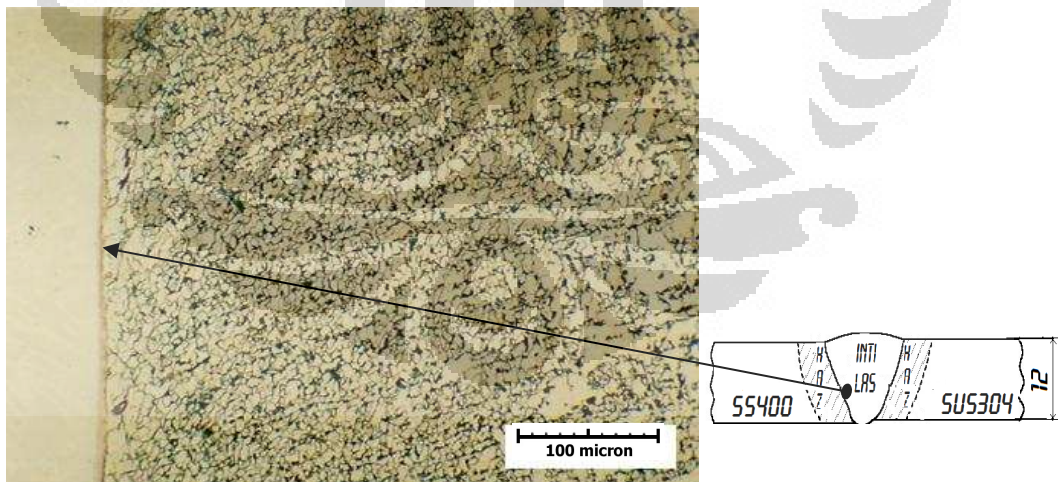




Gambar 4.22 Struktur mikro logam induk SS400 tebal 12 mm



Gambar 4.23 Batas tumbuh butir baru pada SS400 tebal 12 mm



Gambar 4.24 Struktur mikro batas las dan HAZ SS400 tebal 12 mm

4.2. PENELITIAN DENGAN SIMULASI

Penelitian dengan simulasi dimulai dari proses pembuatan model, masukan data, proses (*running*) dan pengambilan data untuk analisis.

4.2.1 Data Penelitian dengan simulasi

Berdasarkan hasil penelusuran literatur telah diperoleh data tentang sifat fisik material SUS304 sebagaimana bentuk grafik pada Gambar 2.9. sesuai hasil penelitian Bogaard R.H., dkk^[21]. Berdasarkan hasil pengolahan data dengan menggunakan pemrograman Bahasa C telah dibuat paket program konversi grafik menjadi nilai digital hingga dapat diperoleh nilai-nilai sifat fisik SUS304 seperti ditunjukkan pada Tabel 4.12.

Tabel. 4.12 Sifat-sifat fisik material SUS304 pada setiap perubahan temperatur

<i>Physical Properties SUS304</i>						
Temperatur		<i>Specific Heat</i>	<i>Conductivity</i>	<i>enthalpy</i>	<i>thermal Expansion</i>	<i>Poisson ratio</i>
t	T	Cp	k	h	α	ν
C	K	J/(kg. K)	W/(m. K)	kJ/mol	$\mu\text{m}/(\text{m}.\text{°C})$	$\times 10^3$
20	293	458	144	3,442	16,93	0,300885
200	473	510	175	11,7343	17,82	0,313274
400	673	540	200	20,9479	18,88	0,330088
600	873	573	240	30,1615	19,86	0,346903
800	1073	604	267	39,3751	20,83	0,361062
1000	1273	642	307	48,5887	21,72	0,376991
1200	1473	671	349	57,8023	22,78	0,393805
1300	1573	694	367	62,4091	23,14	0,402655
1500	1773	728	394	71,6227	24,27	0,416699
2000	2273	815	479	94,6567	26,75	0,456146

Dengan cara yang sama data hasil penelitian Gayle F.W., dkk^[20] tentang sifat-sifat fisik material SS400 seperti ditunjukkan pada Gambar 2.10 dikonversi menjadi data nilai digital hingga diperoleh nilai-nilai sifat fisik material SS400 yang bergantung pada temperatur sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.14.

Pada dasarnya konversi data grafik menjadi angka-angka digital dilakukan dengan membuat program simulasi bilangan polinomial dengan syarat batas nilai X pada sumbu x dan nilai Y pada sumbu y. Setiap satu satuan *pixel* dikonversi menjadi nilai skala terkecil pada hitungan bilangan polinom. Dengan cara memilih titik dengan meng-klik batas-batas yang dimaksud, kemudian meng-klik titik yang dituju maka program disusun sedemikian rupa hingga bisa digunakan sesuai kebutuhan guna memperoleh data. Hasil-hasil yang diperoleh untuk simulasi sifat

fisik material las dissimilar pada penelitian ini seperti ditunjukkan pada Tabel 4.12 dan 4.13.

Tabel 4.13. Sifat-sifat fisik material SS400 pada setiap perubahan temperatur

<i>Physical Properties SS400 and Mild Steel</i>					
Temperatur		<i>Thermal Conductivity</i>	<i>Heat Capacity</i>	<i>Thermal Expansion</i>	<i>Coef heat transfer</i>
T		k	cp	α	a
Celcius	Kelvin	W/(m.K)	J/(kg.K)	μ m/m. C	$(J/mm^2/s/C) \times 10^5$
27	300	48,8	435	11,5	1,0005
78	350	48,8	467	11,8	1,1508
127	400	48,1	494	12,1	1,2514
177	450	46,9	516	12,5	1,4517
227	500	45,5	536	12,7	1,7016
277	550	43,8	554	13,5	2,1014
327	600	42,1	573	13,7	2,5608
377	650	40,4	593	14,2	2,8562
427	700	38,6	615	14,5	3,3125
477	750	36,9	642	14,6	4,0005
527	800	35,3	674	14,7	4,6015
577	850	33,7	713	14,8	5,1031
627	900	32,2	761	14,9	6,1205
677	950	30,8	818	14,9	6,8752
717	990	29,7	871	14,9	7,1005
750	1023	26,4	910	14,9	7,8602
800	1073	25,2	995	14,9	8,9501
850	1123	25	1015	14,9	8,9501
900	1173	25	1023	14,9	8,9501
950	1223	25	1100	14,9	8,9501
1000	1273	25	1210	14,9	8,9501
1050	1323	25	1245	14,9	8,9501
1100	1373	25	1255	14,9	8,9501
1150	1423	25,1	1290	14,9	8,9501
1200	1473	25,2	1380	14,9	8,9501
1250	1523	25,3	1450	14,9	8,9501
1300	1573	25,5	1500	14,9	8,9501
1350	1623	26	1570	14,9	8,9501
1400	1673	26,5	1600	14,9	8,9501
1450	1723	27,5	1640	14,9	8,9501
1500	1773	27,5	1675	14,9	8,9501
1550	1823	27,5	1710	14,9	8,9501
1600	1873	27,5	1730	14,9	8,9501

4.2.2 Hasil Simulasi Panas Las

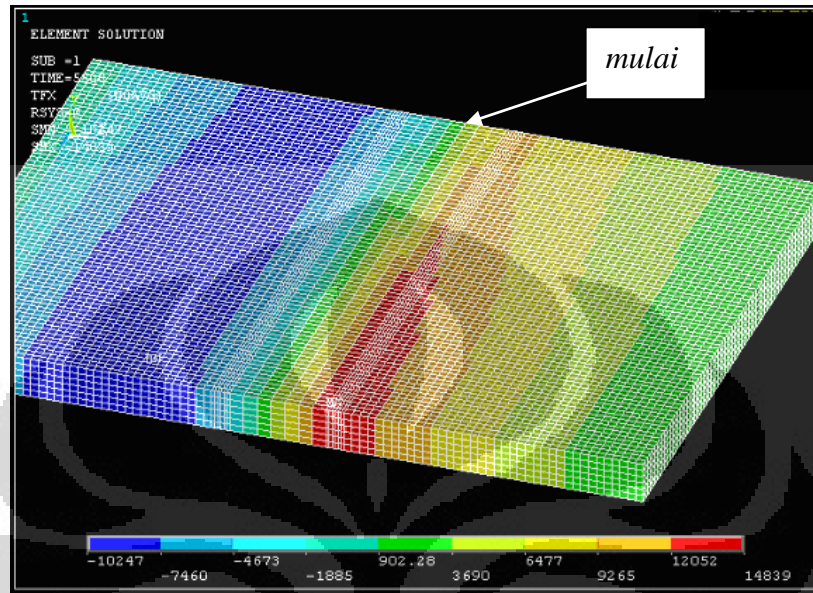
Simulasi dibuat dengan *mesh* jarak 2 mm dalam arah axial dan pada daerah inti las. Distribusi temperatur dari inti las ke logam induk ditunjukkan pada

Tabel 4.14. Distribusi temperatur pada permukaan sampel tebal 8 mm

JIS3101 SS400				Keterangan	SUS304			
No	Jarak	NODE	Temp (K)		No	Jarak	NODE	Temp (K)
1	-81,47367	25063	412	Inti las>		0	1576	1234
2	-79,157881	24999	414	Inti las>		2	1512	1227
3	-76,842092	24935	415	Inti las>		4	1448	1195
4	-74,526303	24871	417	HAZ SUS304>		5	680	930
5	-72,210514	24807	418	HAZ SUS304>		6	3280	702
6	-69,894725	24743	420	HAZ SUS304>		7	3344	616
7	-67,578936	24679	422	HAZ SUS304>		8	3408	570
8	-65,263147	24615	424	HAZ SUS304>		9	3472	538
9	-62,947358	24551	427	HAZ SUS304>		10	3536	514
10	-60,631569	24487	429	HAZ SUS304>		11	3600	495
11	-58,31578	24423	432	HAZ SUS304>		12	3664	480
12	-55,999991	24359	436			14,31579	2512	468
13	-53,684202	24295	439			16,63158	5582	433
14	-51,368413	24231	443			18,94737	5646	409
15	-49,052624	24167	448			21,26316	5710	391
16	-46,736835	24103	453			23,57895	5774	378
17	-44,421046	24039	458			25,89473	5838	367
18	-42,105257	23975	463			28,21052	5902	359
19	-39,789468	23911	470			30,52631	5966	351
20	-37,473679	23847	477			32,8421	6030	346
21	-35,15789	23783	484			35,15789	6094	341
22	-32,842101	23719	492			37,47368	6158	337
23	-30,526312	23655	501			39,78947	6222	332
24	-28,210523	23591	510			42,10526	6286	328
25	-25,894734	23527	519			44,42105	6350	326
26	-23,578945	23463	530			46,73684	6414	324
27	-21,263156	23335	554			49,05262	6478	321
28	-18,947367	23271	568			51,36841	6542	319
29	-16,631578	23207	583			53,6842	6606	317
30	-14,315789	22695	604			55,99999	6670	316
31	-12	22695	604	<HAZ SS400		58,31578	6734	314
32	-11	36239	612	<HAZ SS400		60,63157	6798	313
33	-10	36175	623	<HAZ SS400		62,94736	6862	312
34	-9	36111	638	<HAZ SS400		65,26315	6926	311
35	-8	36047	658	<HAZ SS400		67,57894	6990	310
36	-7	35983	689	<HAZ SS400		69,89473	7054	309
37	-6	35919	737	<HAZ SS400		72,21051	7118	308
38	-5	35855	830	<HAZ SS400		74,5263	7310	310
39	-4	552	1006	<Inti las		76,84209	7374	307
40	-2	1640	1220	<Inti las		79,15788	7438	306

tesis ini adalah untuk menunjukkan proses pendinginan secara konduksi. Namun demikian pertimbangan lain dari kehilangan panas konveksi dari permukaan yang bebas juga menjadi faktor penyebab kehilangan panas dapat berlangsung cepat.

Oleh karena akumulasi panas tertinggi pada inti las terletak di tengah hingga akhir proses las seperti ditunjukkan pada Gambar 4.25 dan pengukuran tegangan sisa juga dilakukan di tengah dengan jarak 84 mm maka distribusi temperatur yang menunjukkan proses pendinginan seperti pada Tabel 4.14.



Gambar 4.25. Akumulasi panas las yang besar mulai dari tengah hingga ahir

Pada simulasi ini, jarak *meshing* antar node dalam arah normal (sumbu y) sebesar 2 mm dan pada arah axial (sumbu z) sebesar 2,32 mm. Dengan demikian jumlah *node* pada sampel dengan ketebalan 8 mm sebanyak 106.800 *node*, pada sampel dengan ketebalan 10 mm sebanyak 166.875 *node* dan pada sampel dengan ketebalan 12 mm sebanyak 240.300 *node*.

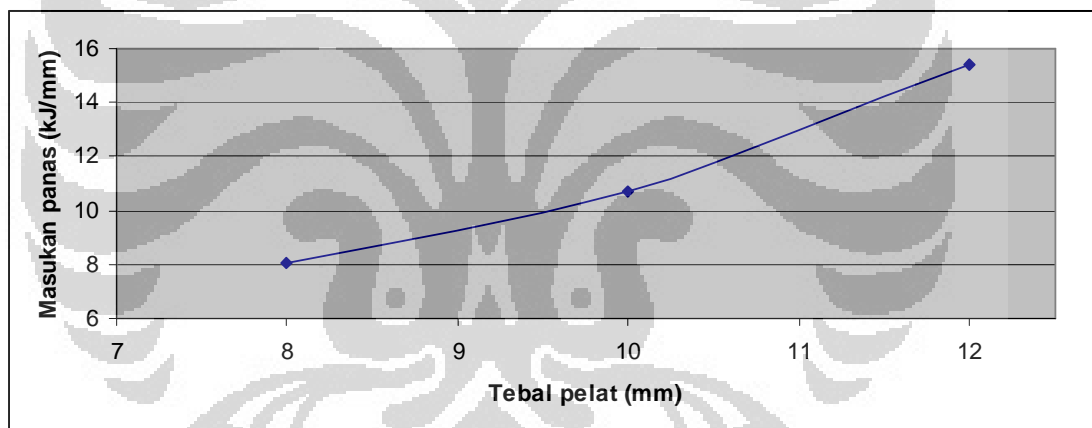
BAB V

PEMBAHASAN HASIL PENELITIAN

5.1. Analisis Hasil Experimental

5.1.1 Analisis Hasil Las Sampel

Pengelasan dilakukan dengan menggunakan las TIG. Sebagai logam pengisi (filler) digunakan TGS 309L. Berdasarkan hasil kerja las, semakin tebal pelat yang digunakan maka kuat arus listrik yang diperlukan semakin besar. Jika kuat arus yang digunakan sama maka kecepatan gerak las menjadi lambat. Oleh karena masukan panas (*heat input*) sangat bergantung pada dua variabel tersebut maka dapat disimpulkan bahwa semakin tebal maka masukan panas yang diperlukan semakin banyak. Selain itu semakin tebal maka jumlah pas yang diperlukan juga semakin banyak. Hubungan antara tebal pelat terhadap masukan panas total dapat ditunjukkan dengan grafik seperti pada Gambar 5.1.

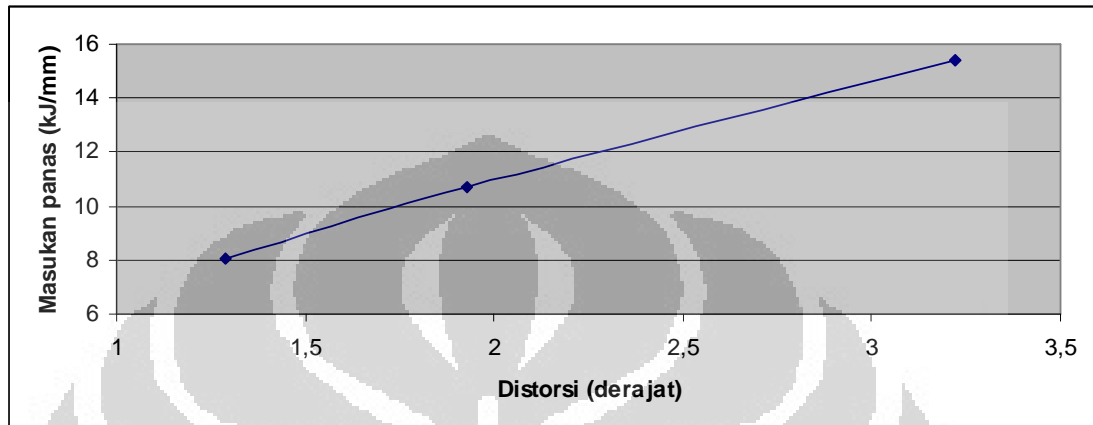


Gambar 5.1 Grafik korelasi masukan panas terhadap tebal pelat

5.1.2 Analisis Distorsi Pada Sampel

Distorsi las terjadi akibat pemuaihan pada saat pemanasan kemudian menyusut pada saat pendinginan tetapi distribusi panasnya tidak merata. Hal ini mengakibatkan terjadinya perubahan bentuk akibat adanya tegangan internal. Untuk mengurangi distorsi maka sampel ditahan dengan menggunakan *tack weld* antara sampel dengan suatu bahan pelat lain yang lebih tebal pada bagian bawah sampel. Namun demikian distorsi masih tetap terjadi. Dari hasil pengukuran diperoleh bahwa semakin tebal material maka derajat terbentuknya distorsi juga meningkat. Hal ini menunjukkan adanya korelasi antara kenaikan besar masukan

panas terhadap distorsi. Semakin tebal sampel maka jumlah masukan panas semakin besar. Demikian pula halnya dengan besar sudut distorsi yang terbentuk. Dapat disimpulkan dari hasil pengukuran diperoleh bahwa semakin besar jumlah masukan panas maka semakin besar derajat distorsi yang terjadi. Hal ini seperti ditunjukkan pada Gambar 5.2.



Gambar 5.2 Pengaruh kenaikan masukan panas terhadap peningkatan derajat distorsi

Dari Gambar 5.2, pada ketebalan pelat 8 mm, besar masukan panas las yang diterima oleh sampel adalah 8,08 kJ. Ini menyebabkan terjadinya distorsi pada sampel yang sudah dalam kondisi di tahan sebesar 1,29⁰. Pada ketebalan 10 mm, masukan panas pada sampel naik menjadi 10,71 kJ mengakibatkan derajat distorsi juga naik menjadi 1,93⁰. Dan akhirnya pada ketebalan 12 mm, masukan panas las menjadi 15,41 kJ. Hal ini menyebabkan derajat distorsi semakin besar hingga mencapai 3,22⁰.

5.1.3 Analisis Hasil Pengukuran Tegangan Sisa Dengan Difraksi Neutron

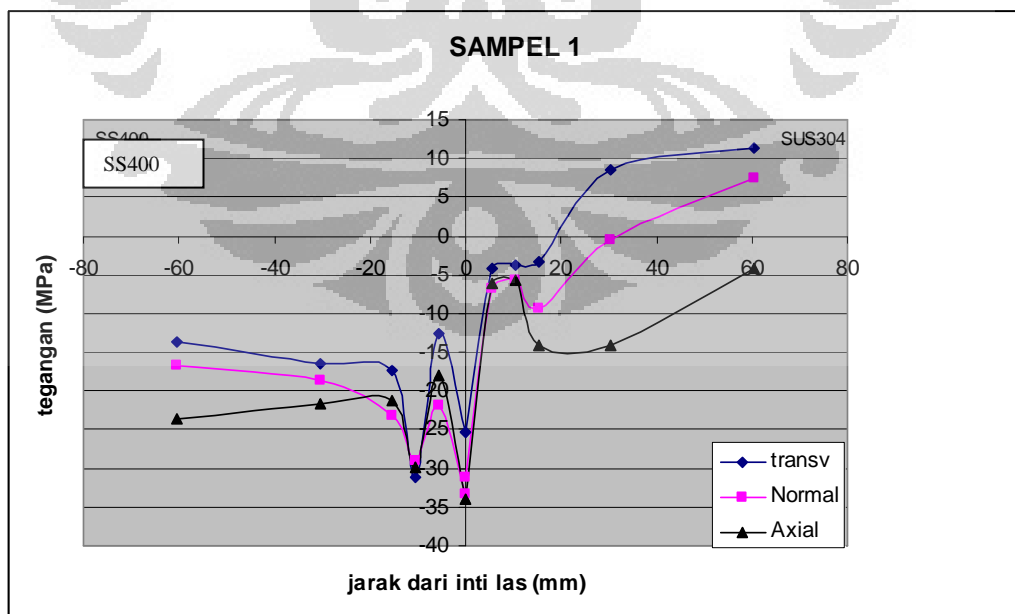
Pengukuran tegangan sisa dilakukan pada sampel 1, sampel 2 dan sampel 3. Lokasi pengukuran pada bagian tengah dari tiap-tiap sampel. Kedalaman pengukuran masing-masing adalah 4 mm, 5 mm dan 6 mm mulai dari daerah las (titik 0) kemudian daerah HAZ (titik 5,5 mm dan titik 10,5 mm) kemudian daerah batas HAZ dan logam induk (titik 15,5 mm) dan daerah logam induk (titik 30,5 mm dan 60,5 mm). Berdasarkan hasil pengamatan dengan uji metalografi dapat terlihat bahwa nilai-nilai prediktif yang ditentukan di atas adalah cukup mendekati jarak nyata dari sampel seperti ditunjukkan pada Gambar 4.5 untuk sampel 1,

Gambar 4.9 untuk sampel 2 dan Gambar 4.13 untuk sampel 3, pada daerah batas HAZ dan logam induk terbentuk sensitasi untuk material SUS304 sedangkan pada material SS400 di daerah batas HAZ dengan logam induk seperti ditunjukkan pada Gambar 4.17 untuk sampel 1, 4.20 untuk sampel 2 dan 4.23 untuk sampel 3 terlihat adanya rekristalisasi. Pada daerah batas HAZ dengan inti las seperti ditunjukkan pada Gambar 4.6, Gambar 4.10 dan Gambar 4.14 untuk SUS304 dan Gambar 4.18, Gambar 4.21 dan Gambar 4.24 untuk SS400 terlihat adanya pertumbuhan butir.

5.1.3.1. Analisis hasil pengukuran sampel 1

Hasil pengukuran tegangan sisa pada sampel 1 (8 mm) seperti ditunjukkan pada Tabel 4.6 dan 4.7. Bidang pengukuran hamburan neutron adalah pada Indeks Miller (200) untuk SS400 dan Indeks Miller (220) untuk SUS304. Ilustrasi letak sudut hamburan neutron pada Indeks Miller (200) dan (220) seperti ditunjukkan pada Gambar 2.9.

Berdasarkan Tabel 4.5 dan 4.6 diperoleh bentuk grafik tegangan sisa pada Sampel 1 dalam arah transversal, normal dan axial baik pada daerah las, HAZ maupun logam induk untuk material SUS 304 dan SS400 seperti ditunjukkan pada Gambar 5.3.



Gambar 5.3. Tegangan sisa las TIG antara SUS304 dan SS400 dengan tebal 8 mm.

Berdasarkan Gambar 5.3 serta Tabel 4.5 diperoleh bahwa pada material SUS304 arah transversal (sumbu-x) terjadi tegangan tarik di daerah las sebesar -25 MPa terhadap daerah HAZ dengan tegangan -4 MPa pada titik tertinggi di jarak 5,5 mm atau beda tegangan adalah -21 MPa. Pada arah normal, tegangan tarik yang terbesar juga pada daerah HAZ khususnya batas antara las dan HAZ dititik 5,5 dengan nilai -31 MPa di daerah las menjadi -7 pada daerah HAZ, atau beda tegangan sebesar -24 MPa. Pada arah axial juga diperoleh hal yang sama, yaitu nilai perbedaan tegangan terbesar pada batas las dan HAZ yaitu -34 MPa di daerah las dan -6 MPa di titik 5,5 atau beda tegangan tarik -28 MPa.

Pada material SS400, berdasar pada Tabel 4.6 perbedaan besar tegangan tarik antara daerah las dan HAZ juga cukup besar. Pada daerah HAZ di titik 5,5 mm besar tegangannya pada arah transversal -13 MPa atau beda tegangan antara daerah las dan daerah HAZ adalah -12 MPa. Pada arah normal tegangan dititik 5,5 mm adalah -22 MPa atau beda tegangannya -11 MPa. Sedangkan pada arah axial besar tegangan tarik terukur di titik 5,5 mm adalah -18 MPa atau beda tegangannya sekitar -16 MPa. Nilai tegangan sisa ini sangat besar pengaruhnya terhadap kekuatan mekanik material sehingga perlu dilakukan upaya perlakuan untuk mereduksi tegangan sisa tersebut.

Kesimpulan sementara dari hasil pengukuran sampel 1 pada kedalaman 4 mm dari permukaan pelat dengan tebal 8 mm adalah:

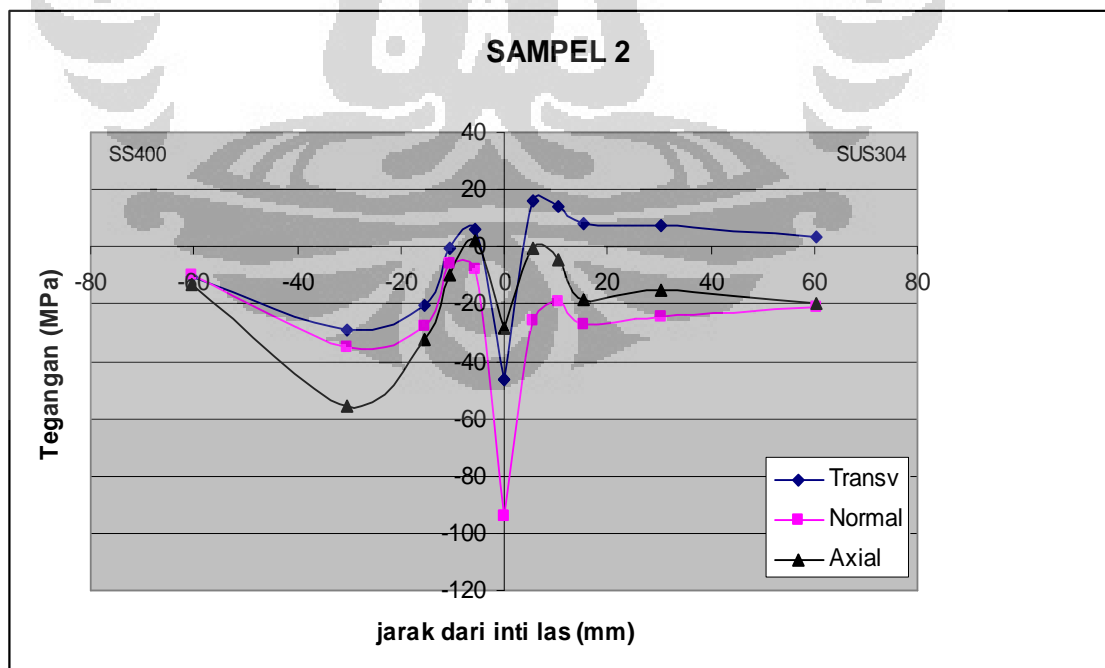
- Pada daerah las dengan menggunakan indeks Miller 220 untuk pengukuran difraksi neutron tegangan sisa arah transversal terukur adalah -25 MPa, pada arah normal -31 MPa dan pada arah axial -34 MPa. Nilai negatif menunjukkan bahwa sampel tertekan dalam arah ke atas dari *root* las.
- Pada daerah HAZ stainless steel SUS304 juga menggunakan indeks Miller 220 diperoleh tegangan sisa di dekat daerah las adalah -4 MPa pada arah transversal, -7 MPa arah normal dan -7 MPa arah axial yang mana merupakan daerah puncak tegangan yang terbentuk antara daerah las dengan daerah HAZ dan logam induk.

- Pada daerah HAZ baja karbon SS400 dengan indeks Miller 200 diperoleh besar tegangan sisa di dekat daerah las adalah -13 MPa arah transversal, -22 MPa arah normal dan -18 MPa arah axial.

Dalam hal ini fenomena yang terjadi pada sampel 1 akan dibandingkan dengan fenomena-fenomena yang serupa pada sampel 2 dengan ketebalan 10 mm dan sampel 3 dengan ketebalan 12 mm. Fenomena tegangan sisa yang diukur adalah pada daerah pertengahan dari tiap-tiap sampel tersebut atau pada kedalaman 4 mm untuk sampel 1, 5 mm untuk sampel 2 dan 6 mm untuk sampel 3.

5.3.1.2. Analisis hasil pengukuran sampel 2

Hasil pengukuran sampel 2 seperti ditunjukkan pada Tabel 4.7 dan Tabel 4.8, dapat digambarkan dalam bentuk grafik perbandingan jarak las dengan tegangan sisa seperti Gambar 5.4. Tegangan sisa arah transversal SUS304 terletak pada daerah las. adalah -46 MPa. Pada daerah HAZ tegangan sisa terukur 16 MPa. Perbedaan besar tegangan adalah -62 MPa. Pada arah normal tegangan daerah las -94 MPa dan daerah HAZ -26 MPa, sehingga selisih tegangannya adalah -68 MPa. Akhirnya untuk arah aksial di daerah las adalah -28 dan daerah HAZ SUS304 adalah 0 sehingga selisih ukuran tegangan sisa yang diperoleh adalah -28 MPa.



Gambar 5.4. Tegangan sisa las TIG antara SUS304 dan SS400 dengan tebal 10 mm.

Pada material SS400, berdasarkan Tabel 4.8 dan Gambar 5.4 diperoleh tempat yang rentan terhadap retak, yaitu pada daerah HAZ khususnya batas las dan HAZ. Hal ini terlihat dari dua cekungan yang terbentuk pada grafik tegangan sisa hasil pengukuran sampel 2 seperti ditunjukkan pada Gambar 5.4. Cekungan yang terbentuk diperkirakan masing-masing pada kisaran jarak sekitar 5,5 mm dengan nilai tegangan 6 MPa arah transversal, -8 MPa arah normal dan 2 MPa pada arah axial.

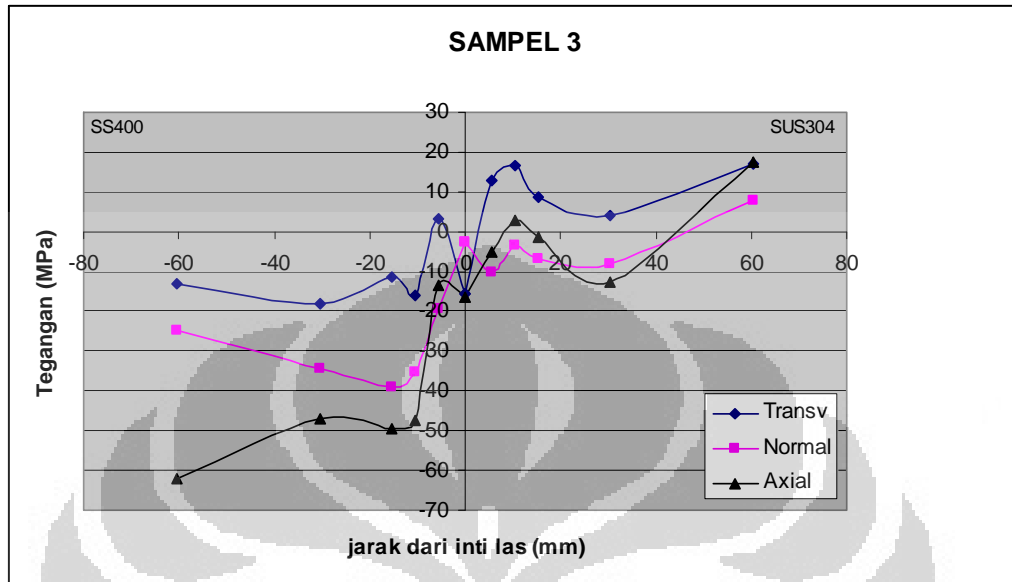
Kesimpulan sementara dari hasil pengukuran sampel 2 pada jarak 5 mm dari permukaan pelat dengan ketebalan 10 mm adalah:

- Pada daerah las dengan menggunakan indeks Miller 220 untuk pengukuran difraksi neutron tegangan sisa terukur adalah -46 MPa pada arah transversal, -94 MPa pada arah normal dan -28 pada arah axial. Nilai negatif menunjukkan bahwa sampel tertekan dalam arah ke atas dari *root* las.
- Pada daerah HAZ stainless steel SUS304 juga menggunakan indeks Miller 220 diperoleh tegangan sisa di dekat daerah las adalah -16 MPa pada arah transversal, -26 MPa, arah normal dan 0 MPa arah axial yang mana merupakan daerah puncak tegangan yang terbentuk antara daerah las dengan daerah HAZ.
- Pada daerah HAZ baja karbon SS400 dengan indeks Miller 200 diperoleh besar tegangan sisa di dekat daerah las adalah 6 MPa arah transversal, -8 MPa arah normal dan 2 MPa arah axial, yang juga merupakan titik balik maksimum terhadap tegangan pada daerah las.

5.3.1.3. Analisis hasil pengukuran sampel 3

Pada sampel 3, hasil pengukuran seperti ditunjukkan pada Tabel 4.9 dan 4.10. Hasil pengukuran dapat digambarkan dalam bentuk grafik seperti ditunjukkan pada Gambar 5.5. Dari Tabel 4.9 dan Gambar 5.5 diperoleh bahwa daerah kritis yang patut dijaga terhadap retak adalah pada jarak 10,5 mm dari inti las. Pada posisi ini daerah las pada arah transversal memiliki tegangan -16 MPa dan daerah HAZ di jarak 10,5 mm dari inti las sebesar 17 MPa sehingga beda tegangannya -33 MPa. Pada

arah normal di daerah las -3 MPa dan di daerah HAZ pada jarak 10,5 mm -4 MPa beda tegangan 1 MPa. Pada arah axial diperoleh di daerah las -16 MPa daerah HAZ 3 MPa dan beda tegangan adalah -19 MPa



Gambar 5.5. Tegangan sisa las TIG antara SUS3004 dan SS400 dengan tebal 12 mm.

Pada material SS400 dengan Tabel 4.10 dan Gambar 5.5 terlihat kecenderungan tegangan sisa dalam arah tekan yang cukup besar pada jarak 10,5 mm. Pada arah transversal jarak 5,5 mm sebesar 3 MPa dan pada jarak 10,5 mm sebesar -16 MPa sehingga beda tegangan 19,6 MPa. Pada arah normal jarak 5,5 mm tegangan sisa -19 MPa dan pada jarak 10,5 mm sebesar -35 MPa sehingga beda tegangan 16 MPa. Pada arah axial di jarak 5,5 mm -14 MPa dan di jarak 10,5 mm sebesar -47 MPa sehingga beda tegangannya 34 MPa. Dengan demikian potensi terjadinya retak pada sampel 3 adalah di daerah HAZ pada jarak jarak 10,5 mm dari inti las.

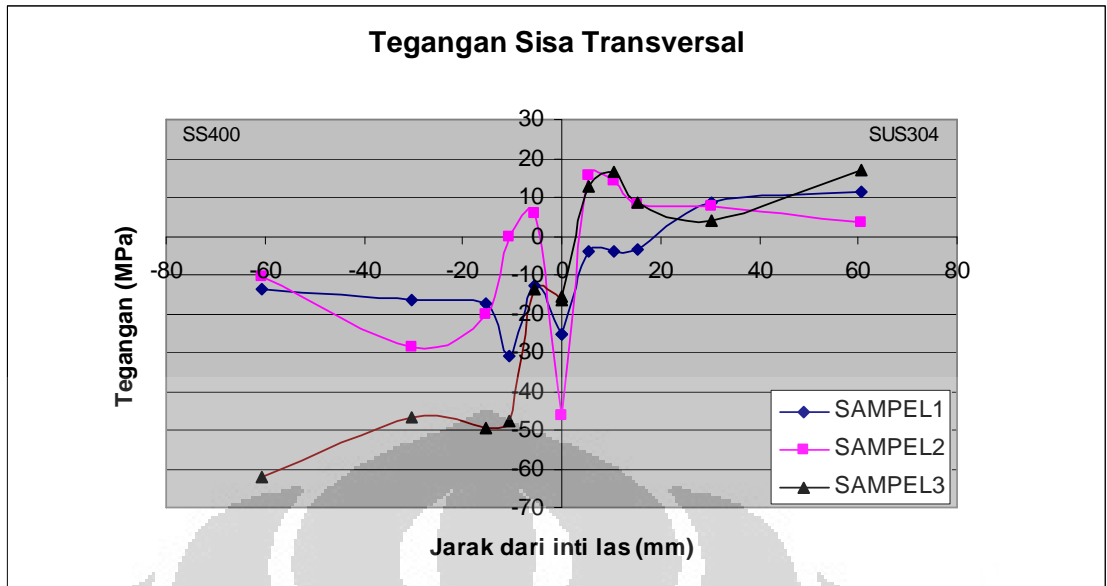
Kesimpulan sementara dari hasil pengukuran sampel 3 pada kedalaman 6 mm dari permukaan pelat dengan ketebalan 12 mm adalah:

- Pada daerah las dengan menggunakan indeks Miller 220 untuk pengukuran difraksi neutron tegangan sisa terukur adalah -16 MPa pada arah transversal, -3 MPa pada arah normal dan -16 MPa pada arah axial. Nilai negatif menunjukkan bahwa sampel tertekan dalam arah ke atas dari *root* las.

- Pada daerah HAZ stainless steel SUS304 juga menggunakan indeks Miller 220 diperoleh tegangan sisa di dekat daerah las khususnya pada jarak 10,5 mm dari inti las adalah 17 MPa pada arah transversal -4 MPa arah normal dan 3 MPa arah axial yang mana merupakan daerah puncak tegangan yang terbentuk antara daerah las dengan daerah HAZ dan logam induk. Puncak daerah HAZ SUS304 dengan tebal 12 mm ini terjadi pergeseran jarak sejauh 5 mm dari jarak yang terjadi pada tebal 8 dan 10 mm.
- Pada daerah HAZ baja karbon SS400 dengan indeks Miller 200 diperoleh besar tegangan sisa di dekat daerah las pada jarak 5,5 mm adalah 3 MPa arah transversal, -19 MPa arah normal dan -14 MPa arah axial, yang juga merupakan titik balik maksimum terhadap tegangan pada daerah las. Cekungan pada titik balik minimum terjadi pada jarak 10,5 mm dari inti las dengan nilai tegangan -16 MPa, pada arah transversal, -35 MPa pada arah normal dan -47 MPa pada arah axial. Titik balik minimum pada sampel 3 tidak membentuk kurva yang sangat tajam jika dibandingkan dengan sampel 1 dan sampel 2.

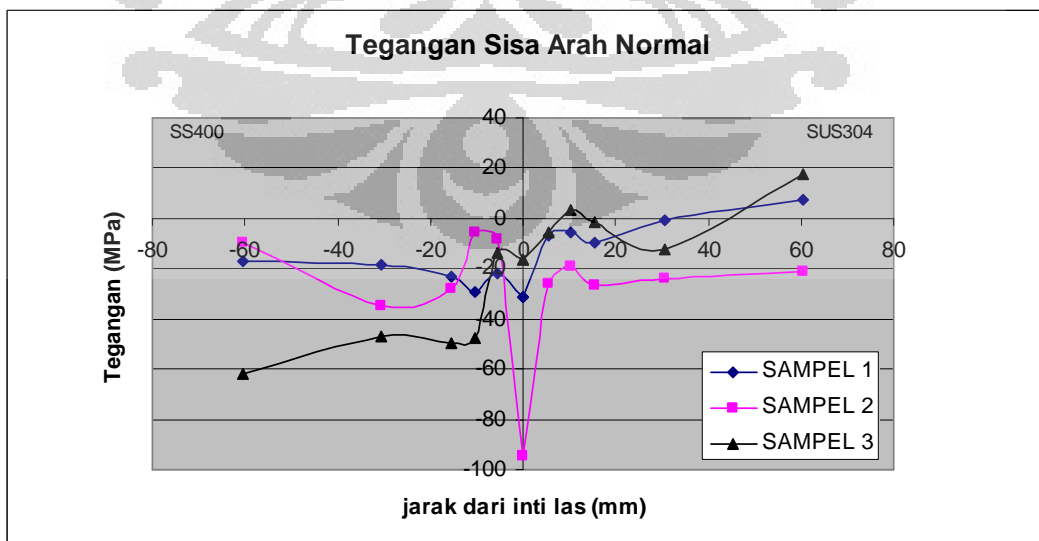
5.1.3.4 *Perbandingan hasil analisis tegangan sisa berdasarkan arah pengukuran pada sampel 1, sampel 2 dan sampel 3.*

Berdasarkan hasil analisis dari tiap-tiap sampel menurut arah pengukurannya maka antara sampel 1, sampel 2 dan sampel 3 dapat dibandingkan secara langsung. Dari Tabel 4.6 hingga 4.11 dalam arah transversal, bentuk grafik dari ketiga sampel seperti ditunjukkan pada Gambar 5.6. Tegangan sisa yang besar dari ketiga sampel pada material SUS304 adalah pada sampel 3. Pada material SS400 tidak diperoleh keteraturan perbandingan tegangan sisa oleh karena sampel 2 memiliki besar tegangan yang lebih besar dibanding sampel 3. Akan tetapi letak puncak pada jarak $\pm 30,5$ mm sementara sampel 1 dan sampel 3 pada jarak $\pm 5,5$ mm. Hal ini mungkin disebabkan proses pendinginan sampel 2 lebih lambat. Indikasi ini juga terlihat pada hasil pengukuran dalam arah normal dan axial sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.6 dan 5.7.

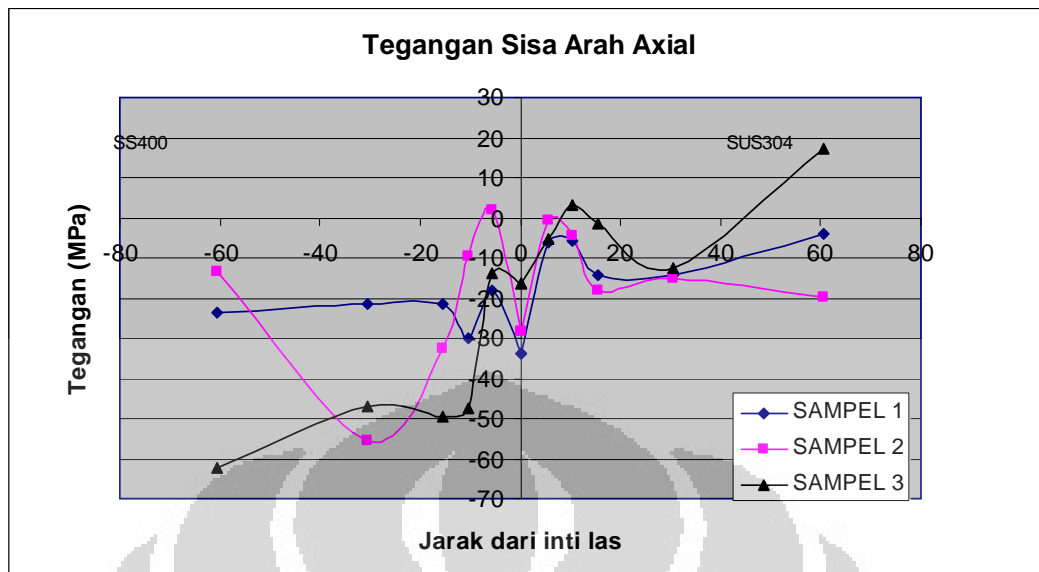


Gambar 5.6. Tegangan sisa las TIG arah transversal antara SUS304 dan SS400 dengan tebal 8 mm, 10 mm dan 12 mm

Pada arah normal, seperti ditunjukkan pada Gambar 5.7 dan arah axial seperti ditunjukkan pada Gambar 5.8 juga terlihat bahwa tegangan sisa terbesar terletak pada sampel 3. Perubahan tegangan dengan keadaan besar tegangan meningkat terlihat pada material SUS304 demikian pula pada material SS400. Antara sampel 3 dengan sampel 2 pada material SS400 tidak terlihat perbedaan yang cukup tajam pada arah axial tetapi pada arah normal perbedaan antara sampel 1, 2 dan 3 cukup jelas, keadaan ini seperti ditunjukkan pada Gambar 5.8.



Gambar 5.7. Tegangan sisa las TIG arah normal antara SUS304 dan SS400 dengan tebal 8 mm, 10 mm dan 12 mm.

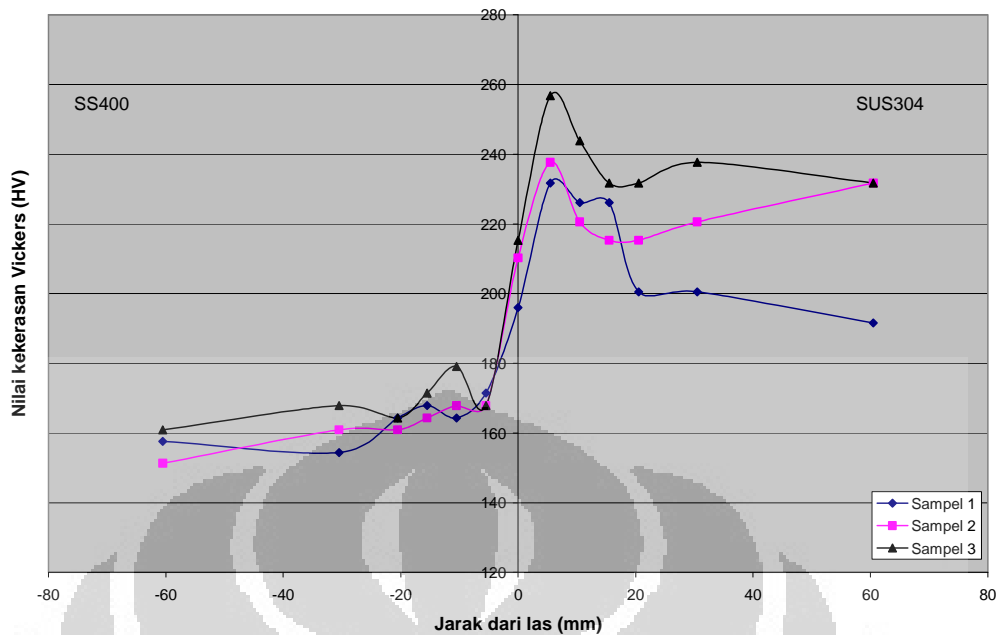


Gambar 5.8. Tegangan sisa las TIG arah axial antara SUS304 dan SS400 dengan tebal 8 mm, 10 mm dan 12 mm

Dengan membandingkan secara langsung antara sampel 1, sampel 2 dan sampel 3 berdasarkan arah pengukuran dari masing-masing sampel dapat disimpulkan sementara bahwa besar tegangan sisa yang terjadi akan semakin meningkat apabila jumlah masukan panas terus bertambah. Hal ini akan berbeda apabila besar tahanan terhadap material sampel dibuat berbeda dimana sampel 3 lebih banyak dibanding sampel 2 dan sampel 2 lebih banyak dari sampel 1. Oleh karena semakin kecil distorsi yang terbentuk maka semakin besar tegangan sisa yang akan terjadi.

5.1.4 Analisis Hasil Uji Kekerasan Sampel 1, Sampel 2 dan Sampel 3.

Hasil uji kekerasan Vickers makro pada pengelasan dissimilar antara material SUS304 dengan SS400 ditunjukkan pada Tabel 4.12. Dari tabel 4.12, perbandingan kekerasan antara ketiga sampel tersebut dapat digambarkan dalam bentuk grafik seperti ditunjukkan pada Gambar 5.9. Dari grafik perbandingan sampel uji kekerasan



Gambar 5.9. Hasil uji kekerasan Vickers makro pengelasan disimilar SUS304 dan SS400 dengan tebal 8 mm, 10 mm dan 12 mm

terlihat bahwa material yang keras terletak pada daerah HAZ untuk SUS304 pada jarak 5,5 mm dari inti las. Perbedaan nilai kekerasan mulai dari sampel 1 (8 mm) lebih lunak dibanding sampel 2 dan sampel 2 lebih lunak dibanding sampel 3. Hal yang sama juga terjadi pada daerah las maupun daerah HAZ pada material SS400. Puncak kekerasan material SUS304 tertinggi adalah sebesar 257 HV (sampel 3) dan terendah adalah 232 (sampel 1) pada daerah HAZ. Puncak kekerasan minimum SS400 adalah 164 HV (sampel 1) dan puncak tertinggi 179 (sampel 3). Dapat disimpulkan bahwa akibat pengaruh masukan panas las pada sampel maka semakin besar jumlah masukan panas las maka nilai kekerasan material juga semakin keras.

5.1.5 Analisis Hasil Uji Metalografi Sampel 1, Sampel 2 dan Sampel 3.

5.1.5.1. Dilusi pada hasil las

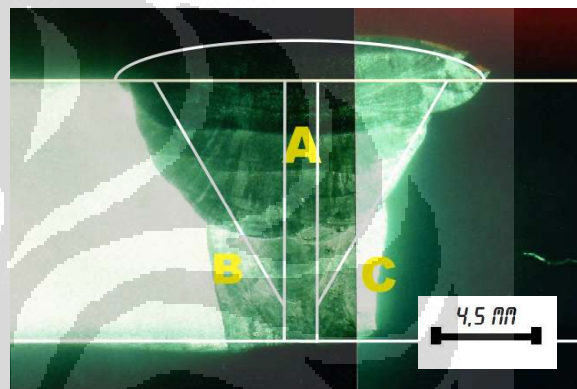
Hasil uji metalografi terdiri atas 2 bagian yaitu, hasil foto makro, yaitu foto pada penampang las dan HAZ dengan perbesaran 7 kali dan hasil foto mikro pada penampang las, HAZ dan logam induk dengan perbesaran 200 kali. Baik foto makro maupun foto mikro dibuat untuk sampel 1, sampel 2 maupun sampel 3.

Hasil foto makro sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.1 dan hasil foto mikro seperti ditunjukkan pada Gambar 4.4 hingga Gambar 4.24.

Foto makro pada Gambar 4.1, untuk kepentingan analisis dibagi atas 3 bagian, A, B dan C seperti ditunjukkan pada Gambar 5.10. Luas A, B dan C dihitung hingga diperoleh hasil luas masing-masing seperti ditunjukkan pada Tabel 5.1. Selanjutnya dengan menggunakan persamaan 2.16, dilusi dari logam pengisi ke sambungan las V

Keterangan:

- Garis segitiga putih menunjukkan bentuk sambungan mula-mula sebelum dilas.
- Bentuk *top weld* (C) dan *root weld* (B) diasumsikan sebagai juring tali busur.
- Bagian tengah inti las berbentuk trapesium.



Gambar 5.10 Tiga bagian penting untuk analisis dilusi las A, B dan C

Tabel 5.1 Luas daerah A, B dan C untuk perhitungan dilusi hasil las

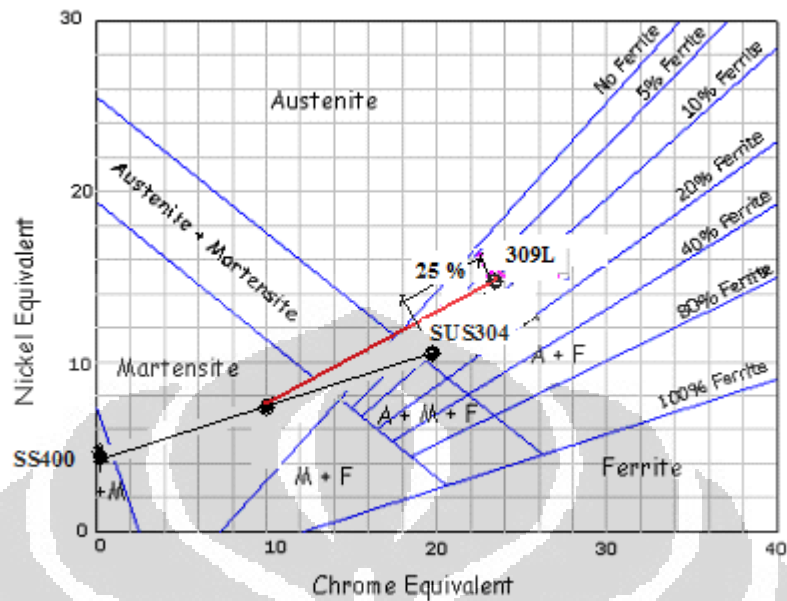
Daerah	Sampel 1 (mm ²)	Sampel 2 (mm ²)	Sampel 3 (mm ²)
Luas A	3195	4450	5015
Luas B	507	690	697
Luas C	550	760	814

dihitung hingga diperoleh hasil pada sampel 1, sampel 2 dan sampel 3 masing-masing adalah 25 % lalu 25 % dan 23 %. Dengan menggunakan rumus 2.14 dan 2.15 serta Tabel 3.1, Tabel 3.2 dan Tabel 3.3 diperoleh besar Ni Ekuivalen dan Cr-ekivalen seperti ditunjukkan pada Tabel 5.2. Dengan menggunakan Schaffler SS400 SUS304 309L

Tabel 5.2 Cr ekuivalen dan Ni ekuivalen dari sampel las disimilar metal

	SS400	SUS304	DW-309L
Ni-ekivalen (%)	5,12	11,4	14,55
Cr-ekivalen (%)	0,29	19,13	23,75

diagram seperti ditunjukkan pada Gambar 5.11 diperoleh bahwa besar delta ferit yang terjadi adalah 10%



Gambar 5.11 Hasil 10% delta Ferit untuk dilusi 25 % hasil las SUS304 dengan SS400

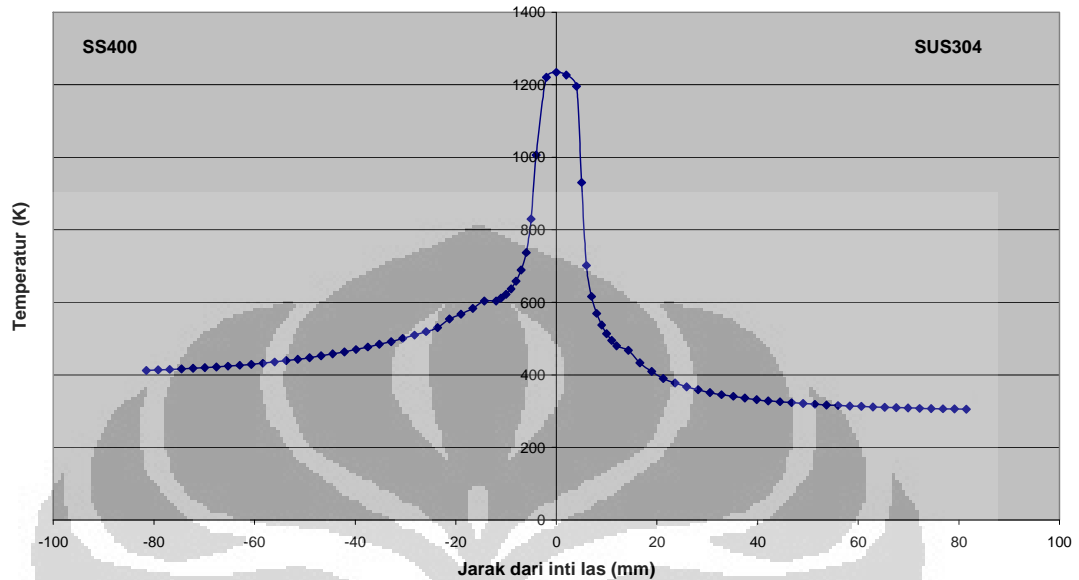
5.1.5.2. Endapan karbida dan pertumbuhan butir pada hasil las disimilar metal

Dengan perbesaran foto struktur mikro 200 kali pada material SUS304 dapat terlihat bahwa pada daerah HAZ SUS304 terbentuk endapan karbida. Akibat adanya endapan karbida menyebabkan daerah HAZ menjadi lebih keras dibanding daerah logam induk. Pada daerah inti las tidak ditemukan adanya martensit hal ini menyebabkan daerah inti las lebih lunak dibanding daerah HAZ SUS304. Hal inilah yang menyebabkan perbedaan hasil pengukuran tegangan sisa pada dua logam yang sama (*similar metal*) dengan pengelasan pada dua logam yang berbeda.

Pada material SS400 dengan perbesaran 200 kali diperoleh bahwa jarak pertumbuhan butir baru pada material yang lebih tebal melebar dari inti las ke arah logam induk lebih jauh dari pada material yang lebih tipis. Hal ini menyebabkan daerah batas las dan HAZ menjadi lebih lunak dan tegangan sisa yang terjadi lebih rendah, tetapi pada kisaran jarak terdekat terjadi rekristalisasi menyebabkan nilai kekerasan pada daerah ini naik dan tegangan sisa yang terjadi juga besar. Hal ini ditunjukkan dengan terbentuknya butiran-butiran yang kecil pada daerah HAZ.

5.2. Analisis Hasil Simulasi

5.2.1 Analisis simulasi termal



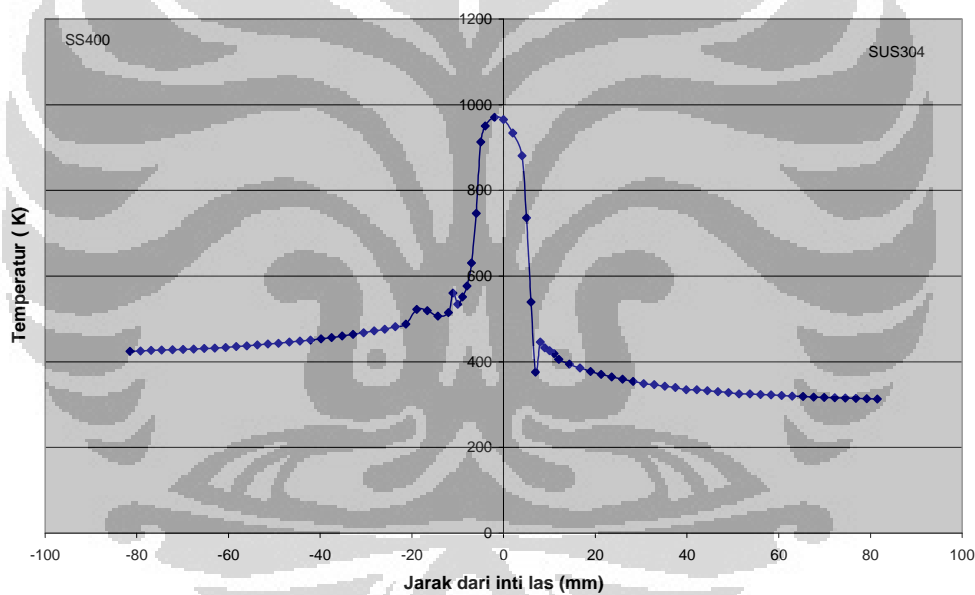
Gambar 5.12. Distribusi temperatur las pada bagian permukaan atas sampel 1, jarak 84 mm arah axial

Distribusi temperatur las mulai dari inti las hingga ke logam induk seperti pada Gambar 5.12. Temperatur setelah pengelasan sekitar 1200°C kemudian dipindahkan ke logam induk melalui daerah HAZ. Proses perpindahan panas konduksi yang menyebabkan pendinginan yang cepat terjadi dari inti las ke logam induk. Tentu saja selain kehilangan panas secara konduksi juga dipengaruhi oleh kehilangan panas secara konveksi dimana permukaan sampel kontak langsung dengan udara terbuka.

Akibat perubahan panas yang berlangsung sangat cepat mengakibatkan perubahan fasa yang terjadi pada logam las dan logam induk mengalami perubahan. Sifat-sifat fisik logam induk cenderung mengalami perubahan utamanya pada daerah dekat inti las yang dikenal dengan nama HAZ. Daerah ini mengalami proses pemuaihan dan penyusutan yang sangat cepat karena masukan panas las mengakibatkan timbulnya tegangan sisa yang tinggi.

Perpindahan panas konduksi yang terjadi pada logam yang lebih tebal cenderung lebih cepat akibatnya kehilangan panas konduksi pada sampel dengan ketebalan 12 mm lebih besar dibanding sampel dengan tebal 8 mm. Hal

ini menyebabkan sampel yang lebih tebal meyerap panas lebih banyak sehingga temperatur las yang diperlukan lebih tinggi maka arus las yang dibutuhkan juga lebih besar. Oleh karena proses kehilangan panas konduksi yang lebih besar pada sampel yang lebih tebal dibanding yang lebih tipis maka puncak distribusi temperatur yang diperoleh lebih rendah sebagaimana perbandingan yang ditunjukkan pada Gambar 5.12 dengan Gambar 5.13. Namun demikian penerimaan panas yang sangat besar menyebabkan perubahan sifat fasa yang meyebakan peningkatan kekerasan pada logam induk di daerah HAZ pada logam yang tebalnya 12 mm lebih tinggi dibanding logam dengan ketebalan 8 mm. Hal ini menjadikan tegangan sisa yang terjadi pada logam dengan ketebalan 12 mm lebih besar dibanding logam dengan ketebalan 8 mm.

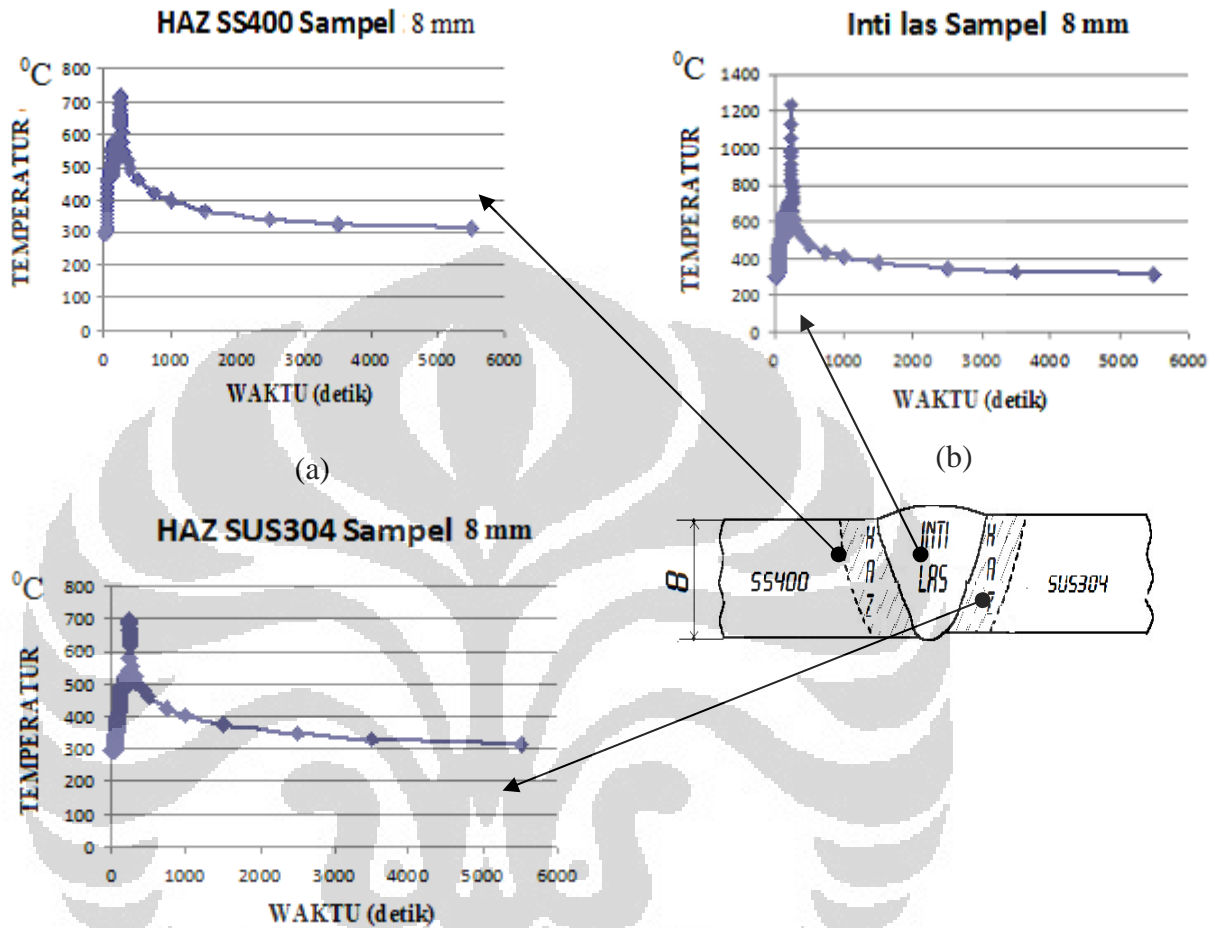


Gambar 5.13 Distribusi temperatur las pada permukaan atas sampel 3 jarak 84 mm arah axial

Proses lain yang juga perlu dilihat untuk menjadi bahan pertimbangan adalah perubahan panas las terhadap waktu seperti ditunjukkan pada Gambar 5.16.

Dengan memperhatikan *thermal history* berupa perubahan panas las pada daerah inti las ke daerah HAZ yang berlangsung sangat cepat terlihat dari waktu 1000 detik pertama maka kecenderungan terjadinya tegangan sisa akibat proses pemanasan dan pendinginan di darah HAZ sangat tinggi. Karakteristik ini ditunjukkan pada Gambar 5.14. Pada inti las pengelasan dua logam berbeda

(*disimilar metal*) terbentuk beberapa fasa yang mengakibatkan terbentuk beberapa puncak temperatur.



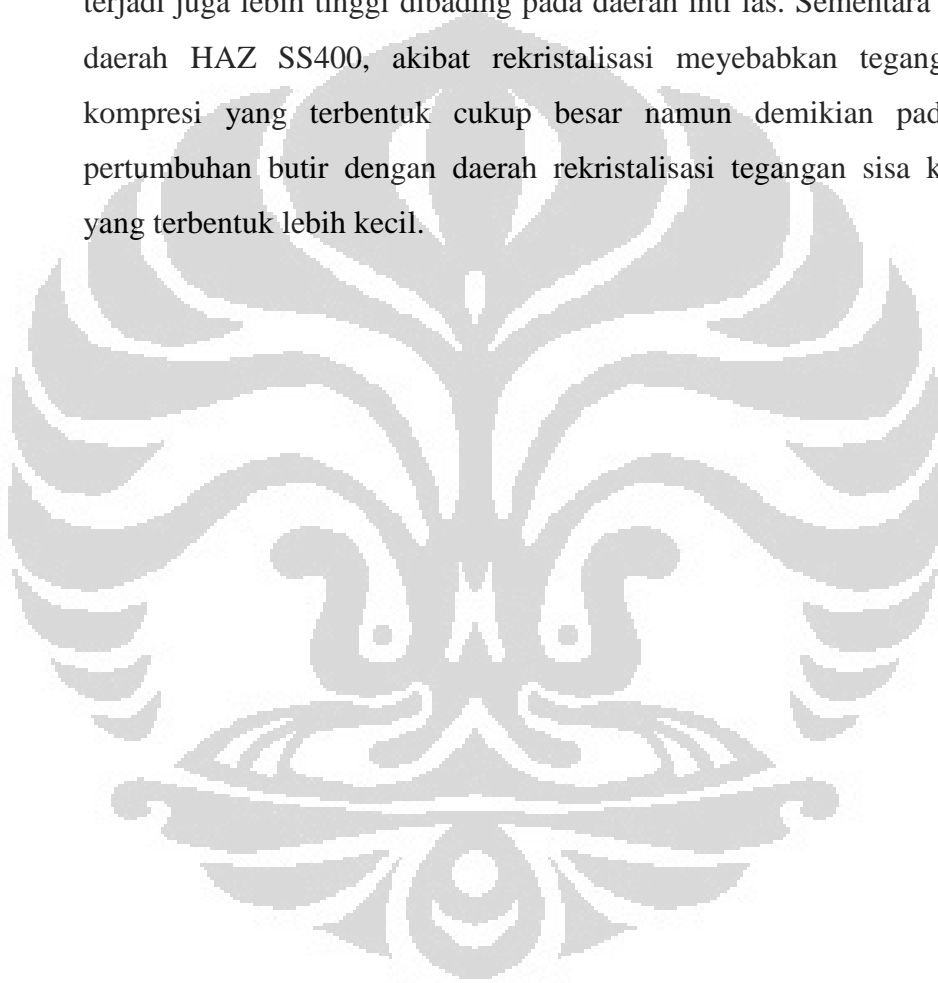
Gambar 5.14. Perubahan temperatur las pada material pada daerah (a) HAZ SS400, (b) Inti las dan (c) HAZ SUS304 pada Sampel 1

BAB VI KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian ini diperoleh kesimpulan bahwa karakteristik tegangan sisa dan struktur mikro hasil las disimilar metal SUS304 dengan SS400 adalah:

1. Dengan besar gaya penahan yang sama besar pada ketiga sampel maka derajat distorsi yang terjadi meningkat akibat masukan panas yang bertambah karena tebal pelat bertambah. Ini ditunjukkan dengan derajat distorsi pada tebal pelat 8 mm $1,29^{\circ}$ kemudian pada tebal pelat 10 mm $1,93^{\circ}$ dan pada tebal 12 mm $3,22^{\circ}$
2. Dari analisis hasil uji metalografi dengan melihat foto struktur makro diperoleh hasil dilusi logam pengisi AWS A5.22 DW-309L pada hasil las SUS304 dengan SS400 dengan adalah 25 % dan pembentukan delta ferit 10%. Analisis hasil foto struktur mikro menunjukkan bahwa terjadi korosi batas butir pada HAZ SUS304 yang ditunjukkan dengan adanya endapan karbida pada daerah batas butir.
3. Hasil uji kekerasan Vickers makro menunjukkan bahwa bagian terkeras pada HAZ SUS304 dengan nilai 232 HV pada sampel tebal 8 mm, kemudian 238 HV pada sampel tebal 10 mm dan yang paling keras adalah pada HAZ sampel tebal 12 mm sebesar 257 HV. Sedangkan pada material SS400 nilai kekerasannya hanya berada pada rentang nilai 150 hingga 180 HV.
4. Hasil pengukuran tegangan sisa menunjukkan bahwa logam yang mendapat masukan panas terbanyak memiliki tegangan sisa terbesar. Pada SUS304 diperoleh tegangan sisa terbesar pada sampel dengan ketebalan 12 mm pada jarak 10,5 mm dari inti las masing-masing untuk arah transversal 17 MPa, normal dan Axial 3 MPa sedangkan pada SS400 pada jarak 15,5 mm tegangan sisa tekan juga paling besar pada sampel 3 dengan nilai -39 MPa pada arah normal dan -50 untuk arah axial.
5. Jumlah masukan panas pada sampel tebal 12 mm lebih besar dibanding sampel tebal 10 mm dan tebal 8 mm. Dari simulasi, perpindahan panas konduksi yang menyebabkan penyerapan panas sampel tebal 12 mm

paling besar dibanding sampel lainnya. Dari hasil uji kekerasan, daerah HAZ SUS304 sampel tebal 12 juga paling keras. Hasil pengukuran tegangan sisa juga menunjukkan bahwa semakin tebal sampel maka semakin tinggi tegangan sisa yang terbentuk. Berdasarkan hasil struktur mikro, pada daerah inti las tidak ditemukan adanya fasa martensit sedangkan pada HAZ SUS304 terbentuk endapan krom karbida hal ini menyebabkan daerah HAZ SUS304 lebih keras dan tegangan sisa yang terjadi juga lebih tinggi dibanding pada daerah inti las. Sementara itu pada daerah HAZ SS400, akibat rekristalisasi menyebabkan tegangan sisa kompresi yang terbentuk cukup besar namun demikian pada batas pertumbuhan butir dengan daerah rekristalisasi tegangan sisa kompresi yang terbentuk lebih kecil.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. Mayinger and K.J. Metzner, **Dissimilar Metal Welds (DMW) in German LWR's Design Types**, Disbonding, NDT, 28 Juli 2001, E.ON Kernkraft, Hannover, Germany, SMIRT-Conference 2001.
- [2] A. Joseph and Sanjay K. Ray, **Evaluation of residual stresses in dissimilar weld joints**, International Journal of Pressure Vessels and Piping 82, page 700–705, (March 2005)
- [3] Anwar Ul-Hamid, et all, **Failure of weld joints between carbon steel pipe and 304 stainless steel elbows**, Engineering Failure Analysis vol 12, page 181–191 (2005).
- [4] Koichi Masubuchi, Prediction and Control of Residual Stresses and Distorsion in Welded Structures, Trans JWRI, vol 25, No 2, (1996)
- [5] Juliana Anggono dan Roche Alimin, **"Pengaruh Besar Input Panas Pengelasan SMAW Terhadap Distorsi Angular Sambungan T Baja Lunak SS 400"** Jurnal Teknik Mesin Volume 1 No 1, (Januari 1999).
- [6] K. Devakumaran, M. Ravi Reddy & P.K. Ghosh, **" Experimental Investigation on The Transverse Shrinkage Stress and Distorsion Generates in Butt Welded Joint"** International Symposium of Research Student on Materials Science and Engineering Chennai – India, (2004)
- [7] <http://www.azom.com/Details.asp?ArticleID=965>, Stainless Steel Grade 304, 4 Januari 2010
- [8] <http://www.meadinfo.org/2010/09/jis-g-3101-ss400-steel-properties-spec.html>, SS400 Structural Steel - An Overview, 4 November 2010
- [9] Wiryosumarto, H. dan Okumura, T., **"Teknologi Pengelasan Logam"**, PT Pradnya Paramita, Jakarta, 1996.
- [10] Artem Pilipenko, **Computer simulation of residual stress and distortion of thick plates in multi-electrode submerged arc welding. Their mitigation techniques**, NTNU, Trondheim, 2001.
- [11] Koichi Masubuchi, Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, 1980.
- [12] ISO /TTA 3, Polycrystalline Materials – **Determination of Residual Stresses by Neutron Diffraction, Technology Trends Assessment**, ISO VAMAS, first edition, 2001.
- [13] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/bragg.html>, Bragg's Law, 4 Juni 2010.

- [14] M. Refai Muslih dan Soeharto, **Aplikasi Berkas Neutron Mikro Pada Diffraktometer DN1-M Untuk Pengukuran Regangan di Dekat Permukaan Baja AISI 1045**, Hal. 237-241, Prosiding Seminar Nasional ke-16 Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir, BATAN, Indonesia, 2010.
- [15] Lawrence H. Van Vlack, **Elemen-elemen Ilmu dan Rekayasa Material**, edisi ke-enam terjemahan, Penerbit Erlangga, Jakarta, 2004.
- [16] http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/miller_indices/printall.php, Lattice Planes and Miller Indices, University of Cambridge, 22 Sep 2010.
- [17] <http://www.gowelding.com/met/diss.html>, Carbon Steel To Austenitic Steel, 4 Juni 2010
- [18] Coniglio, N., et al., **Defining a Critical Weld Dilution to Avoid Solidification Cracking in Aluminum**, Welding Journal, Vol 87, p.237 - 246, (2008).
- [19] Tso-Liang Teng and Chih-Cheng Lin, **Effect of welding conditions on residual stresses due to butt welds**, International Journal of Pressure Vessels and Piping, p. 857–864, (1998).
- [20] IAEA-TECDOC-1457, **Measurement of residual stress in materials using neutrons**, Proceedings of a technical meeting held in Vienna 13-17 October, 2003.
- [21] Anni Rahmat, **Analisa Distribusi Temperatur dan Tegangan Sisa Pada Pengelasan ASTM A131 Dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga**, Skripsi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2007.
- [22] Bogaard R.H., et al., **Thermophysical Properties of Stainless Steels**, *Thermochimica Acta*, Vol. 218, 373-393 (1993).
- [23] Gayle, F.W., et al., **Mechanical and Metallurgical Analysis of Structural Steel**, NIST NCSTAR 1-3 Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster, U.S. Department of Commerce, September 2005