



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH KETEBALAN PELAT TERHADAP TEGANGAN
SISA DAN DISTORSI PADA DISSIMILAR METAL JIS SUS304
DENGAN JIS 3101 SS400 HASIL PENGELASAN GTAW**

SKRIPSI

ARYA PRADIPTA WIJAYAMURTI

0706268316

FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA

TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL

DEPOK

FEBRUARI 2012



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH KETEBALAN PELAT TERHADAP TEGANGAN
SISA DAN DISTORSI PADA DISSIMILAR METAL JIS SUS304
DENGAN JIS 3101 SS400 HASIL PENGELASAN GTAW**

SKRIPSI

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Teknik (ST)**

ARYA PRADIPTA WIJAYAMURTI

0706268316

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
FEBRUARI 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Arya Pradipta Wijayamurti

NPM : 0706268316

Tanda Tangan : 

Tanggal : 1 Februari 2012

HALAMAN PENGESAHAN

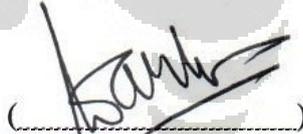
Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Arya Pradipta Wijayamurti
NPM : 0706268316
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Pengaruh Ketebalan Pelat Terhadap Tegangan Sisa
dan Distorsi Pada Dissimilar Metal JIS SUS304
dengan JIS 3101 SS400 Hasil Pengelasan GTAW

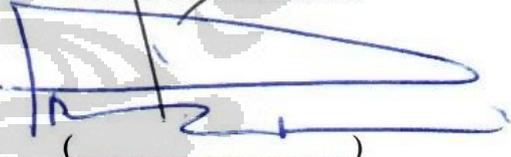
Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

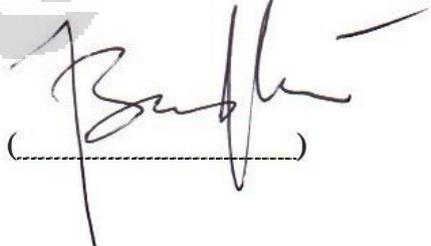
Pembimbing : Dr. Ir. Winarto, M.Sc

()

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

()

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

()

Ditetapkan : Depok, 1 Februari 2012

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur saya panjatkan kehadirat Allah SWT karena dengan berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan Tugas Akhir dan skripsi ini dengan baik. Skripsi yang berjudul **“Pengaruh Ketebalan Pelat Terhadap Tegangan Sisa dan Distorsi Pada Dissimilar Metal JIS SUS304 dengan JIS 3101 SS400 Hasil Pengelasan GTAW”** ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan akademis dalam meraih gelar Sarjana Teknik di Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan, dukungan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Ir. Winarto, M.Sc, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini.
2. Prof. Dr-Ing. Ir. Bambang Suharno, selaku Kepala Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI.
3. Dr. Ir. Muhammad Anis M.Met, selaku Pembimbing Akademis penulis.
4. Bapak Abdul Hafid yang selalu memberikan ilmu dan pengalamannya di dunia pengelasan, dan Bapak Rifai yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengajari saya dalam hal penggunaan alat Diraksi Neutron di BATAN, serta seluruh pihak dari BATAN yang telah membantu dalam penyusunan skripsi ini.
5. Kedua orang tua tercinta, Bapak Haryo Guritno dan Ibu Yuliyanti, serta kakak saya Harimurti Mustikayudha, yang selalu mendukung dan memberikan segalanya untuk saya, terima kasih untuk semuanya, saya sangat bersyukur dapat menjadi bagian dari keluarga kecil kita ini, semoga kita selalu diliputi dalam kebahagiaan.
6. Abellia Anggi Wardani yang telah menjadi inspirasi bagi saya, terima kasih dan sampai jumpa di Omsk, Paris, atau Angers.
7. Rekan seperjuangan tugas akhir saya, Benny Yarlis “The Dragon” Saputra, without you I am just the Dynamic Uno.

8. Rekan-rekan Laboratorium Pengecoran Logam yang telah setia menemani saat saya selama mengerjakan tugas akhir, Abud, David, Benny, Juris, Hesti, Hendro, Andra, Diwang, Oki, serta Kepala Laboratorium kami tercinta Pak Dwi Marta Nurjaya, yang telah mentraktir kami di Hanamasa sampai puas.
9. Teman-teman di kala senang maupun susah : Jaul, Benny, Adhi, Arri, Kennedi, Abud, Andra, Bastian, Rangga, Andika, Umar, Halwan, Lendi, David, dan seluruh anggota keluarga besar metalurgi dan material yang tidak dapat disebut satu per satu.
10. Sahabat-sahabat Pondok Lambang, Halwan, Ucup, Adi, Mamet, Dedi, Tiko, Putut, Ichwan, Welly, Ucu, Fahmi, Denny, Himawan, dan Rahmawan, yang selalu memberikan warna tersendiri di kostan tercinta.
11. Jose Mourinho dan Barney Stinson, dua tokoh legendaris yang selalu menjadi referensi saya dalam menjalani hidup di dunia yang keras ini.
12. Dan Semua pihak yang telah membantu saya dalam menyusun skripsi ini, terima kasih banyak.

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

Depok, 1 Februari 2012

Penulis

ABSTRAK

Nama : Arya Pradipta Wijayamurti
NPM : 0706268316
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Pengaruh Ketebalan Pelat Terhadap Tegangan Sisa dan Distorsi Pada Dissimilar Metal JIS SUS304 Dengan JIS 3101 SS400 Hasil Pengelasan GTAW

Dissimilar metal adalah gabungan dari dua jenis logam berbeda yang dapat diperoleh dengan menggunakan proses pengelasan. Pada penelitian ini, pengelasan dilakukan dengan metode GTAW. Dalam proses pengelasan, panas yang diberikan pada logam menyebabkan distribusi suhu yang tidak seragam yang nantinya akan menyebabkan terjadinya tegangan sisa dan distorsi. Distribusi tegangan sisa hasil pengelasan dari SUS304 dan baja karbon SS400 mengalami perbedaan yang signifikan karena adanya perbedaan koefisien ekspansi termal dan konduktivitas termal antara kedua logam induk. Ada tiga buah pelat dengan ketebalan berbeda yang digunakan, yaitu 8 mm, 10 mm, dan 12 mm. Besarnya nilai tegangan sisa diukur menggunakan instrument difraksi neutron, dan besarnya nilai distorsi angular diukur menggunakan dial gauge. Dari hasil penelitian, didapatkan nilai distorsi angular sebesar $1,07^\circ$ untuk pelat 8 mm, $2,14^\circ$ untuk pelat 10 mm, dan $3,21^\circ$ untuk pelat 12 mm. Nilai tegangan sisa untuk pelat 12 mm yaitu -15,650 MPa pada arah transversal, -2,716 MPa pada arah normal, dan -16,462 MPa pada arah axial, dan besar tegangan sisa untuk pelat 10 mm, dan 8 mm berturut - turut sebagai berikut, -46,146 MPa dan -63,658 MPa untuk arah transversal, -94,302 MPa dan -99,718 MPa untuk arah normal, dan -28,162 MPa dan -99,118 MPa untuk arah axial.

Kata kunci :GTAW; Dissimilar metal; Tegangan Sisa; Difraksi Neutron; Distorsi

ABSTRACT

Name : Arya Pradipta Wijayamurti
NPM : 0706268316
Major : Metallurgy and Material Engineering
Title : The Effect of Plate Thickness on Residual Stress
and Distortion in Dissimilar Metal JIS 3101 SS400
And JIS SUS304 Using GTAW Process

Dissimilar metal is a combination of two different types of metals that can be obtained by using welding process. This research uses Gas Tungsten Arc Welding method. Heat input in the process of welding on the metal causes non-uniform temperature distribution that would lead to the occurrence of residual stress and distortion. Distribution of welding residual stress of SUS304 and SS400 carbon steel having a significant difference due to different coefficients of thermal expansion and thermal conductivity between the base metal. There are three plates with different thicknesses are used, namely 8 mm, 10 mm and 12 mm. From the results of the research, obtained the value of the angular distortion of 1.07° to plate 8 mm, 2.14° for plate 10 mm, and 3.21° for 12 mm plate. Residual stress values for plates of 12 mm is -15.650 Mpa in the transverse direction, -2.716Mpa in the normal direction, and -16.462 Mpa in the axial direction, and the value of residual stress for 10 mm, and 8 mm plates respectively as follows, -46.146 Mpa and -63.658 Mpa for the transverse direction, and -94.302 Mpa and -99.718 Mpa for the normal direction, and -28.162 MPa and -99.118Mpa for the axial direction.

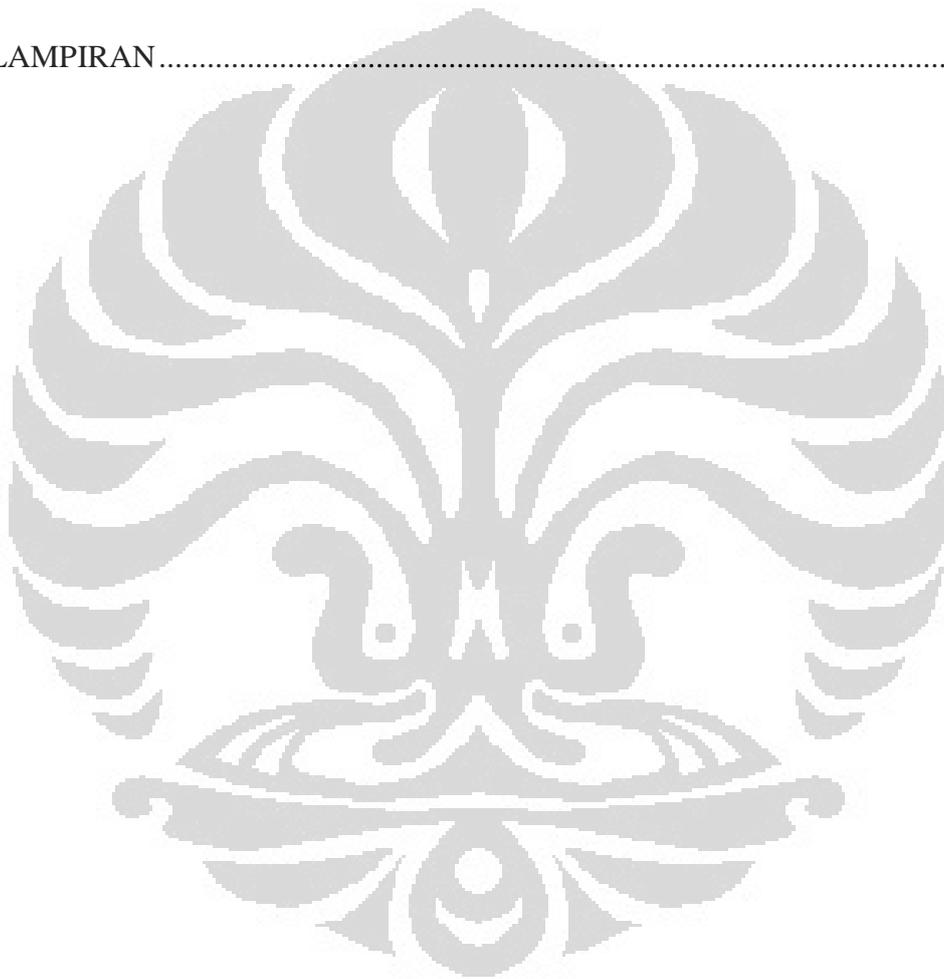
Keyword :GTAW; Dissimilar metal; Residual stress;Neutron diffraction; Distortion.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINILITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	vi
ABSTRAK.....	vii
<i>ABSTRACT</i>	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiv
NOMENCLATURE.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi
1. PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang Penelitian.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Ruang Lingkup Penelitian.....	4
1.4. Tujuan Penelitian.....	4
1.5. Kegunaan Penelitian.....	4
2. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1. Logam Induk.....	6
2.1.1. Material Baja Tahan Karat SUS 304.....	6
2.1.2. Material Baja Karbon JIS SS400.....	7
2.2. Pengelasan Gas Tungsten Arc Welding (GTAW).....	8
2.3. Logam Pengisi (Filler Metal).....	12
2.4. Metalurgi Las.....	13
2.4.1. Diagram Fasa Baja Karbon.....	13
2.4.2. Diagram Fasa Sistem Fe-Cr-Ni.....	15

2.4.3. Struktur Mikro.....	17
2.5. Tegangan Sisa dan Distorsi	18
2.5.1. Termal Las.....	18
2.5.2. Tegangan Sisa.....	18
2.5.3. Pengaruh Tegangan Sisa Terhadap Sifat Mekanis	20
2.5.4. Distorsi Pada Pengelasan	21
2.6. Pengukuran Tegangan Sisa Dengan Difraksi Neutron.....	22
2.7. Hubungan Antara Tegangan – Regangan Elastis	24
3. METODOLOGI PENELITIAN	27
3.1. Diagram Alir Penelitian.....	27
3.2. Alat dan Bahan	28
3.2.1. Bahan	28
3.2. 2. Peralatan.....	28
3.3. Prosedur Pengelasan.....	28
3.3.1. Persiapan Sampel	28
3.3.2. Proses Pengelasan	29
3.4. Pengukuran Distorsi	29
3.5. Uji Visual	30
3.6. Pengujian Pengujian.....	30
3.6.1. Pengamatan Struktur Makro dan Mikro.....	30
3.6.2. Pengujian Kekerasan.....	31
3.6.3. Pengukuran Tegangan Sisa.....	32
4. DATA PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	37
4.1. Data dan Analisa Ketebalan Pelat dan Distorsi Angular.....	37
4.1.1. Perhitungan Masukan Panas (Heat Input).....	37
4.1.2. Pengukuran Distorsi Angular	39
4.2. Data dan Analisa Nilai Kekerasan dan Struktur Mikro.....	42
4.2.1. Pembebanan Struktural	42
4.2.2. Data dan Analisa Struktur Mikro	45
4.2.2.1. Analisa Struktur Mikro Logam Induk SS400	45

4.2.2.2. Analisa Struktur Mikro Logam Induk SUS304	50
4.2.3. Data dan Analisa Struktur Makro.....	57
4.3. Pengukuran Tegangan Sisa.....	59
5. KESIMPULAN.....	65
DAFTAR PUSTAKA	66
LAMPIRAN.....	69



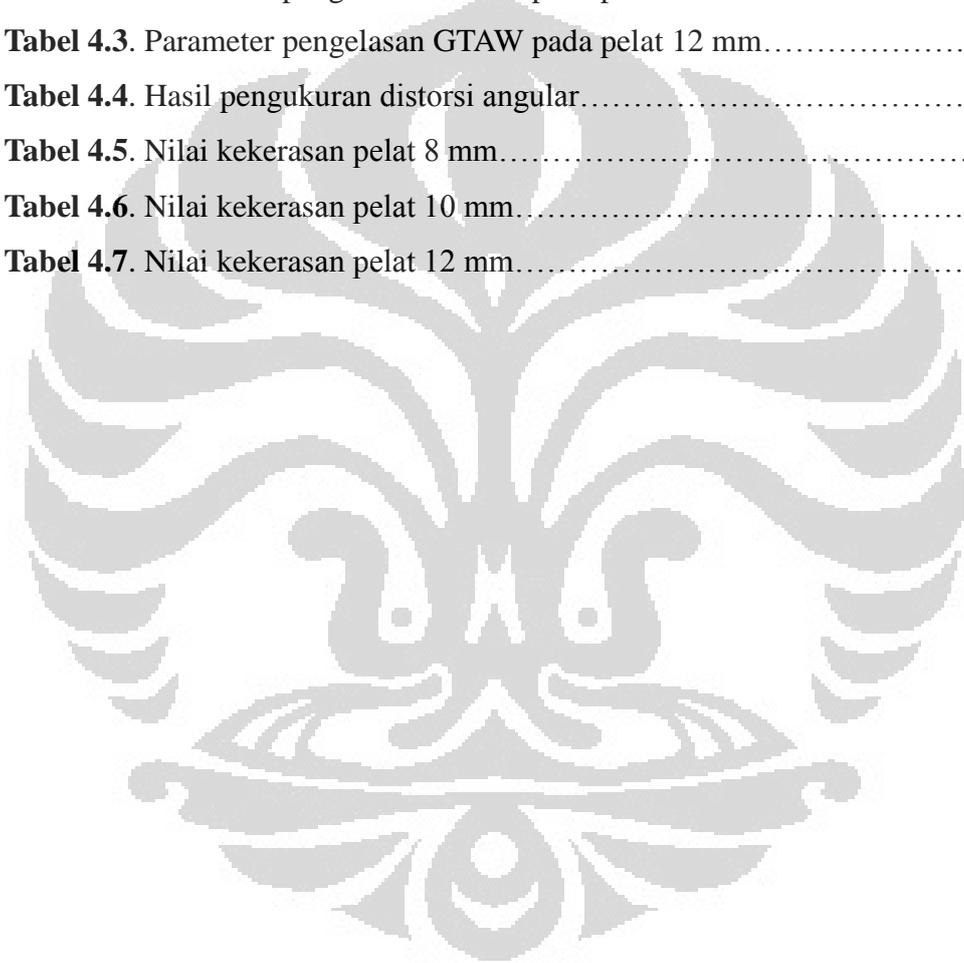
DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Daerah yang terbentuk akibat pengelasan	2
Gambar 2.1. Skema Gas tungsten arc welding: (a) Proses keseluruhan; (b) perbesaran area lasan	9
Gambar 2.2. Tiga jenis arus listrik pada GTAW	10
Gambar 2.3. Pengasahan sudut tip elektroda yang benar dan salah	11
Gambar 2.4. Bentuk ujung tip elektroda untuk berbagai sumber tenaga	11
Gambar 2.5. Dilusi TG-S309 dengan menggunakan diagram Schaeffler	13
Gambar 2.6. HAZ pada baja karbon dan diagram fasa	14
Gambar 2.7. Perbandingan Pengelasan dan <i>Heat Treating</i>	15
Gambar 2.8. Skema Isotermal Diagram Ternern pada Fe-Ni-Cr (a) Liquidus dan (b) Solidus	16
Gambar 2.9. Struktur mikro pengelasan baja karbon rendah	17
Gambar 2.10. Penyusutan dan penyusutan yang terhambat sebagai akibat dari distribusi temperatur yang tidak merata	19
Gambar 2.11. Tegangan sisa yang terjadi pada pengelasan tumpul (<i>butt welding</i>), yang dilas dari ujung keujung	20
Gambar 2.12. Mekanisme penyusutan	21
Gambar 2.13. Jenis-jenis distorsi	22
Gambar 2.14. Kerucut hamburan Debye-Scherre dari material polikristalin	23
Gambar 2.15. Metode penentuan 2θ puncak dengan fungsi Gauss-Cauchy	24
Gambar 2.16. Difraksi pada tegangan satu sumbu (uniaksial)	25
Gambar 3.1. Diagram alir penelitian	27
Gambar 3.2. Dial Gauge untuk pengukuran distorsi	30
Gambar 3.3. Ilustrasi pengukuran distorsi angular	30
Gambar 3.4. Lokasi pengambilan foto dan uji kekerasan	31
Gambar.3.5. Penampang indentor uji kekerasan vickers	32
Gambar.3.6. Diagram skematik peralatan difraktometer neutron	33
Gambar.3.7. Diagram skematik posisi sampel terhadap berkas neutron	34
Gambar.3.8. Posisi sampel diatas meja sampel	35
Gambar.3.9. Posisi pengukuran tegangan sisa	36
Gambar.4.1. Pengukuran sudut distorsi angular pada hasil pengelasan	39

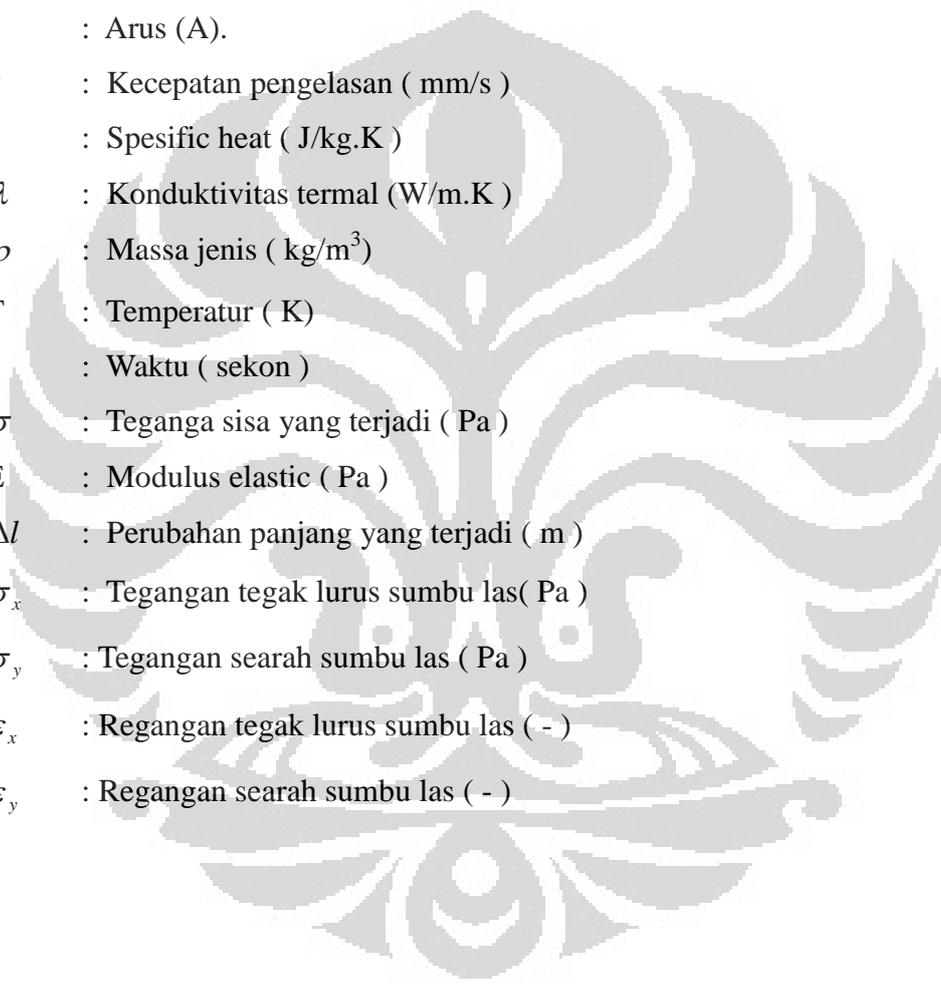
Gambar.4.2. Grafik besar distorsi angular dan ketebalan pelat.....	40
Gambar.4.3. Penahanan pelat saat pengelasan.....	41
Gambar.4.4. Nilai kekerasan di berbagai daerah pada pelat yang berbeda.....	44
Gambar.4.5. Struktur mikro logam induk	46
Gambar.4.6. Struktur mikro HAZ butir kasar.....	48
Gambar.4.7. Perbatasan HAZ butir halus dan HAZ butir kasar.....	50
Gambar.4.8. Struktur mikro logam induk.....	52
Gambar.4.9. Struktur mikro Batas las.....	53
Gambar.4.10. Struktur mikro inti las.....	55
Gambar.4.11. Sensitasi karbida.....	57
Gambar.4.12. Foto makro.....	59
Gambar.4.13. Grafik tegangan sisa pada pelat 8 mm	61
Gambar.4.14. Grafik tegangan sisa pada pelat 10 mm.....	61
Gambar.4.15. Grafik tegangan sisa pada pelat 12 mm.....	62
Gambar.4.16. Grafik tegangan sisa pada arah transversal.....	63
Gambar.4.16. Grafik tegangan sisa pada arah normal.....	63
Gambar.4.16. Grafik tegangan sisa pada arah axial.....	64

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. komposisi SUS 304.....	7
Tabel 2.2. Sifat mekanik SUS 304.....	7
Tabel 2.3. Sifat fisik SUS 304.....	7
Tabel 2.4. Komposisi kimia baja karbon SS 400	8
Tabel 2.5. Komposisi kimia logam pengisi	12
Tabel 4.1. Parameter pengelasan GTAW pada pelat 8 mm	37
Tabel 4.2. Parameter pengelasan GTAW pada pelat 10 mm.....	38
Tabel 4.3. Parameter pengelasan GTAW pada pelat 12 mm.....	38
Tabel 4.4. Hasil pengukuran distorsi angular.....	39
Tabel 4.5. Nilai kekerasan pelat 8 mm.....	42
Tabel 4.6. Nilai kekerasan pelat 10 mm.....	43
Tabel 4.7. Nilai kekerasan pelat 12 mm.....	43



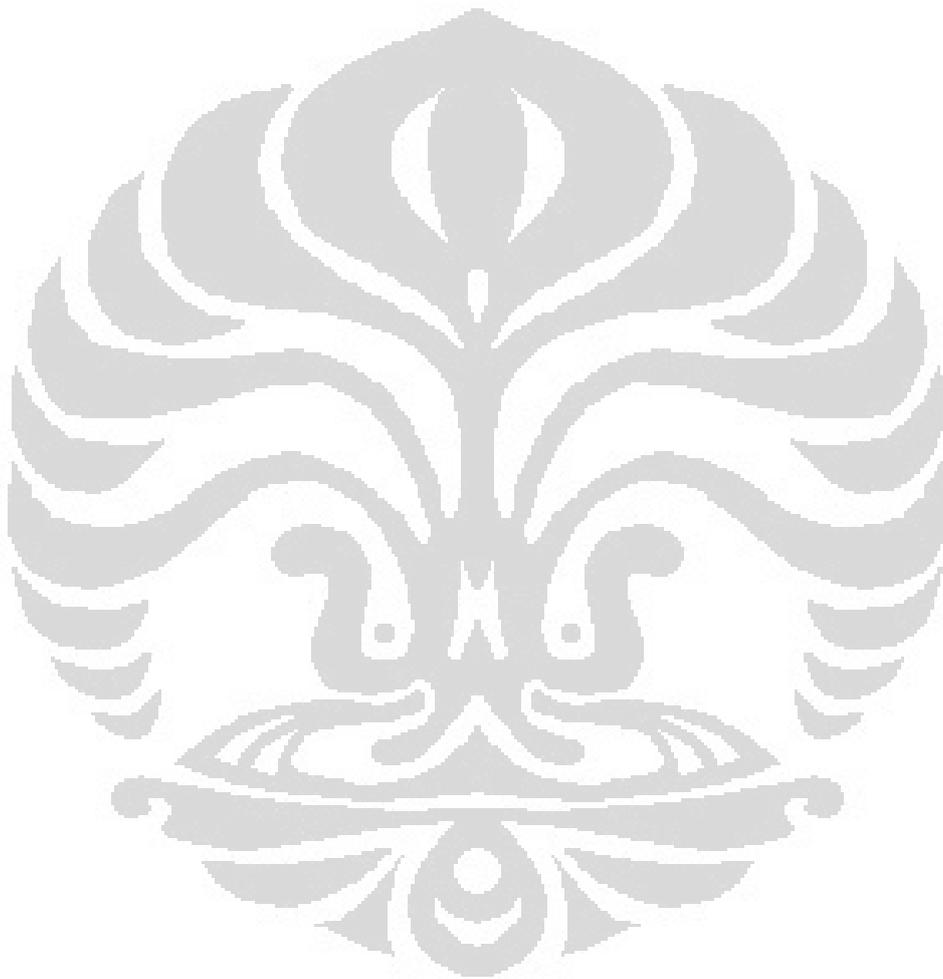
NOMENCLATURE



Q	: Net heat input / effective thermal power (watt)
η	: Koefisien efisiensi (-)
U	: Tegangan Busur (volt)
H_{net}	: Energi input bersih. (J/mm)
E	: Tegangan (V).
I	: Arus (A).
v	: Kecepatan pengelasan (mm/s)
c	: Specific heat (J/kg.K)
λ	: Konduktivitas termal (W/m.K)
ρ	: Massa jenis (kg/m ³)
T	: Temperatur (K)
t	: Waktu (sekon)
σ	: Tegangan sisa yang terjadi (Pa)
E	: Modulus elastic (Pa)
Δl	: Perubahan panjang yang terjadi (m)
σ_x	: Tegangan tegak lurus sumbu las (Pa)
σ_y	: Tegangan searah sumbu las (Pa)
ε_x	: Regangan tegak lurus sumbu las (-)
ε_y	: Regangan searah sumbu las (-)

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1. Data Penelitian	69
LAMPIRAN 2. Foto Proses Pengelasan	78



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Penelitian

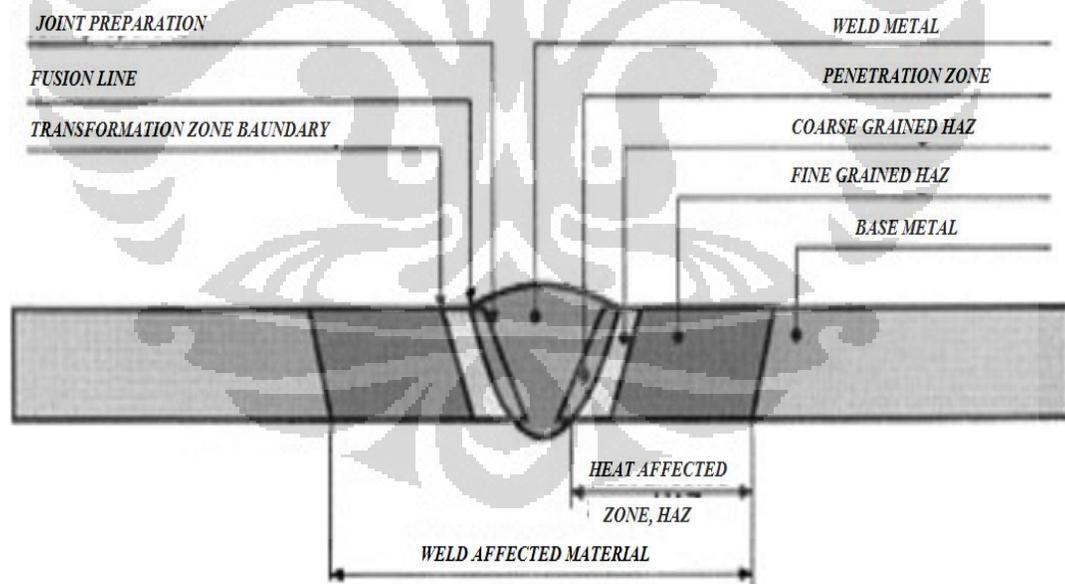
Kebijakan pengembangan material maju diarahkan pada upaya pengembangan teknologi material baru untuk meningkatkan fungsi kandungan lokal, memperkuat industri pendukung dan pohon industri nasional. Ini dinyatakan dalam Lampiran II Keputusan Menristek nomor 193/M/Kp/IV/2010. Karakterisasi material merupakan salah satu tinjauan dalam kategori material maju berdasarkan Agenda Riset Nasional (ARN) 2010 – 2014. Pada sektor energi, Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional (RPJPN) 2005 – 2025, energi nuklir sebagai bagian baru dan terbarukan peranannya terhadap konsumsi nasional pada tahun 2025 mencapai 2% sebagaimana dinyatakan dalam Peraturan Presiden No. 5 Tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional. Penelitian ini berkontribusi pada penyatuan hasil produksi baja karbon nasional sebagai kandungan lokal dengan baja tahan karat yang banyak digunakan pada Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN).

Pada industri Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) berbagai macam sistem operasi dan komponen digunakan. Komponen – komponen pada temperatur tinggi dibuat dari baja tahan karat dan yang beroperasi pada temperatur rendah dari baja feritik. Oleh karena itu penggabungan antara dua jenis material dalam bentuk pengelasan disimilar metal tersebut perlu untuk dilakukan misalnya antara baja feritik dengan baja austenitik yang digunakan pada pembangkit uap ^[1]. Dengan pola yang serupa, pengelasan disimilar metal antara baja tahan karat austenitik SUS304 dan baja karbon SS400 dilakukan untuk mendukung program nasional dalam rangka persiapan untuk pembangunan PLTN di Indonesia dalam hal penggunaan komponen lokal apabila hal tersebut digunakan.

Penggabungan antara baja karbon dengan baja tahan karat dapat meminimalkan biaya jika dilakukan dengan benar. Dalam penelitian ini akan dilakukan pengelasan antara SUS304 buatan Jepang dengan baja karbon lokal yang mengacu pada standar JIS 3101 SS400.

Baja tahan karat jenis SUS304 banyak digunakan dalam PLTN karena tahan korosinya paling baik dan kuat pada temperatur tinggi. Secara ekonomis, baja tahan karat SUS304 merupakan yang termurah di antara baja tahan karat yang lain. Namun, baja austenitik memiliki koefisien ekspansi termal lebih tinggi dan konduktifitas termal lebih rendah dibanding baja karbon dan baja paduan, oleh karena itu sejumlah besar penyusutan, distorsi, dan tegangan sisa yang terjadi dapat berpengaruh setelah fabrikasi las.^[2]

Pada dasarnya pengelasan adalah suatu proses penyambungan dua atau lebih logam, di mana logam induk dan logam pengisi akan menjadi satu karena adanya pengaruh panas, dengan atau tanpa penekanan. Oleh karena itu, pengelasan logam tidak pernah lepas dari peleburan logam, pengaruh penyusutan dan penyambungan antara logam induk dan logam pengisi pada temperatur yang relatif tinggi. Pada proses pengelasan logam, akan terbentuk empat daerah yang berbeda secara metalurgi, yaitu daerah logam las, daerah fusi, daerah HAZ, dan daerah logam induk.



Gambar 1.1. Daerah yang terbentuk akibat pengelasan

Salah satu masalah yang dapat timbul dari proses pengelasan adalah munculnya martensit yang diiringi dengan retakan^[3]. Masalah lain yang dapat timbul

dalam pengelasan SUS304 adalah terjadinya peristiwa sensitasi, yaitu perpindahan Cr ke batas butir karena pengaruh panas, kemudian membentuk krom karbida (Cr_{23}C_6), yang mengakibatkan berkurangnya kandungan Cr pada batas butir, sehingga mengurangi ketahanan korosi pada batas butir yang berada pada daerah dekat dengan lasan.

Untuk mengatasi beberapa masalah yang mungkin terjadi tersebut, maka pemilihan logam pengisi yaitu E309 dilakukan dengan *Schaeffler Diagram*, sehingga diharapkan pada logam las akan terdapat 4% ferit dan tanpa martensit dalam matriks austenitik yang dapat menahan retak panas.

Perbedaan temperatur yang sangat besar di daerah busur las dengan daerah logam induk mengakibatkan distribusi temperatur yang tidak merata. Semakin besar masukan panas (*heat input*), maka regangan termal juga semakin besar. Akibatnya terjadi perubahan bentuk dan ukuran (distorsi). Jika masukan panas semakin meningkat, maka tegangan internal akan meningkat sehingga distorsi yang terjadi semakin besar. Namun tegangan internal yang terjadi di dalam logam tidak semuanya terlepas seiring dengan terjadinya distorsi, tegangan yang masih terperangkap di dalam logam ini disebut tegangan sisa. Berdasarkan fakta tersebut, maka akan dilakukan pengukuran tegangan sisa pada daerah las dan sekitarnya.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah pengukuran tegangan sisa dan distorsi yang terdapat pada hasil pengelasan disimilar logam antara SUS304 dengan SS400 dengan proses *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) secara manual, sehingga dapat diketahui besarnya distorsi angular dengan berdasarkan ketebalan pelat yang berbeda dan besarnya masukan panas saat pengelasan setiap *pass* serta membandingkan tegangan sisa yang hadir pada logam dasar, daerah HAZ dan kampuh las. Kemudian juga dilakukan pengujian kekerasan, dan pengujian metalografi untuk melihat struktur mikro hasil lasan. Berdasarkan hasil analisa tersebut akan dapat dicarikan solusi untuk menghindari permasalahan yang dapat terjadi akibat tegangan sisa yang ada pada hasil lasan tersebut.

1.3 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian ini dibatasi pada :

- a) Bahan dasar yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja karbon lokal yang mengacu pada standar JIS 3101 SS400 dan baja tahan karat austenitik jenis SUS304 dengan dimensi 150 x 100 mm dengan ketebalan 8 mm, 10 mm, dan 12 mm.
- b) Proses pengelasan *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) dengan parameter kuat arus 150-200 A, tegangan listrik 22-25 V, kecepatan las 120 cm / menit, tipe sambungan *single v-groove butt joint*, dan gas pelindung yang digunakan adalah Argon.
- c) Pengujian *microhardness* dengan *standard* ASTM E384, pengamatan struktur makro dan mikro, pengukuran distorsi angular, serta pengukuran tegangan sisa dengan menggunakan metode difraksi neutron.

1.4 Tujuan Penelitian

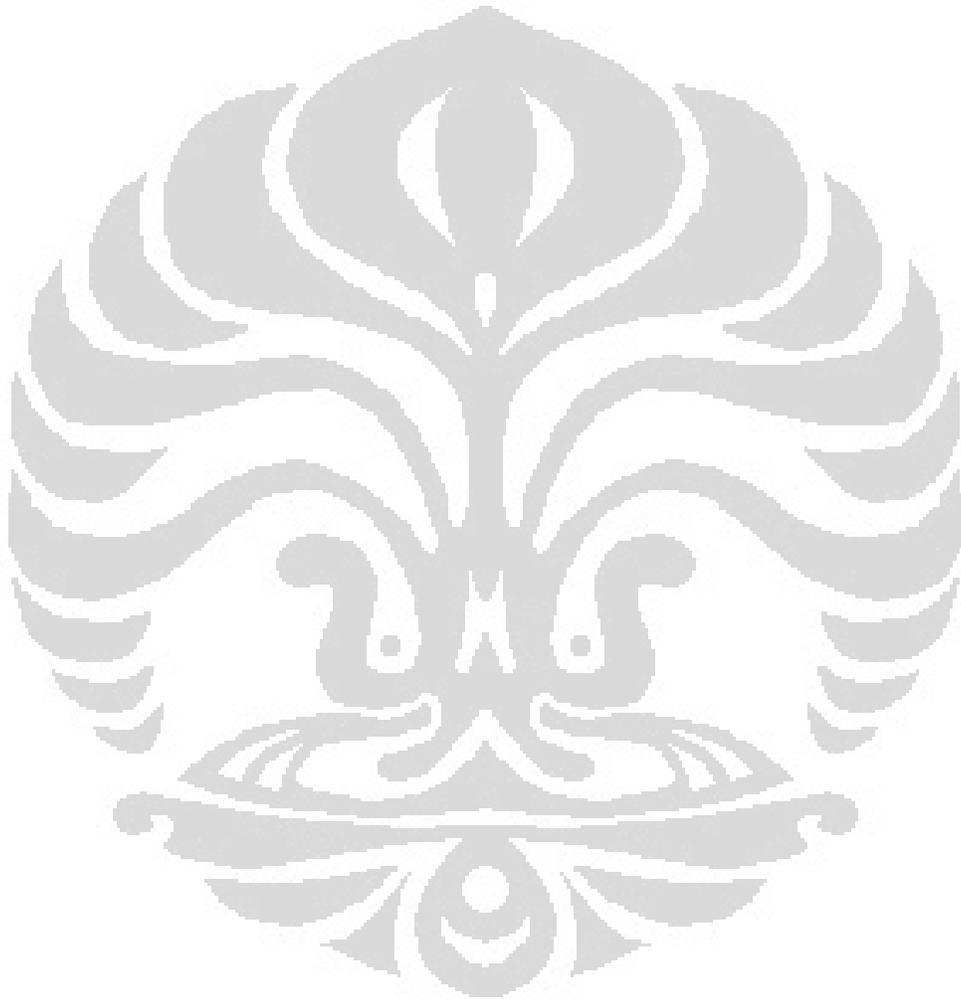
Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui pengaruh hubungan antara ketebalan pelat dengan besarnya distorsi angular pada metode pengelasan GTAW secara manual.
2. Mengetahui pengaruh ketebalan material yang dilas terhadap tegangan sisa pada daerah logam dasar, HAZ dan kampuh las.
3. Mengetahui hubungan kekerasan dengan tegangan sisa pada lasan, pada sambungan las tumpul (*butt welding*) dengan menggunakan las GTAW pada pengelasan dissimilar metal pelat JIS SUS304 dengan JIS 3101 SS400 secara eksperimental.

1.5 Kegunaan Penelitian

Kegunaan dari penelitian ini adalah sebagai rujukan informasi untuk mengetahui besarnya tegangan sisa yang terjadi pada pengelasan dissimilar antara baja tahan karat SUS304 dengan baja karbon SS400, agar dapat menghindari permasalahan yang nantinya ditimbulkan oleh tegangan sisa yang ada, sehingga dapat

digunakan untuk mendukung program-program pembangunan nasional dalam bidang teknologi material yang mendukung semua fokus iptek nasional guna memenuhi kewajiban penggunaan kandungan lokal yang maksimal.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Logam Induk

Logam induk pada pengelasan dissimilar logam pada penelitian ini adalah baja tahan karat austenitik SUS304 dengan baja karbon JIS 3101 SS400. Pada dasarnya, logam induk austenitik SUS304 memiliki sifat mampu las yang baik. Akan tetapi permasalahan yang dapat terjadi pada pengelasan baja tahan karat austenitik adalah apabila terkena panas pada temperatur $500^{\circ}\text{C} - 800^{\circ}\text{C}$ dalam waktu yang lama akan mengakibatkan terjadinya sensitasi pada daerah batas butir. Dalam hal ini akan terjadi kerusakan las (*weld decay*) di mana pada batas butir akan terjadi endapan karbida (Cr_{23}C_6) dan terbentuknya zona miskin Cr pada kedua sisi batas butir. Untuk mengatasinya dapat dilakukan *solution treatment* pada temperatur 1050°C yang diikuti oleh pendinginan cepat^[4]. Sifat mampu las logam induk lainnya, SS400 pada dasarnya juga baik. Ada 5 karakteristik yang perlu dipertimbangkan dalam hal kemampuan las baja karbon, yaitu: kemungkinan terbentuknya *martensite* di daerah HAZ, kehadiran ion hidrogen, tegangan sisa, perlunya *pre-heating*, dan penyesuaian sifat sifat korosi sambungan.

2.1.1 Material Baja Tahan Karat SUS304

Baja tahan karat austenitik digunakan secara luas dan dikenal dengan nama 18-8 (Cr - Ni) *steel*. Sifat penting baja tahan karat austenitik adalah memiliki ketahanan korosi yang sangat baik kecuali dalam lingkungan klorida. Selain itu baja tahan karat austenitik memiliki ketahanan panas, ketangguhan pada temperatur tinggi dan rendah, keuletan dan mampu bentuk serta mampu las sangat baik. Selain itu memiliki kekuatan rendah hingga moderat dan bersifat non magnetik. Akan tetapi harganya relatif mahal, yang disebabkan oleh adanya kandungan nikel^[5]. Tingkat dasar (*basic grade*) baja tahan karat austenitik adalah SS 304^[6]. Kesetaraan menurut standar ASTM dan JIS adalah untuk pelat SUS304 menurut JIS G4304 adalah sama dengan ASTM A240 *type 304*^[7].

Komposisi kimia baja tahan karat SS 304 berdasarkan standar ASTM A368-95a sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2. 1, sifat mekanis pada Tabel 2. 2, dan sifat fisik pada Tabel 2. 3.

Tabel 2.1. Komposisi kimia SUS304^[8]

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

Tabel 2.2. Sifat mekanis SUS304^[7]

Grade	Tensile Strength (MPa) min	Yield Strength 0,2% Proof (MPa) min	Elongation (% in 50 mm) min	Hardness	
				Rockwell B (HR B) max	Brinell (HB) max
304	515	205	40	92	201

Tabel 2.3. Sifat fisik SUS304^[7]

Grade	Density (Kg/m ³)	Elastic Modulus (Gpa)	Mean coef. Of thermal expansion ($\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$)			Thermal conductivity (W/m.K)		Specific Heat 100°C (J/Kg.K)	Electrical Resistivity (n Ω .m)
			0-100	0-315	0-538	100°C	500°C		
304/L/H	8000	193	17.2	17.8	18.4	16.2	21.5	500	720

2. 1. 2 Material Baja Karbon JIS SS400

Baja karbon JIS 3101 SS400 merupakan baja struktural yang cukup luas penggunaannya, misalnya untuk struktur baja, jembatan, kapal, tiang pancang, komponen alat berat, dan sebagainya. Baja JIS G3101 SS400 atau identik dengan ASTM A36 termasuk kedalam *Mild (Low Carbon) Steels*. *Low carbon steels* biasanya memiliki kandungan karbon hingga 0,25% C dengan 0,4 sampai 0,7% Mn, 0,1 sampai 0,5% Si, dan sedikit sulfur, pospor, dan unsur lain yang tersisa. Baja ini tidak dikuatkan dengan unsur paduan selain karbon. Baja jenis ini mengandung sedikit mangan untuk stabilisasi sulfur dan silikon untuk deoksidasi. *Mild Steels* paling sering digunakan pada *as-rolles, forged*, atau *annealed* dan jarang ditemper atau dicelup (*quench*).

Kategori *mild steels* yang paling luas dipakai adalah *low carbon* (C <0.08% dengan Mn \leq 0.4%) yang digunakan untuk *forming* dan *packaging*. *Mild steels* dengan

kandungan karbon dan mangan yang lebih tinggi juga digunakan untuk produk struktural seperti pelat, lembaran, batangan, dan *structural sections*.

Sebelum penggunaan HSLA (*High Strength Low Alloy Steels*), *mild steel* jenis ini biasa digunakan untuk bagian struktural otomotif, jembatan, dan gedung. Baja jenis ini memiliki *weldability* dan *yield strength* yang cukup baik.

Komposisi kimia baja karbon JIS 3101 SS400 mengacu pada standar Jepang JIS G 3101 (JISF), 2004 adalah sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.4.

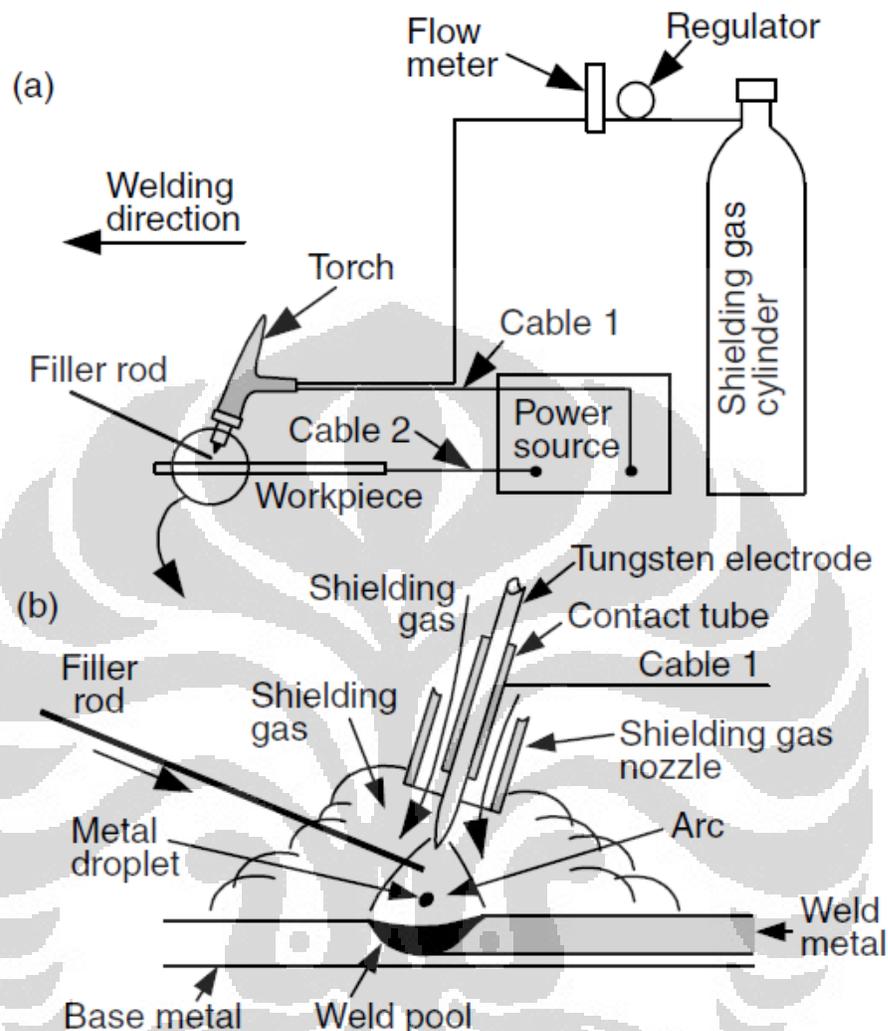
Tabel 2.4. Komposisi kimia baja karbon SS400^[9].

Classification		Chemical Composition				
		C (max)	Si (max)	Mn	P (max)	S (max)
JIS G3101	SS400	-	-	-	0,05	0,05
	SS490	-	-	-	0,05	0,05
	SS540	0,3	-	1,6 max	0,04	0,04
JIS G3101	SM400A	0,23	0,35	2,5 xC min	0,035	0,035
	SM400B	0,2	0,55	0,6-1,4	0,035	0,035
	SM490A	0,2	0,55	1,6 max	0,035	0,035
	SM490B	0,16	-	-	0,035	0,035
ASTM	A36	0,26	0,4	0,6-0,9	0,04	0,05

2.2 Pengelasan Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)

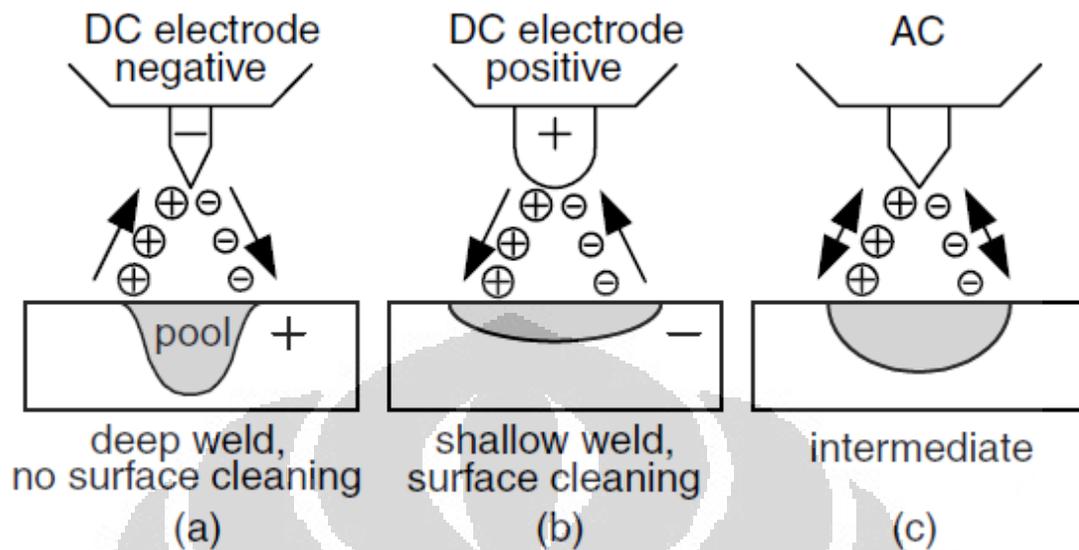
Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) atau sering juga disebut *Tungsten Inert Gas* (TIG) merupakan salah satu dari bentuk las busur listrik (*Arc Welding*) yang menggunakan *inert gas* sebagai pelindung dengan tungsten atau wolfram sebagai elektroda. Skema dari GTAW dapat dilihat dalam Gambar 2.1. Pengelasan ini dikerjakan secara manual maupun otomatis.

Elektroda pada GTAW termasuk elektroda tidak terumpan (*non consumable*) berfungsi sebagai tempat tumpuan terjadinya busur listrik. GTAW mampu menghasilkan lasan berkualitas tinggi pada hampir semua jenis logam mampu las.



Gambar 2.1. Skema *Gas tungsten arc welding*: (a) Proses keseluruhan; (b) perbesaran area lasan^[17]

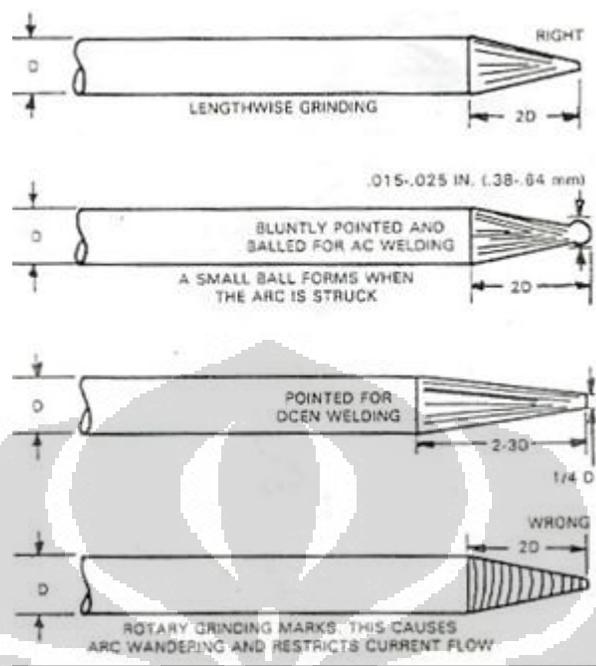
Sumber listrik GTAW dapat menggunakan generator AC maupun DC. Ciri khas generator jenis AC yaitu merupakan kombinasi antara *cleaning* dengan penetrasi medium dan mencegah elektroda tungsten *overheating*. Penggunaan arus DC dibedakan menjadi dua yaitu elektroda negatif (*Direct Current Electrode Negative*) dan elektroda positif (*Direct Current Electrode Positive*). Gambar 2.2 berikut menunjukkan perbedaan penggunaan jenis arah aliran listrik yang digunakan dalam pengelasan.



Gambar 2.2. Tiga jenis arus listrik pada GTAW^[17]

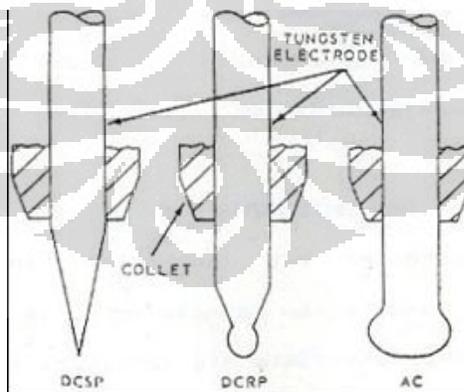
DCEN, dua pertiga konsentrasi panas pada benda kerja, sedangkan untuk DCEP, dua pertiga konsentrasi panas pada elektroda tungsten. Untuk AC, konsentrasi panas masing-masing setengah pada elektroda dan benda kerja. Konsentrasi panas ditimbulkan adanya benturan elektron pada benda kerja dan elektroda tungsten. DCEN menghasilkan penetrasi yang lebih dalam dibandingkan dengan AC tetapi tidak mengalami *oxide cleaning*. DCEP mengalami *oxide cleaning*, tetapi penetrasi yang dihasilkan lebih dangkal daripada AC.

Selain faktor konduktivitas listrik, kestabilan busur listrik masih dipengaruhi oleh besar sudut tip elektroda, dan cara pengasahan. Kesalahan mengasah tipe elektroda akan menyebabkan busur listrik stabil dan melebar sedangkan kesalahan pemilihan besar sudut tip elektroda menyebabkan busur listrik tidak stabil atau ujung tip elektroda meleleh karena *overheating*. Pengasahan sudut tip elektroda yang terbaik adalah arah pengasahan sejajar dengan panjang elektroda, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.3 berikut.



Gambar 2.3. Pengasahan sudut tip elektroda yang benar dan salah

Untuk pemakaian jenis arus listrik AC, bentuk ujung elektroda tungsten mendekati bulat. Hal ini berhubungan erat dengan konsentrasi panas yang timbul pada elektroda tungsten. Untuk pemakaian sumber tenaga DCSP bentuk ujung elektroda lancip. Gambar 2.4 memperlihatkan bentuk ujung elektroda untuk berbagai sumber tenaga pengelasan yang dipakai.



Gambar 2.4. Bentuk ujung tip elektroda untuk berbagai sumber tenaga

2.3 Logam Pengisi (*Filler Metal*)

Pengelasan dissimilar atau *dissimilar metal welding* (DMW) merupakan penyambungan antara dua material baja paduan yang berbeda dengan proses pengelasan. Untuk Pengelasan SUS304 guna mengatasi *weld decay* dapat digunakan logam pengisi E308 dilusi logam las dengan formasi martensite bisa menyebabkan retak karena logam pengisi tidak dapat mentoleransi dilusi dari kedua logam induk tersebut. Dalam masalah ini, sifat logam pengisi yang dapat digunakan adalah jenis E309. Dilusi logam las dapat diestimasi dengan menggunakan *schaeffler diagram*. Pada dilusi logam las E309 akan terdapat sekitar 4% ferit dan tanpa martensit dalam matriks austenitik yang dapat menahan retak panas^[16]. Untuk melakukan estimasi perlu untuk menghitung nilai Cr ekuivalen dan Ni Ekuivalen. Oleh karena itu diperlukan data komposisi kimia dari E 308 maupun E 309. Berikut ini merupakan logam pengisi produk Kobelco, yaitu untuk las SMAW dengan kode NC dan untuk las TIG dengan kode TG-S sebagaimana di tunjukan dalam Tabel 2.5.

Tabel 2.5. Komposisi kimia logam pengisi NC 38 (E380), NC 39 (E309), AWS A5.4, TG-S308 dan TG-S309 (ER309) AWS A5.9^[15].

Brand Name	ASME AWS	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
NC 38	A5.4	0.07	0.35	1.69	0.023	0.002	9.58	20.49	-	-
NC 39	A5.4	0.08	0.53	1.5	0.02	0.003	9.58	20.49	-	-
TG-S308	A5.9	0.05	0.46	1.89	0.024	0.001	9.69	20.00	0.05	0.07
TG-S309	A5.9	0.05	0.45	1.85	0.025	0.001	13.58	23.37	0.03	0.07

Dilusi pada hasil las dapat dihitung berdasarkan pengamatan dan pengukuran struktur mikro hasil las. Dengan menggunakan rumus:

$$X = \frac{F-W}{F-P} \times 100\% \dots\dots\dots (2. 1)$$

Dimana: X = Persentase dilusi (%)

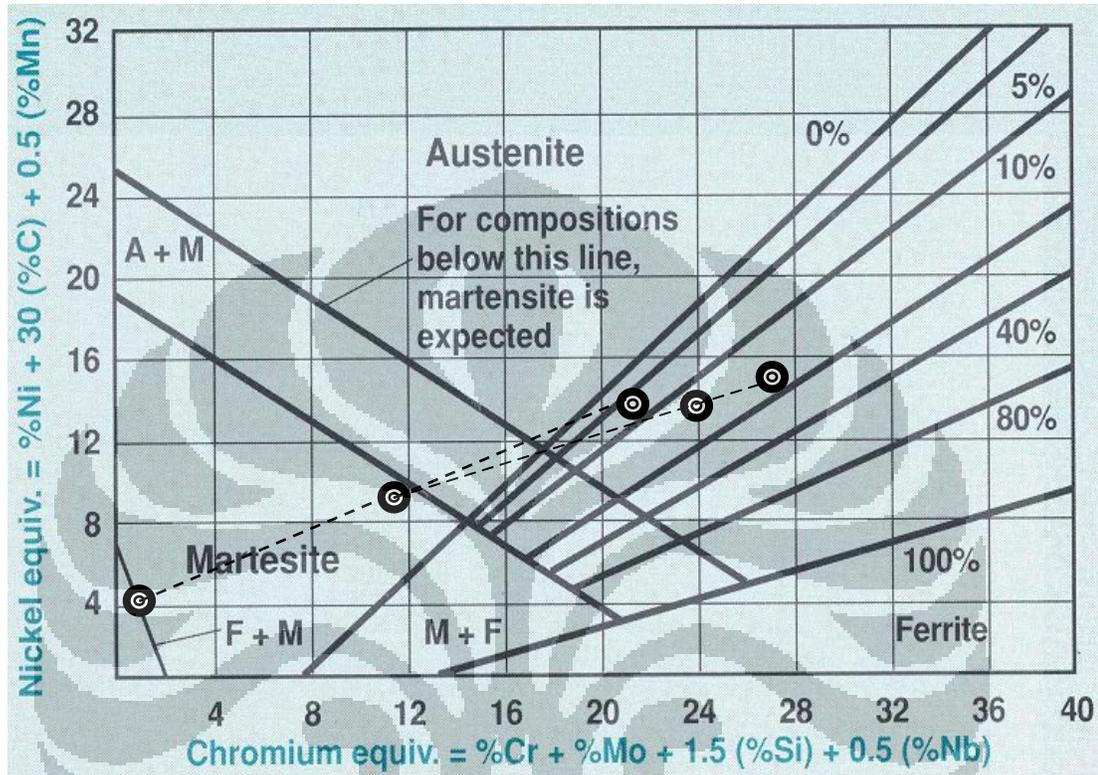
F = Peresentase Ni dalam logam pengisi (*filler metal*)

W = Peresentase Ni dalam logam las

P = Peresentase Ni dalam logam induk

Hasil perhitungan Ni ekuivalen dan Cr ekuivalen serta peresentase dilusi diplotkan ke dalam diagram schaeffler. Dilusi untuk sambungan las buntu dengan

menggunakan proses las GTAW adalah 20 - 40%^[6]. Dengan memilih nilai dilusi 25% maka bentuk diagram schaeffler sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Dilusi TG-S309 dengan menggunakan diagram Schaeffler.

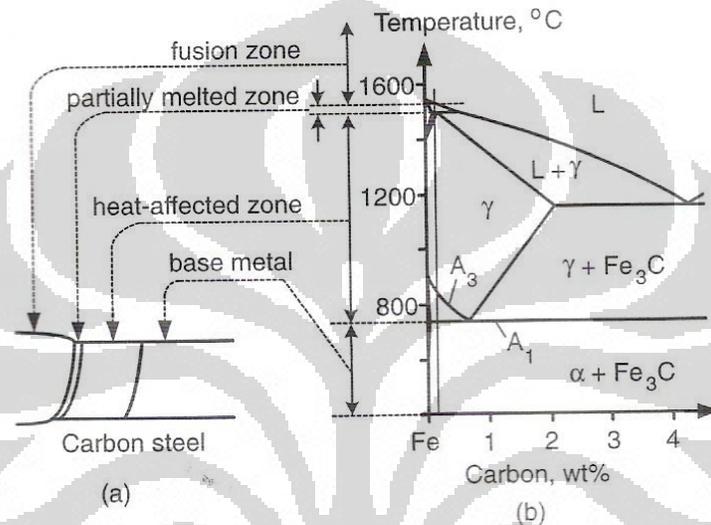
Berdasarkan hasil yang diperoleh, dilusi las akan berisi sekitar 4% ferit dan tanpa martensit dalam matriks austenit yang mampu menahan retak panas.

2.4 Metalurgi Las

2.4.1 Diagram Fasa Baja Karbon

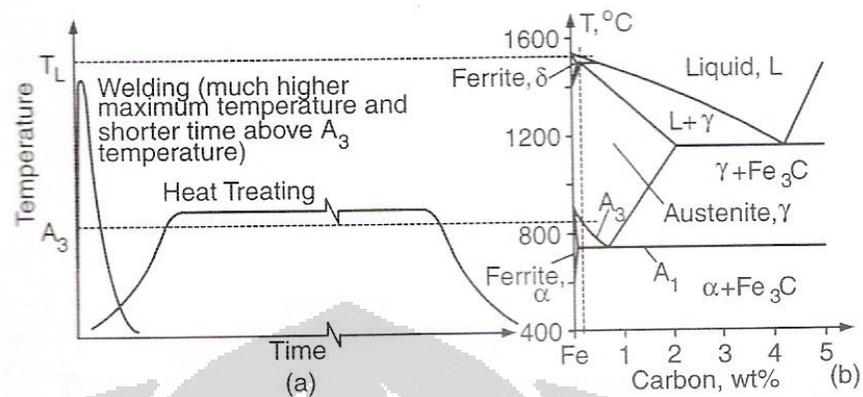
HAZ pada baja karbon sangat berhubungan dengan diagram fasa Fe-C. Diagram fasa Fe-C dan diagram *continuous-cooling transformation* untuk perlakuan panas baja karbon bisa berguna juga untuk pengelasan, tapi ada beberapa perbedaan mendasar antara pengelasan dan perlakuan panas yang harus diperhatikan. Proses termal selama pengelasan dan perlakuan panas sangat berbeda satu sama lain. Yang pertama, pada pengelasan temperatur puncak pada HAZ bisa mendekati 1500°C. Pada

perlakuan panas, temperatur maksimum hanya mendekati 900°C , yang tidak terlalu jauh di atas temperatur kritis A_3 hingga austenit terbentuk. Yang kedua, laju pemanasan tinggi dan waktu tahan di atas A_3 singkat selama proses pengelasan. Pada perlakuan panas, laju pemanasan lebih lambat dan waktu tahan di atas A_3 lebih lama. Temperatur A_1 dan A_3 selama perlakuan panas lebih sering diartikan sebagai temperatur Ac_1 dan Ac_3 .



Gambar 2.6 HAZ pada baja karbon dan diagram fasa^[17]

Gabungan laju pemanasan yang tinggi dan waktu tahan yang singkat di atas A_3 pada pengelasan bisa menghasilkan pembentukan austenit yang tidak seragam selama pemanasan. Ini terjadi karena tidak cukup waktu bagi atom karbon di austenit untuk berdifusi dari koloni perlit dengan kandungan karbon tinggi ke koloni ferit dengan kandungan karbon rendah. Selama pendinginan cepat, yang lebih dahulu berubah menjadi koloni martensit karbon tinggi, sedangkan yang lebih terakhir berubah menjadi koloni ferit karbon rendah. Akibatnya kekerasan mikro pada HAZ bisa sangat beragam pada lasan dengan laju pemanasan yang tinggi.

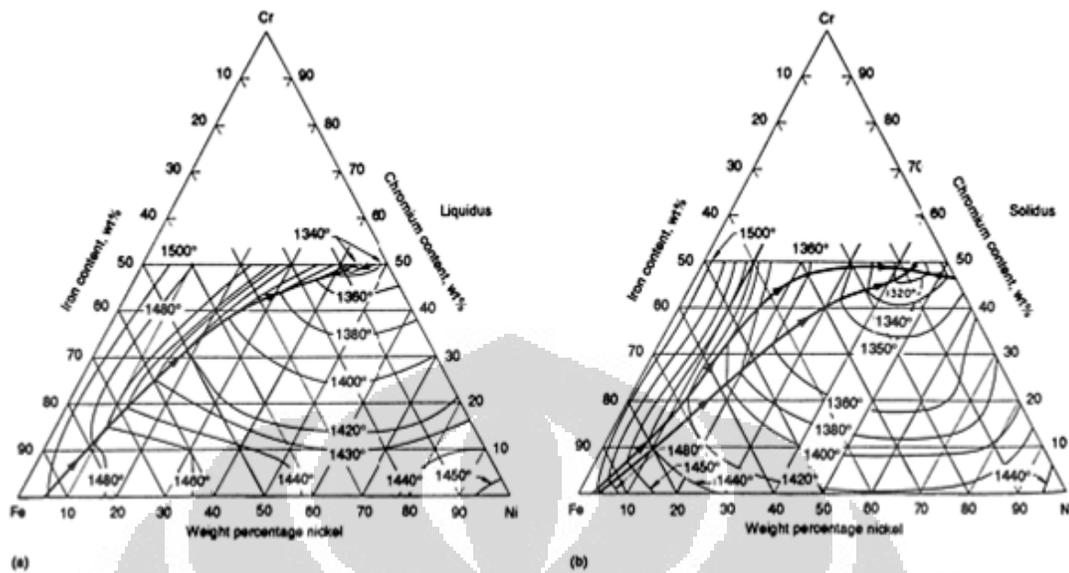


Gambar 2.7 Perbandingan Pengelasan dan *Heat Treating*^[17]

Sebagai hasil temperatur puncak selama pengelasan, pertumbuhan butir bisa terjadi di sekitar batas fusi. Semakin lambat laju pemanasan, semakin lama waktu tahan di atas A_3 semakin hebat pertumbuhan butir. Sedangkan pada perlakuan panas, temperatur maksimum yang dikerjakan hanya sekitar 900°C untuk mencegah pertumbuhan butir.^[17]

2.4.2 DIAGRAM FASA SISTEM Fe-Cr-Ni

Diagram fasa digunakan untuk menjelaskan transformasi fasa dan kestabilan fasa dalam baja tahan karat. Seperti yang telah kita ketahui, bahwa baja tahan karat austenitik mempunyai unsur paduan utama krom dan nikel. Penambahan nikel kepada sistem Fe-Cr akan meningkatkan daerah fasa austenit dan dapat menstabilkan austenit pada temperatur kamar^[17]. Untuk itu perlu kiranya di sini diuraikan mengenai diagram fasa terner besi-krom-nikel seperti pada Gambar 2.8.

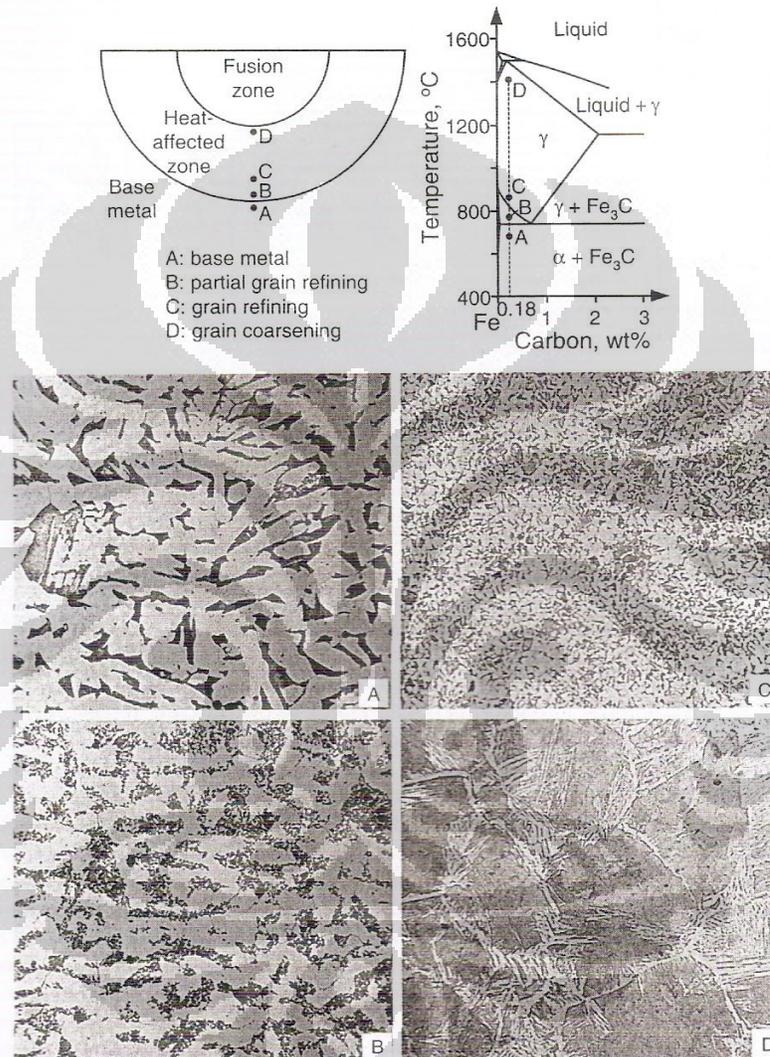


Gambar 2.8. Skema Isotermal Diagram Ternar pada Fe-Ni-Cr (a) Liquidus dan (b) Solidus^[17]

Transformasi delta ferit menjadi karbida dan fasa sigma sangat bergantung pada awal segregasi kromium, molibdenum dan nikel dalam kondisi hasil las. Jika baja tahan karat austenitik tipe 316L dipanaskan pada temperatur 700°C untuk waktu lama maka bila komposisinya berada pada daerah delta ferit, austenit dan fasa sigma, transformasi berjalan sangat lambat dan kebanyakan delta ferit terurai menjadi austenit dan karbida dan sisanya tetap stabil sebagai delta ferit. Sedangkan bila komposisinya berada pada daerah delta ferit dan fasa sigma, transformasi berjalan cepat dan kebanyakan delta ferit terurai menjadi austenit dan fasa sigma. Pada pemanasan yang lebih lama lagi, karbon akan terlarut dalam austenit, batas butir austenit bergerak masuk ke dalam ferit serta dengan adanya Mo yang terdifusi ke batas butir karbida akan mempercepat transformasi $M_{23}C_6$ menjadi M_3C . Maka pengaturan Cr, Mo dan C akan menyebabkan transformasi berjalan lambat pada temperatur kerja.

2.4.3 Struktur Mikro

Baja dengan kandungan karbon di bawah 0.3% termasuk ke dalam jenis baja karbon rendah. Gambar di bawah ini adalah Gambar mikro dari pengelasan baja karbon rendah.



Gambar 2.9 Struktur mikro pengelasan baja karbon rendah^[7]

Logam dasar terdiri dari ferit yang terang dan pearlite yang gelap. Struktur mikro HAZ bisa dibagi menjadi tiga bagian: *partial grain refining*, *grain-refining*, dan daerah *grain-coarsening*. Temperatur puncak pada posisi ini ditandai pada diagram fasa.^[17]

2.5 Tegangan Sisa dan Distorsi

Tegangan sisa pada pengelasan adalah tegangan internal yang terjadi akibat perubahan temperatur (tegangan termal) yang tidak seragam yang terbentuk setelah pengelasan pada saat pendinginan ke temperatur ruang. Salah satu akibat tegangan sisa pada pengelasan adalah distorsi.

2.5.1 Termal Las

Pada proses pengelasan perubahan temperatur pada daerah busur las berlangsung dengan sangat cepat sehingga mengakibatkan perbedaan temperatur di daerah sekitar busur. Selanjutnya panas mengalir ke daerah sekitar las yang memiliki temperatur lebih rendah sehingga terjadi distribusi panas di daerah sekitar alur las. Distribusi panas tersebut tidak merata pada seluruh material logam demikian pula pendinginannya. Ketidak merataan distribusi temperatur tersebut menyebabkan terjadinya deformasi pada struktur las.

2.5.2 Tegangan Sisa

Tegangan sisa adalah tegangan yang terjadi dalam suatu benda setelah gaya luar diabaikan. Istilah teknis yang digunakan untuk tegangan sisa ada berbagai macam seperti *internal stress*, *initial stress*, *inherent stress*, tegangan reaksi, dan *lock-in stress*. Tegangan sisa juga terjadi ketika benda diberi perubahan temperatur yang tidak merata atau biasa disebut sebagai *thermal stress*. Satuan tegangan biasanya dinyatakan dalam beban per unit area, seperti newton per meter persegi (N/m^2) atau pascal (Pa), kilogram permili meter persegi (Kg/mm^2), atau pounds per inchi persegi (psi).

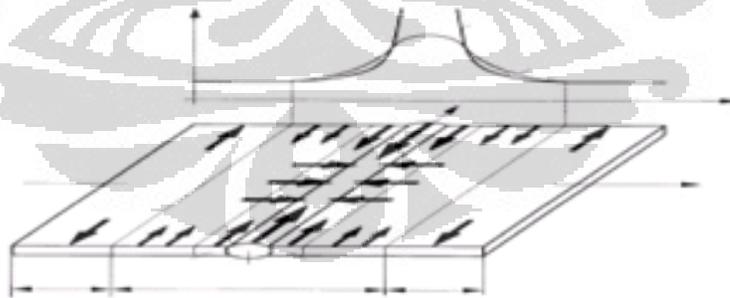
Tegangan sisa yang dihasilkan dari pengelasan termasuk ke dalam tegangan sisa yang dihasilkan oleh perlakuan panas dengan berbagai tahap. Tegangan sisa yang disebabkan ekspansi termal dan kompresi digolongkan sebagai tegangan dalam termal (*thermal internal stress*).^[10]

Tegangan sisa terjadi beragam mulai dari struktur logam yang luas hingga atomik. Tegangan sisa merupakan tegangan internal yang tersisa selama proses

pengelasan yang terjadi akibat siklus pemanasan dan pendinginan pengelasan. Tegangan sisa terjadi pada daerah pengelasan akibat deformasi plastis lokal. Proses proses yang menyebabkan tegangan sisa antara lain adalah pengerolan, pengecoran, perubahan bentuk logam, dan pengelasan.^[11]

Tegangan sisa yang dihasilkan pengelasan adalah akibat dari distribusi temperatur yang tidak seragam di sekitar sambungan las yang timbul pada berbagai proses pengelasan yang berbeda. Ada berbagai macam aspek dan parameter yang berkontribusi pada jumlah dan distribusi tegangan sisa pengelasan. Tegangan sisa bisa disebabkan oleh proses penyusutan, proses pendinginan cepat, dan transformasi fasa.

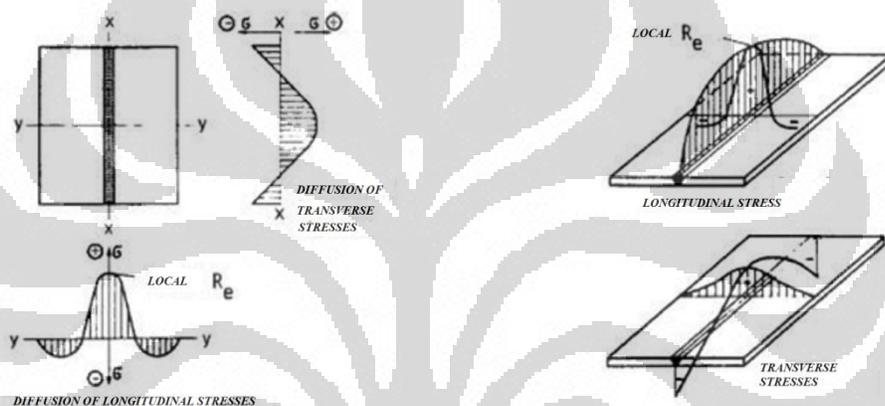
Tegangan sisa yang dipengaruhi oleh proses penyusutan terjadi karena proses penyusutan yang terhambat, terjadi ketika daerah yang dipanaskan dan didinginkan bersebelahan. Prinsip dasarnya adalah volume yang dipanaskan menyusut selama proses pendinginan berdasarkan pada koefisien ekspansi termal material yang dilas dan perbedaan temperature yang ada. Diasumsikan bahwa volume yang melebur tidak memberikan gaya kepada volume sekitar. Akibatnya, sambungan las dan volume sekitar yang tidak meleleh selama proses pengelasan memiliki suhu yang berbeda dan tegangan sisa pun terjadi. Hal ini bisa diilustrasikan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10. Penyusutan dan penyusutan yang terhambat sebagai akibat dari distribusi temperatur yang tidak merata^[12]

Jika penyusutan tidak dicegah, tegangan termal menurun sampai selesai dan tidak ada tegangan sisa yang tersisa setelah pendinginan ke temperature ruang. Pada

kasus sambungan las, mulai dari keadaan bebas tegangan mulai dari logam las, tegangan termal tarik yang terbentuk selama proses pendinginan, yang mencapai *temperature-dependent yield strength* material. Akibatnya, pada akhir proses pendinginan, tegangan sisa tarik muncul pada sambungan las. Jika besar penyusutan yang ditahan cukup besar, tegangan sisa bisa saja mencapai kekuatan luluh dari material sambungan las. Volume material yang berada pada jarak tertentu dari logam las dan tidak melebur selama proses pengelasan mengalami regangan termal yang tertahan selama periode pemanasan.



Gambar 2.11 Menunjukkan tegangan sisa yang terjadi pada pengelasan tumpul (*butt welding*), yang dilas dari ujung keujung^[10]

2.5.3 Pengaruh Tegangan Sisa Terhadap Sifat Mekanis

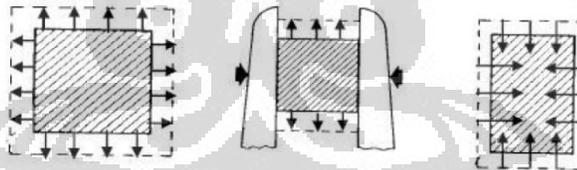
Tegangan sisa dalam logam las menyebabkan dua efek utama. Pertama, tegangan sisa akan menyebabkan distorsi, dan kedua, tegangan sisa akan menyebabkan kerusakan dini pada logam las. Terhadap kekuatan statik, tegangan sisa dapat dikatakan tidak mempengaruhi kekuatan statik logam selama logam induk dan logam las memiliki keuletan yang cukup baik. Selain itu, tegangan sisa juga bisa menyebabkan HIC (*Hydrogen Induced Cracking*), *brittle fracture* jika dikombinasikan dengan tegangan tarik, kegagalan *fatigue*, dan *Stress Corrosion Cracking*.^[13]

2.5.4 Distorsi Pada Pengelasan

Distorsi merupakan perubahan bentuk akibat adanya tegangan dalam logam las yaitu tegangan memanjang dan tegangan melintang. Dalam hal ini distorsi ini disebabkan oleh ekspansi (pengembangan) yang tidak merata dari logam las selama periode pemanasan dan pendinginan. Bila logam cair ini dibiarkan membeku secara bebas maka volume dari logam cair tersebut akan mengalami penyusutan secara bebas.^[13]

Bila sebuah logam dipanaskan secara merata maka akan terjadi ekspansi atau pengembangan ke segala arah dan setelah terjadi pendinginan maka akan terjadi kontraksi secara merata sampai dimensi semula. Bila suatu batang mendapat tahanan selama dipanaskan maka ekspansi ke arah lateral tidak akan terjadi namun volume ekspansi harus terjadi sehingga batang akan mengalami ekspansi ke arah vertikal. Bila batang tersebut kembali ke temperatur kamar maka kontraksi tetap terjadi ke segala arah secara merata sehingga batang sekarang menjadi berubah bentuk dari bentuk semula.^[14]

Ilustrasi mekanisme penyusutan dapat terlihat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12.

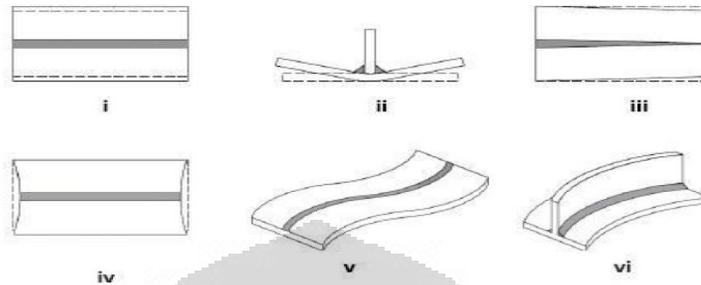


Gambar 2.12. Mekanisme penyusutan^[14]

Masubuchi membagi tipe distorsi menjadi enam kategori:^[10]

- a. Penyusutan transversal
- b. Distorsi angular
- c. Distorsi rotasi
- d. Penyusutan longitudinal
- e. Distorsi *buckling*
- f. Distorsi tegangan tekuk longitudinal

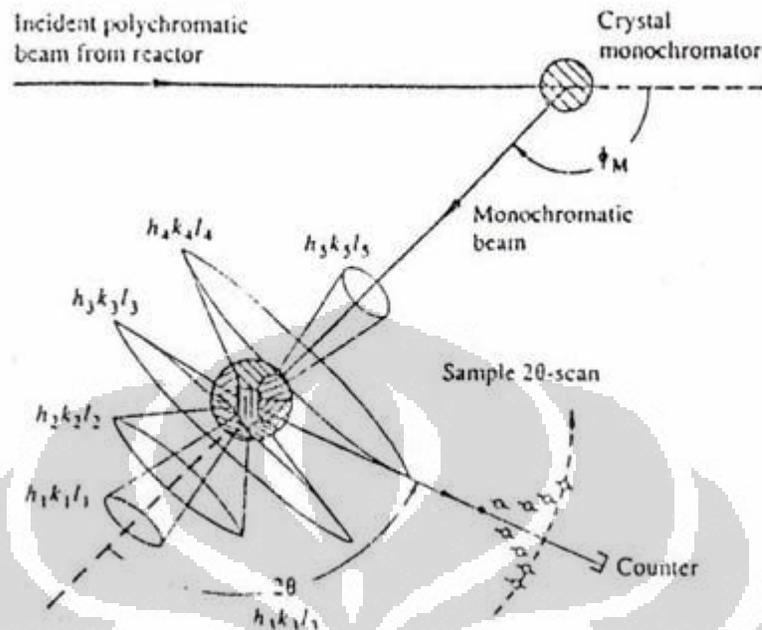
Adapun ilustrasi dari jenis-jenis distorsi yang disebutkan diatas dapat dilihat pada Gambar 2.13.



. Gambar 2.13. Jenis-jenis distorsi^[10]

2.6 Pengukuran Tegangan Sisa Dengan Difraksi Neutron

Neutron cepat dari hasil reaksi fisi dalam reaktor nuklir dimoderasi untuk menghasilkan neutron dengan energi yang lebih rendah (kinetik) melalui tumbukan yang berulang dengan atom-atom moderator seperti grafit, air, atau air berat (*heavy water*). Neutron tersebut berada dalam keseimbangan termis dengan moderator dan akan mengikuti hukum distribusi Maxwell-Boltzman. Neutron ini dinamakan neutron termal. Apabila suhu moderator 40°C, maka panjang gelombangnya $\lambda = 1,1 \text{ \AA}$. Panjang gelombang ini cocok untuk penelitian struktur maupun dinamika kristal karena jarak antar atom dalam satu kristal sekitar 1 \AA . Selanjutnya neutron dilewatkan kolimator serta kristal monokromator untuk menghasilkan berkas neutron monokromatis yang paralel, dengan panjang gelombang tertentu. Berkas neutron monokromatis ini diarahkan ke material polikristalin dan didifraksi dengan sudut tertentu membentuk kerucut *Debye-Scherrer series* seperti tampak pada Gambar 2.14^[18]. Masing-masing kerucut difraksi berkaitan dengan jarak antar bidang atom (d), dan masing-masing kerucut difraksi ditangkap oleh detektor. Posisi puncak maksimum dari hasil pencacahan merupakan indeks Miller (hkl) bidang seperti yang diberikan oleh persamaan Bragg^[18].



Gambar 2.14. Kerucut hamburan Debye-Scherrer dari material polikristalin yang dikenai berkas neutron monokromatis^[18].

Pengukuran tegangan sisa di dalam bahan menggunakan difraksi neutron tidak dapat dilakukan secara langsung, melainkan ditentukan melalui regangannya. Dengan menggunakan persamaan atau hubungan antara tegangan-regangan elastis dan menyertakan modulus Young bahan tersebut. Besar regangan internal diperoleh dengan melakukan pengukuran untuk menentukan jarak antar bidang kisi cuplikan standar d_0 yang diperoleh dari sudut hamburan difraksi θ_0 dengan asumsi bebas tegangan, kemudian pengukuran pergeseran puncak Bragg $\Delta\theta$ yang timbul karena ada perubahan Δd akibat adanya tegangan sisa. Selanjutnya harga regangan dapat ditentukan menggunakan persamaan yang diperoleh dari diferensial persamaan Bragg berikut:

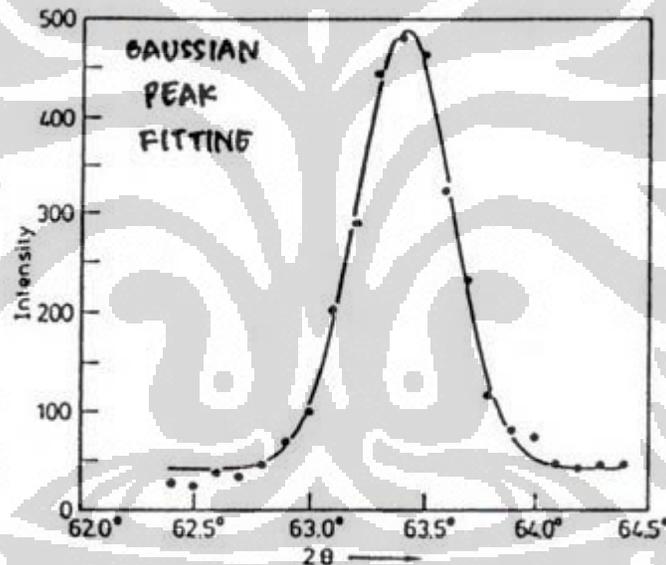
$$\lambda = 2 d_{hkl} \cdot \sin \theta_{hkl} \quad (2.2)$$

dimana λ adalah panjang gelombang neutron monokromatis, sehingga persamaan regangan ϵ menjadi:

$$\epsilon = \frac{\Delta d}{d_0} = -\cot \theta_0 \Delta \theta \quad (2.3)$$

$$\epsilon = \frac{(d-d_0)}{d_0} = -\cot \theta_0 (\theta - \theta_0) \quad (2.4)$$

dimana d_0 dan d adalah jarak antar bidang kisi dari cuplikan awal yang bebas tegangan dan cuplikan yang mengandung tegangan, sedangkan θ_0 dan θ adalah sudut difraksi pada cuplikan awal bebas tegangan dan cuplikan yang diukur tegangannya. Penentuan posisi puncak dari pola difraksi didekati dengan fungsi matematis distribusi Gaussian (Gauss-Cauchy)^[19] seperti pada Gambar 2.15



Gambar 2.15. Metode penentuan 2θ puncak dengan fungsi Gauss-Cauchy^[19]

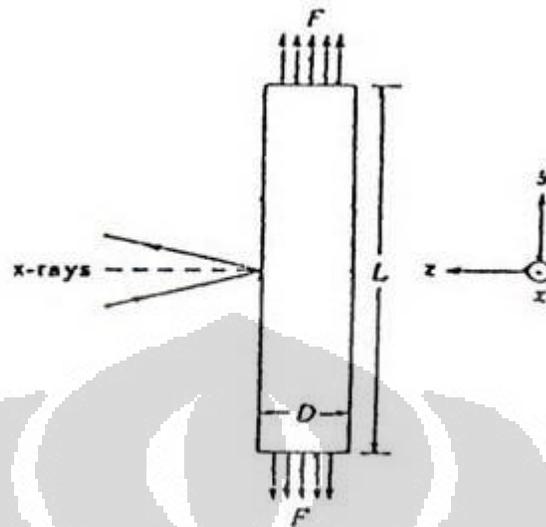
2.7 Hubungan Antara Tegangan-Regangan Elastis

Pada tegangan satu sumbu (uniaksial) seperti terlihat pada Gambar 2.16, tegangan terjadi hanya pada satu sumbu (sumbu y) dengan σ_y menghasilkan regangan dalam arah y.

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (2.5)$$

Dimana L = panjang akhir batang

L_0 = panjang awal batang



Gambar 2.16. Difraksi pada tegangan satu sumbu (uniaksial)^[20]

Menurut hukum Hooke,

$$\sigma_y = E \varepsilon_y \quad (2.6)$$

regangan dalam arah x dan z adalah :

$$\varepsilon_x = \varepsilon_z = \frac{D - D_0}{D_0} \quad (2.7)$$

dimana, D = diameter akhir batang

D_0 = diameter awal batang

Bila material isotropis, maka,

$$\varepsilon_x = \varepsilon_z = -\nu \cdot \varepsilon_y = (-\nu \cdot \sigma_y) / E \quad (2.8)$$

dimana, ν = perbandingan Poisson dari material.

Pada difraksi neutron, yang dapat diukur adalah jarak antar bidang atom yang arahnya tegak lurus permukaan. Dengan demikian yang dapat terukur adalah ϵ_x dan ϵ_z , yaitu:

$$\epsilon_x = \epsilon_z = \frac{d-d_0}{d_0} \quad (2.9)$$

dimana, d = jarak antar bidang atom yang ada tegangan.

d_0 = jarak antar bidang atom yang bebas tegangan.

Substitusi persamaan (2.8) ke dalam persamaan (2.9) diperoleh :

$$\sigma_y = -\frac{E}{\nu} \left[\frac{d-d_0}{d_0} \right] \quad (2.10)$$

dimana harga d dan d_0 dapat dicari dengan hukum Bragg.

Pada tegangan tiga sumbu X, Y, dan Z, regangan utamanya adalah ϵ_x , ϵ_y , ϵ_z dan tegangan utamanya adalah σ_x , σ_y , dan σ_z . Sesuai dengan hukum Hooke^[21] maka tegangan sisa dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

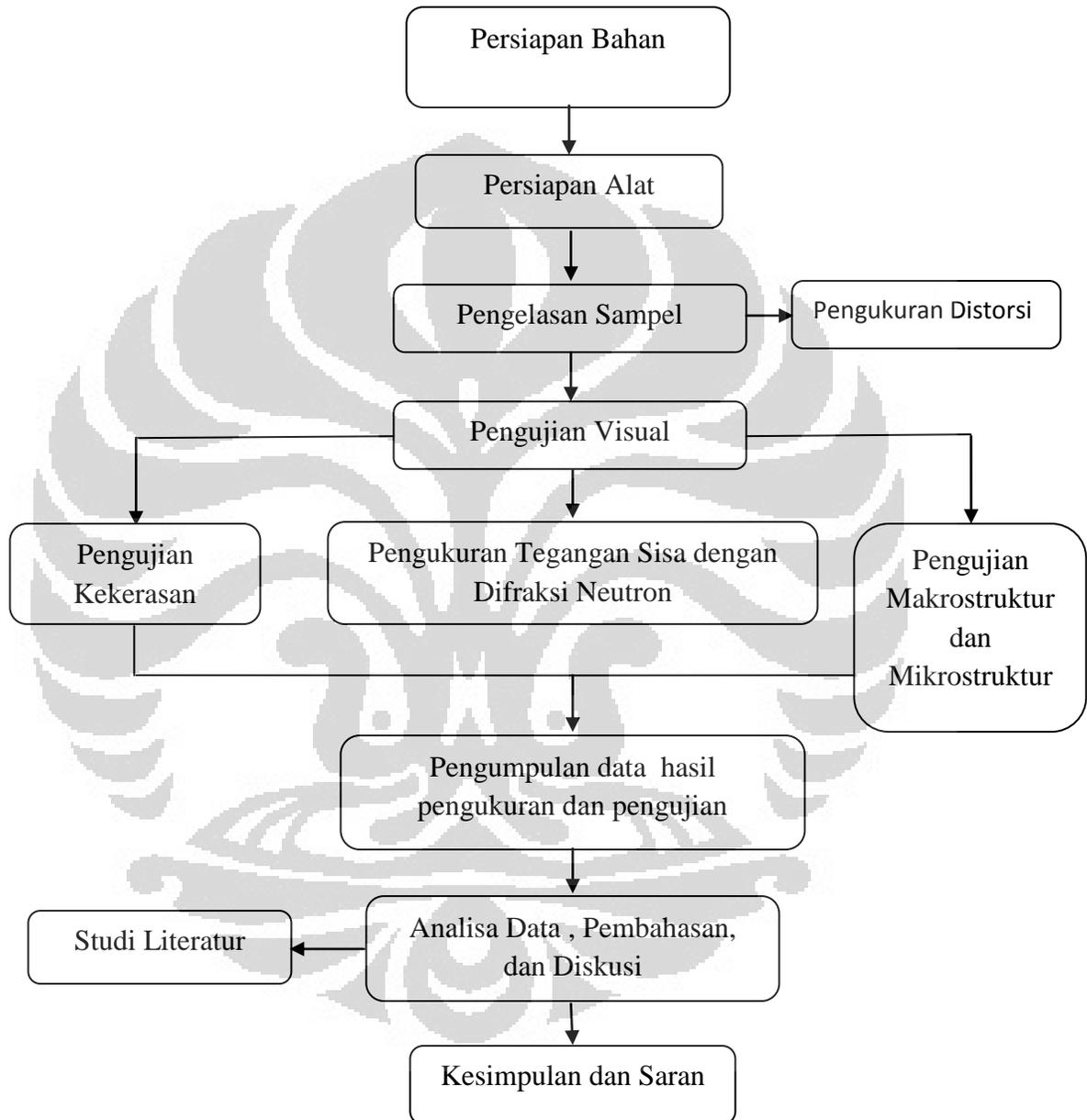
$$\sigma_x = \frac{E}{(1+\nu(1-2\nu))} \{(1-\nu)\epsilon_x + \nu(\epsilon_y + \epsilon_z)\} \quad (2.11)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1+\nu(1-2\nu))} \{(1-\nu)\epsilon_y + \nu(\epsilon_x + \epsilon_z)\} \quad (2.12)$$

$$\sigma_z = \frac{E}{(1+\nu(1-2\nu))} \{(1-\nu)\epsilon_z + \nu(\epsilon_x + \epsilon_y)\} \quad (2.13)$$

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Bahan

1. Logam induk baja tahan karat austenit SUS304 dan logam induk baja karbon JIS 3101 SS400 dengan dimensi 150 mm x 100 mm dan ketebalan 8, 10, dan 12 mm.
2. Logam pengisi TG – S 309 (ER 309)
3. Gas argon
4. *Cleanser* dapat diganti dengan alkohol
5. Majun
6. Spidol permanen

3.2.2 Peralatan

1. Mesin las TIG beserta kelengkapannya
2. Sistem mekanik mesin las
3. Alat ukur
4. *Spark spectrometry*
5. *Hardness tester*
6. Mikroskop optik logam
7. Alat poles beserta perangkat dan larutanya
8. Peralatan keselamatan kerja (topeng las, sarung tangan, dsb)
9. *Wire cutting*
10. Tanggem
11. Gerinda tangan
12. Dudukan plat
13. Penjepit
14. Tang las
15. Difraksi neutron beserta perangkatnya

3.3 Prosedur Pengelasan

3.3.1 Persiapan Sampel

Material yang digunakan sebagai logam induk pada penelitian ini adalah baja tahan karat austenitik SUS304 dan baja karbon JIS 3101 SS400 dengan dimensi 150mm x 100mm. Kemudian pada salah satu sisi pelat dibuat alur dengan kemiringan 30° sesuai dengan AWS A5.1-81. Sehingga setelah digabungkan terbentuk alur model *v-groove* dengan sudut alur 60°

3.3.2 Proses Pengelasan

1. Material logam induk yang digunakan adalah pelat baja tahan karat austenitik SUS304 dan pelat baja JIS 3101 SS400 dengan ketebalan: 8, 10, dan 12 mm.
2. Proses GTAW: logam pengisi yang digunakan adalah ASME AWS A5.4 E309, diameter 1,2 mm. Jenis elektroda ini memiliki Ni ekuivalen dan Cr ekuivalen yang sesuai untuk pengelasan dissimilar antara baja tahan karat dan baja karbon dengan menghasilkan dilusi las yang berisi sekitar 4% ferrite dan tanpa martensite dalam matriks austenit yang mampu menahan retak.
3. Parameter pengelasan
 - Arus : 165 – 200 A
 - Voltase : 20 – 25 V
 - *Travel speed* : 0,5 – 1,5 mm/detik
4. Gas pelindung yang digunakan adalah gas argon, dengan kecepatan 25 Liter/menit dan komposisi 99%.

3.4 Pengukuran Distorsi

Pengukuran distorsi dilakukan dengan menggunakan *dial gauge* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2. Pada ujung pelat yang tidak dijepit diletakan dial gauge. Setiap perubahan yang terbaca pada dial gauge akan dicatat yang kemudian akan di konversi sebagai sudut dengan menggunakan aturan trigonometri sederhana. Pengukuran distorsi dilakukan setelah proses pengelasan selesai dengan ilustrasi seperti pada Gambar 3.3.



Gambar 3.2. Dial Gauge untuk pengukuran distorsi



Gambar 3.3. Ilustrasi pengukuran distorsi angular

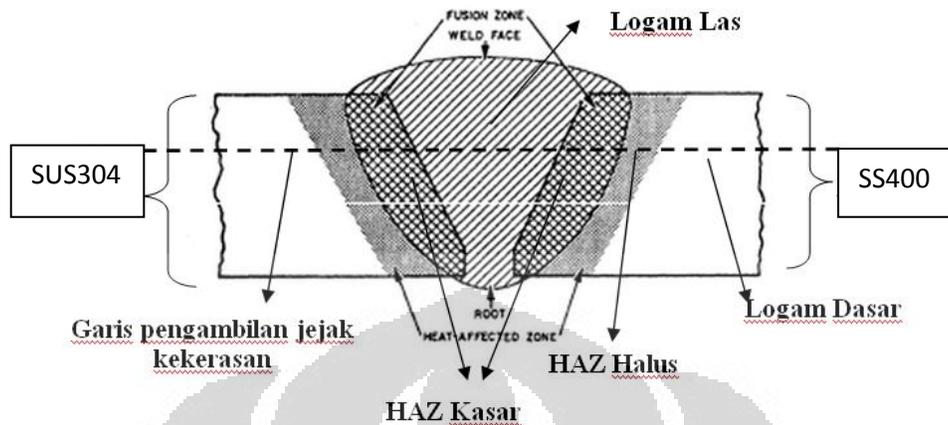
3.5 Uji Visual

Pemeriksaan visual dilakukan untuk mengetahui kualitas hasil lasan. Apakah terdapat cacat atau diskontinuitas dalam pengelasan. Cacat permukaan, *root pass*, serta cacat yang tampak pada mata.

3.6 Pengujian Pengujian

3.6.1 Pengamatan Struktur Makro dan Mikro

Pengamatan struktur makro dan mikro untuk melihat permukaan hasil lasan secara mikro, fasa dan permukaan fraktography. Pengambilan struktur mikro dilakukan pada daerah logam las, HAZ, dan logam induk.



Gambar 3.4. Lokasi pengambilan foto dan uji kekerasan.

3.6.2 Pengujian Kekerasan

Tujuan pengujian kekerasan adalah untuk mengetahui distribusi kekerasan pada daerah daerah yang terbentuk akibat pengelasan. Pengujian yang dilakukan adalah pengujian kekerasan makro menggunakan metode vickers dengan beban yang digunakan 20 kgf. Standar yang digunakan yaitu ASTM E 92. Hasil dari pengujian ini kemudian dihubungkan dengan tegangan sisa pada sampel uji.

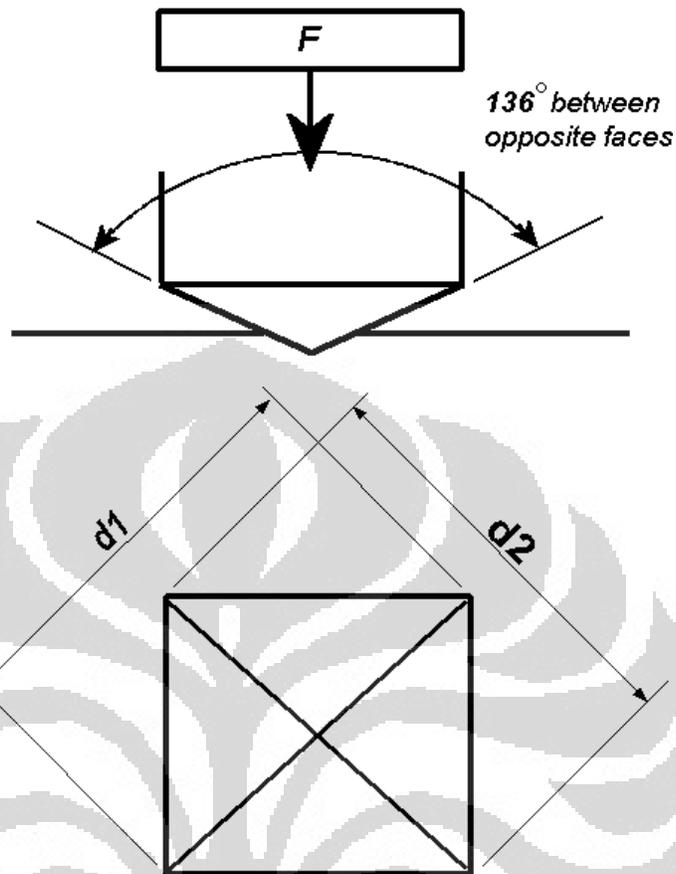
$$HV = \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \quad HV = 1.854 \frac{F}{d^2} \text{ approximately} \quad (3.1)$$

Dimana:

$k = 1,854 (2 \sin (136^\circ/2))$

$F = \text{beban (gram force)}$

$d = \text{diameter jejak (mm)}$



Gambar 3.5. Penampang indenter uji kekerasan vickers.

3.6.3 Pengukuran Tegangan Sisa

Penggunaan berkas neutron untuk menembus sebagian bahan metal sampai beberapa sentimeter menjadikanya unggul untuk digunakan sebagai pemeriksa interior suatu bahan teknik. Ketiadaan muatan listrik pada neutron menjadikannya tidak terpengaruh oleh medan listrik, sehingga neutron akan dengan mudah berinteraksi dengan inti atom.^[22]

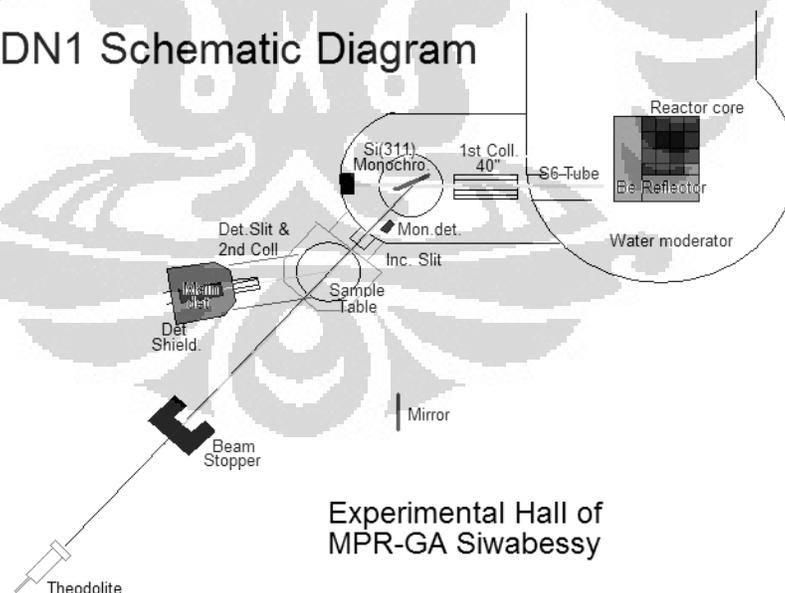
Dalam banyak kasus karakterisasi bahan, berkas neutron dan berkas sinar-X saling melengkapi satu dengan lainnya. Pada kebanyakan bahan, sinar-X akan mudah tembus pada bahan dengan massa atom rendah. Sedangkan neutron justru kebanyakan mudah menembus bahan dengan massa atom tinggi. Pada teknik hamburan (*diffraction*) sinar-X akan dihamburkan oleh permukaan bahan yang diuji, sedangkan pada berkas neutron, sinar ini akan dihamburkan oleh volume dari bahan tersebut.

Pengukuran regangan yang dilakukan dengan menggunakan sinar-X hanya bisa dilakukan pada permukaan bahan, bila dengan menggunakan berkas neutron pengukuran dilakukan pada kedalaman tertentu dari suatu bahan. Sedangkan untuk mengukur regangan yang terjadi sedikit dibawah permukaan suatu bahan akan sulit dilakukan dengan kedua teknik tersebut.

Berkas neutron dihasilkan oleh teras Reaktor Serbaguna GA Siwabessy (RSG-GAS) dikeluarkan melalui lubang berkas no 6. Untuk mendapatkan berkas neutron yang parallel, digunakan kolimator soller 40'. Selanjutnya berkas neutron diseleksi panjang gelombangnya dengan menggunakan monokromator jenis *ouble focussing*. Meja sampel tiga sumbu X, Y, dan Z digunakan untuk memposisikan sampel agar iradiasi tepat mengenai sasaran.

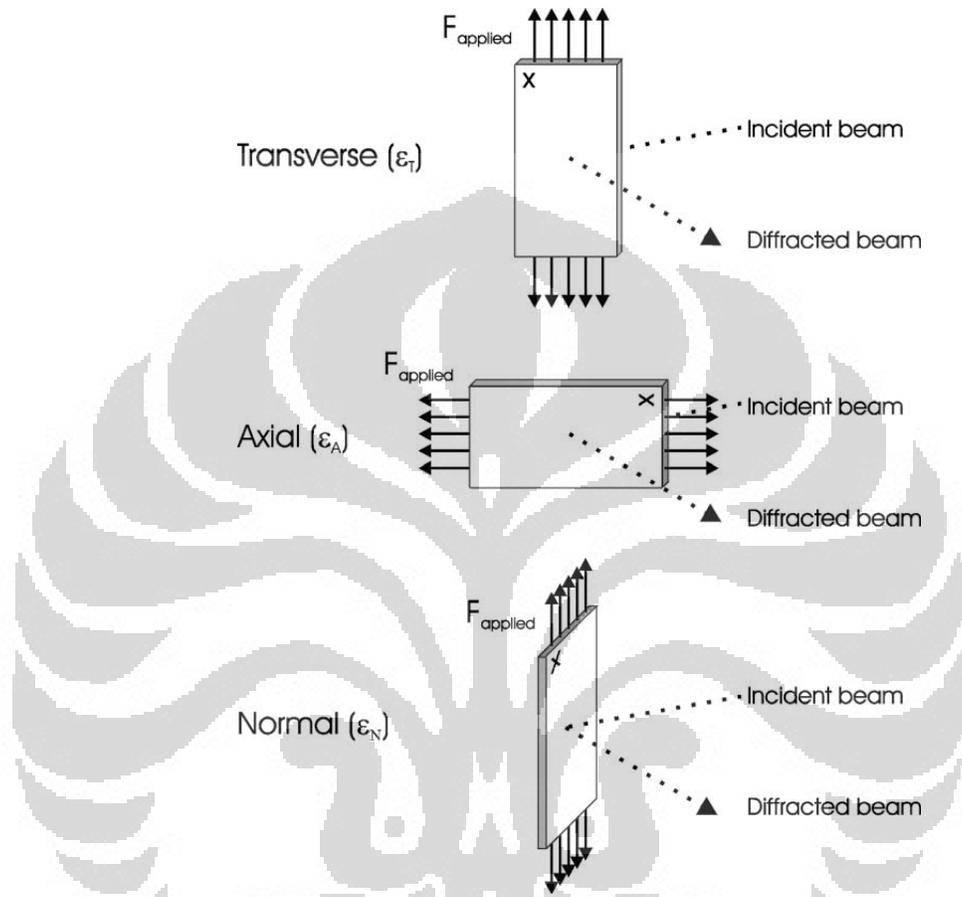
Sampel yang digunakan adalah hasil proses pengelasan dissimilar antara SS400 dan SUS304 sebanyak 3 buah dengan dimensi 150 mm x 100 mm dan variasi ketebalan 8 mm, 10 mm, dan 12 mm. Sampel kemudian diatur di atas meja sampel pada peralatan difraktometer neutron untuk pengukuran tegangan sisa DN1-M. Diagram DN1-M diperlihatkan pada Gambar 3.6.

DN1 Schematic Diagram



Gambar 3.6. Diagram skematik peralatan difraktometer neutron untuk pengukuran tegangan sisa DN1-M yang terletak di dalam balai percobaan RSG-GAS Serpong.

Pengukuran dilakukan pada arah transversal, axial, dan normal pada sampel tersebut. Aturan transversal, axial dan normal terlihat pada Gambar 3.7.

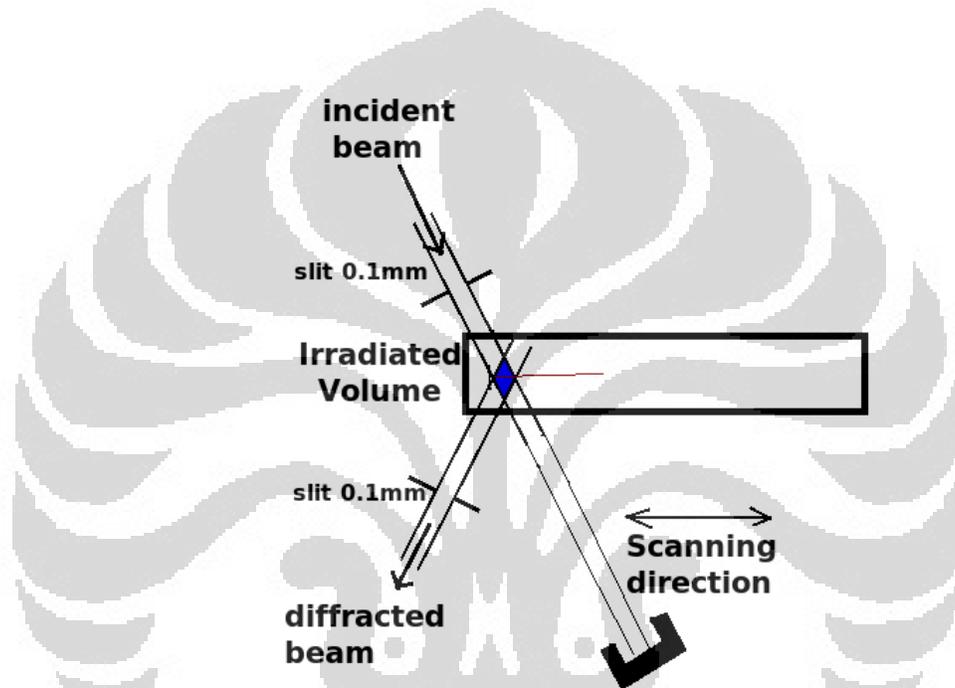


Gambar 3.7. Diagram skematik posisi sampel terhadap berkas neutron pada pengukuran arah transversal, axial, dan normal.

Pengukuran dilakukan pada bidang (220) dengan sudut hamburan sekitar $92,6^\circ$ untuk bagian SUS304, dan bidang (200) untuk bagian SS400 dengan sudut hamburan sekitar $79,6^\circ$. Volume dari sampel yang diukur ditentukan oleh perpotongan lebar berkas datang dan lebar berkas hamburan. Lebar berkas datang maupun hamburan dibatasi dengan menggunakan *slit* selebar 3 mm x 10 mm untuk arah normal dan transversal, dan 3 mm x 3 mm untuk arah axial dengan jarak 100 mm untuk *slit* pada *incident beam* dan 140 mm untuk *slit* pada *detector*. Skematik daerah pengukuran pada sampel ditunjukkan pada Gambar 3.8. Harga modulus

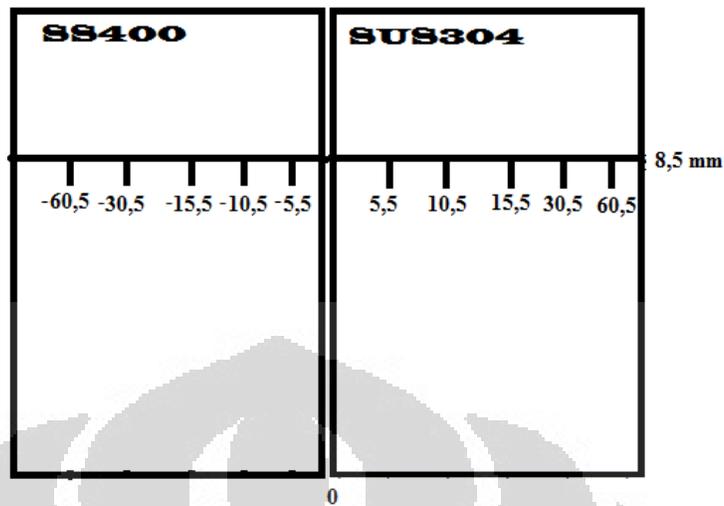
elastisitas atau modulus Young dan perbandingan Poisson dari sampel masing masing adalah $E = 199,1$ GPa dan $\nu = 0,290$ untuk SUS304, dan $E = 174$ GPa dan $\nu = 0,33$ untuk SS400.

Panjang gelombang berkas neutron yang digunakan selama percobaan dikalibrasi dengan menggunakan sampel standar serbuk Silikon yang diukur pada bidang hkl (111), (220), (311), (331), dan (400).



Gambar 3.8. Tampak atas posisi sampel diatas meja sampel. Volume teriradiasi dari sampel ditentukan dari perpotongan antara lebar berkas sinar datang dengan lebar berkas terhambur.

Untuk pengukuran regangan sampel lasan dissimilar dalam penelitian ini dilakukan pengukuran sudut hamburan bidang miller (220) untuk SUS304 pada sudut $2\theta = 92,6^\circ$, dan bidang (200) untuk SS400 pada sudut $2\theta = 79,6^\circ$. Pada arah X, Y, dan Z . Penentuan posisi puncak dari pola difraksi didekati dengan fungsi matematis distribusi Gaussian (Gauss-Cauchy). Pengukuran sampel dilakukan pada posisi 8,5mm dari ujung lasan dengan posisi $\pm 5,5$ mm, 10,5 mm, 15,5 mm, 30,5 mm, dan 60,5 mm dari titik tengah las seperti tampak pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9. Posisi pengukuran tegangan sisa

Peralatan yang digunakan adalah neutron DN1-M milik PTBIN-BATAN yang dipasang pada tabung berkas neutron tangensial S-6 Reaktor Serba Guna G. A. Siwabessy di Serpong. Langkah-langkah pengukuran regangan adalah sebagai berikut:

1. Pengukuran sudut hamburan 0° .
2. Penentuan indeks dan daerah pengukuran.
3. Penentuan ukuran *slit*.
4. Pemasangan sampel yang akan diukur regangannya.
5. Penggerakan lengan detektor ke sudut hamburan (indeks pengukuran).
6. Pengukuran *preferred orientation* dari sampel yang akan diukur.
7. Pengukuran d_o pada arah X, Y, dan Z untuk logam dasar tanpa lasan yang diasumsikan bebas tegangan.
8. Pengukuran d pada arah X, Y, dan Z untuk semua sampel
9. Analisis regangan dan tegangan.

BAB IV DATA PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Data dan Analisa Ketebalan Pelat dan Distorsi Angular

4.1.1 Perhitungan Masukan Panas (*Heat Input*)

Proses pengelasan ini menggunakan mesin las TIG merk Fronius dengan arus maksimal 300 amper dan *dynamic maximum* 10. Gas pelindung yang digunakan adalah argon dengan kecepatan alir 25 l/menit. Dalam proses pengelasan ini juga digunakan *back purging gas* yaitu argon yang berfungsi untuk melindungi *root* dari cacat, misalnya *porosity*, *wavy weld bead*, dan adanya gas lain yang bisa menyebabkan cacat pada pengelasan. Tekanan *back purging gas* yang digunakan berbeda-beda untuk tiap ketebalan pelat yaitu 15 l/menit untuk pelat 8 mm, 20 l/menit untuk pelat 10 mm, dan 25 l/menit untuk pelat 12 mm.

Masukan panas las dihitung dengan menggunakan rumus *heat input*. Dari hasil perhitungan untuk tiap *pass* las diperoleh nilai yang berbeda. Jumlah masukan panas las berdasarkan berdasarkan jumlah tiap *pass* las.

Tabel 4.1. Parameter pengelasan GTAW pada pelat 8 mm

<i>Pass</i> ke	Tegangan (V)	Arus (A)	Gas (L/menit)	<i>Back Purging</i> <i>gas</i> (L/menit)	<i>Travel</i> <i>speed</i> (mm/s)	<i>Heat</i> <i>input</i> (KJ/mm)
1	11	165	25	15	0,663	2,73
2	11	165	25	15	0,843	2,15
3	11	165	25	15	1,104	1,644
4	11	165	25	15	1,037	1,75

Tabel 4.1 menunjukkan parameter yang digunakan pada proses pengelasan pelat 8 mm. Arus, voltase, dan kecepatan las yang digunakan diatur sedemikian hingga ukuran kampuh las yang dihasilkan cocok dengan ukuran groove pada pelat. Perbedaan kecepatan (*travel speed*) yang digunakan menghasilkan nilai masukan panas yang berbeda sehingga nantinya akan menghasilkan distorsi yang berbeda. Kecepatan yang lambat pada *pass* pertama disebabkan karena waktu yang dibutuhkan untuk proses pelelehan logam induk dan logam pengisi di awal pengelasan.

Tabel 4.2. Parameter pengelasan GTAW pada pelat 10 mm

<i>Pass ke</i>	<i>Volt (V)</i>	<i>I (A)</i>	<i>Gas (L/menit)</i>	<i>Back Purging gas (L/menit)</i>	<i>Travel speed (mm/s)</i>	<i>Heat input (KJ/mm)</i>
1	12	165	25	20	0,592	3,355
2	12	165	25	20	1,3552	1,461
3	12	165	25	20	1,283	1,543
4	12	165	25	20	0,949	2,086
5	12	165	25	20	1,208	1,639

Tabel 4.2 menunjukkan parameter proses las yang digunakan pada pengelasan pelat 10 mm. Besar arus yang digunakan sama dengan yang digunakan pada pengelasan pelat 10 mm, namun banyak *pass*, tegangan dan kecepatan las berbeda. Untuk pengelasan pelat 10 mm membutuhkan 5 *pass* dan tegangan yang digunakan adalah 12V. Sedangkan kecepatan yang digunakan sedikit lebih lambat pada pas pertama. Hal ini berhubungan dengan perbedaan ketebalan pelat, untuk pelat yang lebih tebal waktu yang dibutuhkan untuk melelehkan logam induk dan logam pengisi di awal pengelasan menjadi lebih lama. Selain itu juga kecepatan yang lebih lambat ini digunakan untuk menghasilkan kampuh las yang lebih besar sehingga bisa mengisi *groove* pada pelat 10 mm.

Tabel 4.3. Parameter pengelasan GTAW pada pelat 12 mm

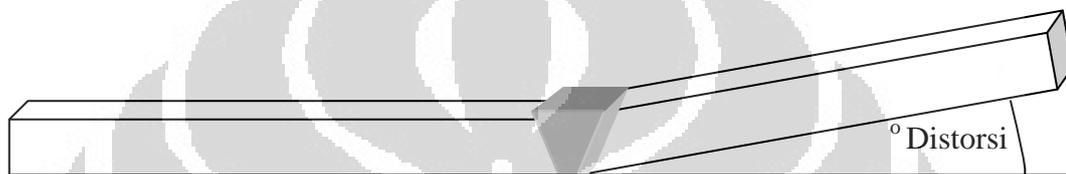
<i>Pass ke</i>	<i>Volt (V)</i>	<i>I (A)</i>	<i>Gas (L/menit)</i>	<i>Back Purging gas (L/menit)</i>	<i>Travel speed (mm/s)</i>	<i>Heat input (KJ/mm)</i>
1	13	194	25	25	0,677	3,725
2	13	194	25	25	0,685	3,681
3	13	194	25	25	1,084	2,326
4	13	194	25	25	0,987	2,555
5	13	194	25	25	1,413	1,784
6	13	194	25	25	1,064	2,37

Tabel 4.3 menunjukkan parameter pengelasan yang digunakan pada pengelasan pelat 12 mm. Besar arus, tegangan, *pass*, dan kecepatan las berbeda dari yang digunakan pada pengelasan pelat 8mm maupun 12 mm. Perbedaan parameter pengelasan yang digunakan pada pengelasan pelat 12 mm disebabkan karena perbedaan ketebalan. Ketebalan yang lebih tinggi membutuhkan arus dan tegangan yang tinggi agar mampu melelehkan logam induk dan juga jumlah *pass*

yang lebih banyak. Walaupun kecepatan las yang digunakan hampir sama dengan pengelasan untuk pelat 8mm dan 10 mm, namun karena perbedaan arus dan tegangan, maka masukan panas yang terjadi juga berbeda, sehingga memungkinkan pengelasan pelat yang lebih tebal.

4.1.2 Pengukuran Distorsi Angular

Distorsi angular yang terjadi akibat proses pengelasan diukur menggunakan busur derajat sehingga dapat diketahui berapa besar perubahan sudut yang terjadi. Pengukuran distorsi seperti ditunjukkan pada Gambar 4.1.



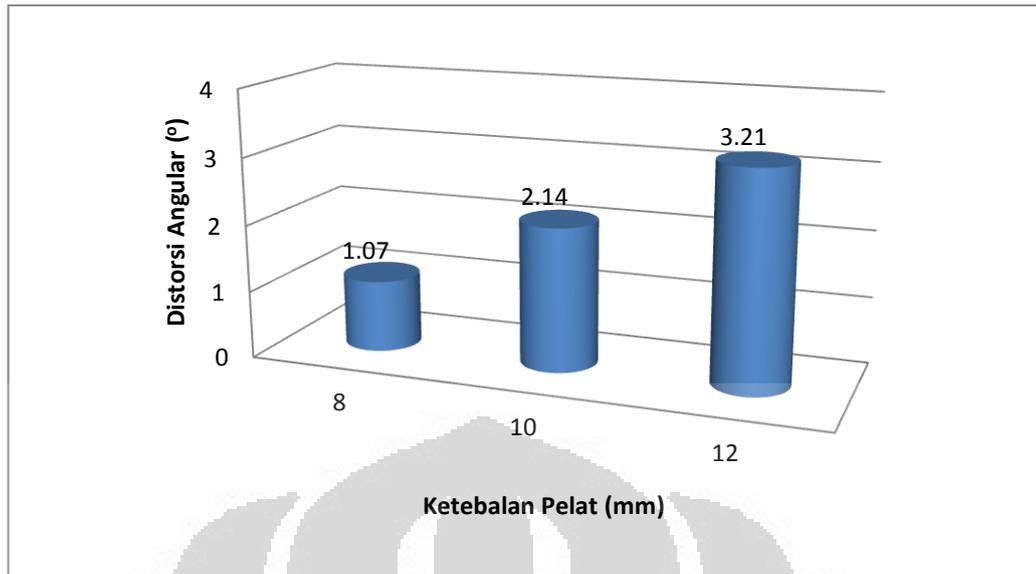
Gambar 4.1. Pengukuran sudut distorsi angular pada hasil pengelasan.

Hasil pengukuran distorsi angular yang terjadi pada sampel sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4. Hasil pengukuran distorsi angular

Tebal Pelat	8 mm	10 mm	12 mm
Distorsi angular	1,07°	2,14°	3,21°

Dari Tabel 4.4 dibuat grafik pada Gambar 4.2. Untuk menunjukkan perbedaan distorsi angular pada pengelasan pelat yang berbeda ketebalan. Hasil penelitian ini menunjukkan nilai distorsi angular yang semakin meningkat seiring bertambahnya ketebalan pelat. Gambar 4.2. Memperlihatkan grafik nilai distorsi angular yang dihasilkan dari pengelasan pelat 8 mm adalah 1,07°. Pada pengelasan pelat 10 mm nilai yang dihasilkan adalah 2,14°. Pada pengelasan pelat 12 mm menghasilkan nilai yang paling besar yaitu 3,21°.



Gambar 4.2. Grafik besar distorsi angular versus ketebalan pelat

Distorsi angular terjadi karena gaya pemuaian dan penyusutan yang bekerja antara lasan terhadap logam induk. Ketika logam las membeku dan bercampur dengan logam lasan, maka logam dalam keadaan memuai maksimum. Pada proses pendinginan, logam berusaha menyusut ke volume yang bisa dicapai pada temperatur terendah, namun hal itu ditahan oleh logam induk yang berdekatan.

Distorsi angular pada pelat 8 mm memiliki nilai paling kecil dibanding pelat 10 mm dan 12 mm karena beberapa hal. Pertama karena pelat 8mm hanya membutuhkan 4 *pass* untuk memenuhi *groove* yang ada pada lasan. Pelat 10 mm dan 12 mm membutuhkan *pass* yang lebih banyak pada lasan, yaitu 5 dan 6, sehingga semakin besar nilai distorsi angular. Hal ini terjadi karena volume logam las yang membeku pada pelat 8 mm lebih sedikit, sehingga gaya pemuaian dan penyusutan yang bekerja pada logam dasar semakin kecil.

Kedua, karena pelat 10 mm mendapatkan masukan panas (*heat input*) yang lebih kecil dibanding dengan pelat yang lebih tebal. Menurut Sindo Kou^[17], semakin besar nilai *heat input* yang diterima oleh logam lasan, maka nilai distorsi angular akan semakin besar. Hal ini terjadi karena semakin besar nilai *heat input* yang diterima logam lasan maka daerah yang mengalami pemuaian semakin besar, sehingga gaya pemuaian yang terjadi antara logam lasan dan logam induk semakin besar. Waktu juga mempengaruhi nilai distorsi, karena semakin lama

waktu pengelasan maka transmisi panas yang dapat mempengaruhi logam sekitar dan memuainya semakin besar, sehingga gaya pemuaian yang terjadi antara logam lasan dan logam induk semakin besar dan distorsi angular yang terjadi juga semakin besar.

Perlakuan yang sama pada setiap ketebalan pelat pada saat pengelasan juga mempengaruhi besarnya distorsi angular. Pada penelitian ini setiap pelat di tahan oleh besi dengan mengelas pada 4 titik seperti terlihat pada Gambar 4.3 di bawah ini.



Gambar 4.3. Penahanan pelat saat pengelasan.

Penahanan yang sama menyebabkan terjadinya perbedaan distorsi angular pada pelat dengan ketebalan berbeda, karena gaya pemuaian dan penyusutan yang berbeda akibat dari perbedaan volume logam pengisi dan masukan panas. Distorsi angular yang terjadi pada pengelasan dengan pelat yang lebih tebal, dapat dikurangi dengan cara memperbanyak penahan pada saat pengelasan.

Jenis sambungan juga mempengaruhi nilai distorsi angular. Pada jenis sambungan *butt* dengan tipe *v-groove* akan menghasilkan nilai distorsi angular yang besar^[10]. Jenis sambungan ini memiliki volume logam las yang cukup besar sehingga memungkinkan gaya penyusutan yang bekerja pada logam induk semakin

besar. Berdasarkan dari ukuran elektroda yang digunakan, ukuran elektroda yang paling besar menghasilkan nilai distorsi yang besar pula.

4.2 Data dan Analisa Nilai Kekerasan dan Struktur Mikro

4.2.1 Data dan Analisa Nilai Kekerasan

Dari hasil pengujian kekerasan makro dengan menggunakan metode Vickers diperoleh hasil uji kekerasan sampel sebagai berikut:

Tabel 4.5. Nilai kekerasan untuk tebal pelat 8 mm

Nilai kekerasan (HV)												
JIS-SS400						JIS-SUS304						
Jarak dari lasan (mm)												
-60,5	-30,5	-20,5	-15,5	10,5	-5,5	logam las	5,5	10,5	15,5	20,5	30,5	60,5
158	154	164	168	164	171	196	232	226	226	201	201	192

Tabel 4.5 menunjukkan nilai kekerasan yang diambil pada beberapa titik dengan jarak tertentu dari logam las. Dari tabel 4.5 tersebut dapat dilihat bahwa nilai kekerasan yang paling tinggi ada di titik pada jarak 5,5 mm dari logam las, yaitu sebesar 171 HV untuk material SS400 dan 232 HV untuk material SUS304. Hal ini menunjukkan bahwa pada jarak 5,5 mm dari lasan baik untuk material SS400 maupun SUS304, merupakan daerah HAZ. Kemudian berturut turut nilai kekerasan pada jarak 10,5 mm, 15,5 mm dan 20,5 mm dari logam las dengan nilai kekerasan untuk material SS400 yaitu 164 HV, 168 HV, 164 HV, juga masih termasuk dalam daerah yang terpengaruh panas (HAZ). Sedangkan untuk material SUS304 nilai kekerasan pada jarak 10,5 mm dan 15,5 mm dari logam las yaitu 226 HV dan 226 HV, juga masih termasuk dalam daerah yang terpengaruh oleh panas (HAZ). Dilihat dari nilai kekerasannya, ada perbedaan luas area HAZ antara material SS400 dan SUS304. Nilai kekerasan logam dasar pada material SS400 direpresentasikan oleh kekerasan pada titik 30,5 mm dan 60,5 mm dari logam las, yaitu sekitar 154 HV dan 158 HV untuk material SS400 sedangkan untuk material SUS304 nilai kekerasan logam dasar terlihat mulai dari titik 20,5 mm, 30,5 mm dan 60,5 mm dari logam lasan yaitu 201 HV, 201 HV dan 192 HV.

Tabel 4.6. Nilai kekerasan untuk tebal pelat 10 mm

Nilai kekerasan (HV)												
JIS-SS400						JIS-SUS304						
Jarak dari lasan (mm)												
-60,5	-30,5	-20,5	-15,5	10,5	-5,5	logam las	5,5	10,5	15,5	20,5	30,5	60,5
151	161	161	164	168	168	210	238	221	215	215	221	232

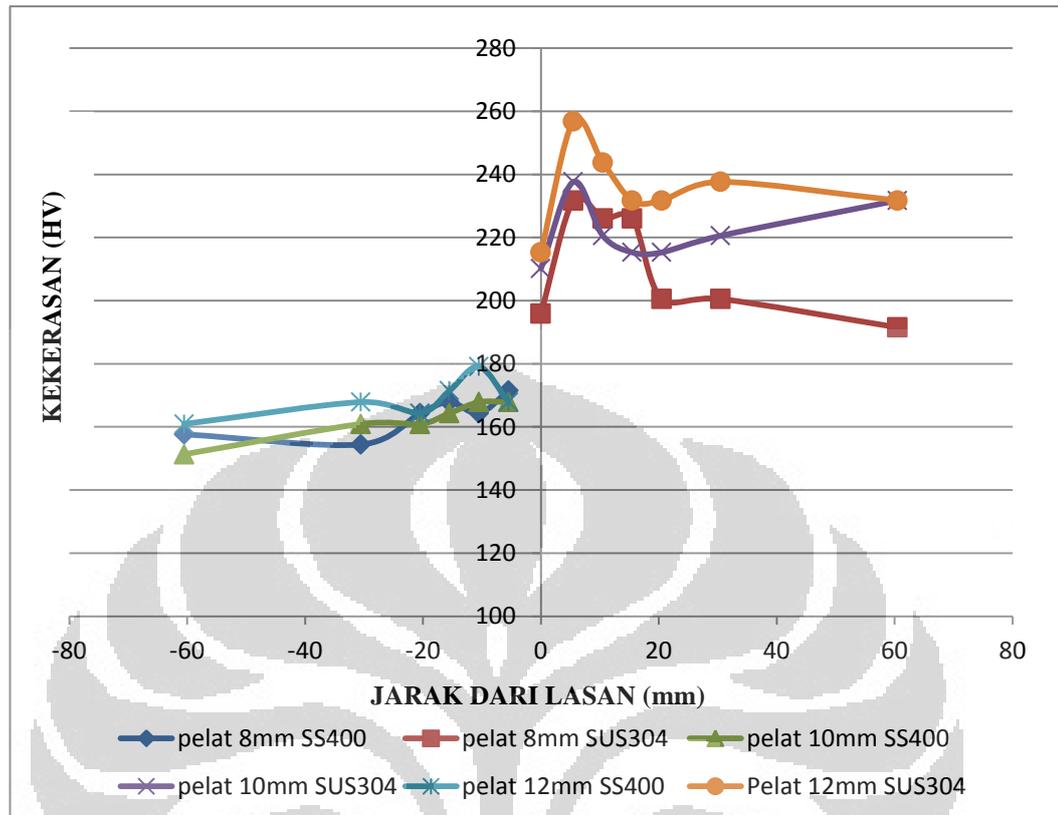
Tabel 4.6 menunjukkan nilai kekerasan yang diambil dari beberapa titik pada pelat 10 mm. Dari Tabel 4.6 dapat dilihat tingkat kekerasan pada pelat 10 mm memiliki kecenderungan yang sama dengan kekerasan pada pelat 8 mm, yaitu kekerasan paling tinggi terdapat pada titik 5,5 mm dari logam las, yaitu 168 HV untuk material SS400 dan 238HV untuk material SUS304. Hanya saja perbedaan mencolok nampak pada nilai kekerasan material SUS304, di mana pada titik 30,5 dan 60,5 mm dari logam las, nilai kekerasan semakin meningkat. Hal ini kurang sesuai, karena seharusnya nilai kekerasan paling rendah berada pada logam induk yang tidak terpengaruh oleh panas.

Tabel 4.7. Nilai kekerasan pelat 12 mm

Nilai kekerasan (HV)												
JIS-SS400						JIS-SUS304						
Jarak dari lasan (mm)												
-60,5	-30,5	-20,5	-15,5	10,5	-5,5	logam las	5,5	10,5	15,5	20,5	30,5	60,5
161	168	164	171	179	168	215	257	244	232	232	238	232

Tabel 4.7 menunjukkan nilai kekerasan yang diambil dari beberapa titik pada pelat 12 mm. tingkat kekerasan tertinggi untuk material SS400 ada di titik 10,5 mm dari lasan yaitu sebesar 179 HV, dan pada material SUS304 kekerasan tertinggi ada di titik 5 mm dari lasan yaitu sebesar 257 HV. untuk nilai kekerasan terendah baik SS400 maupun SUS304 berada pada titik berjarak 60,5 mm dari lasan yaitu sebesar 161 HV untuk SS400, dan 232 HV untuk SUS304.

Dari data pengujian kekerasan pada ketiga buah sampel dapat dibuat sebuah grafik. Gambar 4.4 memperlihatkan nilai kekerasan dari ketiga pelat dengan ketebalan yang berbeda.



Gambar 4.4. Nilai kekerasan di berbagai daerah pada pelat yang berbeda

Logam dasar seharusnya memiliki nilai kekerasan yang sama untuk setiap ketebalan. data yang didapatkan menunjukkan bahwa kekerasan logam induk material material SS400 untuk pelat 8 mm, 10 mm, dan 12 mm yaitu 158 HV, 151 HV, dan 161 HV. Nilai kekerasan pada logam induk material SUS304 untuk pelat 8mm, 10mm, dan 12mm yaitu 192 HV, 232 HV, dan 232 HV. Hal ini bisa saja dipengaruhi oleh kesalahan pada saat penjejakan, seperti peletakan spesimen yang tidak sejajar dengan alas spesimen, karena permukaan spesimen yang tidak merata.

Nilai kekerasan daerah logam las mulai dari yang tertinggi ke yang terendah berturut-turut adalah 12 mm, 10 mm, dan 8 mm dengan nilai kekerasan 215 HV, 210 HV, dan 196 HV.

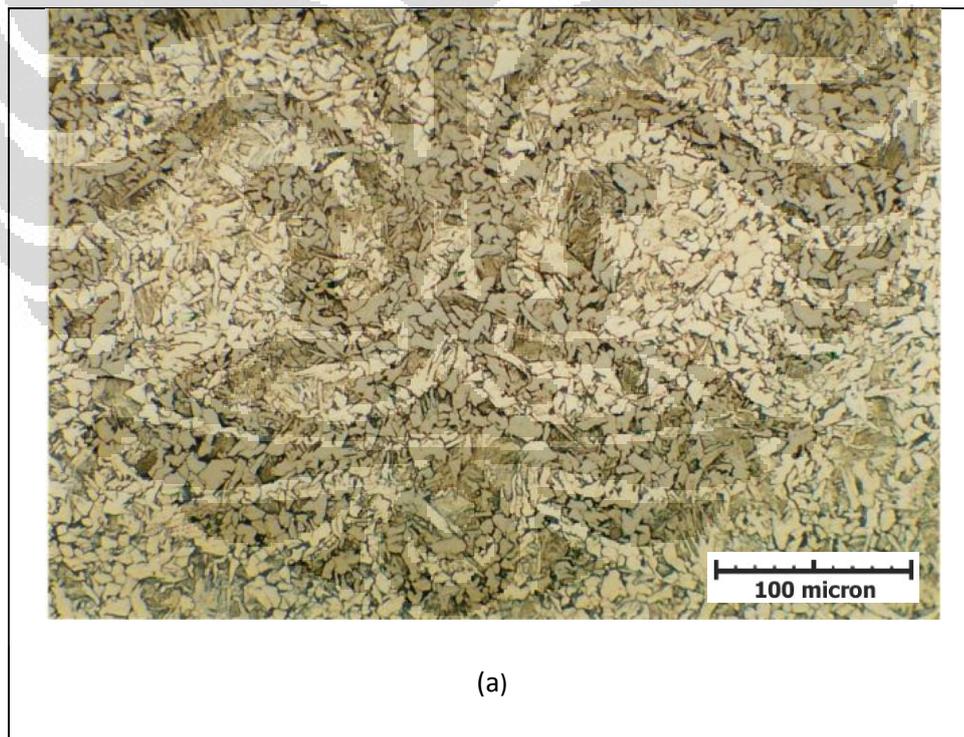
Nilai kekerasan daerah HAZ yang tertinggi untuk material SS400 adalah pada pelat 12 mm sebesar 179 HV, sedangkan untuk material SUS 304 nilai kekerasan tertinggi terdapat pada pelat 12 mm sebesar 257 HV.

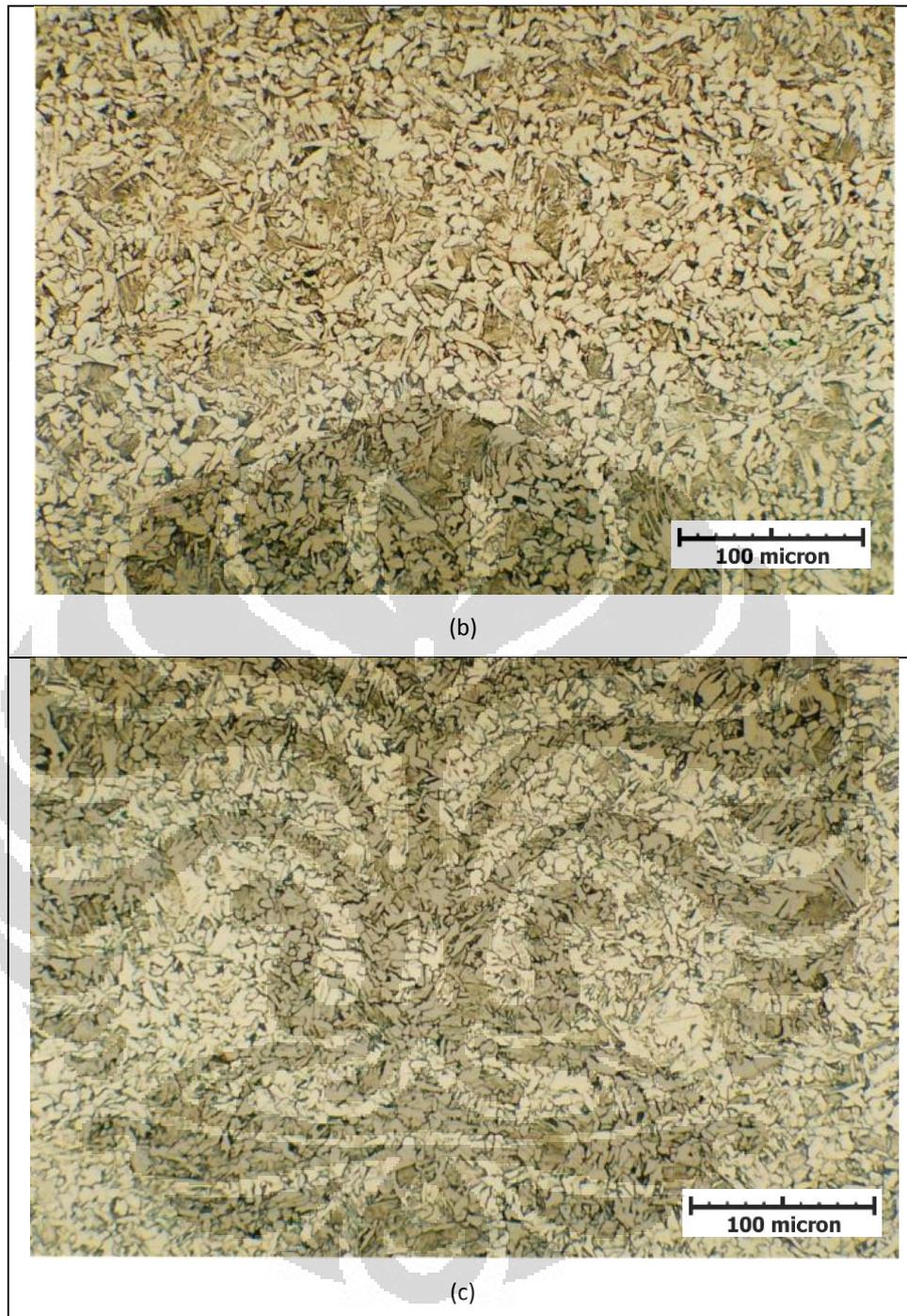
Nilai kekerasan tertinggi dari ketiga pelat baik untuk material SS400, maupun SUS304, terdapat pada daerah HAZ. Hal ini sesuai dengan literatur, karena pada daerah HAZ terdapat tegangan sisa yang menyebabkan kekerasan meningkat namun ketangguhan menurun.

4.2.2 Data dan Analisa Struktur Mikro

4.2.2.1 Analisa Struktur Mikro Logam Induk SS400

Struktur mikro logam induk SS400 terdiri dari ferit dan perlit. Dapat dilihat pada Gambar 4.5 fasa perlit berwarna lebih gelap, dan fasa ferit adalah yang lebih terang. Struktur mikro logam induk SS400 hampir sama pada setiap ketebalan, hal ini menunjukkan tidak ada perlakuan yang berbeda pada ketiga pelat tersebut. Temperatur logam induk saat pengelasan di bawah suhu transformasi A_{r1} , sehingga tidak mengalami perubahan fasa dan struktur mikro, masih berupa ferit dan perlit yang berbentuk memanjang searah dengan arah rol.



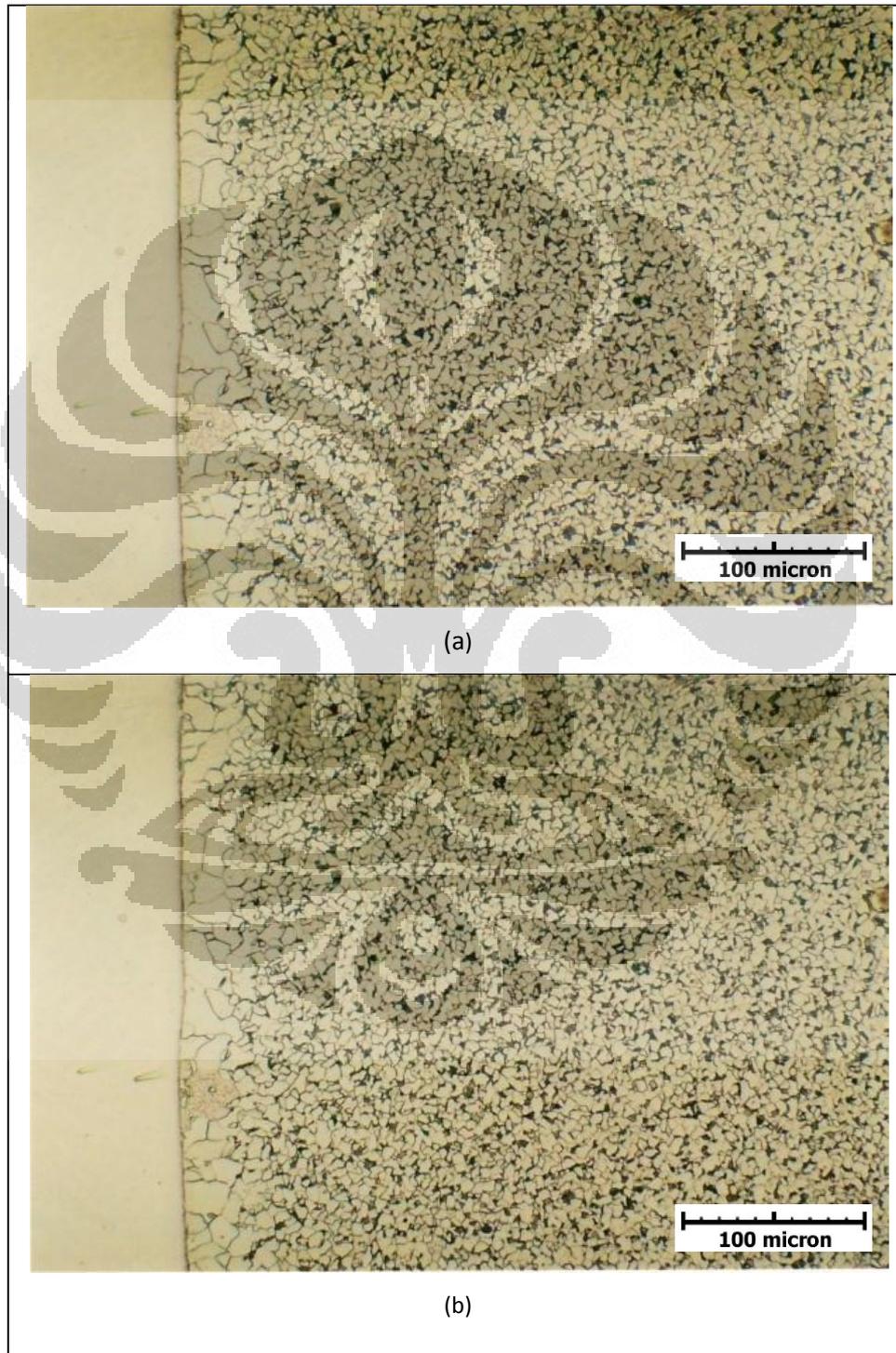


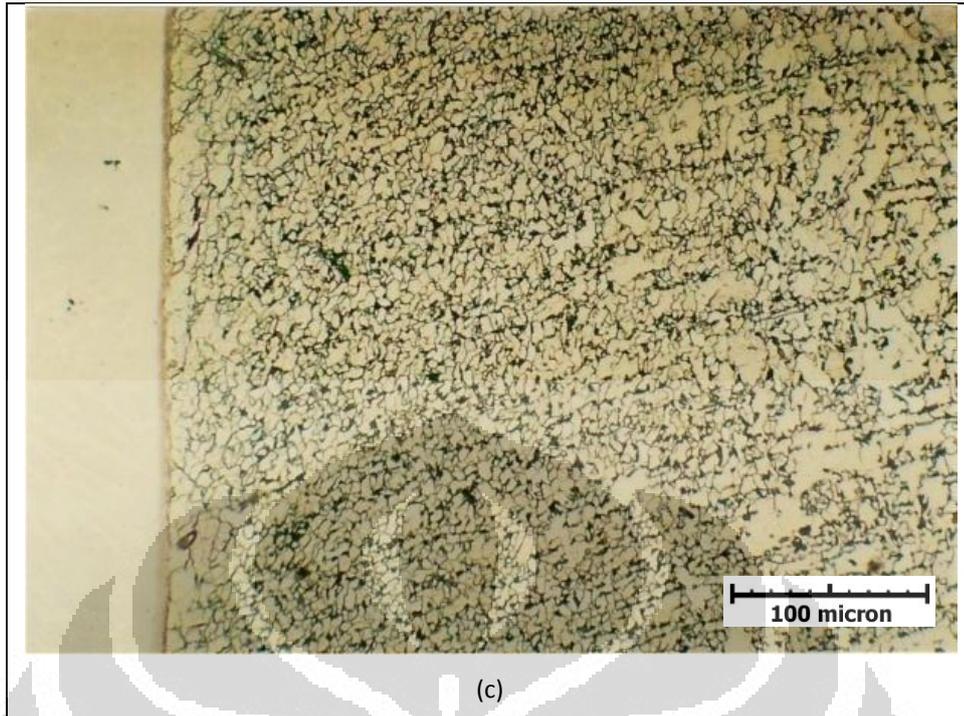
Gambar 4.5. Struktur mikro logam induk (a) pelat 8 mm, (b) pelat 10mm, dan (c) pelat 12 mm, etsa nital 2% perbesaran 200x

Pada daerah HAZ terbagi menjadi dua bagian; HAZ berbutir kasar dan HAZ berbutir halus.

HAZ berbutir kasar terletak bersebelahan langsung dengan logam las. Daerah HAZ butir kasar berupa ferrit batas butir yang berada di sepanjang bekas

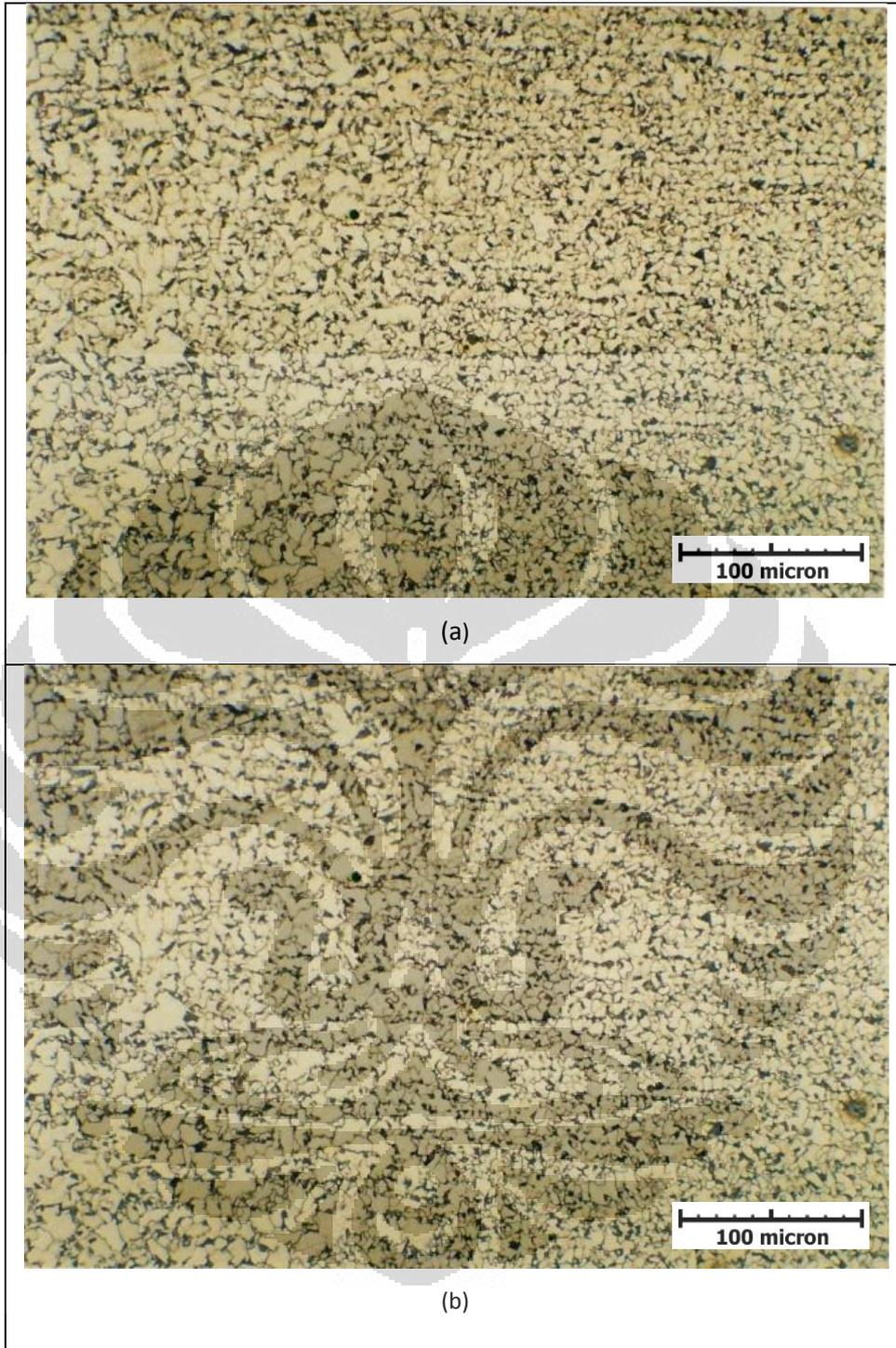
batas butir austenit (prior austenit grain boundaries) dan dalam butir terbentuk bainit berupa pelat-pelat sejajar. Saat pengelasan, temperatur HAZ butir besar di atas 1100°C ^[23] sehingga mengalami pertumbuhan butir austenit dan saat pendinginan, butir austenit kasar cenderung membentuk bainit. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.6 (a), (b), dan (c).

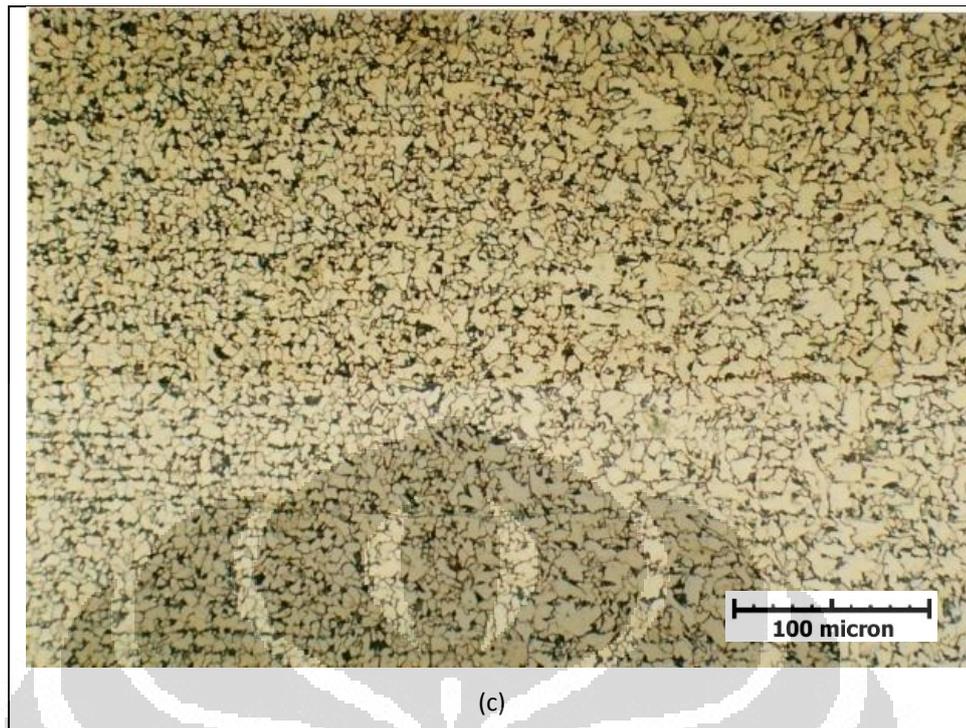




Gambar 4.6. Struktur mikro HAZ butir kasar (a) pelat 8 mm, (b) pelat 10 mm, dan (c) pelat 12 mm, etsa nital 2% perbesaran 200x

Pada daerah yang agak jauh dari lasan, walaupun masih di atas temperatur kritis A_{c3} , namun temperaturnya lebih rendah dibanding daerah HAZ butir kasar, sehingga hanya terjadi rekristalisasi butir austenit dan saat pendinginan terjadi perlit kecil dan ferit halus yang dikenal dengan sebutan HAZ butir halus. Distribusi perlit dan ferit tidak seragam sepenuhnya karena waktu difusi untuk karbon terbatas di bawah laju pemanasan yang tinggi selama pengelasan dan austenit akhir tidak homogen. Perbedaan antara HAZ butir kasar dan HAZ butir halus dapat dilihat pada Gambar 4.7 (a), (b), dan (c).



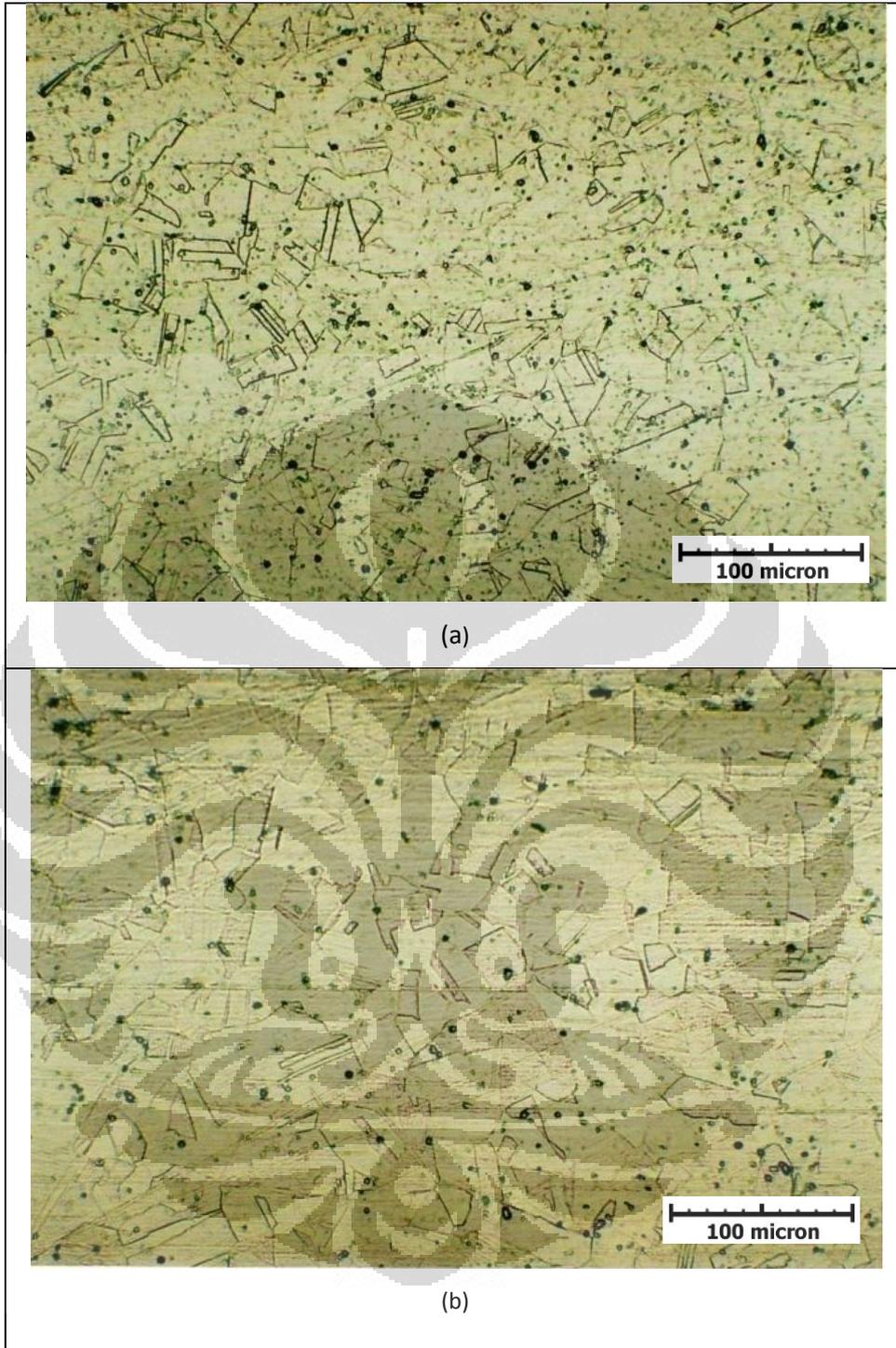


Gambar 4.7. Perbatasan HAZ butir halus dan HAZ butir kasar (a) pelat 8 mm, (b) pelat 10 mm, dan (c) pelat 12 mm, etsa nital 2% perbesaran 200x.

4.2.2.2 Analisa Struktur Mikro Logam Induk SUS304

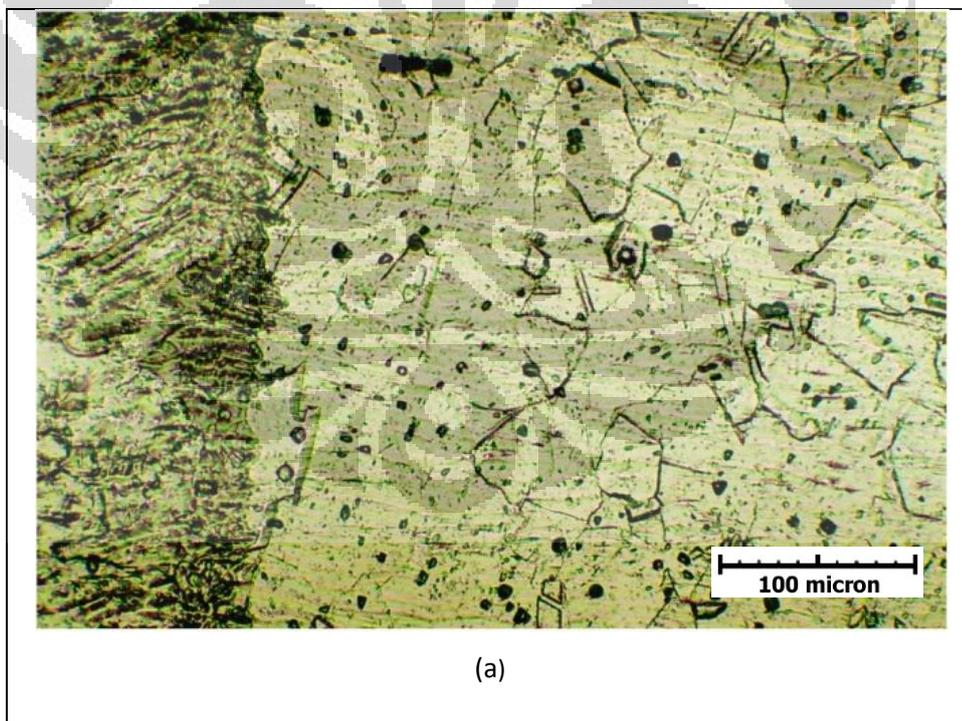
SUS304 merupakan baja tahan karat austenitik yang idealnya berfasa tunggal yaitu austenit dan memiliki struktur kristal FCC (Face Centered Cubic). Pada Gambar 4.8 dapat dilihat fasa austenit dari base metal yang tidak terkena pengaruh panas dari proses pengelasan.

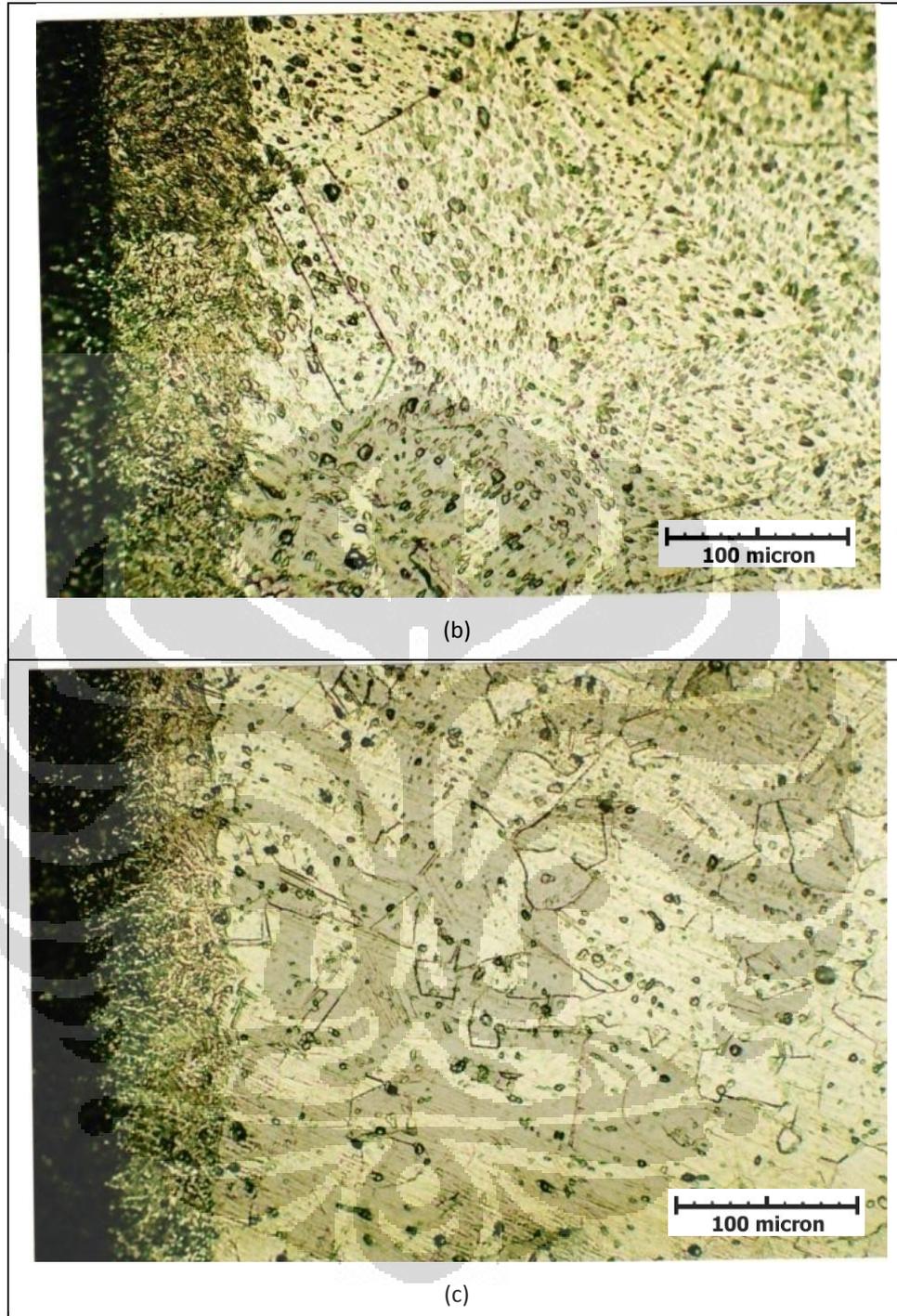
Gambar 4.9 adalah daerah batas antara logam las dengan logam induk SUS304. Pada area ini terdapat suatu daerah bernama *Lord Hard Zone* (LHZ) atau *dark band* yang merupakan daerah di mana terjadi difusi karbon dari HAZ baja karbon SS400. Difusi karbon ini akan membentuk senyawa besi karbida maupun martensit^[24]. Ketebalan LHZ dipengaruhi oleh masukan panas dan laju pendinginan. Difusi karbon mulai terjadi pada suhu 400°C dan makin tinggi suhunya akan mempercepat difusi karbon pada batas fusi^[25]. Dari gambar dapat dilihat bahwa *dark band* pada pelat 8 mm paling tipis. Fenomena ini bisa disebabkan telah banyak karbon yang berdifusi ke dalam logam induk SUS304 karena pengaruh ketebalan pelat yang tipis. Hal ini nantinya akan mempengaruhi sensitasi karbida yang terjadi.





Gambar 4.8. Logam Induk (a) pelat 8 mm, (b) pelat 10 mm, dan (c) pelat 12 mm, etsa 15% oksalat perbesaran 200x.

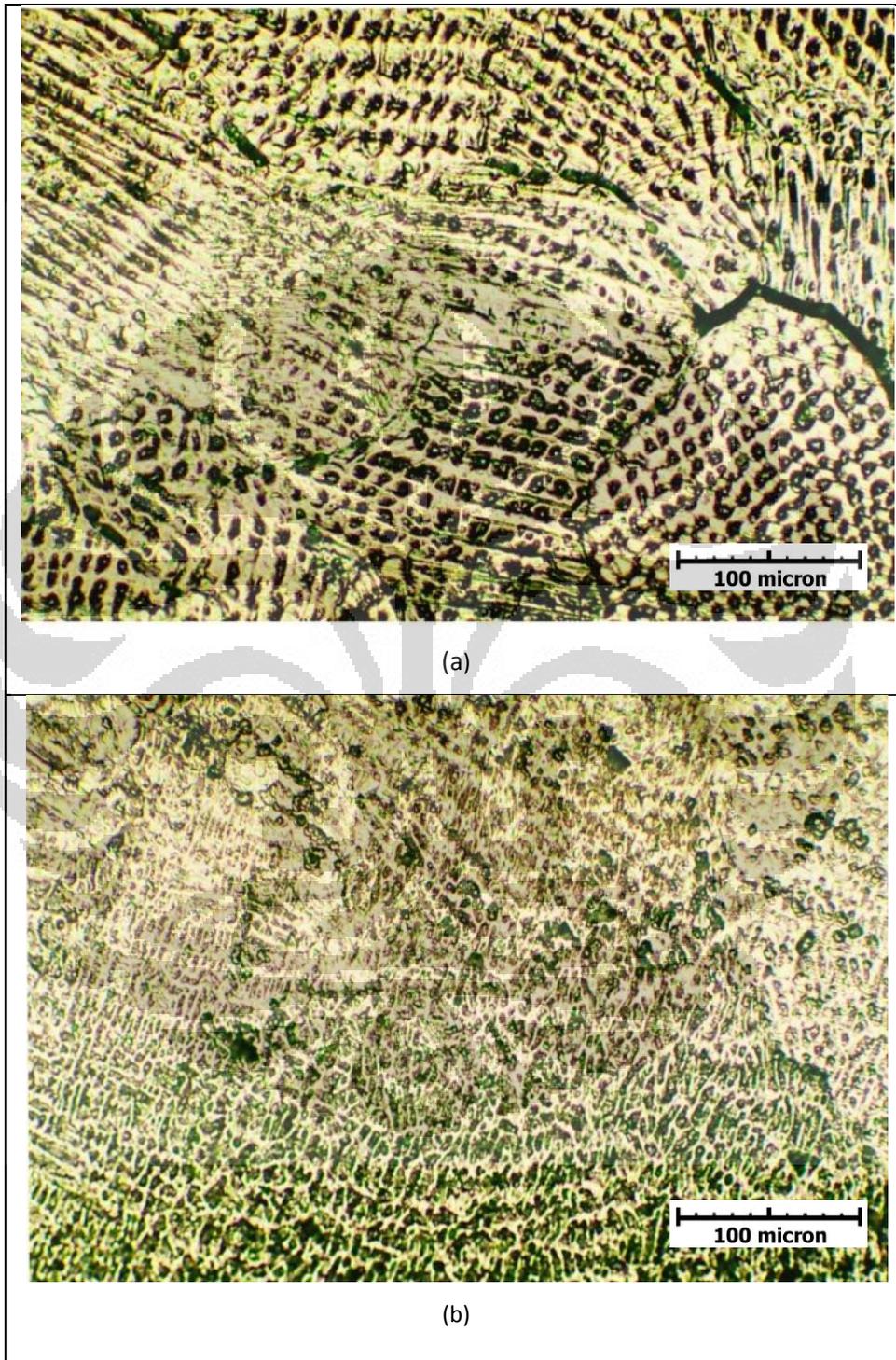


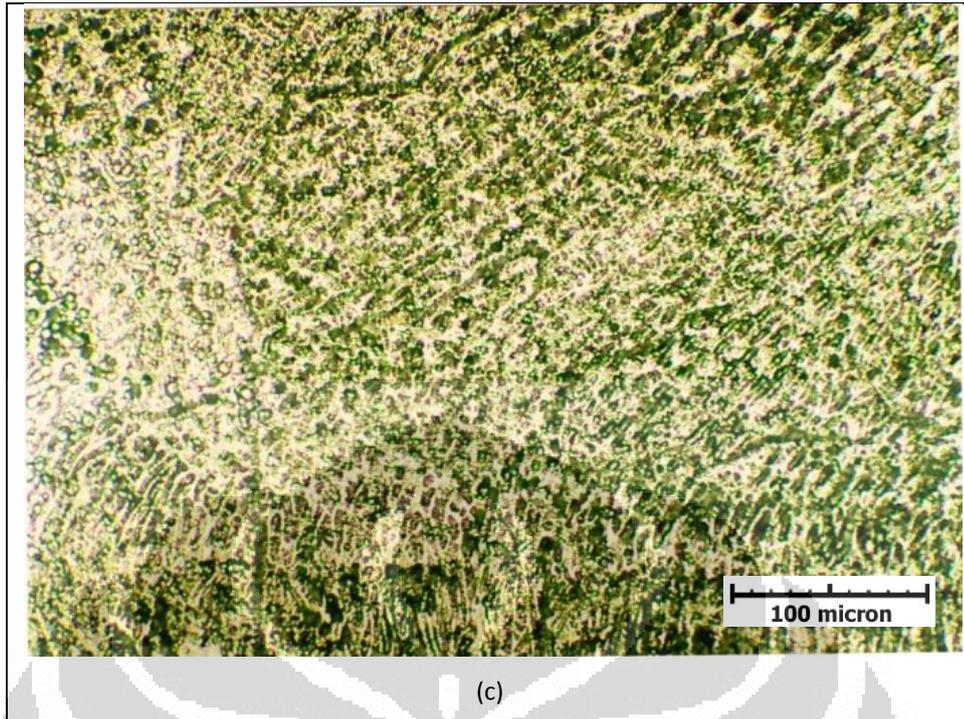


Gambar 4.9 Batas las (a) pelat 8 mm, (b) pelat 10 mm, dan (c) pelat 12 mm, etsa 15% oksalat perbesaran 200x.

Gambar 4.10 menunjukkan inti las. Sesuai dengan hasil prediksi struktur mikro yang diplotkan dengan diagram schaeffler pada saat menentukan logam pengisi, fasa yang terbentuk pada inti las adalah austenit.

Material SUS304 adalah *high alloy steel* dengan kadar pencampuran unsur selain Fe bisa mencapai 30-35% dengan didominasi unsur Cr dan Ni serta sebagian kecil unsur Mn, C, Ti, Nb, P, Si.

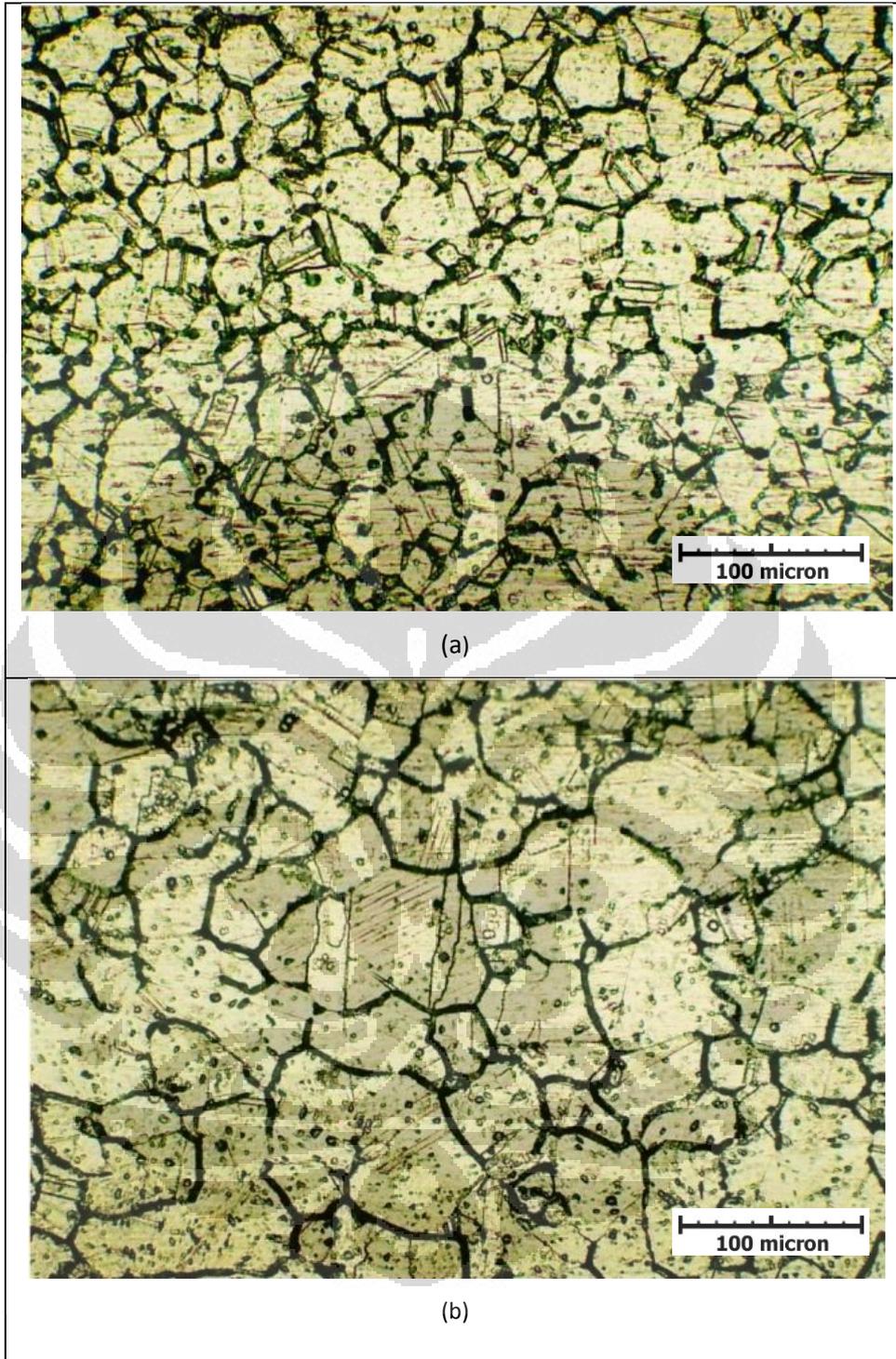


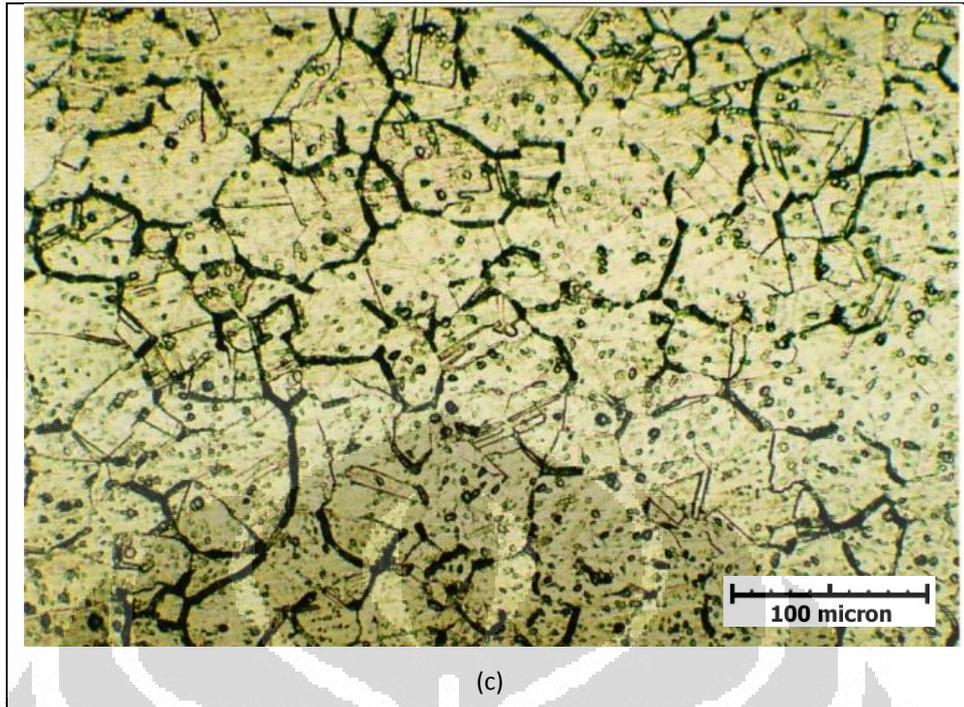


Gambar 4.10. Inti las (a) pelat 8 mm, (b) pelat 10 mm, dan (c) pelat 12 mm, etsa 15% oksalat perbesaran 200x.

Peningkatan daya tahan korosi disebabkan hadirnya unsur Cr dalam larutan padat material. Pada saat material mengalami pemanasan dengan temperatur tinggi karena proses pengelasan, chromium yang menjadi unsur pencampur dominan bereaksi dengan kadar karbon yang ada dalam material ini menjadi chromium karbida dan mengendap di batas butir. Gambar 4.11 menunjukkan terjadinya sensitasi karbida pada batas butir.

Pada Gambar 4.11 dapat dilihat bahwa chromium karbida paling banyak terbentuk pada pelat 8 mm. hal ini dapat disebabkan karena banyaknya karbon dari logam induk SS400 yang berdifusi ke dalamnya seperti yang telah diutarakan di atas.



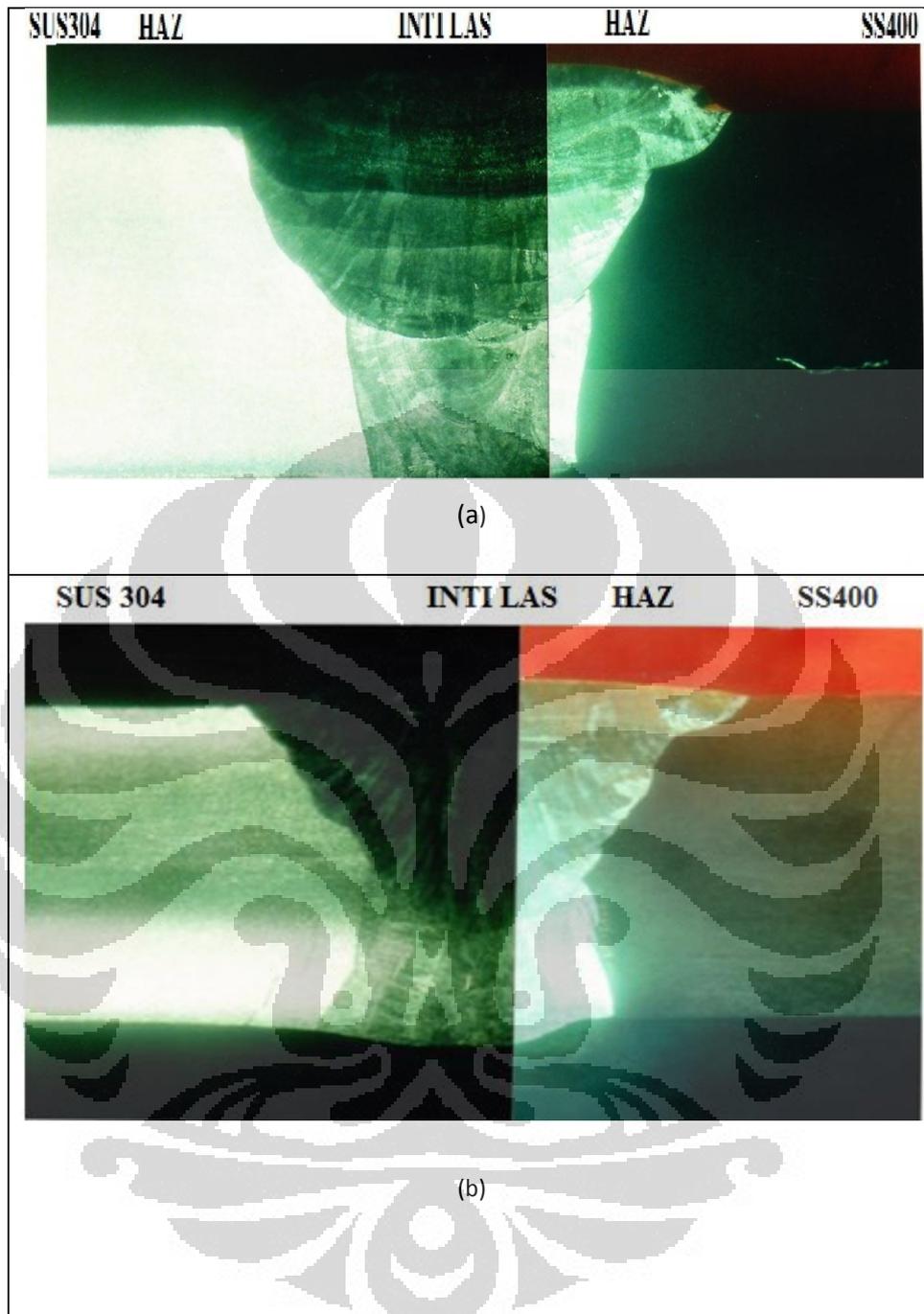


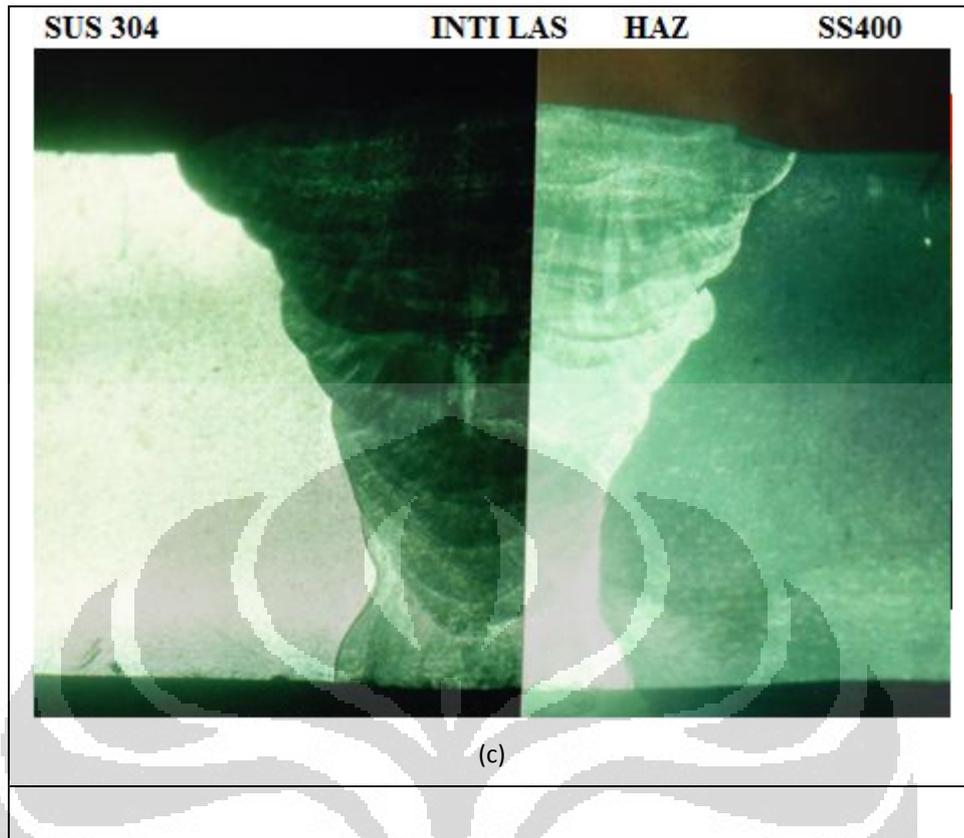
Gambar 4.11. Sensitasi karbida (a) pelat 8 mm, (b) pelat 10 mm, dan (c) pelat 12 mm, etsa 15% oksalat perbesaran 200x.

4.2.3 Data dan Analisa Struktur makro

Gambar 4.12 menunjukkan foto makro pelat 8 mm, 10 mm, dan 12 mm. pada Gambar tersebut terlihat penetrasi lasan yang bagus, bebas *undercutting*, bebas porositas dan kedalaman HAZ yang cukup seragam.

Karena pelat yang dilas cukup tebal, maka untuk mengelas pelat 8 mm, 10 mm, dan 12 mm diperlukan pengelasan multipass. Foto makro pada Gambar 4.12 memperlihatkan hasil pengelasan *multipass*. Pelat 8 mm membutuhkan empat *pass*. Pelat 10 mm dilas dengan lima *pass* menunjukkan gambar makro yang cukup berbeda dengan gambar makro pelat 8 mm. Adapun pelat 12 mm memiliki gambar makro yang cukup berbeda karena pengelasannya membutuhkan enam *pass* seperti yang terlihat pada Gambar 4.12.





Gambar 4.12. Foto makro (a) pelat 8 mm, (b) pelat 10 mm, dan (c) pelat 12 mm, perbesaran 7x.

4.3 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 harus melakukan kalibrasi dengan pengukuran panjang gelombang. 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 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.

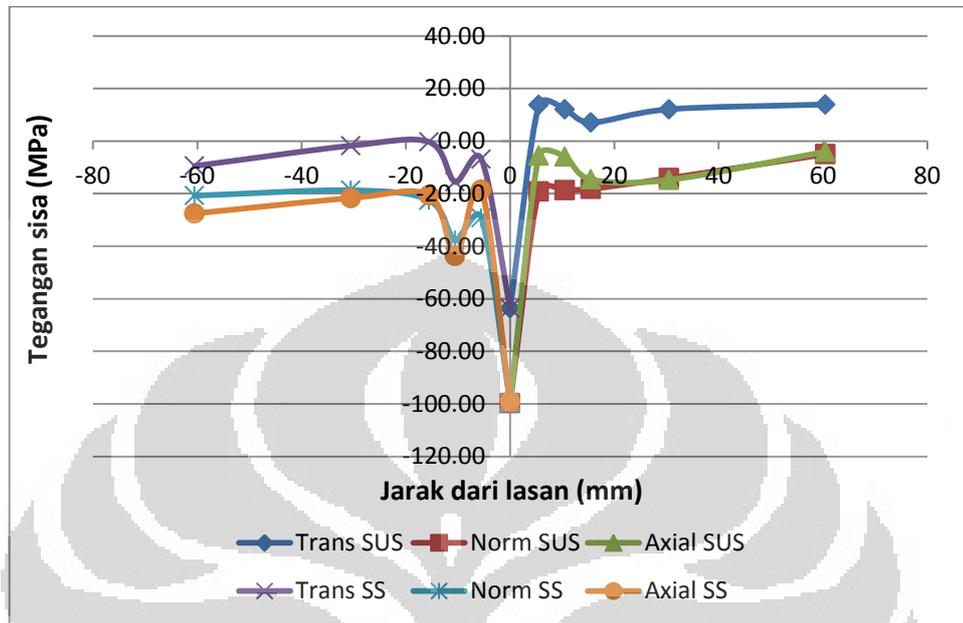
Perhitungan pengukuran dilakukan dengan bantuan *software* Origin (R) 7 dan exel. Keakuratan hasil pengukuran cukup baik.

Setelah perhitungan panjang gelombang, perhitungan dilakukan terhadap sampel, satu per satu. Pengukuran dimulai dari sampel 1 bagian las dan SUS304, kemudian dilanjutkan ke sampel 2 dan sampel 3. Selanjutnya dilakukan pada bagian SS400. Hasil pengukuran dan perhitungan regangan sesuai rumus 2.9. Hasil perhitungan perhitungan panjang gelombang, jarak bidang (d_{hkl}), regangan dan tegangan dapat dilihat pada lampiran.

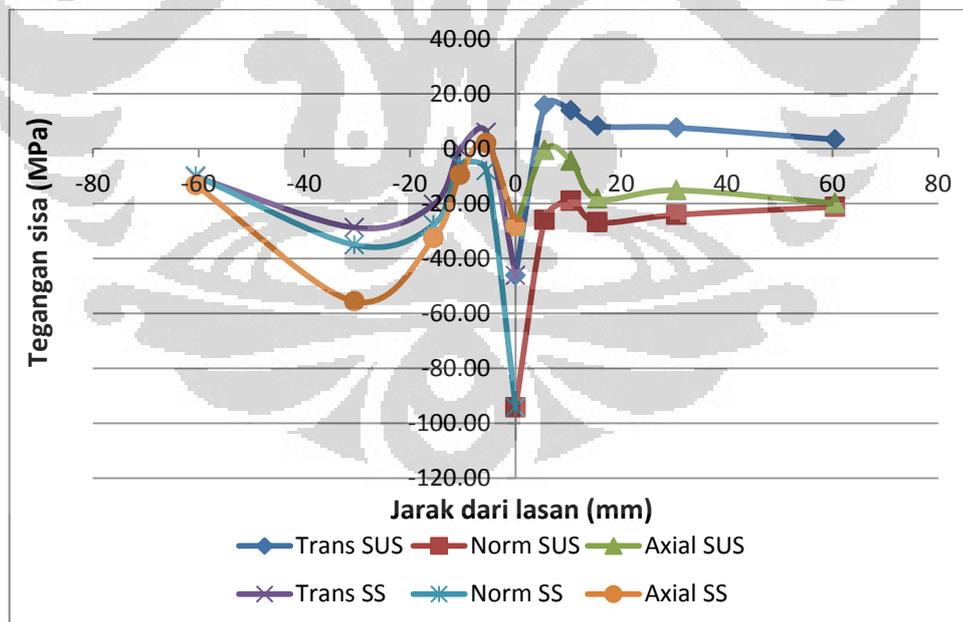
Beberapa hasil pengukuran dan pengolahan data tegangan sisa melintang daerah lasan pada arah transversal, normal, dan axial untuk sampel 1 sampai dengan sampel 3, ditunjukkan pada Gambar 4.13 sampai Gambar 4.15. Seperti telah dijelaskan yakni pada Gambar 3.9 bahwa pengukuran dilakukan pada pusat las dan pada jarak 5,5 mm, 10,5 mm, 15,5 mm, 30,5 mm, dan 60,5 mm ke arah kiri dan kanan dari pusat las.

Grafik pada Gambar 4.13, 4.14, dan 4.15 menunjukkan distribusi tegangan sisa pada sampel 1 sampai dengan sampel 3 baik pada arah transversal, normal, maupun axial. Dari grafik dapat dilihat bahwa distribusi tegangan sisa pada ketiga sampel memiliki kecenderungan yang hampir sama, yaitu semakin meningkat sampai daerah sekitar pusat lasan, kemudian menurun sampai ke pusat lasan. Hal ini terjadi karena pada kedua jenis logam induk, baik SS400 maupun SUS304. Nilai tegangan sisa negatif pada pusat lasan dan sekitarnya menunjukkan bahwa tegangan sisa yang terjadi pada pusat lasan adalah tegangan tekan (*compressive*). Sedangkan untuk nilai tegangan sisa positif di sekitar pusat lasan menunjukkan adanya tegangan tarik (*tensile stress*). Hal ini membuktikan bahwa tegangan sisa

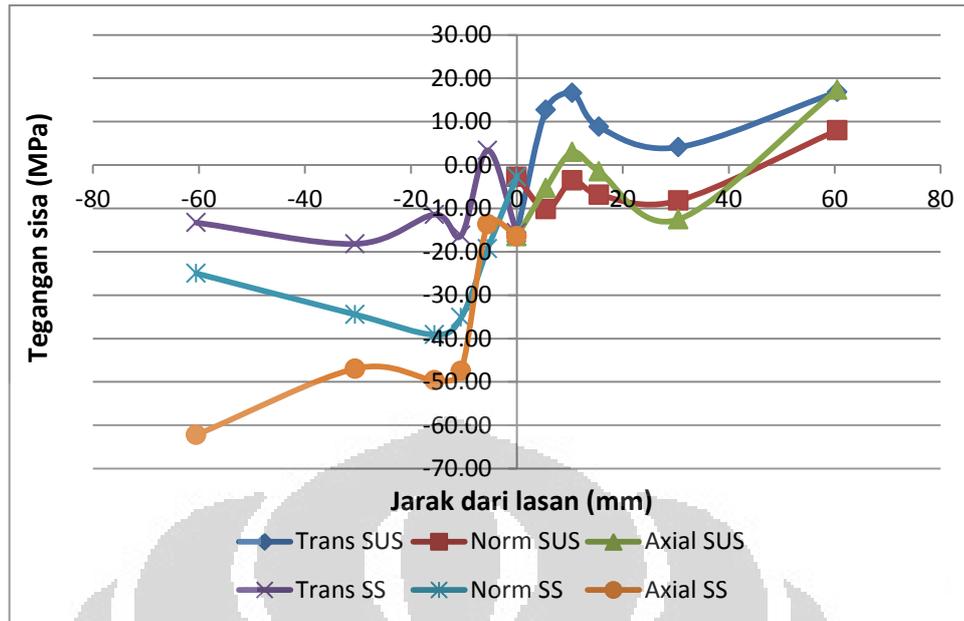
yang terjadi di daerah ini dipengaruhi oleh penyusutan yang terhambat selama pendinginan berlangsung ketika logam las membeku.



Gambar 4.13. Grafik tegangan sisa pada pelat 8 mm

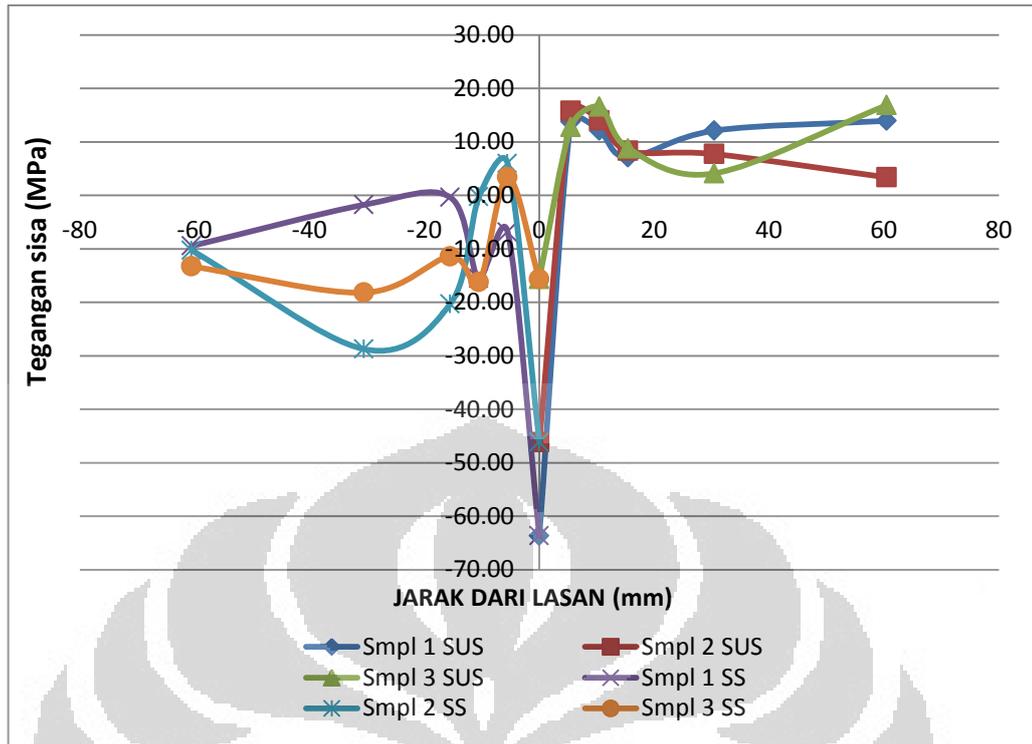


Gambar 4.14. Grafik tegangan sisa pada pelat 10 mm

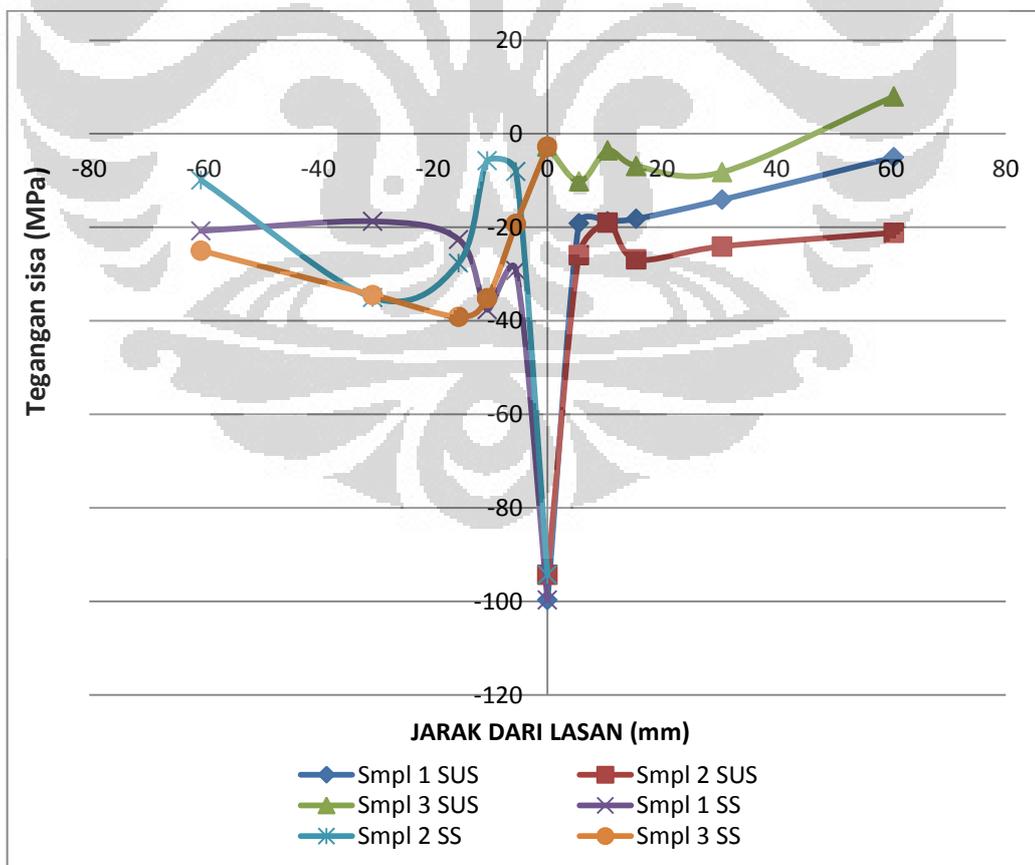


Gambar 4.15. Grafik tegangan sisa pada pelat 12 mm

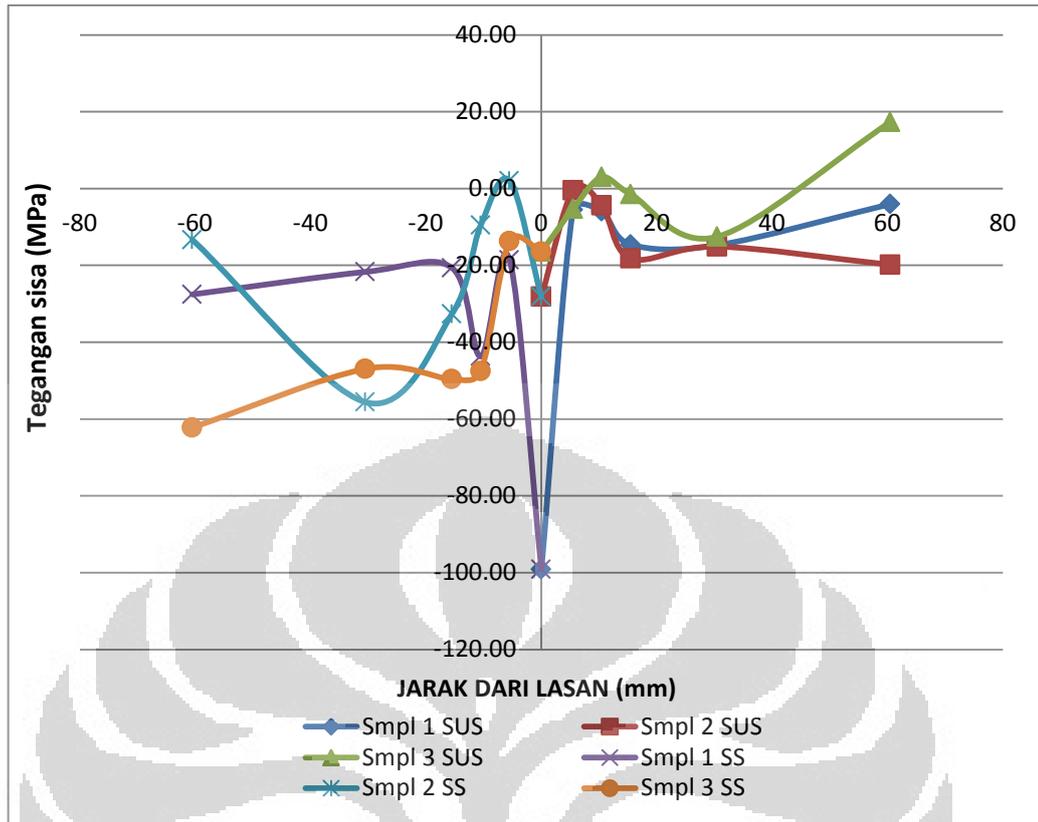
Grafik pada Gambar 4.16 sampai 4.18 menunjukkan perbandingan nilai tegangan sisa pada arah transversal, normal, dan axial pada ketiga sampel. Dari ketiga grafik tersebut terlihat bahwa sampel 3, yaitu pelat dengan ketebalan 12 mm, memiliki nilai distribusi tegangan sisa yang paling besar pada daerah lasan, yaitu sebesar -15,650 MPa pada arah transversal, -2,716 MPa pada arah normal, dan -16,462 MPa pada arah axial. Kemudian diikuti dengan nilai tegangan sisa pada sampel 2, dan sampel 1, masing – masing sebagai berikut, -46,146 MPa dan -63,658 MPa untuk arah transversal, -94,302 MPa dan -99,718 MPa untuk arah normal, dan -28,162 MPa dan -99,118 MPa untuk arah axial. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tebal pelat, maka tegangan sisa yang terjadi akibat proses pengelasan akan semakin besar, karena masukan panas pada pelat yang lebih tebal juga semakin tinggi.



Gambar 4.16. Grafik tegangan sisa pada arah transversal



Gambar 4.17. Grafik tegangan sisa pada arah normal



Gambar 4.18. Grafik tegangan sisa pada arah axial

Tegangan sisa pada pengelasan *butt joint v-groove* pada penelitian kali ini bias disebabkan beberapa hal. Salah satu penyebabnya adalah penyusutan yang terhambat selama pembekuan. Penyusutan logam yang membeku terhambat oleh logam dasar yang memiliki reaksi dari aksi yang diberikan oleh logam las yang membeku.

Di samping itu, transformasi fasa dan perubahan volume selama pengelasan juga mempengaruhi besar tegangan sisa. Meskipun mikrostruktur yang didapat dari penelitian ini tidak menunjukkan adanya fasa martensit, perubahan fasa selama pendinginan berlangsung bisa mengakibatkan tegangan sisa.

BAB V

KESIMPULAN

Dari penelitian yang dilakukan tentang tegangan sisa pada pelat hasil pengelasan dissimilar antara JIS 3101 SS400 dengan JIS SUS304 ini diperoleh beberapa kesimpulan, yaitu :

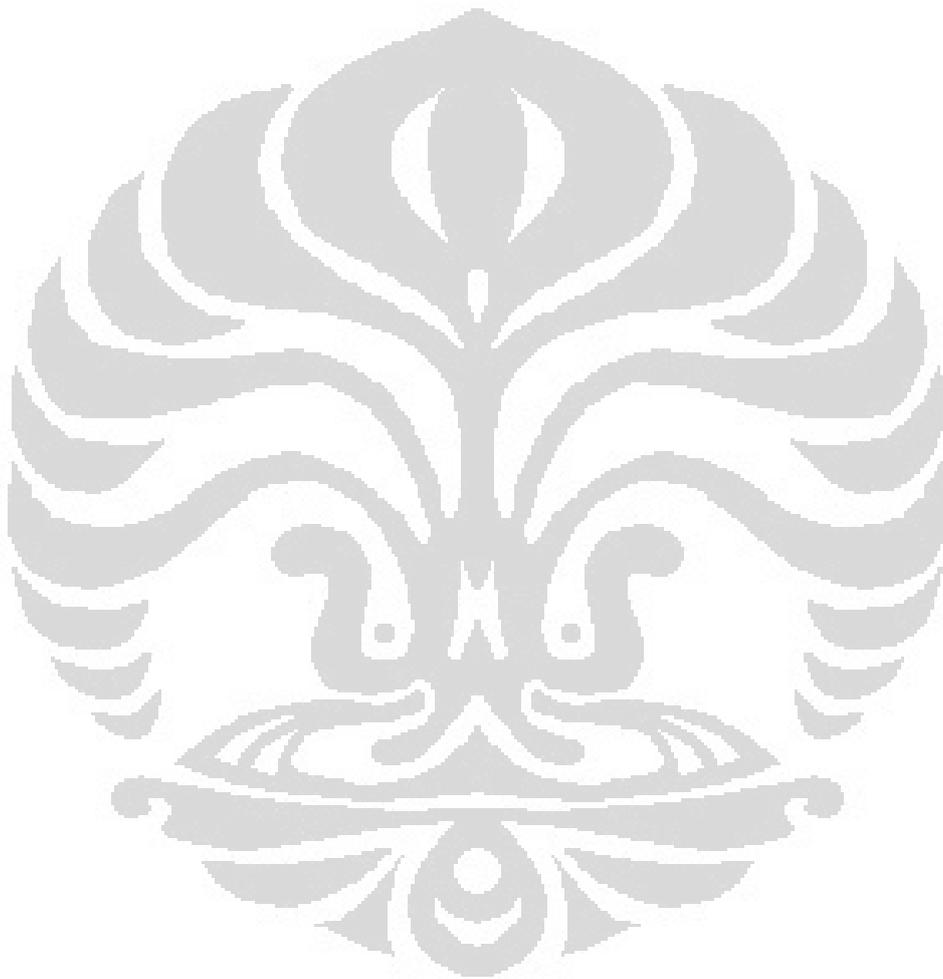
1. Semakin tebal pelat, maka distorsi yang terjadi semakin tinggi. Hal ini disebabkan masukan panas yang dibutuhkan semakin tinggi dengan semakin tebal pelat. Pada penelitian ini didapatkan distorsi pada pelat 8 mm, 10 mm, dan 12 mm berturut-turut adalah $1,07^{\circ}$, $2,14^{\circ}$, dan $3,21^{\circ}$.
2. Ketebalan pelat berpengaruh pada tegangan sisa yang dihasilkan dari proses pengelasan. Semakin tebal pelat maka tegangan sisa yang terjadi akan semakin besar. Pada penelitian ini, pelat dengan ketebalan 12 mm memiliki tegangan sisa paling besar, yaitu -15,650 MPa pada arah transversal, -2,716 MPa pada arah normal, dan -16,462 MPa pada arah axial. kemudian diikuti pelat 10 mm, dan 8 mm berturut-turut sebagai berikut, -46,146 MPa dan -63,658 MPa untuk arah transversal, -94,302 MPa dan -99,718 MPa untuk arah normal, dan -28,162 MPa dan -99,118 MPa untuk arah axial.
3. Pada jarak 5,5 mm dari pusat lasan, kekerasan logam mencapai titik maksimal, baik untuk SUS304 maupun SS400. Tegangan sisa maksimal juga terdapat pada jarak 5,5 mm dari pusat lasan. Dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi tegangan sisa yang ada, kekerasan akan semakin meningkat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Joseph, et all, Evaluation of residual stresses in dissimilar weld joints, p. 700-705, Elsevier, International Journal of Pressure Vessels and Piping 82, (2005)
- [3] Y. C. Lin and C. P. Chou, A New Technique For Reducing The Residual Stress Induced by Welding In Type 304 SS, p. 693-698. Elsevier, Journal of Material Preccessing Technology 48, (1995).
- [3] A. Dhooge, Survey on Reheat Cracking In Austenitic Stainless Steels and Ni Base Alloys, p. 206 – 219, Pergamon, Welding in the world, (1998)
- [4] American Iron and Steel Institute, Welding of Stainless Steel and Other Joining Method, A Designer's HandBook Series No 9002, Nickel Development Institute, 1998.
- [5] George E. Dieter, Materials Selection and Design, ASM Handbook Volum 20, ASM International, 1997.
- [6] <http://www.atlasmaterials.com.au>, 26 Maret 2010.
- [7] <http://www.mesit.com/Tokyo%20supporting%20material.htm>, 17 Juni 2010.
- [8] ASTM A368-95a, Standard Specification for Stainless Steel Wire Strand, United State, 2004.
- [9] Metals Handbook, (2001), Vol. 10 – Materials Characterization, American Society For Metals International,
- [10] Masubuchi, K, 1980. Analysis of Welded Structure, First Ed.Pergamon Press Ltd. Oxford, England.
- [11] SLV Duisburg GmbH, *Welding Engineer's Current Knowledge*, edition 2000,1999

- [12] Metals Handbook, (2002), Residual Stress and Deformation of Steel. Materials Park. USA.
- [13] J. Caron, C. Heinze, C. Schwenk, M. Rethmeier, S.S Babu, J. Lippold. Effect of Continuous Cooling Transformation Variations on Numerical Calculation of Welding-Induced Residual Stresses.
- [14] Farid Moch. Zamil. 2003. ”*Manual Distorsi/Deformasi (Perubahan Bentuk)*”. Diakses 21 Januari 2010, dari migas online. <http://www.migas-indonesia.com/index.php?module=article&sub=article&act=view&id=164>
- [15] Kobelco Welding Handbook – Welding Consumables and Processes, Kobe Steel, Ltd, Japan, 2008.
- [16] Welding Handbook Volume 1, eight Ed, American Welding Society Miami, Florida, USA.
- [17] Sindo Kou, 2002. Welding Metallurgy 2nd ed. “A Wiley Interscience publication.
- [18] SMITH, D.J., LEGGATT, R.H., and WEBSTER, G.A., “Neutron Diffraction Measurement of Residual Stress and Plastic Deformation in Aluminium Alloy Weld”, Journal of Strain Analysis, Vol.23, No.4, 1988.
- [19] ISO VAMAS, ISO/TTA 3, “Polycrystalline Materials – Determination of Residual Stresses by Neutron Diffraction”, 1st ed., 2001.
- [20] CULLITY, B.D., “Element of X-Ray Diffraction”, 2nd ed., Addison-Wesley, Indiana, 1978, p.482.
- [21] DIETER, G.E., “Mechanical Metallurgy”, 3rd ed., McGraw-Hill, Toronto, 1986, pp.6-52.
- [22] BACON, GE, 1962, *Neutron diffraction*, Clarendon Press.

- [23] Easterling, K.E., 1992, *“Introduction to the Physical Metallurgy of Welding”*, Butterworth – Heinemann, London, UK
- [24] Lippold, J.C., Kotecki, D.J., 2005, *“Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steel”*, Wiley Inter Science, Canada.



LAMPIRAN 1

Data Penelitian

Tabel Pengukuran panjang gelombang neutron dengan *slit* 3x10, 3x10 mm

Calculation of DN1 Lambda at 2011/1/18										
RSG-GAS Serpong										
	S	a=	5,43094	Used Si : (NBS 640b)			$\lambda_0 = 1,825$		slit 3x10	
		u(a)		(J Appl. Cryst. (2007)						
		=	0,000011	40, 232-240)						
h	k	l	d	2 θ	u (2 θ)	λ	2 θ cal	1/d \cdot cos θ	$\Delta 2\theta$	u (λ)
1	1	1	3,135555	34,04635	0,006	1,835920	33,8377	0,333536	0,208635	0,000171
2	2	0	1,920127	57,14086	0,00679	1,836558	56,7485	0,593010	0,392348	0,000109
3	1	1	1,637490	68,22276	0,00915	1,836620	67,7324	0,737595	0,490369	0,000118
3	3	1	1,245943	94,96842	0,02195	1,836747	94,1721	1,187648	0,796352	0,000176
			Lambda(avr) 111 to 331 = 1,836461							
			u(lambda)= 0,000293							

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

Calculation of DN1 Lambda at 2011/1/18										
RSG-GAS Serpong										
	S	a=	5,43094	Used Si : (NBS 640b)			$\lambda_0 = 1,825$		slit 3x3	
		u(a)		(J Appl. Cryst. (2007)						
		=	0,000011	40, 232-240)						
h	k	l	d	2 θ	u (2 θ)	λ	2 θ cal	1/d \cdot cos θ	$\Delta 2\theta$	u (λ)
1	1	1	3,135555	34,109	0,02837	1,839223	33,8377	0,333593	0,271759	0,000807
2	2	0	1,920127	57,286	0,02579	1,840835	56,7485	0,593420	0,537722	0,000412
3	1	1	1,637490	68,347	0,03234	1,839547	67,7324	0,738135	0,614113	0,000416
4	0	0	1,357735	85,307	0,03234	1,839896	84,4549	1,001433	0,851791	0,000306
								Intercept = 0,000114		
			Lambda(avr) 111 to 331 = 1,839875				2Theta correction = -0,042254			
			u(lambda)= 0,001043							

Tabel tabel hasil pengukuran tegangan sisa dengan metode difraksi neutron sampel 1.

Slit Incident (size, distance)	3x10, 100		
Slit Detector (size, distance)	3x10, 140		
Lambda	1.836993	+/-	0.00029
Delta 2Theta	-0.0177		

Bahan	Arah	Comment	Position	Y0	+/- Y0	Xc	+/- Xc	w
		d0 filler	d0 filler	68.586	15.503	92.460	0.004	0.734
		d0(powder)	d0 powder	57.674	7.608	92.687	0.017	0.986
SUS	Transv	#1(220) d0	d0 transv (bulk)	12.2224	3.160	92.599	0.008	0.692
		#1(220) 0	0	7.330	2.795	92.495	0.009	0.662
		#1(220)5.5	5.5	6.225	1.434	92.561	0.010	0.652
		#1(220)10.5	10.5	7.753	1.748	92.571	0.010	0.593
		#1(220)15.5	15.5	7.344	2.340	92.587	0.013	0.651
		#1(220)30.5	30.5	4.031	2.695	92.564	0.015	0.722
		#1(220)60.5	60.5	6.296	1.716	92.588	0.011	0.696
	Norm	#1 (220)d0	d0 norm (bulk)	12.674	5.229	92.587	0.006	0.674
		#1 (220)0	0	6.098	2.213	92.776	0.018	0.629
		#1(220)5.5	5.5	6.238	2.891	92.717	0.011	0.670
		#1(220)10.5	10.5	7.531	2.359	92.711	0.008	0.649
		#1(220)15.5	15.5	7.793	2.581	92.684	0.009	0.686
		#1(220)30.5	30.5	7.751	2.947	92.668	0.010	0.639
		#1(220)60.5	60.5	6.703	2.924	92.635	0.010	0.657

Bahan / arah	+/- w	A	+/- A	Xc correct	uStrain	+/- uStrain	d (A)	uStrain
SUS / Transv	0.013	1518.56	33.646	92.477			1.2718	
	0.068	197.886	19.966	92.705			1.269	
	0.021	190.755	6.916	92.617			1.270	
0mm	0.022	154.142	5.985	92.513	-297	80	1.271	-297
5,5mm	0.025	67.803	3.053	92.579	318	91	1.271	318
10,5mm	0.026	71.663	3.491	92.589	232	94	1.271	232
15,5mm	0.033	85.572	4.973	92.605	100	111	1.270	100
30,5mm	0.040	89.306	6.043	92.582	295	127	1.271	295
60,5mm	0.029	76.287	3.777	92.605	98	97	1.270	98
SUS / Norm	0.017	385.886	11.259	92.605			1.270	
0mm	0.046	55.993	4.608	92.794	-2634	154	1.268	-2634
5,5mm	0.030	120.488	6.215	92.735	-1082	107	1.269	-1082
10,5mm	0.020	140.627	4.992	92.728	-1027	83	1.269	-1027
15,5mm	0.023	139.164	5.616	92.701	-805	90	1.269	-805
30,5mm	0.026	130.782	6.230	92.685	-670	101	1.270	-670
60,5mm	0.026	132.958	6.231	92.652	-396	100	1.270	-396

Slit Incident (size, distance)		3x3, 100	
Slit Detector (size, distance)		3x10, 140	
Lambda	1.835352	+/-	0.0004
Delta 2Theta	0.014484		

Bahan	Arah	Comment	Position d0 axial (bulk)	Y0	+/- Y0	Xc	+/- Xc	w
SUS	Axial	#1(220)d0		12.236	3.1762	92.613	0.008	0.7002
		#1(220)0	0	13.028	4.1773	92.696	0.055	0.7974
		#1(220)5.5	5.5	13.321	2.3692	92.637	0.017	0.6769
		#1(220)10.5	10.5	14.71	1.7646	92.637	0.011	0.6238
		#1(220)15.5	15.5	17.164	2.8718	92.681	0.018	0.6037
		#1(220)30.5	30.5	11.977	4.1498	92.698	0.024	0.7249
		#1(220)60.5	60.5	14.566	3.4352	92.653	0.009	0.6712
SS	Axial	#1 (200)d0		16.109	3.228	79.685	0.009	0.6612
		#1(200)5.5	-5.5	13.617	3.7647	79.722	0.024	0.7318
		#1(200)10.5	-10.5	18.736	3.5546	79.829	0.143	0.6538
		#1(200)5.5	-15.5	17.507	2.5808	79.757	0.021	0.6354
		#1(200)30.5	-30.5	12.754	1.8507	79.767	0.016	0.6832
		#1(200)60.5	-60.5	15.298	2.0241	79.782	0.017	0.6288

Bahan / arah	+/- w	A	+/- A	Xc correct	uStrain	+/- uStrain	d (A)	uStrain
SUS / Axial	0.0231	181.056	6.99968	92.598			1.269	
0mm	0.2076	22.6992	8.65536	92.682	-1704	461	1.268	-2595
5,5mm	0.0502	52.1387	4.82627	92.622	-200	161	1.269	-200
10,5mm	0.0297	61.1256	3.46671	92.623	-204	113	1.269	-204
15,5mm	0.0451	61.0863	5.52472	92.667	-570	163	1.269	-570
30,5mm	0.0745	65.6992	8.72848	92.684	-711	209	1.268	-711
60,5mm	0.0257	146.418	6.96406	92.638	-333	102	1.269	-333
SS / Axial	0.0251	150.802	6.78701	79.671			1.433	
5,5mm	0.0797	53.3832	7.79486	79.707	-382	270	1.432	-382
10,5mm	0.1934	53.497	23.56023	79.815	-1502	1497	1.430	-1502
15,5mm	0.0515	59.913	5.53283	79.743	-751	239	1.431	-751
30,5mm	0.0425	56.2485	4.06625	79.753	-858	196	1.431	-858
60,5mm	0.0425	57.939	4.33047	79.767	-1010	200	1.431	-1010

Tabel tabel hasil pengukuran tegangan sisa dengan metode difraksi neutron sampel 2.

Slit Incident (size, distance)	3x10, 100		
Slit Detector (size, distance)	3x10, 140		
Lambda	1.836993	+/-	0.000293
Delta 2Theta	-0.0177		

Bahan	Arah	Comment	Position	Y0	+/- Y0	Xc	+/- Xc	w
		d0 filler	d0 filler	68.586	15.503	92.460	0.004	0.734
SUS	Trans	#2(220) d0	d0 trans (bulk)	8.46432	1.90991	92.69995	0.01176	0.6834
		#2(200) 5.5	0	7.652	1.740	92.523	0.014	0.625
		#2(200)10.5	5.5	5.852	1.306	92.559	0.012	0.715
		#2(200)15.5	10.5	7.187	1.664	92.575	0.015	0.613
		#2(200)30.5	15.5	6.716	1.933	92.571	0.015	0.665
		#2(200)60.5	30.5	4.085	1.764	92.585	0.013	0.638
		#2(200)60.5	60.5	5.137	1.840	92.608	0.015	0.719
SUS	Normal	#2(220) d0	d0 Norm(bulk)	13.408	5.638	92.584	0.007	0.721
		#2(220) 0	0	7.085	1.577	92.899	0.018	0.561
		#2(220) 5.5	5.5	4.597	3.162	92.767	0.011	0.718
		#2(220)10.5	10.5	4.461	3.472	92.715	0.012	0.691
		#2(220)15.5	15.5	4.715	3.121	92.728	0.010	0.705
		#2(220)30.5	30.5	4.126	1.890	92.716	0.006	0.686
		#2(220)60.5	60.5	5.880	2.205	92.683	0.008	0.680
SUS	Axial	d0 filler	d0 filler	68.586	15.503	92.460	0.004	0.734
		#2(220) d0	d0 axial(bulk)	13.40788	5.63805	92.58378	0.00716	0.72053
		#2(220) 0	0	17.2019	2.87431	92.41612	0.00863	0.61268
		#2(220) 5.5	5.5	16.87915	3.23841	92.56867	0.01772	0.65513
		#2(220)10.5	10.5	17.89457	3.57961	92.60151	0.01819	0.65738
		#2(220)15.5	15.5	14.63841	2.92958	92.66102	0.02201	0.73693
		#2(220)30.5	30.5	16.21178	3.53558	92.6461	0.01992	0.67239
		#2(220)60.5	60.5	16.49804	3.25172	92.67221	0.02216	0.74857

Bahan/ Arah	+/- w	A	+/- A	Xc correct	uStrain	+/- uStrain	d (A)	uStrain
SUS / Trans	0.013	1518.565	33.646	92.477			1.27175	
	0.03092	77.93497	4.16773	92.718			1.26921	
0mm	0.035	56.033	3.600	92.541	-532	122	1.27108	-532
5,5mm	0.033	52.441	2.899	92.576	1178	170	1.27070	1178
10,5mm	0.039	47.965	3.435	92.592	1044	189	1.27053	1044
15,5mm	0.038	62.347	4.160	92.589	1074	183	1.27057	1074
30,5mm	0.033	61.558	3.712	92.603	959	176	1.27043	959
60,5mm	0.040	60.443	4.112	92.626	767	184	1.27018	767
SUS / Norm	0.020	380.717	12.630	92.601			1.27044	
0mm	0.041	37.705	3.102	92.917	-3653	151	1.26711	-3653
5,5mm	0.029	145.778	7.021	92.785	-1526	106	1.26850	-1526
10,5mm	0.031	140.348	7.542	92.733	-1094	114	1.26905	-1094
15,5mm	0.027	148.057	6.885	92.746	-1203	104	1.26891	-1203
30,5mm	0.017	143.409	4.133	92.734	-1102	80	1.26904	-1102
60,5mm	0.020	135.286	4.782	92.700	-822	88	1.26939	-822
SUS / Axial	0.013	1518.565	33.646	92.477			1.2717547	
	0.01964	380.7169	12.62996	92.5693			1.2707794	
0mm	0.02249	127.6723	5.5721	92.40164	634.0531	81.01917	1.272561	634.0531
5,5mm	0.04955	69.1869	6.43538	92.55419	126.1	152.6547	1.2709397	126.1
10,5mm	0.05108	76.23735	7.25933	92.58703	-147.902	156.4704	1.2705915	-147.902
15,5mm	0.0667	52.36388	6.22735	92.64654	-643.836	187.6568	1.2699613	-643.836
30,5mm	0.05687	69.10551	7.2125	92.63162	-519.57	170.5598	1.2701192	-519.57
60,5mm	0.07183	54.70149	6.92638	92.65773	-737.004	188.8865	1.2698429	-737.004

Slit Incident (size, distance)	3x3, 100		
Slit Detector (size, distance)	3x3, 114		
Lambda	1.835352	+/-	0.000436
Delta 2Theta	0.014484		

Bahan	Arah	Comment	Position	Y0	+/- Y0	Xc	+/- Xc	w
SS	Trans	#2(200) d0	d0 trans (bulk)	11.119	2.714	79.656	0.010	0.687
		#2(200)5.5	-5.5	12.032	2.360	79.612	0.008	0.649
		#2(200)10.5	-10.5	11.331	3.389	79.630	0.012	0.680
		#2(200)15.5	-15.5	12.048	2.229	79.658	0.007	0.586
		#2(200)30.5	-30.5	13.077	4.771	79.650	0.017	0.646
		#2(200)60.5	-60.5	12.318	3.020	79.670	0.011	0.671
SS	Normal	#2(200) d0	d0 Norm(bulk)	12.207	3.614	79.733	0.009	0.634
		#2(200) 5.5	-5.5	11.354	2.663	79.791	0.008	0.595
		#2(200)10.5	-10.5	7.813	3.137	79.746	0.011	0.678
		#2(200)15.5	-15.5	8.212	3.849	79.789	0.018	0.653
		#2(200)30.5	-30.5	6.447	2.834	79.772	0.011	0.665
		#2(200)60.5	-60.5	8.015	3.048	79.744	0.012	0.649

Bahan / Arah	+/- w	A	+/- A	Xc correct	uStrain	+/- uStrain	d (A)	uStrain
SS / Transv	0.027	121.509	5.815	79.674			1.434	
5,5mm	0.020	132.539	4.922	79.630	455	132	1.434	455
10,5mm	0.032	126.956	7.223	79.647	274	162	1.434	274
15,5mm	0.018	125.184	4.394	79.676	-23	128	1.434	-23
30,5mm	0.045	120.171	9.949	79.667	67	210	1.434	67
60,5mm	0.029	121.982	6.370	79.688	-151	153	1.434	-151
SS/ Norm	0.024	170.855	7.416	79.750			1.433	
5,5mm	0.021	132.171	5.306	79.809	-614	130	1.432	-614
10,5mm	0.031	122.305	6.675	79.764	-144	153	1.432	-144
15,5mm	0.048	92.495	8.011	79.806	-585	211	1.432	-585
30,5mm	0.029	114.069	5.958	79.790	-414	149	1.432	-414
60,5mm	0.032	110.990	6.333	79.762	-122	157	1.432	-122

Slit Incident (size, distance)	3x3, 100		
Slit Detector (size, distance)	3x3, 114		
Lambda	1.835352	+/-	0.000436
Delta 2Theta	0.014484		

Bahan	Arah	Comment	Position	Y0	+/- Y0	Xc	+/- Xc	w
SS	Axial	#2(200)d0	d0	11.85058	2.9526	79.66443	0.00524	0.66478
		#2(200)5.5	-5.5	11.41787	5.99953	79.64946	0.02474	0.65124
		#2(200)10.5	-10.5	13.67347	2.00141	79.70578	0.01248	0.59982
		#2(200)15.5	-15.5	14.83458	2.1457	79.75686	0.01379	0.56537
		#2(200)30.5	-30.5	15.13818	1.88838	79.85466	0.01631	0.5137
		#2(200)60.5	-60.5	18.90075	2.54242	79.70099	0.00932	0.57977

Bahan/ Arah	+/- w	A	+/- A	Xc correct	uStrain	+/- uStrain	d (A)	uStrain
SS/ Axial	0.01404	247.5471	6.21639	79.64995			1.432874	
5,5mm	0.07843	70.02334	11.16178	79.63498	156.6907	276.1476	1.433098	156.6907
10,5mm	0.03111	70.99551	4.10694	79.6913	-432.466	161.8845	1.432254	-432.466
15,5mm	0.03263	66.84404	4.30199	79.74238	-965.999	172.9609	1.431489	-965.999
30,5mm	0.03698	45.11633	3.55544	79.84018	-1985.38	195.0966	1.430029	-1985.38
60,5mm	0.02331	105.5491	4.88398	79.68651	-382.395	136.6631	1.432326	-382.395

Tabel tabel hasil pengukuran tegangan sisa dengan metode difraksi neutron sampel 3.

Slit Incident (size, distance)	3x10, 100		
Slit Detector (size, distance)	3x10, 114		
Lambda	1.836993	+/-	0.000293
Delta 2Theta	-0.0177		

Bahan	Arah	Comment	Position	Y0	+/- Y0	Xc	+/- Xc	w
SUS	Trans	#3(220) d0	d0 (filler)	8.63693	3.11255	92.62845	0.01224	0.65444
		#3(220)0	0	4.448	2.686	92.520	0.022	0.760
		#3(220)5.5	5.5	6.571	2.228	92.525	0.020	0.657
		#3(220)10.5	10.5	5.335	1.975	92.528	0.015	0.630
		#3(220)15.5	15.5	9.742	3.499	92.561	0.012	0.650
		#3(220)30.5	30.5	11.097	1.872	92.567	0.007	0.636
		#3(220)60.5	60.5	12.577	1.959	92.571	0.007	0.641
SUS	Norm	#3(220)d0		15.748	6.188	92.624	0.009	0.675
		#3(220)0	0	16.229	2.024	92.420	0.020	0.673
		#3(220)5.5	5.5	12.840	4.650	92.698	0.008	0.726
		#3(220)10.5	10.5	11.569	6.024	92.680	0.009	0.713
		#3(220)15.5	15.5	13.205	4.239	92.678	0.006	0.694
		#3(220)30.5	30.5	8.104	3.590	92.658	0.011	0.661
		#3(220)60.5	60.5	6.586	2.356	92.635	0.008	0.666
SS	Trans	#3(200) d0		29.987	2.661	79.668	0.006	0.627
		#3(200)5.5	-5.5	14.439	2.022	79.590	0.007	0.564
		#3(200)10.5	-10.5	11.640	2.568	79.607	0.009	0.604
		#3(200)15.5	-15.5	11.222	2.618	79.570	0.015	0.591
		#3(200)30.5	-30.5	12.792	3.431	79.620	0.019	0.557
		#3(200)60.5	-60.5	7.706	2.220	79.583	0.012	0.645
SS	Norm	#3(200)d0		11.851	2.953	79.664	0.005	0.665
		#3(200)5.5	-5.5	6.161	1.508	79.752	0.013	0.613
		#3(200)10.5	-10.5	16.630	7.923	79.742	0.072	0.639
		#3(200)15.5	-15.5	9.08201	1.666	79.769	0.010	0.662
		#3(200)30.5	-30.5	9.016	2.065	79.736	0.011	0.642
		#3(200)60.5	-60.5	11.216	2.864	79.665	0.014	0.614

Bahan / Arah	+/- w	A	+/- A	Xc correct	uStrain	+/- uStrain	d (A)	uStrain
SUS / Transv	0.03159	117.9244	6.61933	92.646			1.270	
0mm	0.062	61.232	6.164	92.538	-506	187	1.271	-506
5,5mm	0.051	53.327	4.796	92.542	865	194	1.271	865
10,5mm	0.039	57.812	4.103	92.545	841	165	1.271	841
15,5mm	0.032	130.331	7.392	92.579	563	145	1.271	563
30,5mm	0.019	120.435	3.951	92.585	509	118	1.271	509
60,5mm	0.019	120.345	4.119	92.589	477	120	1.271	477
SUS / Norm	0.023	336.737	13.375	92.641			1.270	
0mm	0.052	47.164	4.361	92.438	332	174	1.272	332
5,5mm	0.022	279.245	10.438	92.716	-620	99	1.269	-620
10,5mm	0.025	321.332	13.401	92.697	-464	104	1.269	-464
15,5mm	0.017	313.506	9.309	92.696	-451	90	1.269	-451
30,5mm	0.029	148.038	7.661	92.676	-289	118	1.270	-289
60,5mm	0.021	133.483	5.043	92.653	-97	99	1.270	-97
SS / Transv	0.015	199.832	5.432	79.686			1.434	
5,5mm	0.018	110.623	3.943	79.607	819	97	1.435	819
10,5mm	0.023	112.493	5.003	79.625	636	113	1.435	636
15,5mm	0.037	72.533	5.199	79.587	1027	168	1.435	1027
30,5mm	0.047	70.746	6.611	79.638	499	210	1.434	499
60,5mm	0.031	81.552	4.606	79.601	889	138	1.435	889
SS / Norm	0.014	247.547	6.216	79.682			1.434	
5,5mm	0.034	47.780	3.053	79.770	-913	150	1.432	-913
10,5mm	0.188	47.516	16.373	79.760	-812	757	1.433	-812
15,5mm	0.027	71.676	3.503	79.787	-1091	120	1.432	-1091
30,5mm	0.029	81.113	4.277	79.753	-746	128	1.433	-746
60,5mm	0.035	88.053	5.811	79.683	-4	155	1.434	-4

Slit Incident (size, distance)	3x3, 100		
Slit Detector (size, distance)	3x3, 114		
Lambda	1.839875	+/-	0.001043
Delta 2Theta	-0.04225		

Bahan	Arah	Comment	Position	Y0	+/- Y0	Xc	+/- Xc	w
SUS	Axial	#3(220) d0		10.09357	2.63718	92.64478	0.01056	0.62303
		#3 (220)0	0	4.80038	0.66982	92.69025	0.09375	0.59123
		#3(220)5.5	5.5	14.19281	1.28693	92.68119	0.02088	0.65818
		#3(220)10.5	10.5	16.49733	2.69135	92.6496	0.0441	0.64187
		#3(220)15.5	15.5	15.12378	1.75587	92.6572	0.02113	0.61675
		#3(220)30.5	30.5	14.57909	3.24433	92.71326	0.04042	0.6737
		#3(220)60.5	60.5	13.40788	5.63805	92.58378	0.00716	0.72053
SS	Axial	#3(200) d0	d0	16.89344	2.35562	79.66231	0.00811	0.61492
		#3(200)5.5	-5.5	15.29065	3.3246	79.70861	0.02665	0.70634
		#3(200)10.5	-10.5	12.00209	4.59191	79.83056	0.02836	0.75755
		#3(200)15.5	-15.5	16.9386	2.45048	79.84382	0.02219	0.62712
		#3(200)30.5	-30.5	11.37226	2.59847	79.82527	0.01485	0.67249
		#3(200)60.5	-60.5	17.23027	2.45409	79.9358	0.02837	0.54135

Bahan / Arah	+/- w	A	+/- A	Xc correct	uStrain	+/- uStrain	d (A)	uStrain
SUS / Axial	0.02651	112.4393	5.46057	92.687			1.272	
0mm	0.24823	2.54459	1.26259	92.733	-2125	785	1.271	-559
5,5mm	0.05936	23.06235	2.56221	92.723	-303	195	1.271	-303
10,5mm	0.12408	22.22852	5.28146	92.692	-40	378	1.271	-40
15,5mm	0.05691	30.91313	3.39321	92.699	-103	197	1.271	-103
30,5mm	0.1191	29.3768	6.53594	92.756	-570	347	1.271	-570
60,5mm	0.01964	380.7169	12.62996	92.62603	508	106	1.272	508
SS/ Axial	0.02061	123.4306	4.77674	79.705			1.436	
5,5mm	0.09398	34.01894	6.45373	79.751	-484	291	1.435	-484
10,5mm	0.1138	41.79324	9.25634	79.873	-1755	307	1.433	-1755
15,5mm	0.06843	31.47585	4.46814	79.886	-1893	246	1.433	-1893
30,5mm	0.05007	48.69285	4.92124	79.868	-1700	176	1.433	-1700
60,5mm	0.07207	28.33935	4.37155	79.978	-2848	307	1.431	-2848

LAMPIRAN 2

Foto Proses Pengelasan



Foto peralatan yang digunakan



Foto mesin las yang digunakan



Foto persiapan pengelasan



Foto proses pengelasan

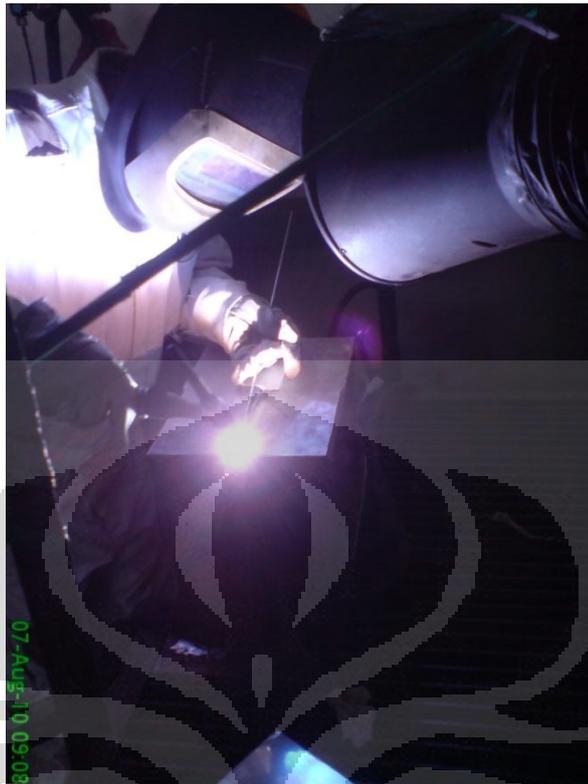


Foto proses pengelasan 2



Foto proses pengelasan 3



Foto pendinginan dengan media pasir



Foto saluran untuk backing gas



Foto saluran untuk backing gas 2



Foto saluran untuk backing gas 3



Foto Posisi pengelasan