



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH KETEBALAN PELAT TERHADAP
TEGANGAN SISA DAN DISTORSI ANGULAR
PADA PELAT BAJA JIS G 3101 SS400 DILAS DENGAN
MENGUNAKAN PROSES FCAW SEMI-OTOMATIS**

SKRIPSI

**ABDILLAH ENSTEIN
0606074464**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN METALURGI DAN MATERIAL
JUNI 2010**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH KETEBALAN PELAT TERHADAP
TEGANGAN SISA DAN DISTORSI ANGULAR
PADA PELAT BAJA JIS G 3101 SS400 DILAS DENGAN
MENGUNAKAN PROSES FCAW SEMI-OTOMATIS**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**ABDILLAH ENSTEIN
0606074464**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN METALURGI DAN MATERIAL
JUNI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Abdillah Enstein
NPM : 0606074464
Tanda Tangan :
Tanggal : 5 Juli 2010



LEMBAR PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Abdillah Enstein
NPM : 0606074464
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Pengaruh Ketebalan Pelat Terhadap Besarnya Tegangan Sisa dan Distorsi pada Baja JIS G3101 SS400 Dilas dengan Metode FCAW Semi-otomatis

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, DEA. ()

Penguji 2 : Dr. Ir. Badrul Munir M.Sc. ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 5 Juli 2010

KATA PENGANTAR

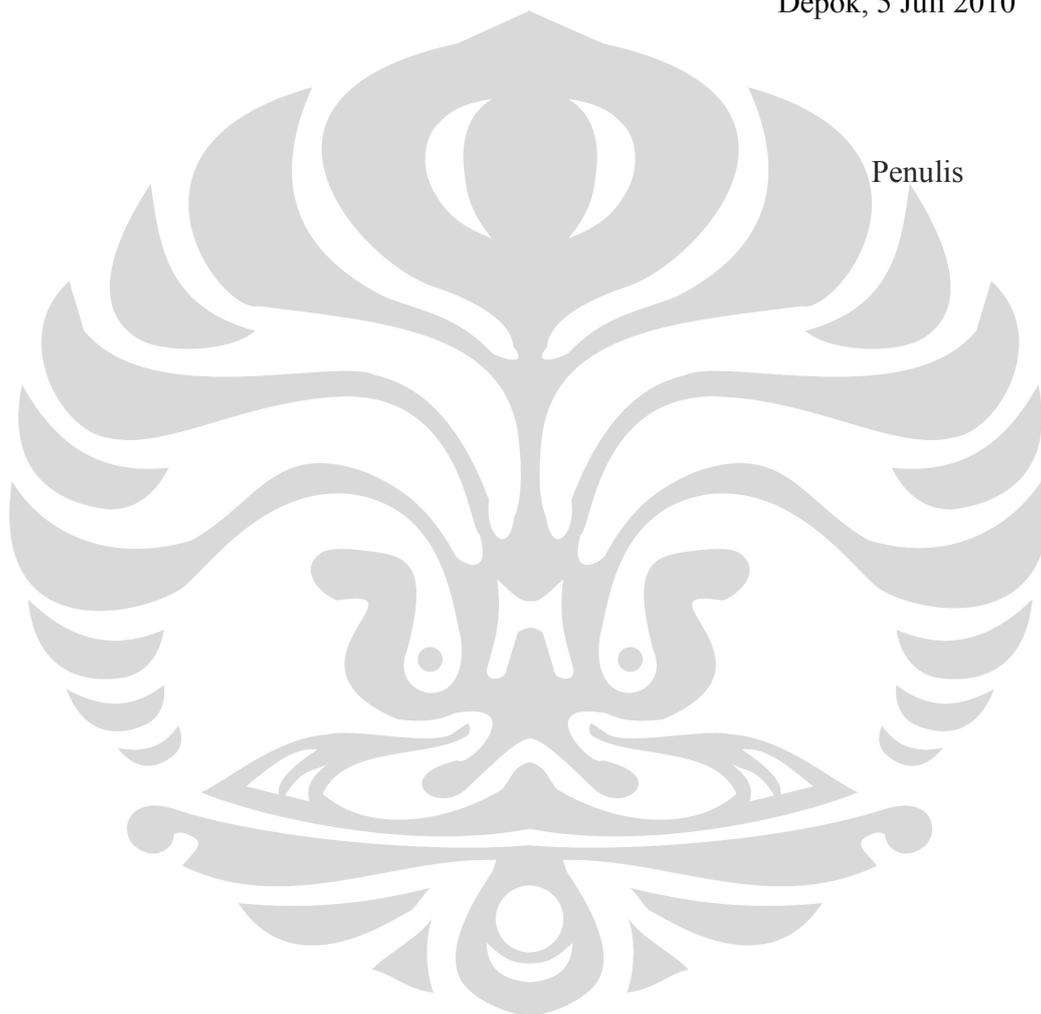
Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, karena atas ridho dan perkenaan-Nya, penulis akhirnya dapat menyelesaikan skripsi ini. Skripsi ini ditulis untuk memenuhi salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan, dorongan, saran, dan bimbingan dari berbagai pihak penulis akan mengalami kesulitan dan berbagai hambatan dalam menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, dengan ucapan yang paling tulus, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Dr. Ir. Winarto, MSc , selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan dan nasehat yang berharga sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik.
2. Bapak Dr. Ir Muhammad Anis, M.Met yang telah menyediakan waktunya kepada penulis untuk mendiskusikan hal yang berhubungan dengan skripsi yang sedang penulis kerjakan.
3. Ahmad Ashari, ST yang telah banyak membantu dalam proses pengelasan sampel pengujian.
4. Teman-teman Angkatan 2006, khususnya yang telah bersama-sama mengerjakan tugas akhir yang telah memberikan bantuan selama pengerjaan skripsi ini
5. Aulia Sani, rekan sekaligus sahabat yang telah banyak membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
6. Anindyastari Saraswati, yang juga telah membantu penulis agar skripsi yang tengah dikerjakan berjalan dengan lancar.
7. Dan secara khusus kepada kedua orang tuaku dan adikku yang telah banyak memberikan bantuan moral dan juga memberikan motivasi kepada penulis untuk dapat menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, penulis berharap semoga Tuhan Yang Maha Esa membalas kebaikan semua pihak yang telah membantu penulis dan penulis juga berharap semoga skripsi ini membawa manfaat dalam pengembangan ilmu.

Depok, 5 Juli 2010

Penulis



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

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

Nama : Abdillah Enstein
NPM : 0606074464
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Departemen : Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

Pengaruh Ketebalan pelat terhadap besarnya tegangan sisa dan distorsi pada baja JIS G3101-SS400 dilas dengan metode FCAW semi-otomatis

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada Tanggal : 5 Juli 2010

Yang menyatakan

(Abdillah Enstein)

ABSTRAK

Nama : Abdillah Enstein
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Pengaruh Ketebalan Pelat Terhadap Tegangan Sisa dan Distorsi Angular pada Pelat Baja JIS G 3101 SS400 Dilas fengan Menggunakan Proses Fcaw Semi-Otomatis

Tegangan sisa dan distorsi adalah dua hal yang sulit dihindari ketika proses pengelasan selesai dilakukan. Distorsi terjadi karena sifat alamiah dari logam cair yang akan menyusut ketika membeku dan akan menghadirkan tegangan sisa. tegangan sisa pada produk hasil las sangat dihindari karena dapat memicu terjadinya retak. Di dalam penelitian ini dilakukan pengukuran distorsi angular yang terjadi akibat proses pengelasan FCAW pada pelat dengan ketebalan 10, 16, dan 20 mm dan juga pengukuran tegangan sisa yang terjadi dengan menggunakan metode difraksi sinar-X. Hasil yang diperoleh memperlihatkan bahwa distorsi angular yang terjadi berbanding lurus dengan ketebalan pelat. Sedangkan pada pengujian tegangan sisa memperlihatkan bahwa daerah terpengaruh panas memiliki tegangan sisa terbesar.

Kata kunci : distorsi angular, tegangan sisa, *flux core arc welding*

ABSTRACT

Name : Abdillah Enstein
Study program : Teknik Metalurgi dan Material
title : Effect of Plate Thickness to Residual Stess and Angular Distortion
on JIS G 3101 SS400 Steel Plate Welded by Semi-Automatic
FCAW Process

Distortion and residual stress are the things that can't be hindered after welding process. Distortion occur because the nature of liquid metal that will be shrinkage after the liquid metal solidify. With the distortion occur, the residual stress will also occur. Residual stress in the weld product restrict to happen because it can lead to cracking. This research is carried out by flux core arc welding with flat (1G) position performed on three steel plates with different thickness. Steel plate used is JIS 3101 SS400 with 10mm, 16mm and 20mm thickness. The residual stress measurement in the weld area and heat affected zone (HAZ) using X-ray diffraction method. The result show that the value of angular distortion proportional with the thickness of the plate and the residual stress value gives that the heat affected zone has the biggest residual stress.

Keyword : angular distortion, residual stress, flux core arc welding

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Ruang Lingkup Penelitian	4
BAB 2 DASAR TEORI.....	5
2.1 Baja Struktural JIS G3101-SS400.....	5
2.2 Pengelasan FCAW (Flux-Cored Arc Welding).....	6
2.3 Metalurgi Las	7
2.3.1 Daerah hasil pengelasan.....	7
2.3.2 Reaksi pembekuan	8
2.3.3 Mikrostruktur logam las.....	9
2.4 Tegangan Sisa.....	10
2.4.1 Faktor-faktor yang mempengaruhi tegangan sisa	11
2.4.2 Distribusi Tegangan Sisa pada proses pengelasan.....	12
2.4.3 Cara mengurangi dan mengendalikan tegangan sisa	14
2.4.4 Pengukuran tegangan sisa	15
2.5 Distorsi	16

2.5.1	Jenis-jenis distorsi	16
2.5.2	Faktor – faktor yang mempengaruhi Distorsi	18
2.5.3	Pengendalian Distorsi.....	20
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN		23
3.1	Diagram Alir Penelitian.....	23
3.2	Persiapan alat dan bahan	24
3.2.1	Bahan	24
3.2.2	Alat.....	25
3.2	Pengelasan	26
3.4	Pengujian dan Pengukuran	26
3.4.1	Pengukuran Penyimpangan Sudut	26
3.4.2	Pengujian Struktur Makro Dan Mikro	27
3.4.3	Pengujian Kekerasan di daerah Logam Las, Haz dan Logam Induk	28
3.4.4	Pengujian Tegangan Sisa	28
BAB 4 HASIL PENELITIAN & PEMBAHASAN		30
4.1	Hasil dan Pembahasan Pengukuran Distorsi Angular	30
4.2	Hasil dan Pembahasan Pengujian Makrostruktur	34
4.3	Hasil dan Pembahasan Pengujian Mikrostruktur	38
4.3.1	Mikrostruktur logam dasar.....	44
4.3.2	Mikrostruktur daerah HAZ (<i>Heat Affected Zone</i>).....	45
4.3.3	Mikrostruktur daerah kampuh las (<i>weld pool</i>).....	46
4.4	Hasil dan Pembahasan Pengujian Kekerasan Mikro.....	47
4.5	Data dan Pembahasan Tegangan Sisa	52
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN		55
5.1	Kesimpulan.....	55
5.2	Saran	56
DAFTAR REFERENSI		57
LAMPIRAN.....		59

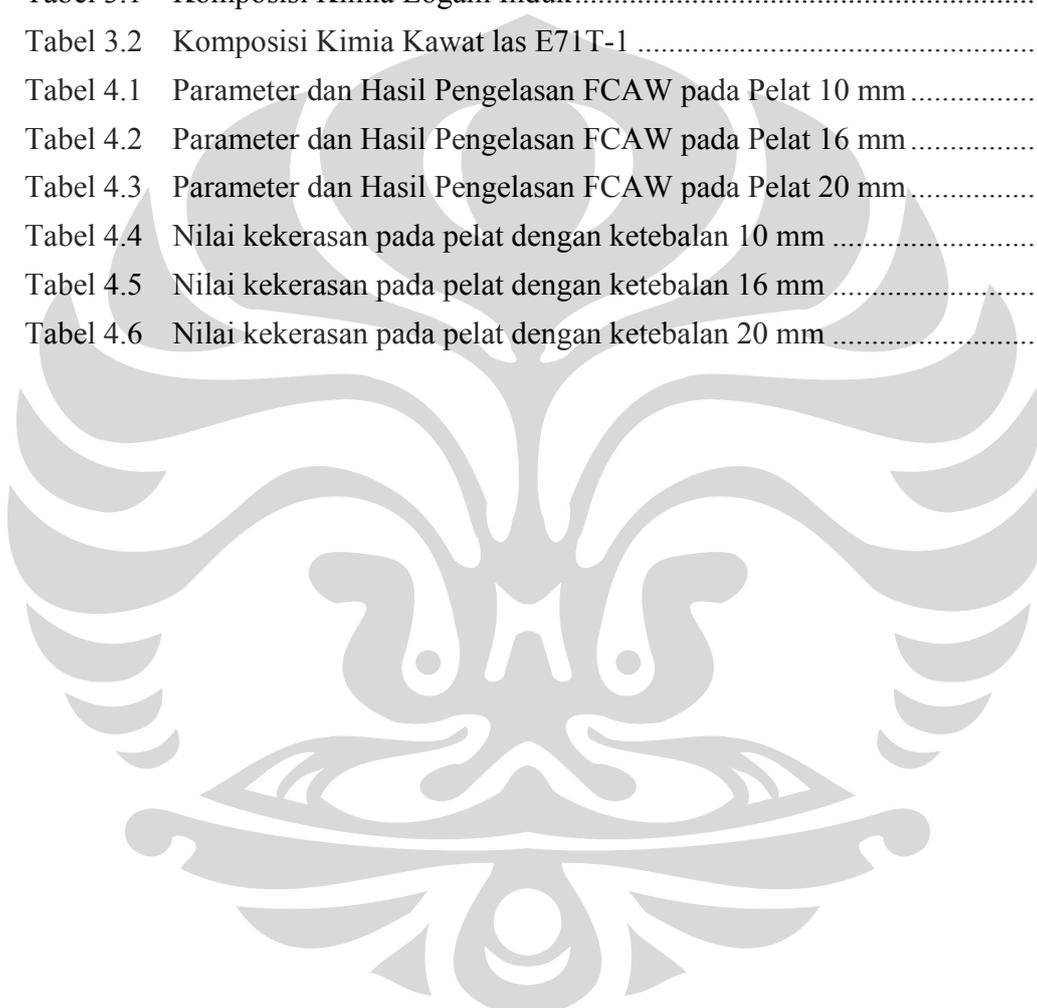
DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Skematis Pengelasan FCAW dengan menggunakan gas pelindung.....	6
Gambar 2.2	Mikro struktur dari as-cast carbon steel. A-B : Fusion Zone, C-F : HAZ , G ; Base metal.....	8
Gambar 2.3	Konsep pertumbuhan kristal epitaksial.....	9
Gambar 2.4	Ilustrasi mekanisme terjadinya tegangan sisa.....	10
Gambar 2.5	Hubungan antara panjang las dengan tegangan sisa.....	12
Gambar 2.6	Distribusi tegangan termal.....	13
Gambar. 2.7	Pengaruh waktu dan temperatur pemanasan terhadap tegangan sisa ..	15
Gambar 2.8	Jenis-jenis distorsi	18
Gambar 2.9	<i>Overweld</i>	20
Gambar 2.10	<i>Intermittenet welding</i>	21
Gambar 2.11	<i>Presetting</i>	21
Gambar 2.12	Berbagai macam bentuk dari jig.....	22
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian.....	23
Gambar 3.2	Ukuran material yang dilakukan pengelasan.....	24
Gambar 3.3	Bentuk sambungan	24
Gambar 3.4	Cara pengukuran besar distorsi	26
Gambar 3.5	Lokasi pengambilan Foto mikro dan uji kekerasan.....	27
Gambar 3.6	Susunan peralatan difraksi sinar x.....	29
Gambar 4.1	Grafik pengaruh ketebalah terhadap distorsi angular.....	32
Gambar 4.2	Makrostruktur hasil pengelasan FCAW pada pelat dengan ketebalan 10 mm (perbesaran 7x).....	34
Gambar 4.3	Makrostruktur hasil pengelasan FCAW pada pelat dengan ketebalan 16 mm (perbesaran 9x).....	34
Gambar 4.4	Makrostruktur hasil pengelasan FCAW pada pelat dengan ketebalan 20 mm (perbesaran 8x).....	35
Gambar 4.5	Daerah – daerah pada logam hasil las	36
Gambar 4.6	Mikrostruktur bagian kampuh las (<i>weld pool</i>) hasil las FCAW dengan ketebalan 10 mm.....	38

Gambar 4.7	Mikrostruktur bagian HAZ kasar hasil las FCAW dengan ketebalan 10 mm.....	38
Gambar 4.8	Mikrostruktur bagian HAZ halus hasil las FCAW dengan ketebalan 10 mm.....	39
Gambar 4.9	Mikrostruktur bagian logam dasar hasil las FCAW dengan ketebalan 10 mm.....	39
Gambar 4.14	Mikrostruktur bagian kampuh las (<i>weld pool</i>) hasil las FCAW dengan ketebalan 16 mm.....	40
Gambar 4.15	Mikrostruktur bagian HAZ kasar hasil las FCAW dengan ketebalan 16 mm.....	40
Gambar 4.16	Mikrostruktur bagian HAZ halus hasil las FCAW dengan ketebalan 16 mm.....	41
Gambar 4.17	Mikrostruktur bagian logam dasar hasil las FCAW dengan ketebalan 16 mm.....	41
Gambar 4.13	Mikrostruktur bagian kampuh las (<i>weld pool</i>) hasil las FCAW dengan ketebalan 20 mm.....	42
Gambar 4.12	Mikrostruktur bagian HAZ kasar hasil las FCAW dengan ketebalan 20 mm.....	42
Gambar 4.10	Mikrostruktur bagian HAZ halus hasil las FCAW dengan ketebalan 20 mm.....	43
Gambar 4.11	Mikrostruktur bagian logam dasar hasil las FCAW dengan ketebalan 20 mm.....	43
Gambar 4.12	Daerah-daerah dari hasil pengelasan yang diamati mikrostrukturnya	44
Gambar 4.13	Salah satu mikrostruktur dari logam dasar yang berbentuk pipih.....	44
Gambar 4.14	Struktur HAZ kasar (kiri) dan HAZ halus (kanan).....	45
Gambar 4.15	Mikrostruktur dari daerah kampuh las yang memiliki butir halus.....	46
Gambar 4.16	Grafik kekerasan material dengan ketebalan 10 mm.....	48
Gambar 4.17	Perbandingan kekerasan pada bagian atas dari material untuk ketebalan 10 mm, 16 mm, dan 20 mm.....	49
Gambar 4.18	(a) Grafik kekerasan material dengan tebal 16 mm (b) Grafik kekerasan material dengan tebal 20 mm.....	51
Gambar 4.19	Grafik tegangan sisa pada pelat 10 mm.....	52
Gambar 4.20	Grafik tegangan sisa pada pelat 20 mm.....	52
Gambar 4.21	Grafik perbandingan tegangan sisa pada pelat 10 mm dan 20 mm.....	54

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Komposisi Kimia baja JIS 3101-SS400	5
Tabel 3.1	Komposisi Kimia Logam Induk	24
Tabel 3.2	Komposisi Kimia Kawat las E71T-1	25
Tabel 4.1	Parameter dan Hasil Pengelasan FCAW pada Pelat 10 mm	30
Tabel 4.2	Parameter dan Hasil Pengelasan FCAW pada Pelat 16 mm	30
Tabel 4.3	Parameter dan Hasil Pengelasan FCAW pada Pelat 20 mm	31
Tabel 4.4	Nilai kekerasan pada pelat dengan ketebalan 10 mm	47
Tabel 4.5	Nilai kekerasan pada pelat dengan ketebalan 16 mm	47
Tabel 4.6	Nilai kekerasan pada pelat dengan ketebalan 20 mm	47



DAFTAR LAMPIRAN



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Proses pengelasan pada saat ini telah banyak dipergunakan secara luas dalam penyambungan struktur-struktur baja pada suatu konstruksi bangunan. Proses pengelasan pada rangka dan konstruksi bangunan sendiri pada saat ini telah berkembang pesat baik dalam pengembangan teknologi dan alat pengelasan yang semakin canggih, metode dan teknik pengelasan dan juga dalam prosedur dan perencanaan proses pengelasannya, sehingga cacat dalam pengelasan semakin dapat dikurangi dengan adanya prosedur pengelasan yang baik. Bentuk dan hasil pengelasanpun semakin baik dengan ditemukannya teknik pengelasan baru seperti, *Flux Core Arc Welding*, *Laser Welding*, *Plasma Arc Welding*, dan *Friction Welding*. Selain itu, semakin banyak digunakannya proses pengelasan otomatis dan semi-otomatis untuk menggantikan proses manual semakin mengurangi cacat yang mungkin terjadi selama proses pengelasan terutama yang berhubungan dengan kecepatan pengelasan.

Pengelasan otomatis adalah pengelasan yang tidak melibatkan operator sama sekali dalam pengaturan proses pengelasan. Dalam hal ini, semua pekerjaan dilakukan oleh mesin. Proses ini sedikit rentan terjadi kesalahan akibat mesin, apabila dalam pengaturan awal tidak dilakukan dengan benar. Hal ini sedikit berbeda dengan pengelasan semi-otomatis. Pada pengelasan semi-otomatis, operator pengelasan masih ikut terlibat dalam pengaturan proses pengelasan. Pengaturan posisi pengelasan masih dapat diatur oleh operator sehingga kesalahan akibat mesin dapat diminimalisir. Kedua metode pengelasan jenis ini, otomatis dan semi-otomatis, memiliki keunggulan bila dibandingkan dengan pengelasan dengan cara manual. Keuntungan dari metode ini antara ini, kualitas dan penampilan dari hasil pengelasan

menjadi lebih baik karena kecepatan pengelasan yang lebih stabil bila dibandingkan dengan pengelasan manual, menjauhkan operator dari busur listrik hasil pengelasan sehingga memberikan operator lingkungan yang baik, operator juga terhindar dari kelelahan karena pengelasan tidak sepenuhnya dilakukan oleh operator, dapat memudahkan pengelasan dilakukan untuk segala macam posisi, dan yang terakhir adalah pengelasan otomatis dan semi-otomatis ini menyebabkan distorsi yang terjadi menjadi semakin kecil bila dibandingkan dengan pengelasan manual karena pengelasan otomatis dan semi-otomatis memberikan masukan panas yang lebih seragam karena kecepatan yang konstan.

Walaupun demikian, adanya distorsi dan tegangan sisa pada proses pengelasan tetap menjadi suatu permasalahan yang rumit dan sulit dihilangkan pada proses pengelasan. Hal tersebut dikarenakan distorsi merupakan sifat alami yang terjadi pada logam, yaitu sifat pemuaian dan penyusutan logam yang merupakan respon logam terhadap adanya perubahan panas (ΔT). Dan proses panas yang timbul dalam proses pengelasan itu sendiri adalah suatu hal yang tidak bisa dihindari.

Pada proses pengelasan, panas berasal dari busur listrik, dan atau gesekan yang ditimbulkan selama proses pengelasan. Pada proses pengelasan, bagian yang dilas akan menerima panas pengelasan setempat, sehingga menyebabkan distribusi temperatur logam yang dilas tidak merata. Pendistribusian panas yang tidak merata dalam proses pengelasan ini yang menyebabkan temperatur dari daerah logam las (*weld pool*) lebih tinggi dari daerah sekitarnya. Akibat dari pendistribusian panas yang tidak merata selama siklus pemanasan dan pendinginan yang terjadi pada proses pengelasan tersebut akan meninggalkan tegangan sisa setelah proses pengelasan berakhir.

Tegangan sisa di dalam logam las mengakibatkan dua efek utama. Pertama, adalah tegangan sisa menyebabkan terjadinya distorsi dan yang kedua adalah tegangan sisa dapat menjadi penyebab kerusakan dini pada material hasil lasan. Karena tegangan sisa akan mempengaruhi sifat dan kekuatan sambungan las, maka adanya tegangan sisa mendapat banyak perhatian dari kalangan praktisi maupun akademisi yang berkecimpung dalam dunia pengelasan.

1.2 Perumusan Masalah

Penelitian ini menggunakan material baja karbon rendah JIS G3101- SS400. Material ini umumnya digunakan sebagai struktur baja, jembatan, kapal, otomotif, tiang pancang, komponen alat berat dan fabrikasi yang lain. Material ini memiliki mampu bentuk dan las yang sangat baik dan sebagian besar penggunaannya berhubungan dengan *mild cold bending*, *mild hot forming*, *punching*, *machining*, dan pengelasan.

Proses pengelasan yang digunakan adalah proses *Flux Core Arc Welding* (FCAW) dengan BUG-O (*automatic track welding*). Metode pengelasan dengan menggunakan FCAW (*Flux Core Arc Welding*), dengan menggunakan gas pelindung karbon dioksida 90%, dapat menghasilkan penetrasi las yang dalam dan profil lasan yang baik. Penggunaan BUG-O (*automatic track welding*) mempunyai tujuan agar pada saat proses pengelasan didapat kecepatan pengelasan yang konstan karena kecepatan pengelasan akan berpengaruh terhadap hasil dari pengelasan selain faktor-faktor yang lain seperti tegangan dan juga arus yang digunakan pada saat pengelasan. Masalah utama yang akan dikaji di dalam penelitian ini adalah tentang besarnya distorsi *angular* dan juga tegangan sisa yang dihasilkan akibat proses pengelasan FCAW (*Flux Core Arc Welding*) berdasarkan ketebalan pelat yang berbeda. Selain itu, dilakukan pengamatan struktur mikro dan makro serta pengujian kekerasan untuk melihat kualitas hasil pengelasan FCAW (*Flux Core Arc Welding*) dengan menggunakan BUG-O (*automatic track welding*).

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan bertujuan untuk :

1. Mengukur besarnya distorsi angular akibat proses pengelasan FCAW dengan BUG-O pada baja JIS G3101 – SS400.
2. Memeriksa pengaruh ketebalan pelat terhadap besarnya distorsi angular pada proses pengelasan FCAW dengan BUG-O pada baja JIS G3101 – SS400.
3. Mengukur besarnya tegangan sisa pada proses pengelasan FCAW dengan BUG-O baja JIS G3101 – SS400.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

a. Material

1. Logam induk : Pelat baja JIS G3101 – SS 400
2. Kawat las : AWS A5.20/ASME E71T-1, diameter 1,2 mm

b. Parameter Penelitian

1. Ketebalan dari logam induk pelat baja JIS G3101 – SS 400 dengan variasi ketebalan : 10 mm, 16mm, dan 20 mm
2. Proses pengelasan FCAW dengan parameter :
 - Arus : (170 ÷ 220) Ampere
 - Tegangan : (20 ÷ 25) Volt
 - Gas pelindung : CO₂ dengan prosentase > 90%

c. Pengukuran dan Pengujian

Pengukuran dan pengujian yang dilakukan di dalam penelitian ini adalah :

1. Pengukuran distorsi
2. Pengujian metalografi
3. Pengujian kekerasan *vickers* dengan standar ASTM E 92
4. Pengujian tegangan sisa dengan difraksi sinar-x

BAB 2 DASAR TEORI

2.1 Baja Struktural JIS G3101-SS400

Baja Struktural JIS G3101-SS400 komposisinya hampir sama dengan ASTM A 36 dan termasuk ke dalam *Mild Steels*. Komposisi dari *Mild Steels* umumnya terdiri dari 0.25% C, 0.4-0.7% Mn, 0.5% Si, dan sedikit sulfur, fosfor, dan unsur lain yang tersisa. Mangan di dalam baja ini berfungsi sebagai stabilisasi sulfur, silikon berfungsi sebagai deoksidasi, dan karbon berfungsi sebagai penguat pada baja jenis ini. *Mild Steels* umumnya digunakan pada produk *as-rolles*, *forged*, atau *annealed*. Di dalam dunia industri saat ini, JIS G3101-SS400 banyak digunakan untuk menggantikan ASTM A 36 karena lebih mudah dicari.

Mild steel yang banyak dipakai adalah kategori *low carbon* ($C < 0.08\%$ dan $Mn \leq 0.4\%$) yang umumnya 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*.

Komposisi kimia dari baja JIS G3101 dan ASTM A 36 diperlihatkan pada tabel 2.1.

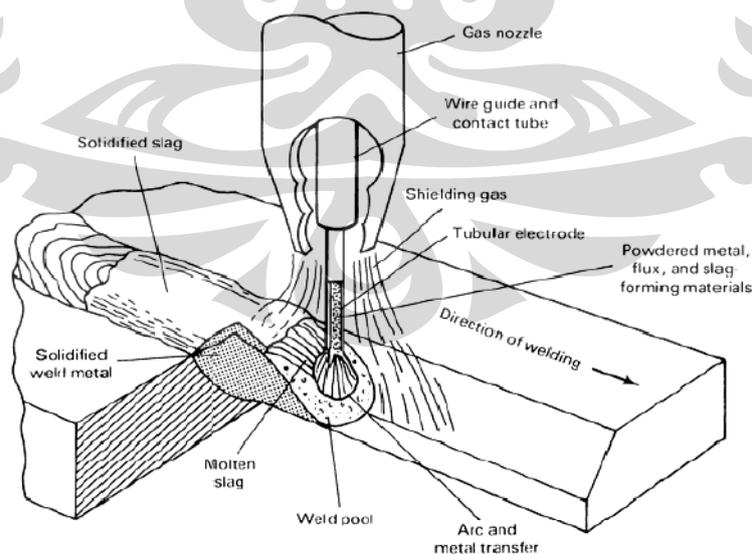
Tabel 2.1 Komposisi Kimia baja JIS 3101-SS400^[1]

Classification		Chemical Compositions				
		C (max)	Si (max)	Mn	P (max)	S (max)
JIS G3101	SS 400	-	-	-	0.05	0.05
	SS 490	-	-	-	0.05	0.05
	SS 540	0.3	-	1.6 max	0.04	0.04
ASTM	A 36	0.26	0.4	0.6 – 0.9	0.04	0.05

2.2 Pengelasan FCAW (Flux-Cored Arc Welding)

Pengelasan FCAW (*Flux-Cored Arc Welding*) adalah proses pengelasan busur listrik yang tercipta antara elektroda terumpan dan *weld pool* dengan menggunakan pelindung berupa *fluks* yang terdapat di dalam elektroda yang berongga, dimana prosesnya dilakukan tanpa tekanan dan dapat diberi tambahan gas CO₂ sebagai pelindung . Pada dasarnya proses pengelasan FCAW memiliki prinsip yang sama seperti proses pengelasan *Gas Metal-Arc Welding* (GMAW). Perbedaannya adalah elektroda (kawat las) yang diisi dengan *fluks* (kemudian disebut dengan *flux-core*). Elektroda inti menghasilkan busur listrik yang lebih stabil, memperbaiki garis bentuk lasan dan menghasilkan sifat-sifat mekanik yang baik dari logam lasan. Fluks dalam elektroda ini lebih fleksibel dari pada pelapisan yang rapuh/getas yang digunakan pada elektroda SMAW (*Shielded Metal-Arc Welding*), sehingga elektroda yang berbentuk pipa dapat disediakan dalam bentuk gulungan yang panjang pada suatu rol.

Proses pengelasan FCAW ini merupakan proses semi otomatis dan dapat disebut juga sebagai kombinasi SMAW, GMAW dan SAW.



Gambar 2.1 Skematis Pengelasan FCAW dengan menggunakan gas pelindung^[2]

Dalam proses FCAW, kawat pengisi-fluks dimasukkan secara otomatis melalui gagang las (*torch*), dengan menggunakan peralatan yang tipenya sama dengan yang digunakan untuk GMAW. *Fluks* yang berada di bagian dalam kawat menimbulkan terak yang melindungi lasan dari atmosfer. Penambahan gas pelindung berfungsi untuk melindungi daerah lasan. FCAW bersifat ekonomis karena prosesnya dapat dilakukan dengan kecepatan yang tinggi. Hal seperti ini sesuai untuk pengelasan pada posisi yang sulit (*out-of-position*) serta dengan ketebalan logam yang bervariasi.

Pengelasan FCAW ini memiliki beberapa keunggulan antara lain adalah mempunyai kecepatan deposisi yang lebih tinggi dari SMAW dan GMAW, dapat digunakan dalam berbagai posisi las dan lebih efisien serta ekonomis dibandingkan dengan MIG. Sedangkan kelemahan yang ada pada las FCAW ini adalah terak (*slag*) harus dibersihkan antar *pass*-nya, terdapat banyak asap, dan kemungkinan dapat terjadinya inklusi terak.

2.3 Metalurgi Las

Pada proses pengelasan, terjadi beberapa reaksi seperti reaksi peleburan dan reaksi pembekuan logam pada daerah kumpuh las dan sebagian logam induk yang disebabkan oleh panas dari proses pengelasan itu sendiri. Reaksi-reaksi yang terjadi tersebut mempengaruhi pembentukan fasa pada deposit las dan daerah terpengaruh panas yang pada akhirnya akan mempengaruhi sifat fisik dan sifat mekanis dari lasan.

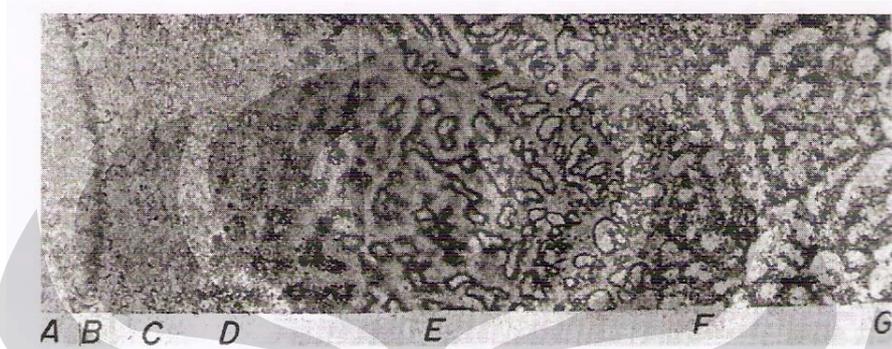
2.3.1 Daerah hasil pengelasan

Daerah hasil pengelasan dapat dibagi menjadi 3 daerah utama yaitu:

- a. *Weldpool* (*kampuh las*)
- b. *Heat affected Zone* (daerah terpengaruh panas)
- c. Logam dasar yang tidak terpengaruh (*base metal*)

Weldpool adalah daerah yang mengalami proses pengelasan sehingga di daerah tersebut mengalami proses pencairan dan kemudian membeku. *Heat affected zone*

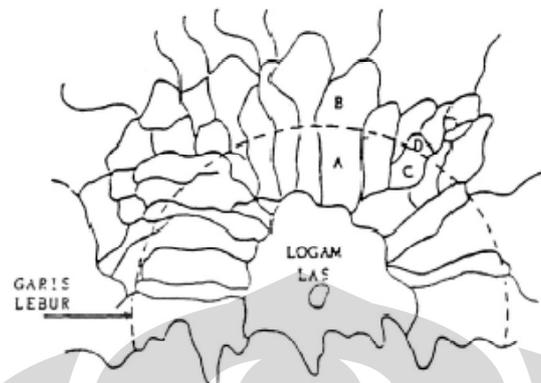
(HAZ) adalah daerah yang bersebelahan dengan *weldpool* tetapi tidak ikut mencair ketika proses pengelasan. Daerah ini hanya mengalami proses pemanasan dan pendinginan yang berakibat pada perubahan butir. Sedangkan *base metal* adalah logam induk dari material yang dilas dimana panas hasil dari pengelasan tidak mempengaruhi mikrostruktur dari logam induk.



Gambar 2.2 Mikro struktur dari as-cast carbon steel.
A-B : Fusion Zone, C-F : HAZ , G ; Base metal^[3]

2.3.2 Reaksi pembekuan

Pada umumnya proses pembekuan suatu logam diawali oleh peristiwa nukleasi dan pertumbuhan butir. Adanya peristiwa nukleasi dan pertumbuhan butir akan mengakibatkan perubahan fasa cair menjadi fasa padat. Pada peristiwa pembekuan logam deposit las, nukleasi awal dan pertumbuhan butir akan terjadi secara epitaksial, yaitu kristal-kristal yang terbentuk selama pembekuan akan melakukan nukleasi pertama kali di daerah antar muka cair-padat logam induk, kemudian masing-masing butir yang terbentuk merupakan kelanjutan dari butir yang terdahulu yang menjadi tempat nukleasi butir baru. Jika batas las bergerak maju oleh proses pengelasannya, maka butir yang terbentuk selama pendinginan akan sangat tergantung dari jumlah nukleasi awal yang terbentuk. Mekanisme pembekuan deposit las terjadi secara epitaksial seperti yang terlihat pada Gambar 2.3.



Keterangan:

1. Kristal A merupakan pengintian awal kristal. Akibatnya kristal A dan B mempunyai orientasi kristal yang sama.
2. Demikian juga untuk kristal C dan D.

Gambar 2.3. Konsep pertumbuhan kristal epitaksial.^[4]

Struktur butir utama yang terbentuk setelah pembekuan adalah epitaksial dan sub struktur yang terbentuk oleh pemisahan mikro (mikro segregasi) tergantung pada kecepatan pembekuan yang mencakup: konsentrasi logam las cair, parameter pembekuan yang nilainya sama dengan G/R , dimana G merupakan gradien temperatur dalam arah pembekuan pada ujung logam las cair. Sedangkan R adalah kecepatan pergerakan batas pembekuan pada ujung logam cair.

Pada pendinginan setelah pembekuan akan dihasilkan struktur utama epitaksial dengan bentuk butir kolumnar dan substruktur yang terbentuk adalah selular pada kecepatan pembekuan yang rendah dan struktur dendritik pada kecepatan yang tinggi pembekuannya. Sedangkan fasa struktur mikro yang terbentuk tergantung dari komposisinya (kandungan karbon, krom, dan nikel).

2.3.3 Mikrostruktur logam las

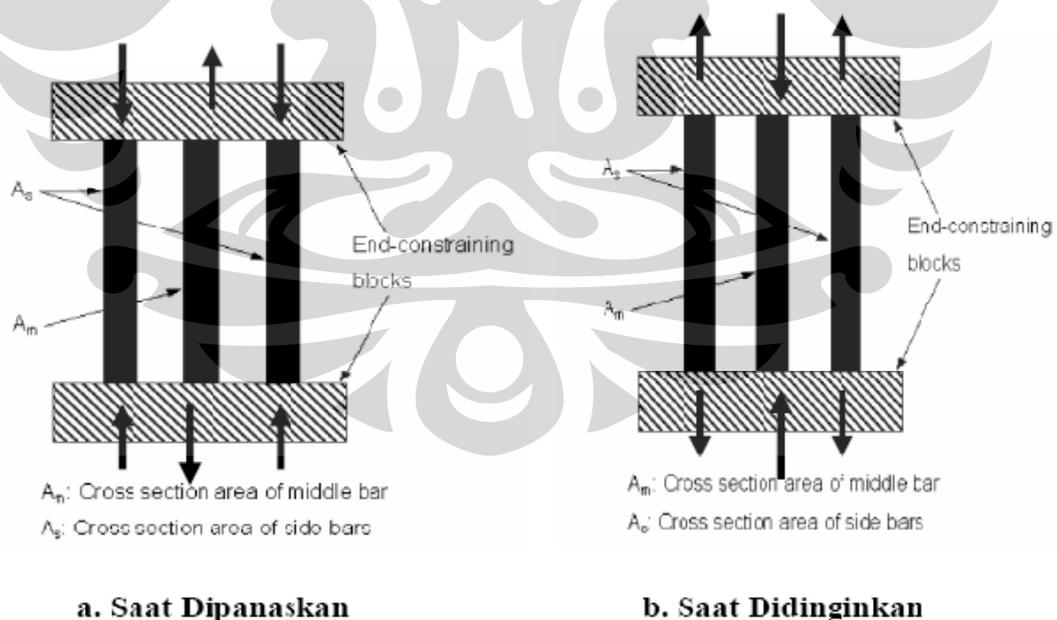
Struktur pada logam lasan umumnya memiliki butir yang halus dan berstruktur *widmanstätten*. Pada proses pendinginan normal, ferit akan terbentuk dari fasa austenite dan kemudian dikelilingi oleh butir perlit. Namun, pada proses

pengelasan terjadi pendinginan cepat sehingga butir ferit dan perlit tidak terbentuk seperti pada pendinginan normal tetapi yang terbentuk adalah struktur *widmanstatten*.

Pada pengelasan *multipass*, panas dari proses pengelasan dapat menyebabkan terjadinya proses *normalizing* pada deposit logam las sebelumnya. Hal ini menyebabkan butir daerah las yang berada di bagian bawah memiliki struktur butir yang lebih baik akibat proses *normalizing* yang terjadi pada pengelasan multipass

2.4 Tegangan Sisa

Pada proses pengelasan terjadi pemanasan yang terpusat serta distribusi temperaturnya tidak seragam. Oleh karenanya timbul apa yang dinamakan *Residual Stress* (Tegangan Sisa). *Residual stress* yang timbul menyebabkan terjadinya penurunan kekuatan mekanis konstruksi las. Oleh karena itu sebisa mungkin masalah *residual stress* ini harus dihindari. Mekanisme terjadinya *residual stress* pada material dapat diilustrasikan seperti terlihat dalam Gambar 2.4



Gambar 2.4. Ilustrasi mekanisme terjadinya tegangan sisa^[3]

Dari Gambar.2.4. tersebut terlihat bahwa batang *Am* atau yang terletak di bagian tengah dipanaskan pada suhu tertentu, sedangkan batang *As* tidak mengalami pengaruh panas. Pada saat dipanaskan, batang *Am* mengalami pemuaian , namun ditahan oleh batang *As* , sehingga dapat dikatakan bahwa batang *Am* menghasilkan tegangan tekan, sedangkan batang *As* mengalami tegangan tarik. Saat didinginkan kembali sampai temperature kamar, batang *Am* mengalami penyusutan namun ditahan oleh batang *As*. Pada saat ini batang *Am* berubah mengalami tegangan tarik, sementara batang *As* mengalami tegangan tekan. Pada temperature kamar dapat dikatakan bahwa Batang *Am* mempunyai tegangan dalam tarik, sementara batang *As* mempunyai tegangan dalam tekan.

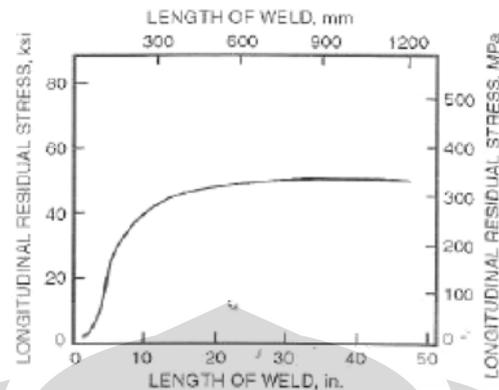
Walaupun begitu, tegangan sisa dalam proses pengelasan agak sedikit berbeda dan lebih rumit untuk menjelaskannya bila dibandingkan dengan ilustrasi pada gambar 2.4 tersebut. Hal ini disebabkan karena distribusi temperatur pada daerah las itu tidak seragam.

2.4.1 Faktor-faktor yang mempengaruhi tegangan sisa

Beberapa faktor yang mempengaruhi besar tegangan sisa dalam sambungan las adalah :

- a. Ukuran material yang dilas
- b. Urutan pengelasan (*Welding Sequence*)
- c. Bentuk sambungan (*Joint design*)

Untuk ukuran material yang paling berpengaruh adalah panjang las dan ketebalan material yang di las. Hubungan antara panjang pengelasan dengan besarnya tegangan sisa yang terjadi dapat dilihat pada Gambar. 2.5 dibawah ini.

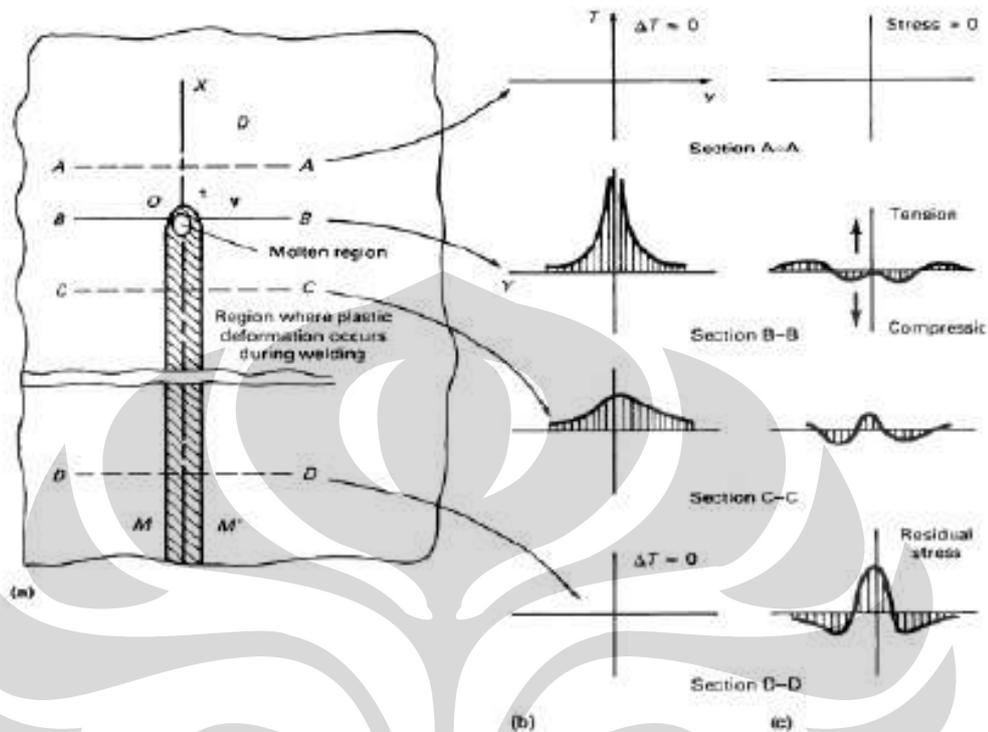


Gambar 2.5 Hubungan antara panjang las dengan tegangan sisa^[5]

Selain dimensi material yang dilas, urutan pengelasan juga merupakan faktor penting dalam menentukan besar kecilnya nilai tegangan sisa sambungan. Pengaturan urutan las yang baik akan menurunkan nilai akhir tegangan sisa sambungan.. Faktor terakhir yang dapat mempengaruhi nilai akhir tegangan sisa sambungan las adalah bentuk sambungan. Semakin rumit bentuk sambungan maka tegangan sisa yang terbentuk juga akan sulit untuk diperhitungkan.

2.4.2 Distribusi Tegangan Sisa pada proses pengelasan

Pada proses pengelasan, logam induk mengalami pemanasan yang berbeda-beda tergantung pada posisinya. Semakin jauh dari daerah lasan maka pemanasan yang timbul juga akan semakin kecil.



Gambar 2.6 Distribusi tegangan termal^[3]

Gambar 2.6.a. memperlihatkan jalannya proses pengelasan yang dilakukan sepanjang garis X-X kemudian berhenti pada titik O. Sementara pada Gambar 2.6.b. memperlihatkan perubahan temperatur yang terjadi selama proses pengelasan. Sedangkan pada Gambar 2.6.c memperlihatkan perubahan tegangan yang terjadi sepanjang proses pengelasan. Area M-M' adalah daerah terjadinya deformasi plastis. Area A-A adalah daerah di atas dari sumber panas dan belum terpengaruh panas secara signifikan. Perubahan temperatur pada daerah ini karena pengelasan, ΔT , adalah nol. Area B-B adalah daerah persimpangan dari pusat panas, distribusi temperatur pada daerah ini agak berbeda jauh dan tidak teratur. Sedangkan disepanjang daerah C-C yang merupakan daerah agak dibelakang dari pusat panas, distribusi temperatur tidak terlalu tinggi bila dibandingkan dengan daerah B-B dan distribusi temperatur akan semakin seragam dengan semakin jauh daerah dari pusat panas seperti yang ditunjukkan daerah D-D.

Panas yang dihasilkan selama proses pengelasan menghasilkan tegangan di sepanjang arah longitudinal.

Distribusi perubahan tegangan selama proses pengelasan pada titik A-A karena tidak ada perubahan temperature maka tidak terlihat adanya perubahan tegangan. Pada titik B-B distribusi tegangan sedikit terlihat karena adanya perubahan temperatur, tegangan tekan pada daerah sekitar logam las terjadi karena adanya pemuai logam pada daerah HAZ . Pada titik C-C logam las yang tadinya mencair mulai membeku dan menyusut menyebabkan pada daerah tersebut mengalami tegangan tarik cukup besar dan titik yang lebih jauh mengalami tegangan tekan. Pada titik D-D yang sudah dingin perubahan tegangan semakin terlihat dimana daerah logam las mengalami tegangan tarik dan daerah yang sedikit jauh darinya mengalami tegangan tekan.

2.4.3 Cara mengurangi dan mengendalikan tegangan sisa

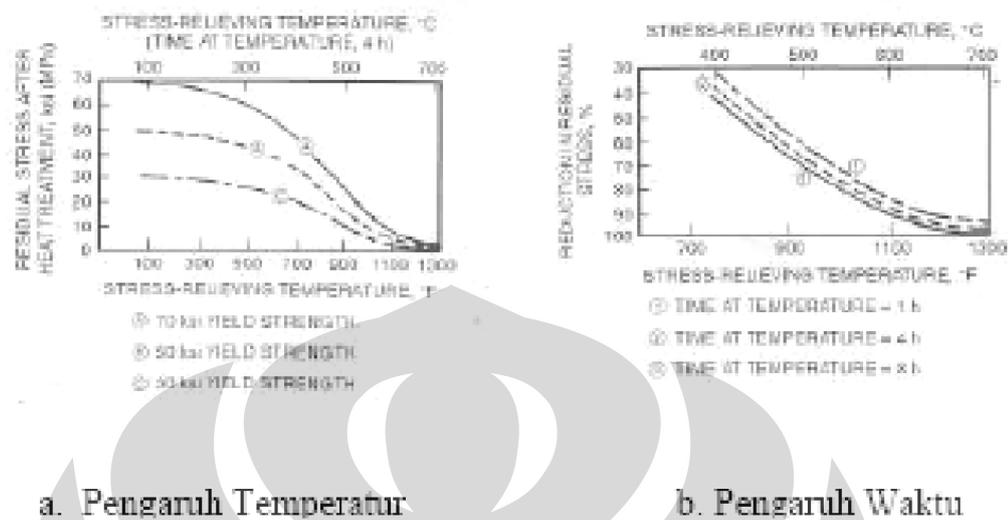
Tegangan sisa dalam proses pengelasan tidak bisa dihindari karena sudah bersifat alamiah namun bisa dikendalikan. Beberapa cara mengurangi tegangan sisa adalah :

a. Preheating

Preheating adalah proses pemanasan yang dilakukan sebelum pengelasan untuk memperkecil terjadinya tegangan sisa dalam pengelasan. Tujuan utama dari proses ini adalah untuk memperkecil perbedaan temperature pemanasan disekitar daerah las.

b. Post Weld Heat Treatment

Postweld (Pemanasan setelah pengelasan) adalah proses penurunan tegangan sisa dan penyeragaman sifat mekanis material. Dalam proses PWHT ini pengaruh temperatur dan waktu harus diperhatikan. Hubungan antara waktu dan temperatur dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar. 2.7. Pengaruh waktu dan temperatur pemanasan terhadap tegangan sisa^[5]

2.4.4 Pengukuran tegangan sisa

Tegangan sisa pada suatu material dapat dihitung nilainya dengan menggunakan beberapa teknik. Prinsip dasar dari pengukuran tegangan sisa ini adalah berdasarkan “Hukum Hooke”. “Hukum Hooke” mengatakan bahwa perubahan ukuran suatu material disebabkan karena adanya tegangan. Oleh karena itu, tegangan sisa dapat diukur oleh alat yang dapat mengukur perubahan ukuran suatu material. Karena tegangan yang ada bersifat mikro, maka perubahan ukuran yang terjadi juga dalam ukuran mikro. Sehingga diperlukan alat yang dapat mengukur pada skala mikro. Cara yang umum digunakan untuk mengukur tegangan sisa dibagi menjadi 4 bagian yaitu^[6]:

a. Metode pembebasan tegangan

Metode ini terdiri dari berbagai macam teknik, yang secara umum memiliki prinsip dengan melakukan pembebasan tegangan pada material dengan cara memotong, membuat lubang, atau menghilangkan permukaan material. Teknik

yang biasa digunakan antara lain : *hole drilling* dan *ring core methods, layer removal method, sectioning method*.

b. Metode difraksi

Metode ini menggunakan sinar-x atau neutron untuk mengukur perubahan jarak pada bidang antar kisi dari kristal.

c. Metode yang menggunakan kepekaan terhadap regangan

Metode ini menggunakan ultrasonik atau magnetik untuk mengetahui besarnya regangan yang terjadi di dalam material yang mengalami tegangan sisa kemudian dibandingkan dengan material tanpa tegangan.

d. Metode retak

Metode ini dapat dilakukan pada material yang mengalami retak akibat *Hydrogen Induced Cracking* atau *Stress corrosion cracking*.

2.5 Distorsi

Salah satu dampak dari tegangan sisa yang terjadi dalam proses pengelasan adalah terjadinya perubahan bentuk yang biasa disebut distorsi. Mekanisme terjadinya distorsi pada proses pengelasan adalah dimulai saat terjadinya proses pendinginan logam las. Sifat dasar dari logam cair adalah akan menyusut saat didinginkan atau saat pembekuan. Akibat adanya proses penyusutan ini maka terjadi tegangan yang sangat besar pada daerah disekitarnya dan jika nilainya melebihi nilai yield point logam induknya maka akan terjadi apa yang dinamakan distorsi.

2.5.1 Jenis-jenis distorsi

Ada beberapa jenis distorsi yang biasa terjadi dalam proses pengelasan. Masing-masing jenis dibedakan berdasarkan perubahan bentuk yang terjadi dan penyebabnya yaitu^[7] :

1. *Transverse Shrinkage*

Distorsi ini disebabkan arah penyusutan logam las tegak lurus dengan arah pengelasan. Akibat penyusutan logam las ini plat disekitar logam las tertarik ke tengah.

2. *Longitudinal Shrinkage*

Distorsi ini disebabkan arah penyusutan searah dengan arah pengelasan. Besar *longitudinal shrinkage* adalah sekitar 1/1000 panjang las.

3. *Angular Distortion*

Distorsi angular dapat terjadi pada sambungan tumpul (*butt joint*) dan sambungan T (*fillet joint*). Pada sambungan tumpul (*butt joint*) distorsi angular terjadi jika transverse shrinkage tidak seragam kearah tebal plat. Sedangkan pada sambungan T (*fillet*), perubahan bentuk yang terjadi tergantung berapa banyak dan kuat penahan yang ada.

4. *Longitudinal Bending/ Bowing*

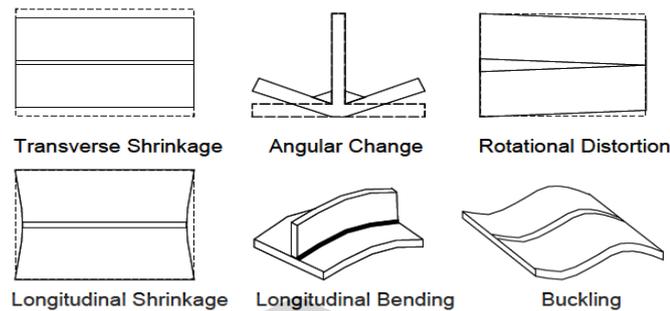
merupakan distorsi yang disebabkan oleh longitudinal shrinkage. Hal ini terjadi akibat penyusutan yang tidak merata pada arah longitudinal yang menyebabkan struktur melengkung.

5. *Rotational Distortion*

Distorsi ini terjadi akibat perbedaan penyusutan yang terjadi di daerah sepanjang pengelasan. Distorsi ini dipengaruhi oleh masukan panas dan kecepatan pengelasan.

6. *Buckling*

buckling adalah merupakan distorsi yang terjadi karena ukuran material yang dilas tipis. Umumnya terjadi pada pelat dengan ketebalan kurang dari 10 mm. Hal ini disebabkan tegangan tekan longitudinal yang terjadi pada daerah lasan nilainya jauh lebih besar dari CBL (*critical buckling load*) struktur.



Gambar 2.8 Jenis-jenis distorsi^[7]

2.5.2 Faktor – faktor yang mempengaruhi Distorsi

Faktor utama yang mempengaruhi jenis dan besar distorsi dapat dikelompokkan kedalam beberapa kelompok seperti^[5] :

1. Sifat fisik logam induk (*Physiscal properties of parent metal*)

Sifat fisik logam induk yang mempengaruhi besar kecilnya distorsi adalah;

- a. Koefisien muai panas, semakin tinggi nilai koefisien maka distorsi yang terjadi makin besar.
- b. Panas jenis, semakin tinggi maka distorsi semakin besar.
- c. Koefisien daya hantar panas, semakin tinggi maka semakin besar distorsi yang timbul.
- d. *Yield point* dan *yield point* pada temperatur tinggi. Untuk material yang memiliki nilai *yield point* tinggi maka distorsi akan lebih kecil dibandingkan dengan material yang memiliki *yield point* rendah. Namun tegangan sisa yang terjadi setelah pengelasan lebih tinggi dibanding dengan material yang memiliki *yield point* rendah.
- e. Titik cair (*melting point*). Untuk material yang memiliki titik cair tinggi maka distorsi yang terjadi besar.

2. Jumlah penguat/penahan

Untuk sambungan las yang memiliki penguat atau penahan yang cukup besar akan menyebabkan distorsi lebih kecil dibandingkan dengan sambungan yang penahannya kecil. Namun memiliki tegangan sisa yang lebih besar.

3. Bentuk sambungan

Bentuk dan disain sambungan las sangat berpengaruh sekali terhadap besar kecilnya distorsi. Semakin besar volume dari sambungan las tersebut maka distorsi yang terjadi semakin besar karena penyusutan logam cair saat membeku berbanding lurus dengan volumenya.

4. Pemasangan komponen

Cara pemasangan komponen yang baik seperti jarak satu komponen dengan komponen diatur sedekat mungkin akan menghasilkan distorsi yang kecil. Biasanya dalam prakteknya jarak yang diinginkan adalah sekitar 2 – 3 mm.

5. Proses pengelasan

Pada proses pengelasan, pengaturan parameter seperti besar arus las, tegangan dan kecepatan pengelasan sangat penting karena akan mempengaruhi besar kecilnya panas yang masuk (*Heat input*). Semakin besar nilai *heat input* maka semakin besar juga distorsi yang timbul. Besar *heat input* dapat di hitung berdasarkan rumus dibawah :

$$H = \frac{60 \cdot E \cdot I}{1000 \cdot S} \quad (2.1)$$

Dimana :

$H = \text{Heat Input (kJ/mm)}$

$E = \text{Arc Volatage (Volts)}$

$I = \text{Current (Amp)}$

$S = \text{Speed (mm/min)}$

Selain pengaturan parameter , urutan pengelasan (*welding sequence*) juga perlu diperhatikan. Urutan pengelasan yang tidak seimbang akan menyebabkan distorsi yang tinggi juga. Yang terakhir perlu diperhatikan adalah temperature pemanasan awal. Temperatur pemanasan awal yang kurang tinggi akan menyebabkan distorsi yang besar.

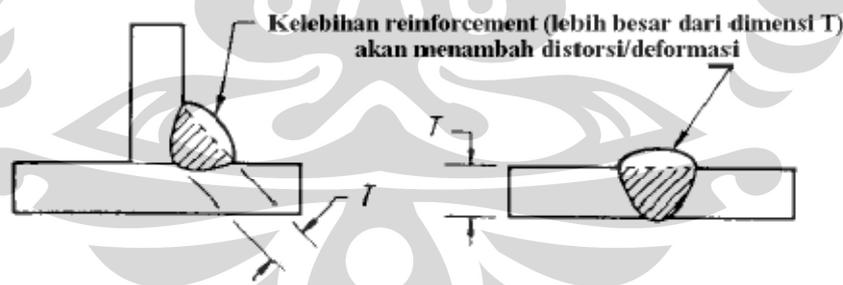
2.5.3 Pengendalian Distorsi

Untuk mengendalikan distorsi dapat digunakan beberapa metode termasuk desain dan selama pengelasan yang menghasilkan siklus pemanasan dan pendinginan. Penyusutan tidak dapat dicegah tetapi dapat dikendalikan. Beberapa cara yang digunakan untuk meminimalisir distorsi adalah :

1. Tidak membuat ukuran yang berlebihan.

Reinforcement yang berlebihan (lebih besar dari T akan menambah terjadinya distorsi/deformasi. Dalam hal ini semakin banyak logam yang ditambahkan pada sambungan maka akan semakin besar gaya penyusutannya yang terjadi.

Adapun ilustrasi dari *reinforcement* yang berlebihan dapat dilihat pada Gambar 2.9.

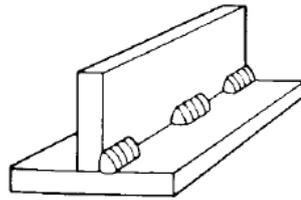


Gambar 2.9 *Overweld*^[8]

2. Menggunakan pengelasan melompat

Metode ini kalau mungkin harus digunakan, akan dapat mengurangi logam las sebanyak 75% dan dapat mengurangi terjadinya distorsi/deformasi.

Ilustrasi *intermittent welding* dapat dilihat pada Gambar 2.10.

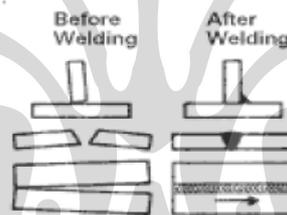


Gambar 2.10 *Intermittenet welding*^[8]

3. Melakukan *Presetting*

Dengan memanfaatkan posisi material yang dilas sebelum distorsi terjadi. Teknik ini merupakan teknik yang ditentukan dengan melakukan beberapa percobaan untuk mengetahui arah distorsi. Menggunakan gaya mekanik yang berlawanan dengan arah distorsi pada saat dilakukan pengelasan sehingga hasil akhir sesuai dengan posisi yang diinginkan.

Contoh ilustrasi dari penggunaan *presetting* dapat dilihat pada Gambar 2.9.

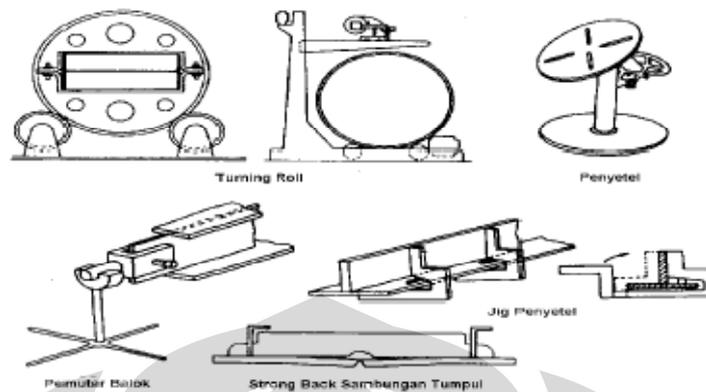


Gambar 2.11 *Presetting*^[8]

4. Menggunakan Jig

Berfungsi sebagai penahan arah distorsi pada saat pengelasan. Dengan penahan diharapkan distorsi yang dihasilkan dapat dikendalikan sehingga produk akhir hasil pengelasan masih sesuai denan yang diinginkan.

Ilustrasi macam-macam alat bantu dapat dilihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2.12 Berbagai macam bentuk dari jig^[9]

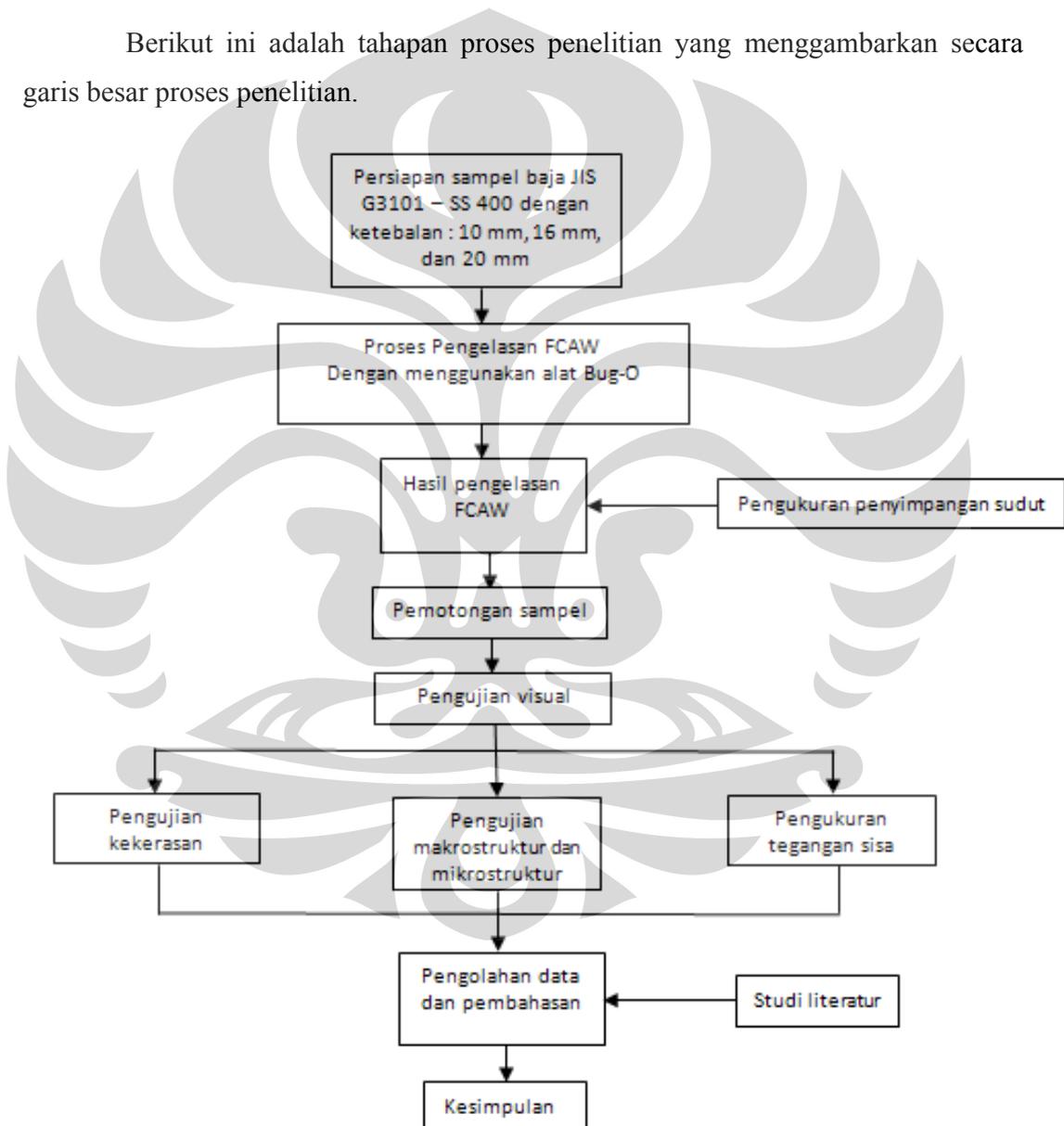
5. Melakukan Pemanasan

Dalam situasi kondisi tertentu, pemanasan dilakukan bukan bertujuan untuk memperbaiki distorsi tetapi untuk mencegah terjadinya distorsi berlebihan pada produk akhir setelah dilakukan pengelasan. Pemanasan dilakukan untuk memperkecil selisih temperatur antara material induk dan daerah las sehingga didapatkan pendinginan yang merata.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Berikut ini adalah tahapan proses penelitian yang menggambarkan secara garis besar proses penelitian.



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

3.2 Persiapan alat dan bahan

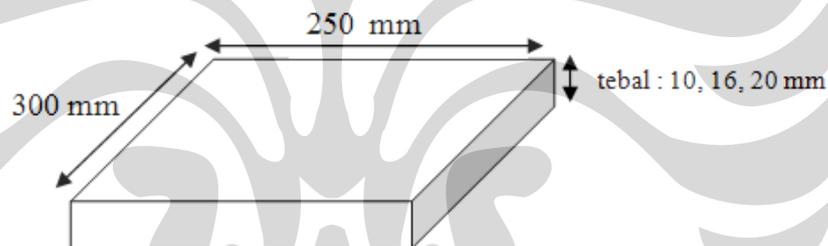
3.2.1 Bahan

Logam induk yang digunakan adalah baja karbon rendah dengan spesifikasi baja JIS G 3101 - SS400. Untuk komposisi kimia logam induk terlihat pada Tabel.

Tabel 3.1 Komposisi Kimia Logam Induk

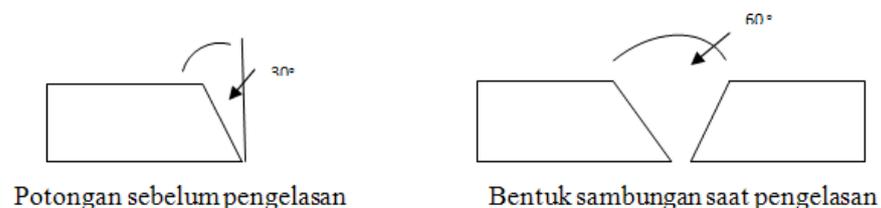
Unsur	C	Mn	Si	P	S
SS 400	0,16	0,64	0,19	0,05 max	0,05 max

Dimensi yang digunakan berukuran 300 x 250 mm dengan variasi ketebalan 10, 16, dan 20 mm.



Gambar 3.2. ukuran material yang dilakukan pengelasan

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° .



Gambar 3.3. bentuk sambungan

Kawat las yang digunakan adalah AWS A5.20/ASME E71T-1. Kawat las jenis ini memiliki fluks titania dan dapat digunakan untuk semua posisi pengelasan. Komposisi kimia dari kawat las ini diperlihatkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Komposisi Kimia Kawat las E71T-1

Unsur	C	Mn	Si	P	S
<i>Mill cert.</i>	0,05	1,22	0,54	0,017	0,007

Sampel yang telah dibuat alur kemudian diletakkan di atas pelat baja datar yang memiliki penjepit. Kemudian sampel diletakkan di atas pelat baja tersebut dengan salah satu sampel (dari 2 yang akan dilas) dijepit pada bagian penjepit yang terdapat pada pelat baja tersebut. Penjepitan ini bertujuan agar hanya terdapat satu bagian saja yang mengalami distorsi sehingga mempermudah pengukuran distorsi.

3.2.2 Alat

Alat yang digunakan pada penelitian kali ini adalah :

- a. Mesin pengelasan FCAW
- b. Alat pengelasan otomatis Bug-O
- c. Tang potong
- d. Sikat kawat
- e. Penggaris
- f. *Dial gauge*
- g. *Cutting Wheel*

3.3 Pengelasan

- 1) Proses pengelasan menggunakan metode *Flux Core Arc Welding* (FCAW).
- 2) Kawat las yang digunakan adalah AWS A5.20/ASME E71T-1 dengan diameter 1,2 mm.
- 3) Parameter las yang digunakan adalah
 - Arus : (170 ÷ 220) Ampere
 - Tegangan : (20 ÷ 25) Volt
- 4) Gas pelindung yang digunakan adalah gas $\text{CO}_2 > 90\%$ dengan kecepatan alir 13– 20 liter/ menit (LPM)
- 5) Posisi Pengelasan adalah posisi mendatar (1G)

3.4 Pengujian dan Pengukuran

3.4.1 Pengukuran Penyimpangan Sudut

Pengukuran penyimpangan sudut yang terjadi dilakukan dengan menggunakan *dial gauge*. Pengukuran dilakukan langsung pada saat proses pengelasan.



Gambar 3.4. Cara pengukuran besar distorsi

3.4.2 Pengujian Struktur Makro Dan Mikro

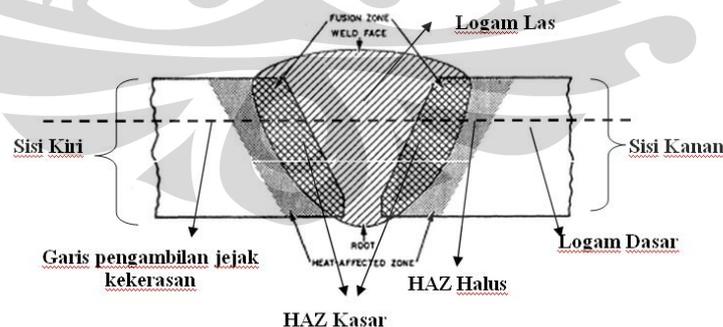
Sebelum dilakukan pengujian struktur makro dan mikro, sampel terlebih dahulu dipotong. Pemotongan sampel dilakukan dengan menggunakan gerinda potong abrasif dengan menambahkan air terus menerus selama pemotongan dengan tujuan untuk menjaga agar struktur mikro dan tegangan sisa di dalam sampel tidak rusak selama proses pemotongan.

Bagian awal yang dipotong berukuran 9 cm x 9 cm pada bagian tengah dari pelat yang telah dilas agar didapat sampel yang baik. Kemudian sampel yang akan diuji mikrostrukturnya diambil dari sampel awal yang telah dipotong dengan ukuran sekitar 1 cm x 9 cm. setelah dipotong kemudian sampel di amplas.

Setelah dilakukan pengamplasan sampai benar-benar halus maka dilakukan proses pemolesan pada alat poles *ferrous* di Laboratorium Metalografi dan HST Departemen Metalurgi dan Material FTUI.

Setelah itu proses pemolesan selesai, maka dilakukan proses etsa dengan menggunakan larutan Nital 2%. Sampel dicelupkan dalam larutan selama 10 detik kemudian dibilas dengan menggunakan air lalu dikeringkan.

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 3.5. Lokasi pengambilan Foto mikro dan uji kekerasan

3.4.3 Pengujian Kekerasan di daerah Logam Las, Haz dan Logam Induk

Pengujian kekerasan ini bertujuan untuk mengamati distribusi kekerasan dari logam las hingga ke logam induk. Hal ini karena kekerasan pada sampel las banyak dipengaruhi oleh distribusi panas yang masuk selama proses pengelasan.

Metode yang digunakan dalam pengujian adalah metode penjejakan *vickers*. Pengujian menggunakan standar ASTM E 92. Pada pengujian ini nilai yang diperoleh dari penjejakan adalah diagonal jejak yang kemudian dikonversi menjadi besaran kekerasan material dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$VHN = \frac{1852 P}{d^2}$$

dimana :

P : beban (*gram force*)

d : diameter jejak (μm)

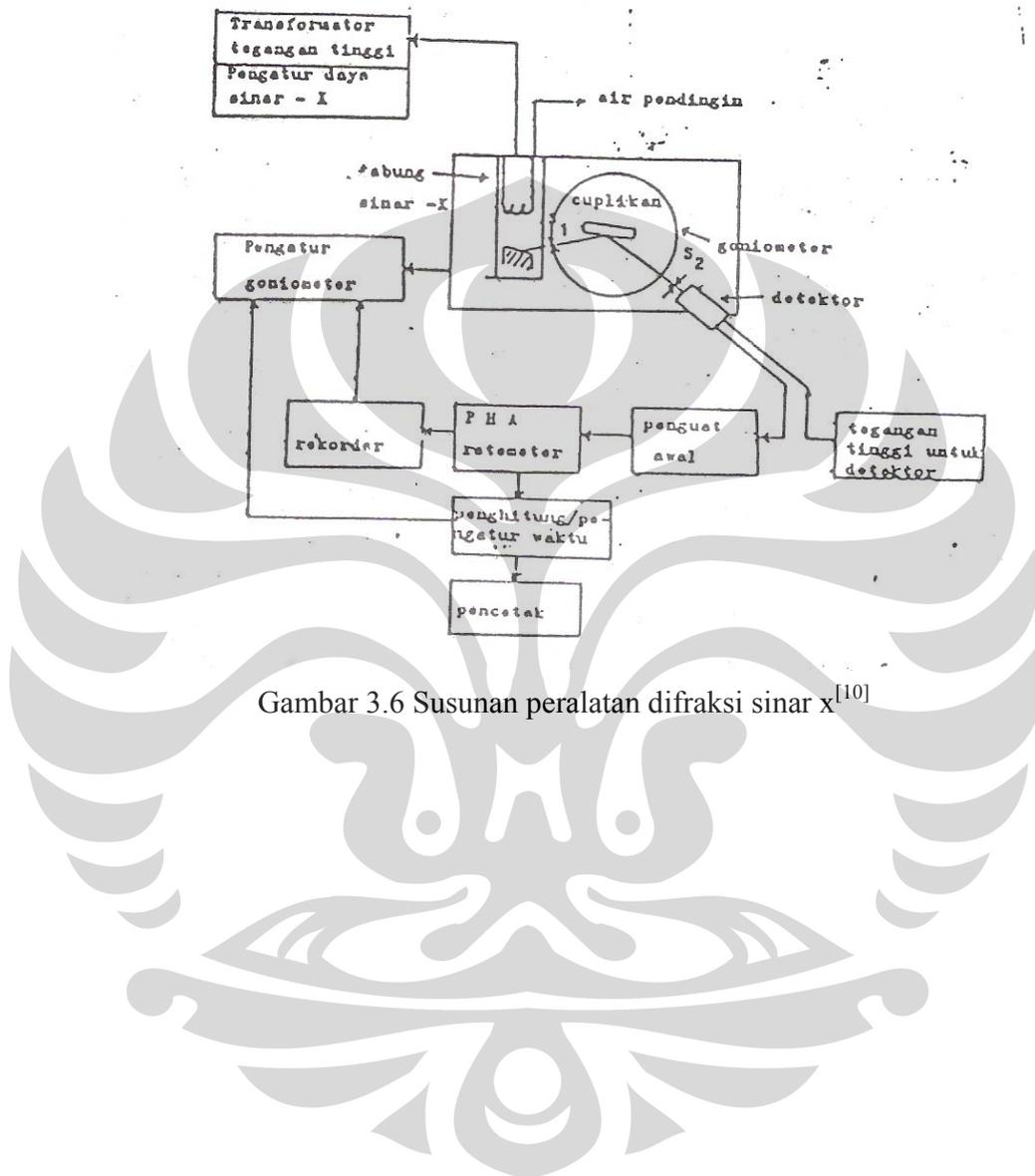
3.4.4 Pengujian Tegangan Sisa

Pengukuran tegangan sisa dilakukan dengan menggunakan difraksi sinar-x. Alat yang digunakan adalah difraktometer yang bertujuan untuk mengamati pola difraksi yang dihasilkan oleh bahan yang diteliti. Difraktometer ini menggunakan sumbu rotasi bahan yang diteliti pada arah vertikal dan detektornya bergerak dengan arah horizontal. Alat yang digunakan pada difraktometer sinar x ini terdiri dari :

1. Generator sinar-x
2. Goniometer untuk mengukur sudut hamburan (2θ) sinar-x
3. Sistem pencacah untuk mengukur intensitas hamburan sinar-x

Pengukuran dilakukan dengan cara berkas sinar-x dilewatkan pada sampel kemudian akan terjadi hamburan sinar-x jika mengenai sampel dengan orientasi tertentu. Selanjutnya berkas hamburan sinar-x ini masuk melalui detektor dan diubah

menjadi pulsa listrik, dan diteruskan ke alat penghitung waktu maupun alat perekam. Dari *recorder*, diperoleh bentuk pola difraksi dari sampel yang diamati.



Gambar 3.6 Susunan peralatan difraksi sinar x^[10]

BAB 4
HASIL PENELITIAN & PEMBAHASAN

5.1 Hasil dan Pembahasan Pengukuran Distorsi Angular

Tabel 4.1 Parameter dan Hasil Pengelasan FCAW pada Pelat 10 mm

Pass ke	Tegangan (V)	Arus (A)	Kec. Gas (L/menit)	Kec. Pengelasan (mm/menit)	Masukan Panas (KJ/mm)	Distorsi (°)
1	28	180	18	34,883	8,67	0,10417
2	30	200	18	31,25	11,52	0,14023
3	30	200	18	31,25	11,52	0,35259
Total Distorsi					31.709	0,59699

Tabel 4.2 Parameter dan Hasil Pengelasan FCAW pada Pelat 16 mm

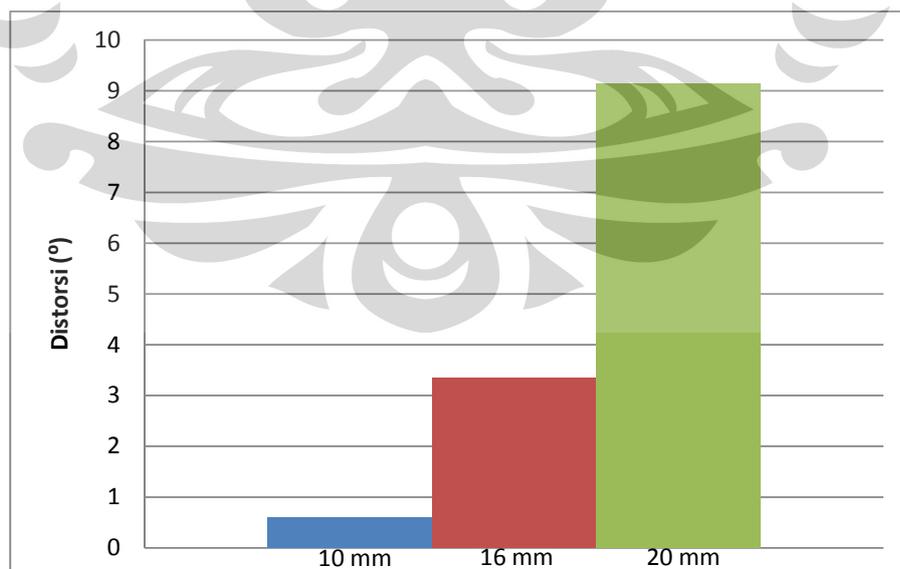
Pass ke	Tegangan (V)	Arus (A)	Kec. Gas (L/menit)	Kec. Pengelasan (mm/menit)	Masukan Panas (KJ/mm)	Distorsi (°)
1	29	180	20	34,883	11,0667	0,21636
2	30	200	20	28,301	12,7204	0,50084
3	30	200	20	28,301	12,7204	0,54492
4	30	200	20	23,809	15,1203	1,07787
5	30	200	20	23,809	15,1203	1,00974
Total					64,66	3,34973

Tabel 4.3 Parameter dan Hasil Pengelasan FCAW pada Pelat 20 mm

Pass ke	Tegangan (V)	Arus (A)	Kec. Gas (L/menit)	Kec. Pengelasan (mm/menit)	Masukan Panas (KJ/mm)	Distorsi (°)
1	28	180	20	38,461	7,8625	0,01009
2	30	200	20	38,461	9,3601	0,39946
3	30	200	20	38,461	9,3601	1,31548
4	30	200	20	38,461	9,3601	1,47694
5	30	200	20	38,461	9,3601	1,90079
6	30	200	20	34,883	10,32	1,78776
7	30	200	20	34,883	10,32	1,13792
8	30	220	20	34,883	11,352	1,10564
Total					77.296	9,13408

Distorsi merupakan masalah yang umum yang terjadi pada proses pengelasan. Distorsi disebabkan oleh siklus pemanasan dan pendinginan yang menyebabkan penyusutan pada logam las dan logam dasar yang mencair dan gaya penyusutan cenderung menyebabkan distorsi angular^[11]. Sifat dasar logam dalam keadaan cair adalah volume akan menyusut ketika membeku, sehingga semakin besar volume logam cair yang ada ketika pengelasan maka akan semakin besar pula distorsi yang terjadi^[3]. Pada pengelasan *multi pass* tingkat penyusutan akan bertambah seiring dengan bertambahnya jumlah *pass* pada pengelasan karena disebabkan volume logam cair yang bertambah sehingga pada umumnya distorsi akan semakin besar seiring dengan banyaknya jumlah *pass* yang dilakukan pada saat pengelasan.^[12]

Pada penelitian yang dilakukan dengan menyambungkan dua buah pelat baja dengan bentuk sambungan *single V* di dapat hasil distorsi yang dapat dilihat pada tabel 4.1 ,tabel 4.2 , dan tabel 4.3. Pengelasan dilakukan dengan metode FCAW (*Flux Core Arc Welding*) dan pengelasan dilakukan secara *multi pass* untuk pelat dengan ketebalan 10 mm, 16 mm, dan 20 mm. Hasil penelitian untuk ketebalan 10 mm menghasilkan distorsi angular sebesar $0,597^\circ$, untuk ketebalan 16 mm menghasilkan distorsi angular sebesar $3,35^\circ$, dan untuk ketebalan 20 mm menghasilkan distorsi angular sebesar $9,13^\circ$.



Gambar 4.1 Grafik pengaruh ketebalah terhadap distorsi angular

Dari hasil penelitian di atas, dan dapat dilihat pada gambar 4.1 distorsi angular yang dihasilkan cenderung bertambah besar seiring dengan kenaikan ketebalan pelat. Hal ini disebabkan karena semakin tebal pelat yang akan di las maka volume yang harus diisi oleh logam cair pada sambungan berbentuk *single V* akan semakin besar. Banyaknya volume logam cair yang ada pada sambungan las dapat dilihat dari banyaknya *pass* yang dilakukan pada saat proses pengelasan. Pada pelat dengan tebal 10 mm dilakukan pengelasan dengan tiga kali *pass* untuk mengisi seluruh sambungan las, untuk pelat dengan tebal 16 mm dilakukan pengelasan dengan lima kali *pass* untuk mengisi seluruh sambungan las, dan untuk pelat dengan tebal 20 mm dilakukan pengelasan dengan delapan kali *pass* untuk mengisi seluruh sambungan las. Dari sini dapat dilihat bahwa untuk pelat dengan tebal 20 mm memiliki jumlah *pass* paling banyak yang juga memiliki nilai distorsi angular terbesar dan untuk pelat 10 mm memiliki jumlah *pass* paling sedikit juga memiliki nilai distorsi angular paling kecil. Hal ini disebabkan karena semakin besarnya volume deposit las pada sambungan las, yang dilihat dari banyaknya *pass* yang dilakukan, maka penyusutan yang terjadi pada daerah sambungan akan semakin besar sehingga menyebabkan distorsi angular yang besar pula.

Selain pengaruh dari penyusutan volume logam cair yang membeku, distorsi juga dipengaruhi oleh masukan panas yang diberikan selama pengelasan^[3]. Dari hasil penelitian dapat dilihat pada tabel 4.1, tabel 4.2, dan tabel 4.3. Pada tabel ditunjukkan bahwa masukan panas semakin besar seiring dengan ketebalan pelat. Untuk pelat dengan ketebalan 10 mm sebesar 31.709 KJ/mm, pelat 16 mm sebesar 64,66 KJ/mm, dan untuk pelat 20 mm sebesar 77,296 KJ/mm. Pengaruh dari masukan panas terhadap distorsi ini disebabkan karena semakin tinggi masukan panas yang diterima oleh logam lasan maka panas yang dihasilkan akan semakin tinggi maka daerah yang mengalami pemuaihan juga akan semakin besar sehingga ketika temperatur logam las mulai turun maka gaya penyusutan antara logam dasar dan logam lasan semakin besar. Hal ini juga dipengaruhi oleh kecepatan pendinginan dari logam dimana kecepatan pendinginan semakin bertambah seiring dengan semakin meningkatnya ketebalan logam.^[8]

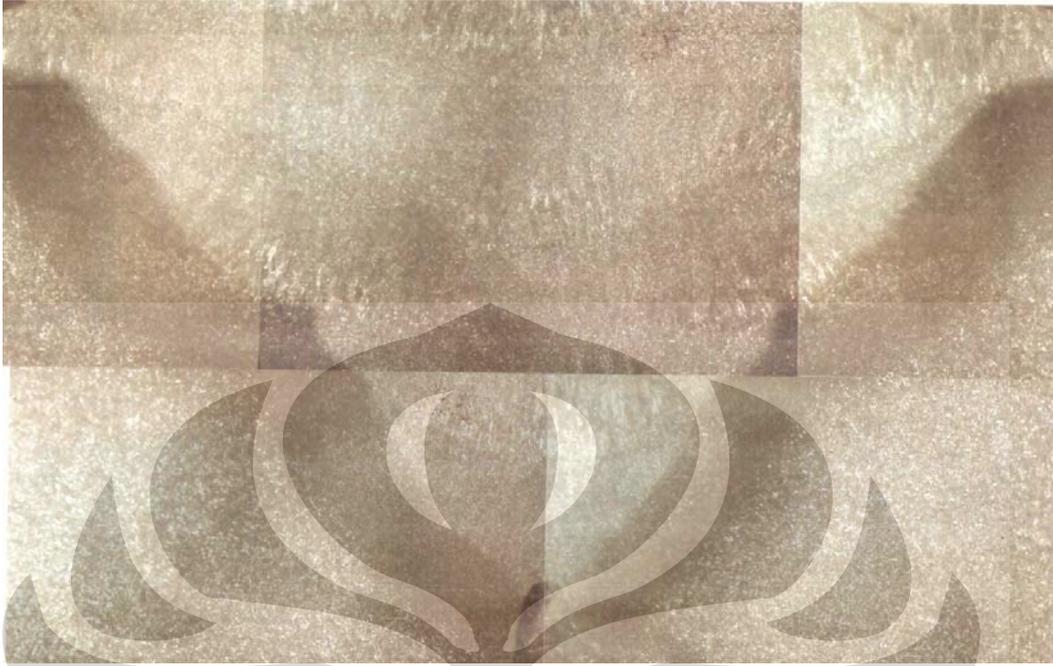
5.2 Hasil dan Pembahasan Pengujian Makrostruktur



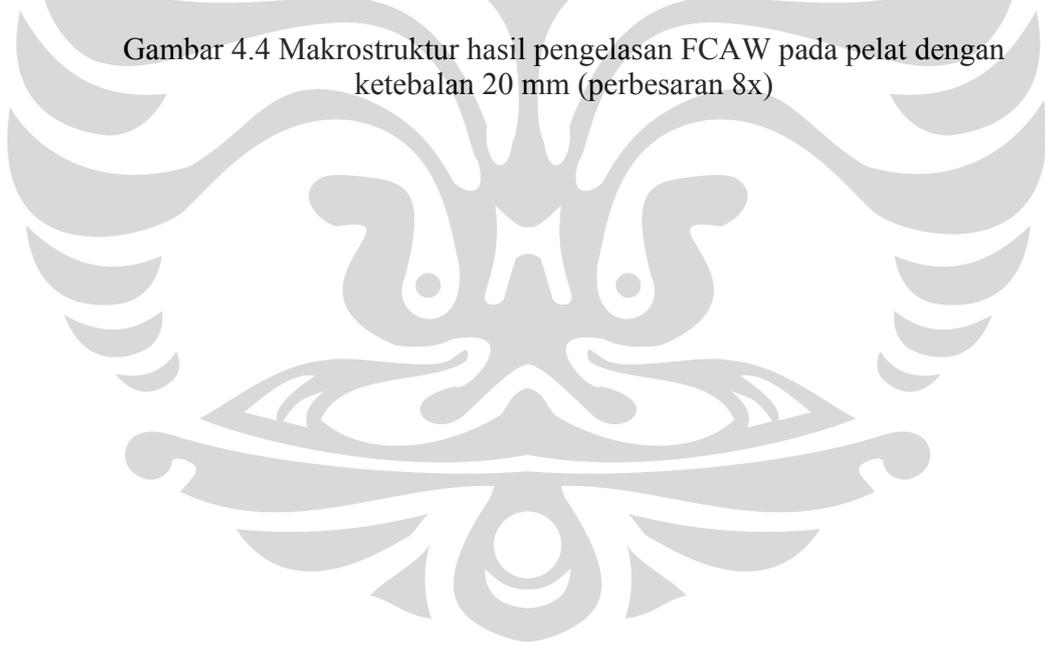
Gambar 4.2 Makrostruktur hasil pengelasan FCAW pada pelat dengan ketebalan 10 mm (perbesaran 7x)



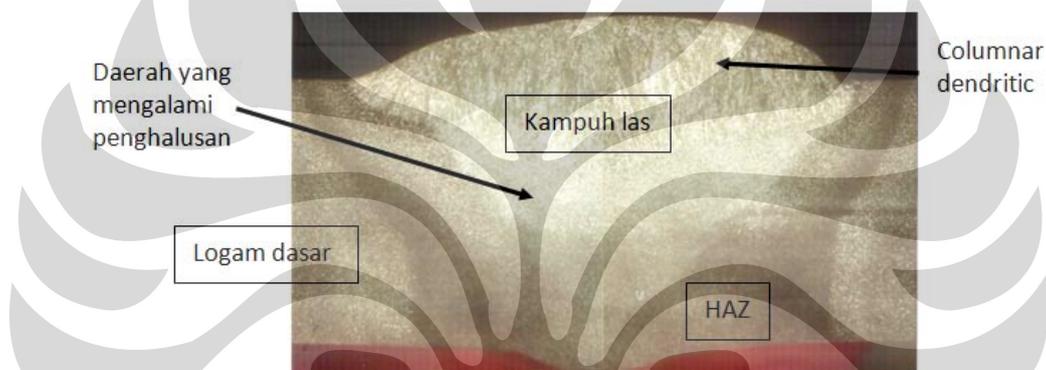
Gambar 4.3 Makrostruktur hasil pengelasan FCAW pada pelat dengan ketebalan 16 mm (perbesaran 9x)



Gambar 4.4 Makrostruktur hasil pengelasan FCAW pada pelat dengan ketebalan 20 mm (perbesaran 8x)



Dari hasil foto makro pada gambar 4.2, 4.3, dan 4.4 dapat dilihat dengan jelas adanya perbedaan antara daerah logam dasar, daerah terpengaruh panas (HAZ) dan juga daerah kampuh las (*weld pool*). Pada ketiga gambar tersebut, daerah terpengaruh panas memiliki warna yang lebih gelap daripada daerah kampuh las dan juga logam dasar. Luas daerah dari kampuh las banyak dipengaruhi oleh *heat input* yang diberikan selama pengelasan, sedangkan luas kampuh las (*weld pool*) pada hasil lasan dipengaruhi oleh ketebalan pelat, bentuk dari sambungan las, proses pengelasan yang digunakan, dan banyaknya logam induk yang ikut mencair.



Gambar 4.5 Daerah – daerah pada logam hasil las

Dari hasil foto makro ini juga, dapat dilihat bahwa proses pengelasan ini digunakan pengelasan *multi-pass*. Pelat dengan ketebalan 10 mm dilakukan dengan 3 kali *pass*, pelat dengan ketebalan 16 mm dilakukan dengan 5 kali *pass*, dan Pelat dengan ketebalan 20 mm dilakukan dengan 8 kali *pass*. Pada gambar 4.5 dapat dilihat bahwa di daerah kampuh las (*weld pool*) terdapat struktur butir *columnar dendritic*, struktur inilah yang merupakan batas untuk tiap *pass* yang dilakukan. hal ini disebabkan karena ketika dilakukan pengelasan, maka ada batas antara logam cair dengan logam yang tidak mencair yang disebut *fusion line*. Pada daerah di dekat *fusion line*, logam cair membeku membentuk struktur *columnar dendritic* disebabkan karena pendinginan yang cepat sedangkan untuk daerah yang lebih jauh dari *fusion line* terbentuk struktur *equiaxed dendritic* yang bernukleasi dan tumbuh sehingga

menghambat struktur *columnar dendritic* untuk tumbuh. Hal inilah yang menyebabkan pada gambar 4.5 terdapat struktur yang lebih bulat di bawah struktur *columnar dendritic*.

Pada pengelasan *multi-pass*, setiap pengelasan yang dilakukan akan menyebabkan penghalusan butir pada daerah hasil pengelasan sebelumnya. Hal ini yang menyebabkan struktur *columnar dendritic* lebih banyak pada bagian atas dari material lasan bila dibandingkan dengan bagian bawahnya.



5.3 Hasil dan Pembahasan Pengujian Mikrostruktur



Gambar 4.6 Mikrostruktur bagian kantung las (*weld pool*) hasil las FCAW dengan ketebalan 10 mm



Gambar 4.7 Mikrostruktur bagian HAZ kasar hasil las FCAW dengan ketebalan 10 mm



Gambar 4.8 Mikrostruktur bagian HAZ halus hasil las FCAW dengan ketebalan 10 mm



Gambar 4.9 Mikrostruktur bagian logam dasar hasil las FCAW dengan ketebalan 10 mm



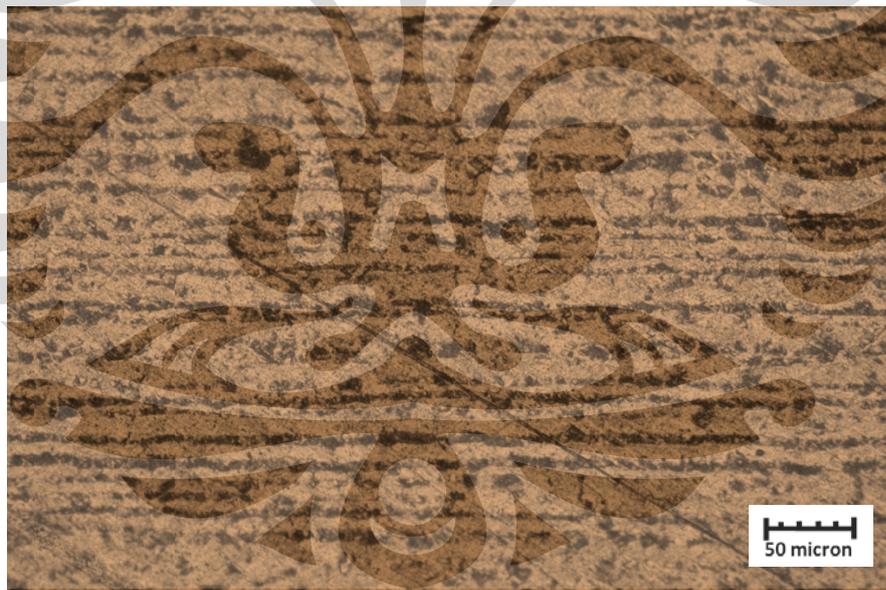
Gambar 4.14 Mikrostruktur bagian kampuh las (*weld pool*) hasil las FCAW dengan ketebalan 16 mm



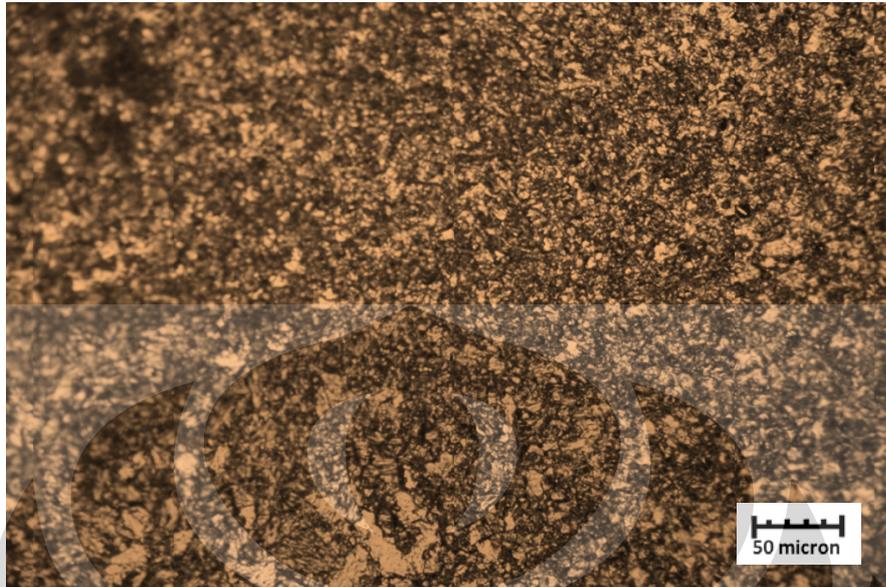
Gambar 4.15 Mikrostruktur bagian HAZ kasar hasil las FCAW dengan ketebalan 16 mm



Gambar 4.16 Mikrostruktur bagian HAZ halus hasil las FCAW dengan ketebalan 16 mm



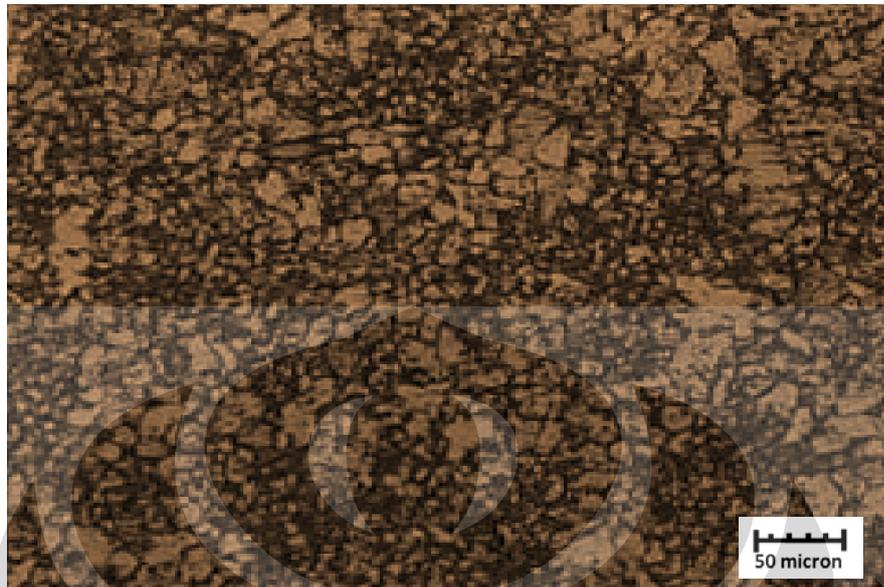
Gambar 4.17 Mikrostruktur bagian logam dasar hasil las FCAW dengan ketebalan 16 mm



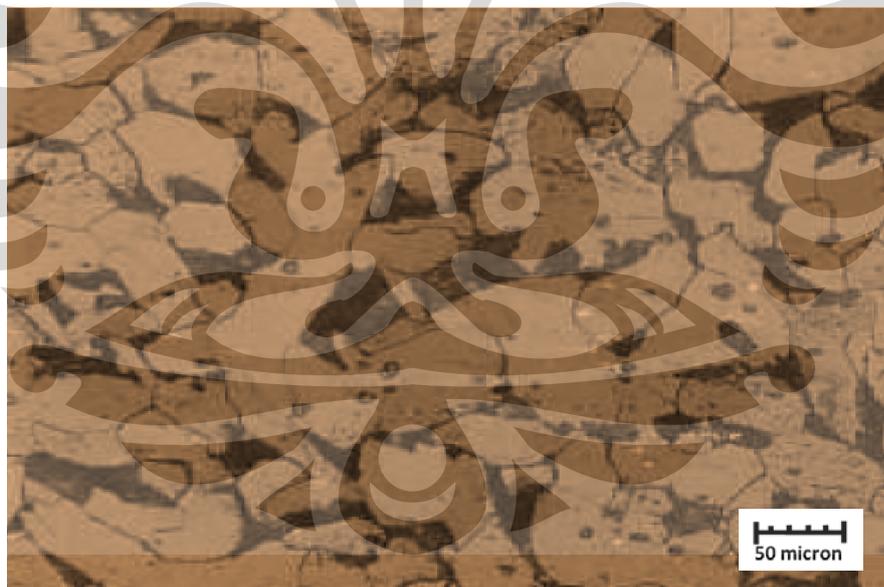
Gambar 4.13 Mikrostruktur bagian kantung las (*weld pool*) hasil las FCAW dengan ketebalan 20 mm



Gambar 4.12 Mikrostruktur bagian HAZ kasar hasil las FCAW dengan ketebalan 20 mm

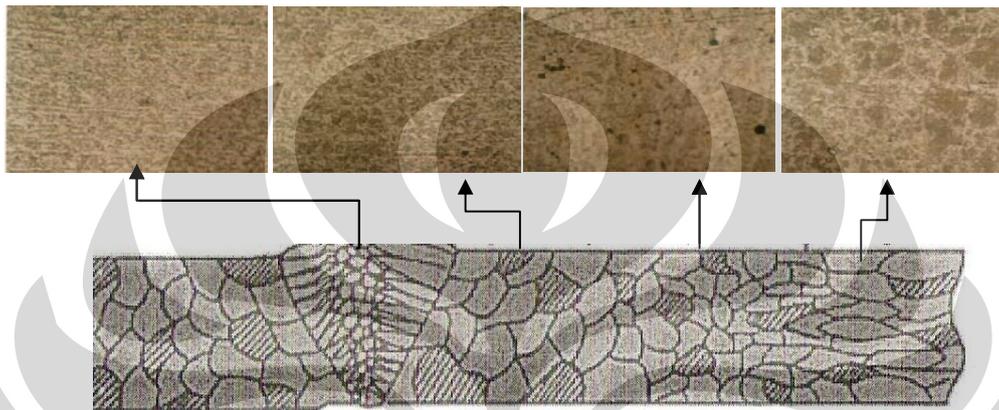


Gambar 4.10 Mikrostruktur bagian HAZ halus hasil las FCAW dengan ketebalan 20 mm



Gambar 4.11 Mikrostruktur bagian logam dasar hasil las FCAW dengan ketebalan 20 mm

Pengamatan mikrostruktur dilakukan pada daerah kumpuh las (*weld pool*), daerah terpengaruh panas kasar, daerah terpengaruh panas halus, dan daerah logam dasar. Secara umum, terdapat perbedaan bentuk butir pada keempat daerah tersebut. Gambar 4.12 Berikut merupakan salah satu mikrostruktur dari daerah yang diamati mikrostrukturnya.



Gambar 4.12 Daerah-daerah dari hasil pengelasan yang diamati mikrostrukturnya

4.3.1 Mikrostruktur logam dasar

Mikrostruktur dari logam dasar yang diamati memiliki bentuk butir yang berbeda-beda. Ada yang berbentuk pipih dan juga berbentuk bulat. Bentuk butir dari logam dasar yang berbeda-beda ini tidak dipengaruhi oleh proses pengelasan tetapi dipengaruhi oleh proses perlakuan yang dilakukan terhadap logam dasar sebelumnya. Misalnya, bentuk butir pipih disebabkan karena proses *rolling* yang dilakukan pada logam dasar.



Gambar 4.13 Salah satu mikrostruktur dari logam dasar yang berbentuk pipih

Secara umum, fasa yang terdapat pada semua logam dasar yang diamati mikrostrukturnya adalah fasa perlit dan fasa ferit. Fasa perlit adalah fasa yang berwarna lebih gelap sedangkan fasa ferit adalah fasa yang berwarna lebih terang.

4.3.2 Mikrostruktur daerah HAZ (*Heat Affected Zone*)

Mikrostruktur daerah terpengaruh panas (HAZ) dibagi menjadi dua bagian, yaitu mikrostruktur HAZ kasar dan mikrostruktur HAZ halus. Daerah HAZ kasar adalah daerah yang terpengaruh panas dengan temperatur di atas suhu rekristalisasi dan daerah ini bersebelahan dengan daerah dari kampuh las (*weld pool*). bentuk butir pada daerah HAZ kasar ini sangat kompleks karena berbagai macam bentuk butir terbentuk pada daerah ini, tetapi secara umum daerah ini memiliki ukuran butir yang lebih besar bila dibandingkan dengan dengan daerah HAZ halus. Hal disebabkan karena temperatur di atas suhu rekristalisasi menyebabkan butir menjadi tumbuh. Pada daerah ini terbentuk fasa austenit yang akan berubah menjadi fasa ferit dan perlit yang bentuk butirnya dipengaruhi oleh proses pendinginan yang terjadi. Pada daerah tepat pada batas antara kampuh las dengan logam dasar yaitu *fusion line* terbentuk *widmanstatten* ferit, *acicular* ferit, dan sedikit bainit yang pembentukannya dipengaruhi oleh kecepatan pendinginan.



Gambar 4.14 Struktur HAZ kasar (kiri) dan HAZ halus (kanan)

Daerah HAZ halus adalah daerah yang terpengaruh panas dengan temperatur di bawah suhu rekristalisasi. Daerah HAZ halus ini memiliki bentuk butir yang lebih halus dibandingkan dengan butir yang dimiliki logam dasar. Hal ini disebabkan karena pada temperatur di bawah suhu 700° terjadi proses rekristalisasi yaitu butir dari logam dasar akan melepaskan internal stress yang dimilikinya dan kemudian membentuk butir baru yang lebih halus. Pada daerah HAZ halus ini tidak terjadi proses transformasi austenit seperti yang terjadi pada daerah HAZ kasar, tetapi hanya terjadi proses rekristalisasi.

4.3.3 Mikrostruktur daerah kampu las (*weld pool*)

Pada daerah kampu las ini, komposisinya merupakan hasil pembekuan dari logam pengisi yang terdiri dari karbon dengan kandungan 0,05 %. Fasa yang terdapat pada daerah ini adalah fasa ferit dan perlit. Selain itu, pada daerah kampu las ini juga terdapat fasa *widmanstatten* ferit dan *acicular* ferit seperti yang terdapat pada daerah *fusion line*. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya pada pembahasan makrostruktur, daerah kampu las ini mengalami proses penghalusan butir akibat proses pengelasan *multi-pass* sehingga butir pada bagian bawah dari daerah kampu las memiliki bentuk butir yang lebih halus bila dibandingkan bagian atas yang cenderung memiliki struktur butir *columnar dendritic*. Pada daerah dengan struktur butir *columnar dendritic* ini terdapat fasa *widmanstatten* ferit dan *acicular* ferit.



Gambar 4.15 Mikrostruktur dari daerah kampu las yang memiliki butir halus

5.4 Hasil dan Pembahasan Pengujian Kekerasan Mikro

Tabel 4.4 Nilai kekerasan pada pelat dengan ketebalan 10 mm

Posisi	Nilai Kekerasan (HV)										
	Logam Dasar		HAZ Kiri		Weld Pool			HAZ Kanan		Logam Dasar	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
atas	165,6	163	161,9	162,8	166,2	172,8	172,4	163,1	159,2	162,4	164,2

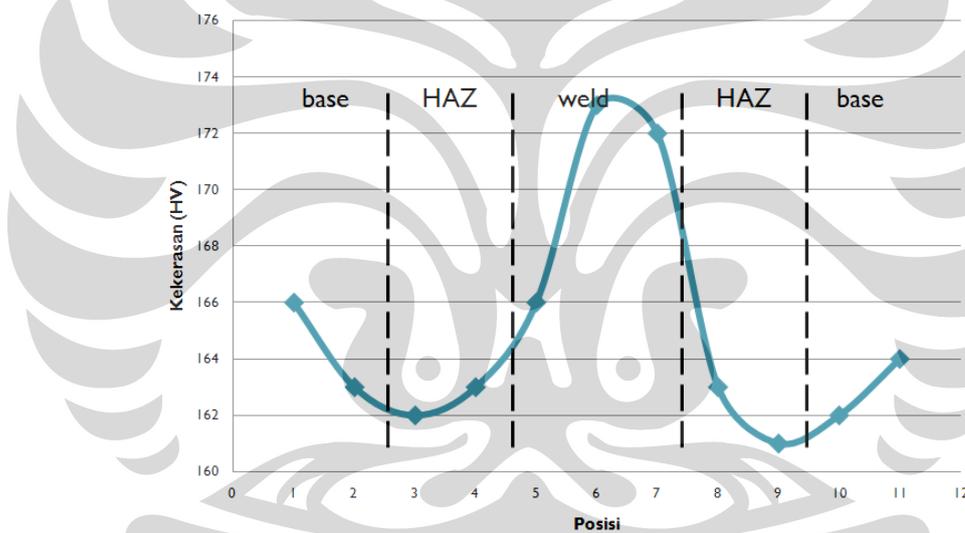
Tabel 4.5 Nilai kekerasan pada pelat dengan ketebalan 16 mm

Posisi	Nilai Kekerasan (HV)										
	Logam Dasar		HAZ Kiri		Weld Pool			HAZ Kanan		Logam Dasar	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
atas	157,7	153,0	185,9	185,5	158,3	160,2	156,8	169,5	169,9	148,1	144,7
bawah	154,4	154,4	171,4	171,7	195	176,3	179,1	186,2	181,1	151	156,4

Tabel 4.6 Nilai kekerasan pada pelat dengan ketebalan 20 mm

Posisi	Nilai Kekerasan (HV)										
	Logam Dasar		HAZ Kiri		Weld Pool			HAZ Kanan		Logam Dasar	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
atas	156,7	154,2	166,6	174,2	160	159,2	163	169	166,1	149	142,3
bawah	147,7	147,7	171,4	172,5	184	178	191,8	169,9	173,5	147,1	153,4

Pada hasil pengelasan FCAW ini, telah dilakukan pengujian kekerasan dengan menggunakan alat uji kekerasan *Vickers*. Pengujian kekerasan dilakukan pada daerah logam dasar, HAZ (*Heat Affected Zone*), dan juga daerah kumpuh las (*weldpool*). Pengujian dilakukan pada bagian atas dan bawah untuk ketebalan 16 mm dan 20 mm untuk mengetahui pengaruh dari pengelasan *multi pass* terhadap kekerasan yang dihasilkan, sedangkan untuk ketebalan 10 mm hanya dilakukan pada bagian atas. Hasil pengujian diperlihatkan pada gambar 4.2 untuk masing-masing ketebalan yaitu 10 mm, 16 mm, dan 20 mm. Pada gambar 4.2 b dan gambar 4.2 c, yaitu untuk ketebalan 16 mm dan 20 mm, diperlihatkan perbandingan antara kekerasan bagian atas dan kekerasan pada bagian bawah dari material lasan.



Gambar 4.16 Grafik kekerasan material dengan ketebalan 10 mm

Berdasarkan gambar 4.16, yaitu untuk ketebalan 10 mm diperoleh hasil yang menunjukkan kekerasan tertinggi terdapat pada bagian kumpuh las (*weldpool*). Dengan nilai kekerasan tertinggi yaitu 172,8 HV. Kekerasan yang paling tinggi pada bagian kumpuh las (*weldpool*) ini disebabkan karena pada bagian ini terdapat paling banyak material yang berasal dari logam pengisi (kawat las). Berdasarkan komposisi kimia *mill certificate* dari kawat las E71T-1, diketahui bahwa kawat pengisi mengandung unsur-unsur paduan lain selain Fe dan Carbon dengan komposisi paduan

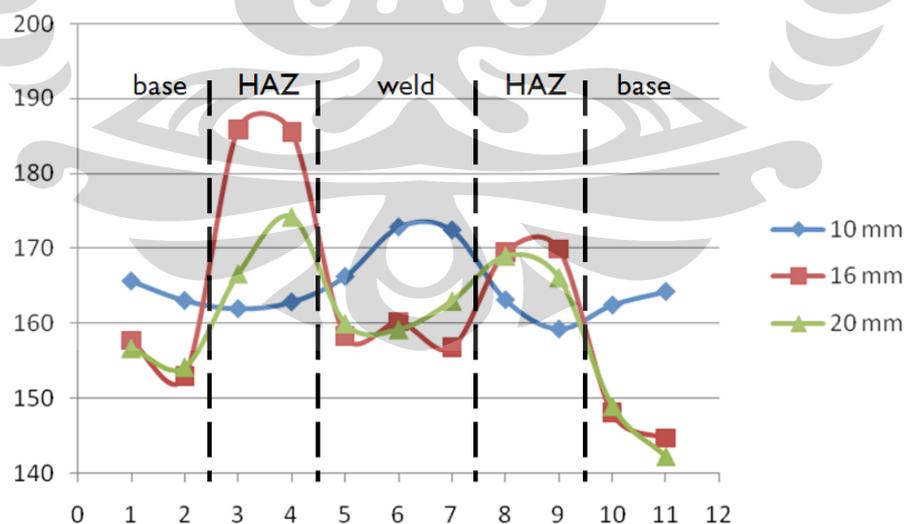
terbanyak ada pada Mangan (Mn) dan Silikon (Si). Mangan (Mn) pada baja berfungsi sebagai pembentuk *solid solution strengthening* yang dapat meningkatkan kekerasan pada baja, dan Silikon (Si) berfungsi sebagai unsur yang dapat meningkatkan kekuatan ferit. Sehingga, dengan adanya unsur-unsur tersebut menyebabkan bagian kampuh las (*weldpool*) menjadi lebih keras bilang dibandingkan dengan bagian HAZ (*Heat Affected Zone*) dan juga bagian logam dasar.

Selain pengaruh unsur-unsur paduan tersebut, besar butir juga berpengaruh terhadap kekerasan material. Berdasarkan persamaan Hall-Petch, diameter butir berbanding terbalik dengan kekuatan tarik, sedangkan kekuatan tarik sebanding dengan kekerasan suatu material.

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k_y}{\sqrt{d}}$$

Dimana σ_y adalah kekuatan tarik; σ_0 adalah tegangan awal yang dapat membuat dislokasi bergerak; k_y adalah konstanta suatu material; dan \sqrt{d} adalah diameter rata-rata dari butir.

Hal ini dapat dilihat pada perbandingan grafik kekerasan pada daerah atas material pada ketebalan 10 mm, 16 mm, dan 20 mm yang terdapat pada gambar 4.3.

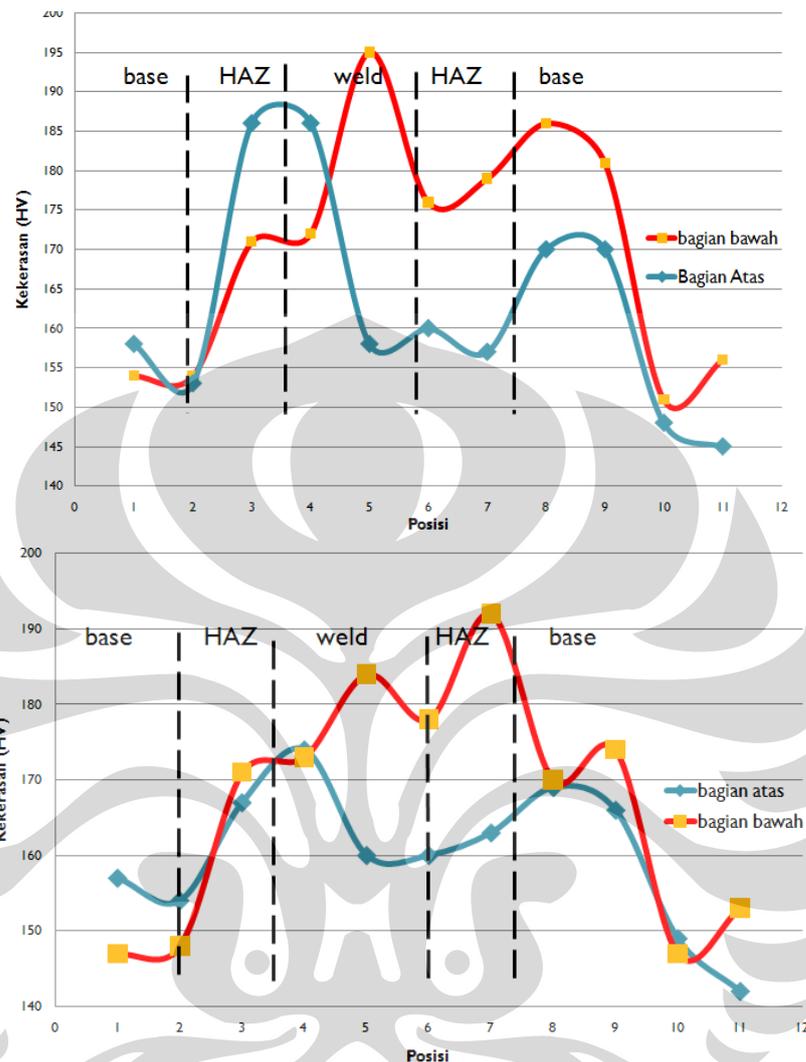


Gambar 4.17 Perbandingan kekerasan pada bagian atas dari material untuk ketebalan 10 mm, 16 mm, dan 20 mm

Pada gambar 4.17, diperlihatkan pada bagian kampuh las (*weld pool*) kekerasan paling tinggi dimiliki oleh material dengan ketebalan 10 mm sedangkan untuk ketebalan 16 mm dan 20 mm memiliki nilai kekerasan yang sama dengan kecenderungan material dengan ketebalan 16 mm lebih keras daripada material dengan ketebalan 20 mm. Hal ini disebabkan karena ukuran butir pada material dengan ketebalan 10 mm lebih kecil daripada material dengan ketebalan 16 mm dan 20 mm. Ukuran butir pada kampuh las (*weld pool*) ini dipengaruhi pada mekanisme pembekuan pada daerah tersebut, mulai dari keadaan cair kemudian mengalami nukleasi hingga akhirnya membeku. Mekanisme pembekuan ini salah satunya dipengaruhi oleh kecepatan pendingin (*cooling rate*) dari suatu material. Semakin tinggi kecepatan pendinginan maka butir yang terbentuk akan semakin halus. Kecepatan pendinginan ini dipengaruhi oleh ketebalan dari suatu material. Kecepatan pendinginan akan meningkat dengan turunnya ketebalan material, hal ini disebabkan karena pelat yang lebih tipis berfungsi sebagai *heat sink* yang lebih baik dibandingkan dengan pelat yang lebih tebal untuk menurunkan suhu dari lasan^[3].

Heat input juga mempengaruhi nilai kekerasan pada bagian atas dari material ini. Bila dibandingkan, *heat input* pada material dengan ketebalan 10 mm, lebih kecil bila dibandingkan dengan *heat input* pada material dengan ketebalan 16 mm dan 20 mm. Heat input yang besar akan menyebabkan tingkat pendinginan menurun dan heat input yang besar juga akan menyebabkan penurunan kekuatan dari material^[6].

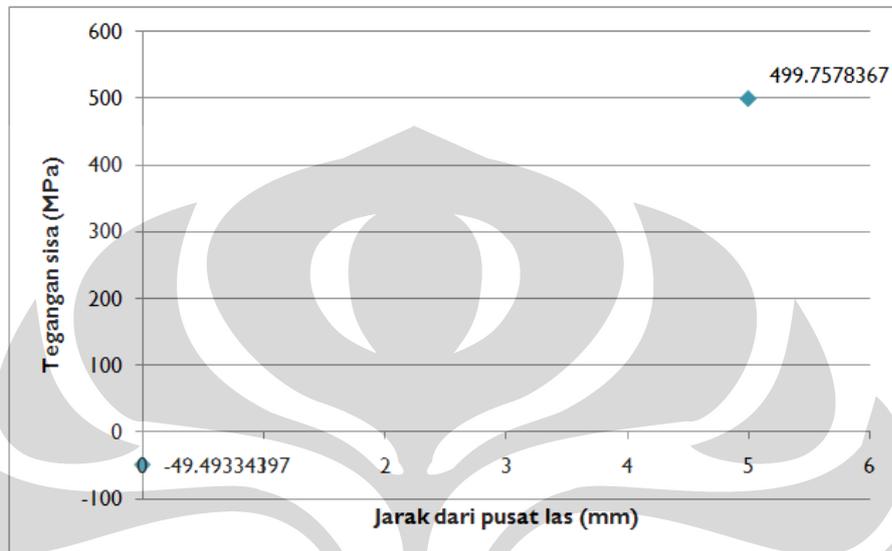
Pada gambar 4.18 untuk kedua ketebalan, 16 mm dan 20 mm, diperlihatkan bahwa kekerasan pada bagian bawah dari material lebih keras bila dibandingkan dengan kekerasan pada bagian atas material terutama pada bagian kampuh las (*weld pool*). Pada material dengan tebal 16 mm, rata-rata kekerasan pada bagian atas adalah 158,43 HV sedangkan nilai rata-rata pada bagian bawah adalah 183,47 HV. Sedangkan pada material dengan ketebalan 20 mm, rata-rata kekerasan pada bagian atas adalah 160,73 HV sedangkan nilai rata-rata pada bagian bawah adalah 184,6 HV.



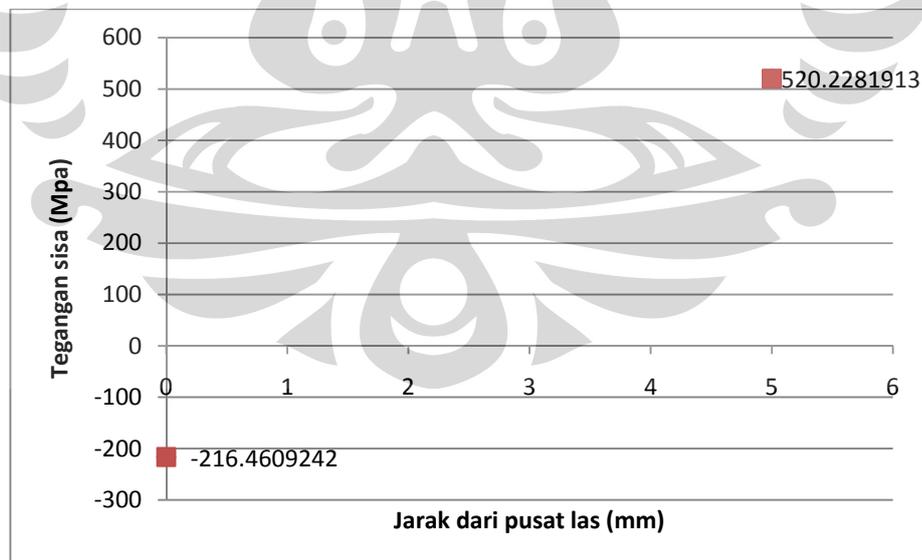
Gambar 4.18 (a) Grafik kekerasan material dengan tebal 16 mm
(b) Grafik kekerasan material dengan tebal 20 mm

Perbedaan kekerasan pada bagian atas dan bawah ini disebabkan karena proses pengelasan dilakukan secara *multi-pass*. Pada pengelasan *multi-pass*, proses pengelasan yang dilakukan akan menyebabkan penghalusan butir pada daerah yang telah dilakukan pengelasan sebelumnya, begitu seterusnya hingga *pass* terakhir. Sehingga hal ini menyebabkan butir pada bagian bawah akan lebih halus bila dibandingkan dengan butir pada bagian atas dari material. Dengan semakin halus butir, akan menyebabkan nilai kekerasan meningkat.

5.5 Data dan Pembahasan Tegangan Sisa



Gambar 4.19 Grafik tegangan sisa pada pelat 10 mm



Gambar 4.20 Grafik tegangan sisa pada pelat 20 mm

Pada pengujian tegangan sisa dengan menggunakan difraksi sinar-x ini, daerah yang diuji tegangan sisanya adalah daerah HAZ (*Heat Affected Zone*) dan daerah kampuh las (*weld pool*) hasil dari pengelasan FCAW pada daerah bagian atas. Hal ini dilakukan karena pada pengelasan *multi-pass* akan terjadi penghilangan tegangan sisa pada bagian bawah terutama pada bagian kampuh las (*weld pool*) sehingga data tegangan sisa yang didapat tidak menggambarkan yang sebenarnya. Pelat yang diuji tegangan sisa adalah pelat dengan ketebalan 10 mm dan pelat dengan ketebalan 20 mm.

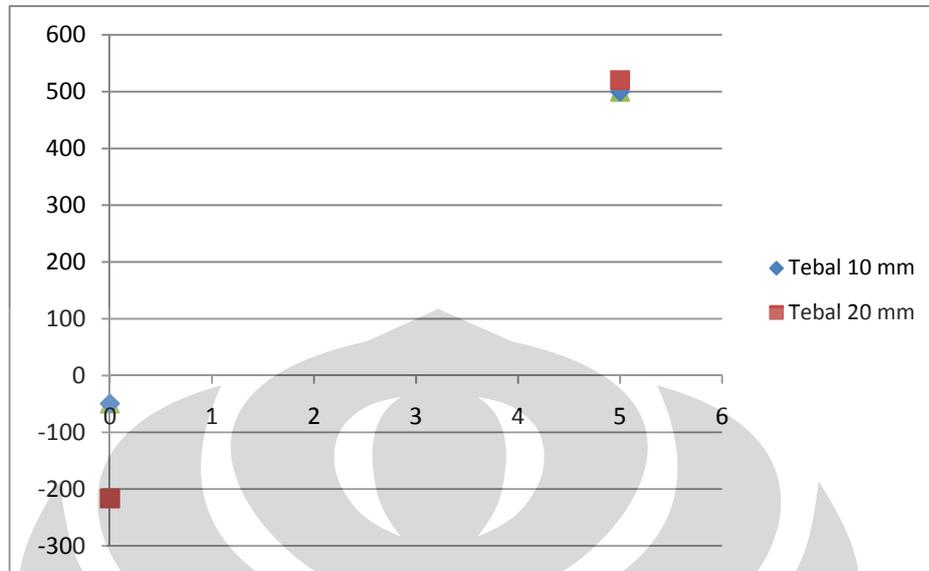
Tegangan sisa pada logam las ini terjadi karena adanya siklus pemanasan dan pendinginan yang tidak merata dalam logam las. Pada pengelasan fusi, bagian logam yang mengalami pemanasan hanyalah daerah di sekitar kampuh las, akan tetapi panas ini didistribusikan secara 3 dimensi ke arah x, y, dan z. distribusi yang tidak merata ini yang menyebabkan adanya daerah HAZ disekitar daerah kampuh las (*weld pool*)^[4]

Dengan menggunakan nilai Modulus Elastisitas, E sebesar 207 Gpa dan *poisson's ratio* sebesar 0,3, maka dari hasil perhitungan dengan menggunakan rumus:

$$\sigma = \frac{E}{(1 + \nu) \times (1 - 2\nu)} (\epsilon) \quad (4.1)$$

Maka didapat tegangan sisa untuk pelat 10 mm pada daerah kampuh las (*weld pool*) sebesar – 49,4493 MPa dan pada daerah HAZ 5 mm dari pusat kampuh las sebesar 499,758 Gpa, sedangkan untuk pelat 20 mm pada daerah kampuh las (*weld pool*) sebesar – 216,461 GPa dan pada daerah HAZ 5 mm dari pusat kampuh las sebesar 520,228 Gpa.

Dari nilai tegangan sisa ini didapat bahwa untuk pelat dengan ketebalan 10 mm dan 20 mm tegangan sisa pada daerah kampuh las adalah tegangan sisa tekan sedangkan tegangan sisa pada daerah HAZ adalah tegangan sisa tarik perbedaan tegangan sisa yang terjadi ini disebabkan karena pada daerah kampuh las terjadi proses penyusutan dari logam cair yang membeku sedangkan pada daerah HAZ terjadi proses pemuain karena panas yang terjadi pada proses pengelasan.



Gambar 4.21 Grafik perbandingan tegangan sisa pada pelat 10 mm dan 20 mm

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa tegangan sisa untuk pelat 20 mm lebih besar dari pada tegangan sisa untuk pelat 10 mm. Hal ini disebabkan karena masukan panas (*heat input*) yang digunakan pada pengelasan pelat 20 mm lebih besar daripada masukan panas (*heat input*) yang digunakan pada pengelasan pelat 10 mm.

Tegangan sisa yang ada ini, juga berhubungan dengan terjadinya distorsi pada pengelasan. Berdasarkan tabel 4.1 dan 4.3, nilai distorsi untuk ketebalan 20 mm lebih besar bila dibandingkan dengan nilai distorsi untuk ketebalan 10 mm. Nilai ini sebanding dengan nilai tegangan sisa yang ada yaitu tegangan sisa pelat dengan ketebalan 20 mm lebih besar bila dibandingkan dengan ketebalan 10 mm. Hal ini disebabkan karena dengan adanya tegangan, maka kisi kristal logam akan mengalami regangan, yang merupakan penyebab terdistorsinya kisi kristal logam^[4]. Oleh karena itu, semakin besar tegangan sisa yang ada, maka distorsi yang terjadi juga semakin besar.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

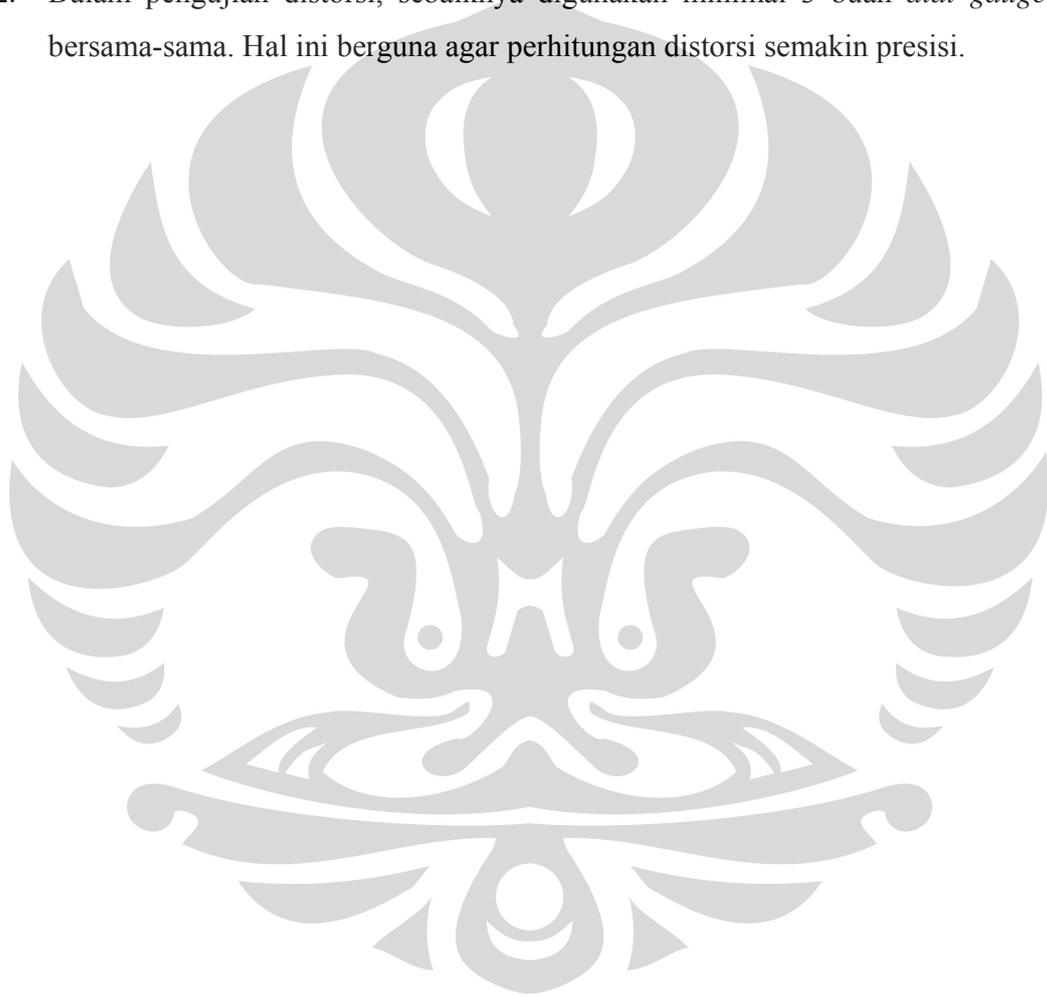
6.1 Kesimpulan

Dari penelitian ini, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan yaitu :

1. Semakin tebal pelat yang di las akan semakin besar distorsi angular yang terjadi. pelat 20 mm memiliki nilai distorsi sebesar 9.134° , pelat 16 mm sebesar 3.35° , pelat 10 mm sebesar 0.597° .
2. Masukan panas (*Heat Input*) juga mempengaruhi distorsi. Semakin tebal pelat, maka distorsi semakin besar, dan masukan panas yang dibutuhkan semakin tinggi. Untuk pelat dengan ketebalan 20 mm memiliki nilai *heat input* sebesar 77,296 KJ/mm, pelat 16 mm sebesar 64,66 KJ/mm, dan pelat 10 mm sebesar 31,71 KJ/mm.
3. Pada pelat dengan ketebalan 16 mm dan 20 mm, pengelasan *multi-pass* menyebabkan penghalusan butir pada bagian bawah dari pelat hasil las sehingga menyebabkan kekerasan untuk pelat bagian bawah menjadi lebih besar daripada pelat bagian atas terutama pada bagian kampuh las.
4. Untuk pelat 16 mm, kekerasan rata-rata pada bagian atas kampuh las adalah 158,43 HV dan pada bagian bawah kampuh las sebesar 183,47 HV. Untuk pelat 20 mm, kekerasan rata-rata pada bagian atas kampuh las adalah 160,73 HV dan pada bagian bawah kampuh las sebesar 184,6 HV.
5. Pengukuran tegangan sisa dilakukan pada pelat 10 mm dan 16 mm. untuk pelat 10 mm nilai tegangan sisa terbesar pada daerah HAZ sebesar 499 Mpa dan untuk pelat 20 mm nilai tegangan sisa terbesar juga ada pada daerah HAZ yaitu sebesar 520 MPa

6.2 Saran

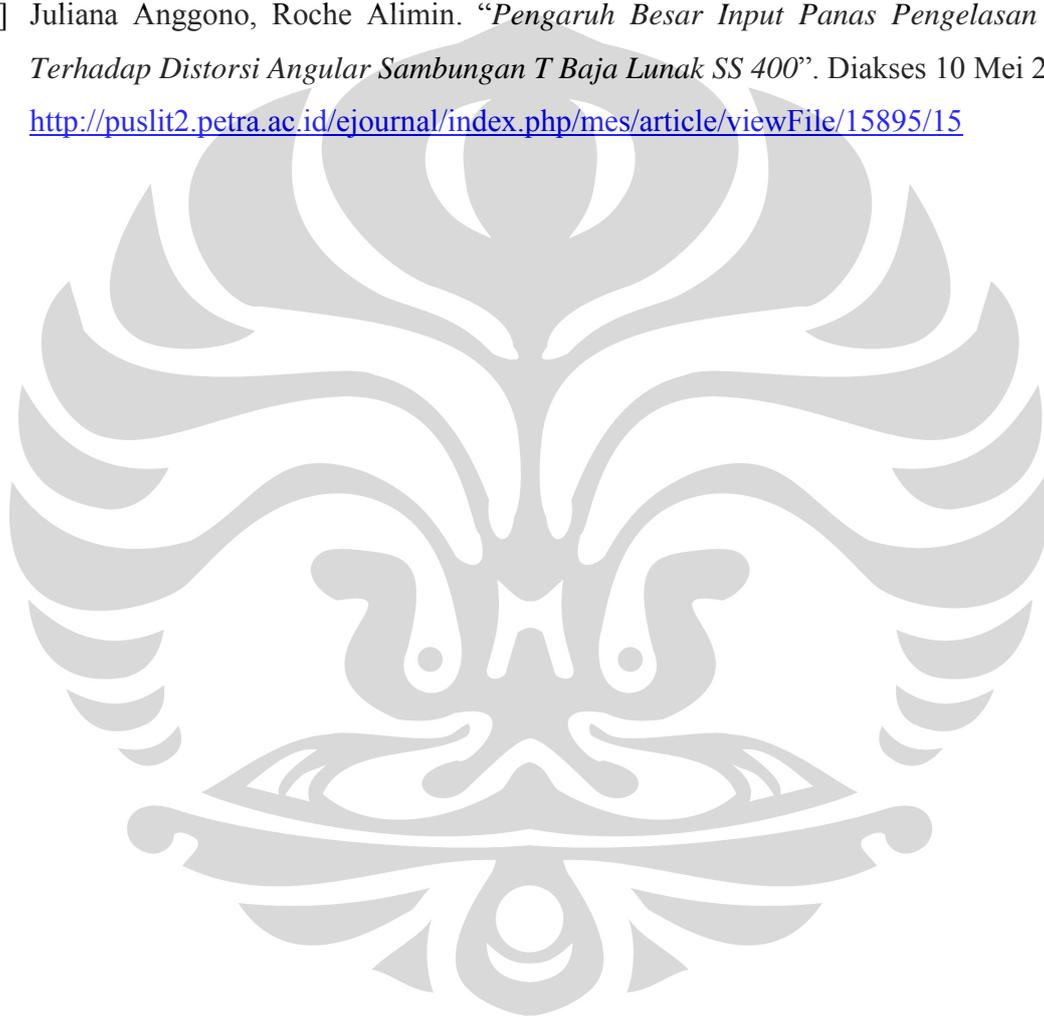
1. Karena keterbatasan alat, maka pengujian sisa dilakukan dengan menggunakan difraksi sinar-x yang hanya dapat mengukur tegangan sisa pada satu arah. Untuk mendapatkan data tegangan sisa pada tiga arah (x, y, dan z) maka sebaiknya digunakan difraksi neutron.
2. Dalam pengujian distorsi, sebaiknya digunakan minimal 3 buah *dial gauge* secara bersama-sama. Hal ini berguna agar perhitungan distorsi semakin presisi.



DAFTAR REFERENSI

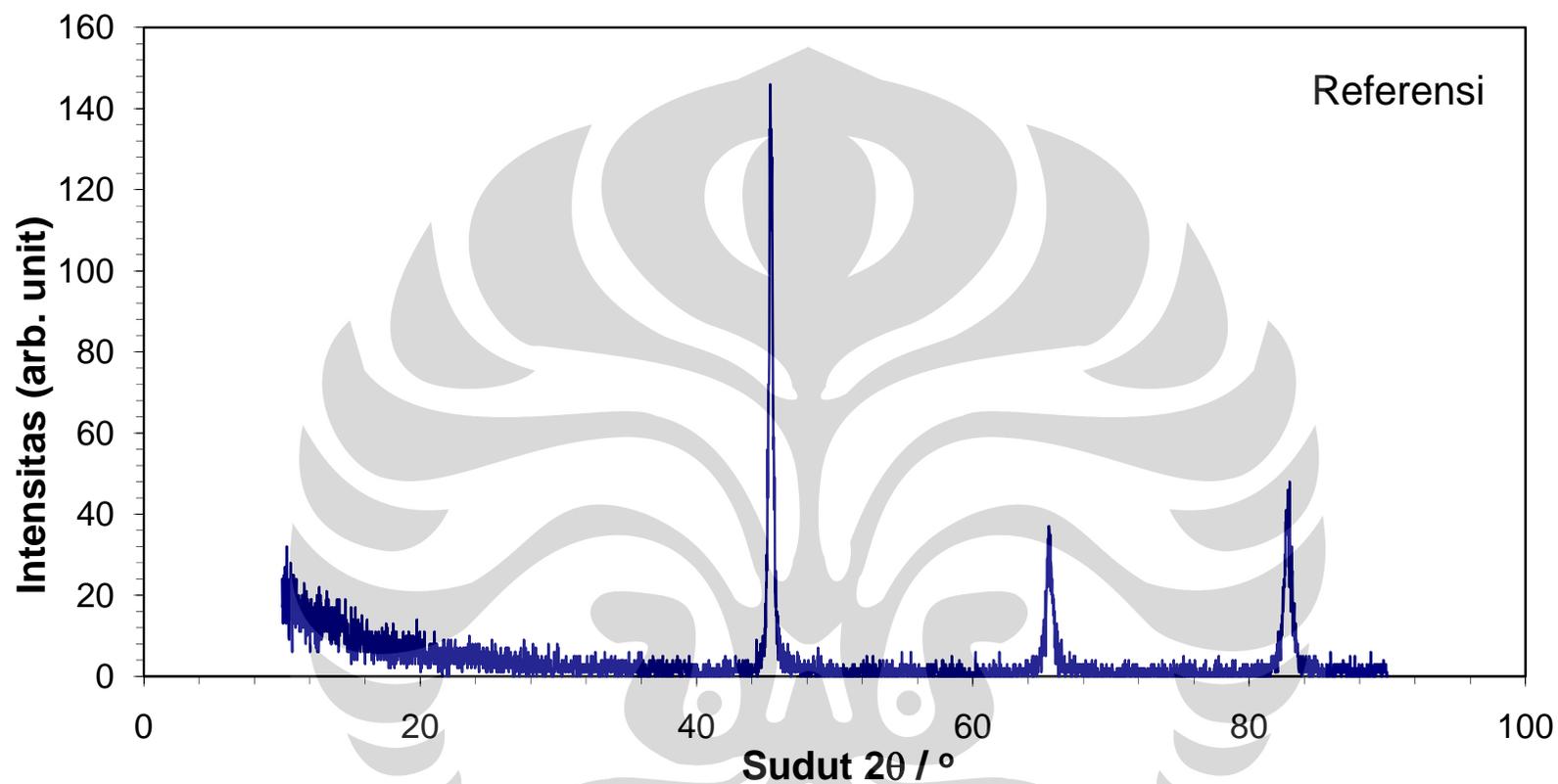
- [1] JIS G 3101 (JISF), Rolled Steels for General Structure, Japan Standards Association, 2004
- [2] Welding Handbook Volume 1, eight Ed, American Welding Society Miami, Florida, USA
- [3] Sindo Kou, 2002. Welding metallurgy 2nd ed. "A Wiley-Interscience publication.
- [4] O. P. Khana, *Welding Technology*, (New Delhi : Dhampat Rai and Sons, 1991).
- [5] American Welding Society , *Welding Handbook, Volume 1 , Welding Science & Technology , 9th Edition* (Miami : American Welding Society, 2006).
- [6] H. Wiryosumarto dan T. Okura Teknologi Pengelasan Logam, P.T Pradnya Paramita, Jakarta, 2004.
- [7] Ikeagu, Chukwugozie Raymond, *Evaluating the Effect of Different Welding Processes on the Distortion of 4mm Thick DH36 Ship Panels*, Cranfield University, September, 2007.
- [8] Artikel "*Prevention and Control of Weld Distortion*". Diakses 21 Mei 2010. <http://www.lincolnelectric.com/knowledge/articles/list.asp>
- [9] James Dydo, Harvey Castner. 1999. "*Guidelines For Control Of Distortion In Thin Ship Structures*". Navy Joining Center. Ohio.
- [10] Ir. Edy S Siradj M.Eng, 1993. Pengukuran Tegangan Sisa Aluminium Paduan 5852-H13 Hasil Pengelasan GTA dengan Metode Difraksi Sinar-X. Jurusan Metalurgi Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- [11] Feng, Zhili, *Process and Mechanism of Welding Residual Stress and Distortion*, CRC Press, New York.
- [12] Masubuchi, K, 1980. Analysis of Welded Structure, First Ed.Pergamon Press Ltd. Oxford, England.
- [13] Hirai dan Nakamura. research on *angular* change in fillet welds, Ishikawajina Review, pp29-68)) on 1 analisis of welded structure.
- [14] Analysis of Residual Stress by Diffraction using Neutron and Synchrotron Radiation, 2003. Taylor & Francis 11 New Fetter Lane, London EC4P 4EE

- [15] Metals Handbook, (2001), Vol. 10 – Materials Characterization, American Society For Metals International.
- [16] Farid Moch. Zamil. 2003. ”*Manual Distorsi/Deformasi (Perubahan Bentuk)*”. Diakses 21 Januari 2010.
<http://www.migas-indonesia.com/index.php?module=article&sub=article&act=view&id=164>
- [17] Juliana Anggono, Roche Alimin. “*Pengaruh Besar Input Panas Pengelasan SMAW Terhadap Distorsi Angular Sambungan T Baja Lunak SS 400*”. Diakses 10 Mei 2009.
<http://puslit2.petra.ac.id/ejournal/index.php/mes/article/viewFile/15895/15>



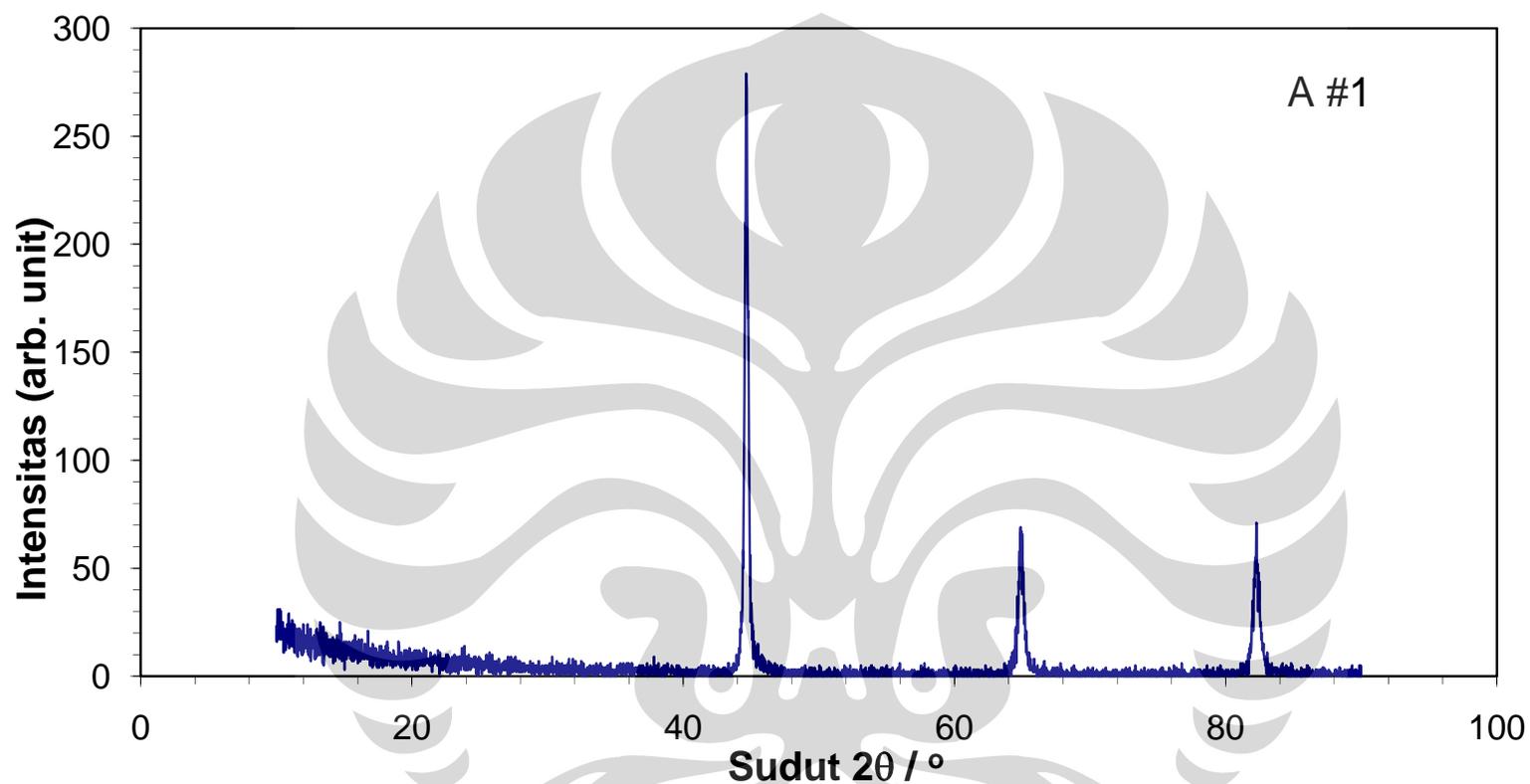
LAMPIRAN



Lampiran 1. Hasil Pengujian XRD untuk material referensi

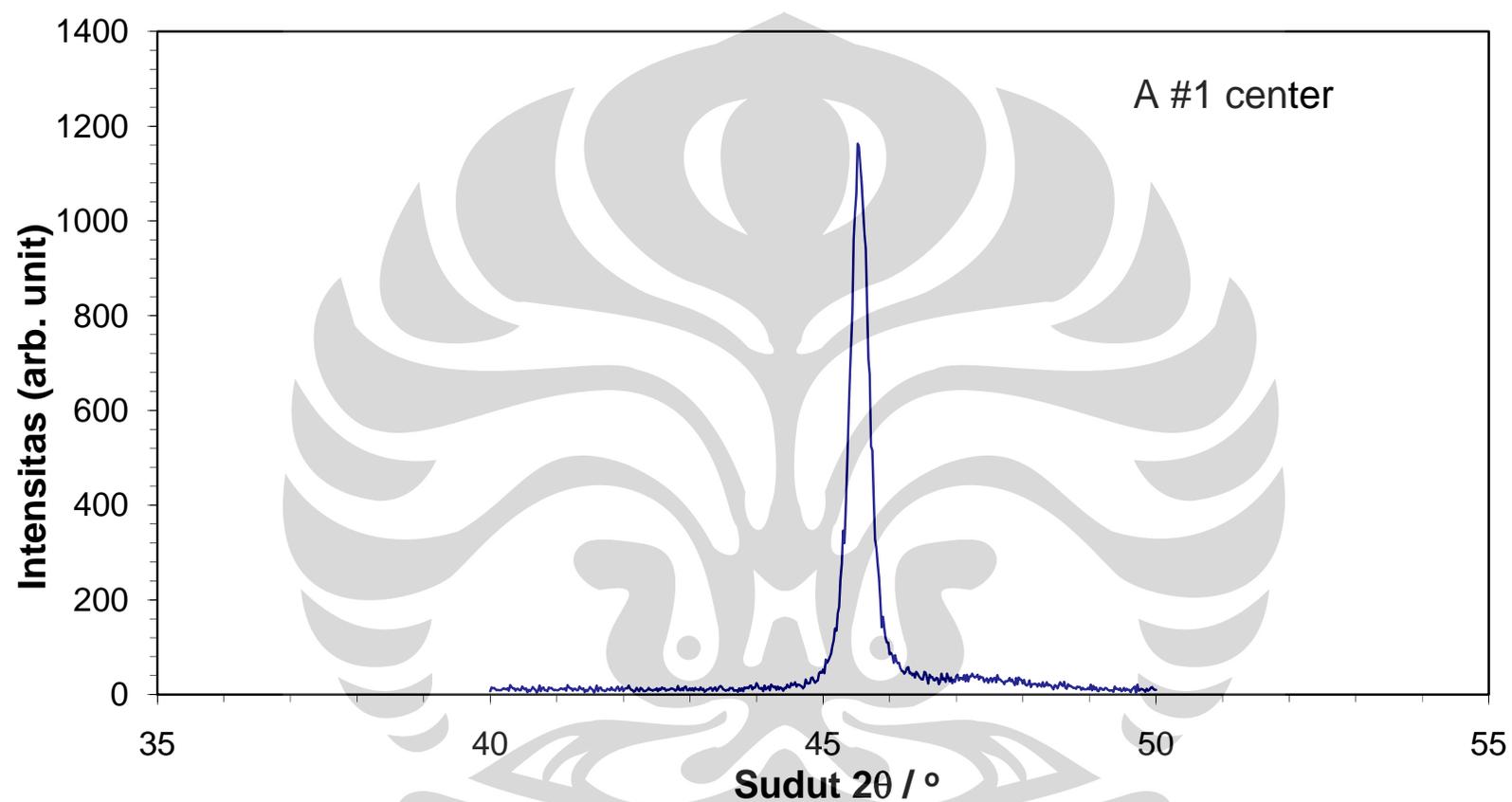
No.	Pos. [°2Th.]	FWHM [°2Th.]	Area [cts*°2Th.]	Backgr.[cts]	d-spacing [Å]	Height [cts]	Rel. Int. [%]
1	45.3899	0.3149	41.85	1	1.99815	134.73	100
2	65.5212	0.48	20.43	1	1.4235	31.92	23.69
3	82.6674	0.336	16.88	1	1.16634	37.67	27.96

Lampiran 2. Hasil Pengujian XRD untuk material hasil lasan FCAW tebal 20 (jarak 5 mm dari weld center)



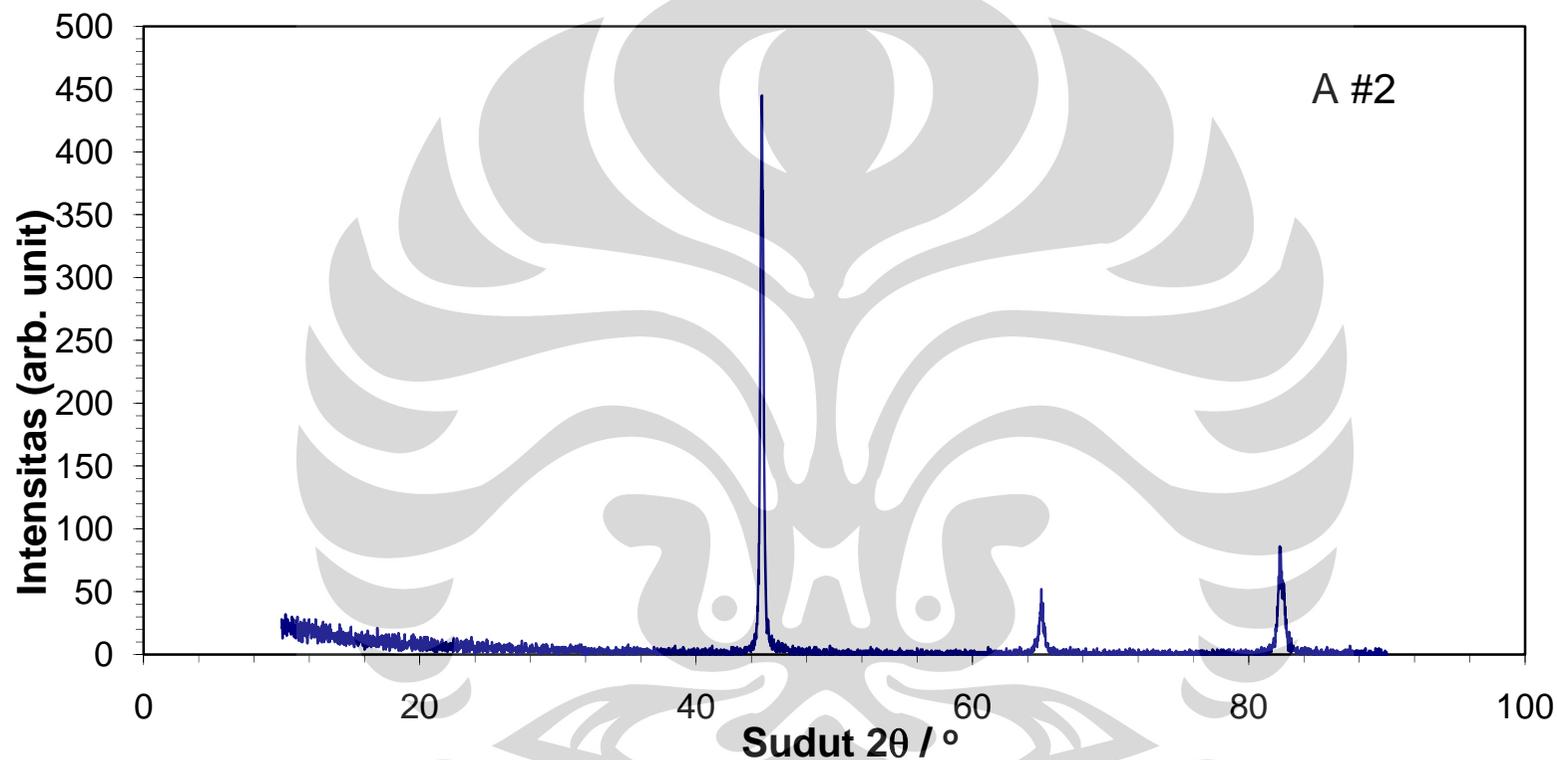
No.	Pos. [°2Th.]	FWHM [°2Th.]	Area [cts*°2Th.]	Backgr.[cts]	d-spacing [Å]	Height [cts]	Rel. Int. [%]
1	44.6672	0.1181	32	1	2.02879	274.73	100
2	64.9263	0.3936	22.94	1	1.43629	59.09	21.51
3	82.2457	0.48	38.05	0	1.17124	59.45	21.64

Lampiran 3. Hasil Pengujian XRD untuk material hasil lasan FCAW tebal 20 (jarak 0 mm dari weld center)



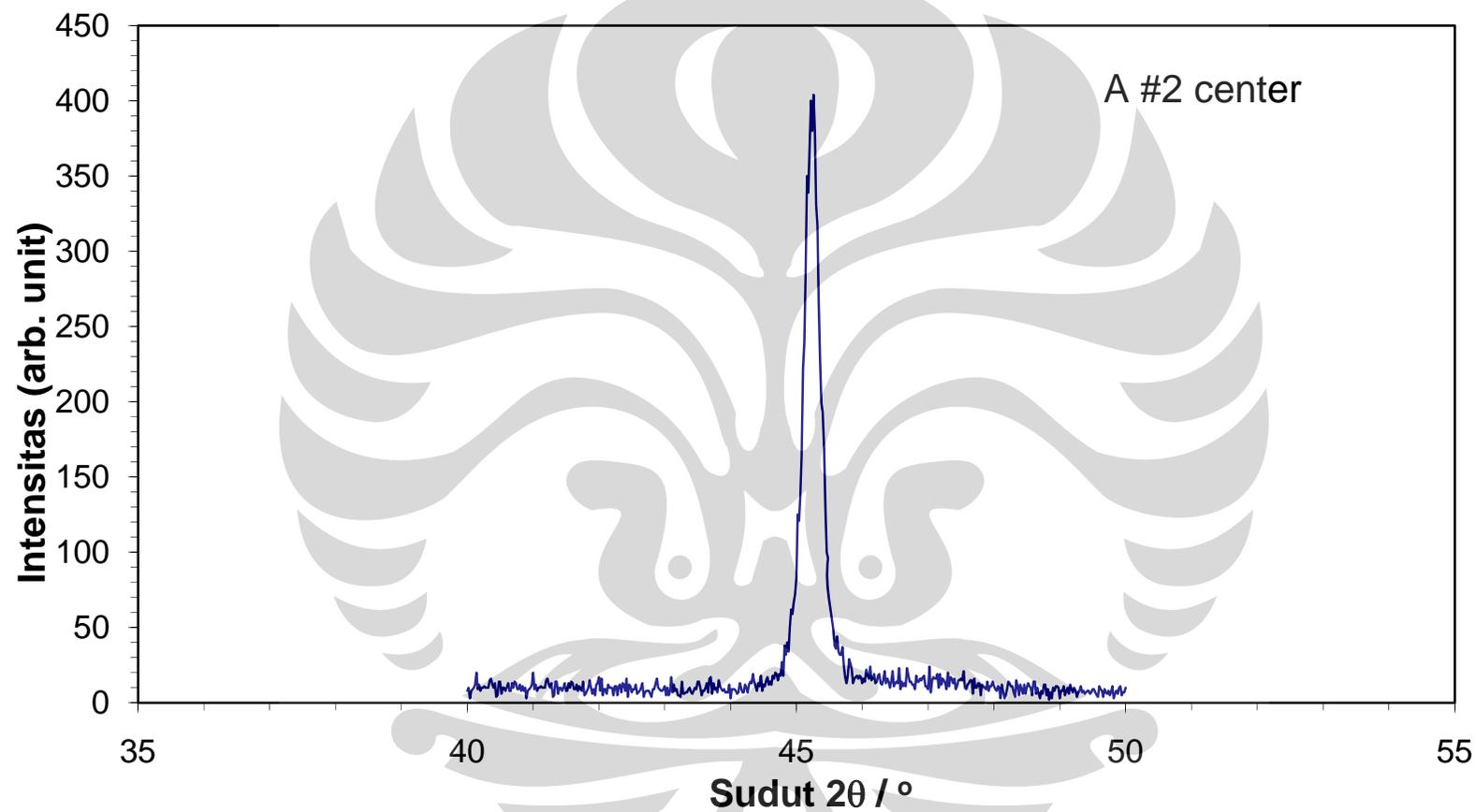
No.	Pos. [°2Th.]	FWHM [°2Th.]	Area [cts*°2Th.]	Backgr.[cts]	d-spacing [Å]	Height [cts]	Rel. Int. [%]
1	44.6901	0.2755	305.61	23	2.0278	1124.46	100

Lampiran 4. Hasil Pengujian XRD untuk material hasil lasan FCAW tebal 10 (jarak 5 mm dari weld center)



No.	Pos. [°2Th.]	FWHM [°2Th.]	Area [cts*°2Th.]	Backgr.[cts]	d-spacing [Å]	Height [cts]	Rel. Int. [%]
1	44.7493	0.1771	73.19	1	2.02526	418.91	100
2	64.9876	0.2362	9.13	0	1.43508	39.18	9.35
3	82.2682	0.24	25.78	0	1.17098	80.55	19.23

Lampiran 5. Hasil Pengujian XRD untuk material hasil lasan FCAW tebal 10 (jarak 0 mm dari weld center)



No.	Pos. [$^{\circ}2\theta$.]	FWHM [$^{\circ}2\theta$.]	Area [cts* $^{\circ}2\theta$.]	Backgr.[cts]	d-spacing [Å]	Height [cts]	Rel. Int. [%]
1	44.3755	0.2755	102.06	10	2.04144	375.52	100

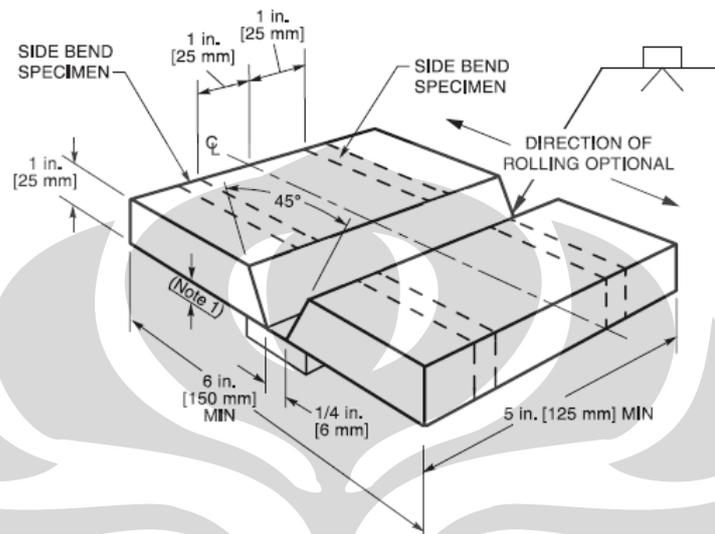
Lampiran 6. Hasil Perhitungan Tegangan sisa

Posisi 5 mm							
Sample	Peaks	2 theta	theta	d	do	(d-do)/do	ϵ
Ref	1	45.304	22.652	3.925509	3.925509		
	2	65.526	32.763	2.733505	2.733505		
	3	82.742	41.371	2.18248	2.18248		
A1	1	44.712	22.356	3.976809	3.976809	0.013069	0.013069
	2	64.975	32.4875	2.756053	2.756053	0.008249	0.008249
	3	82.341	41.1705	2.192644	2.192644	0.004657	0.004657
A2	1	44.735	22.3675	3.974791	3.974791	0.012554	0.012554
	2	64.99	32.495	2.755434	2.755434	0.008022	0.008022
	3	82.362	41.181	2.192109	2.192109	0.004412	0.004412
B1	1	44.665	22.3325	3.980941	3.980941	0.014121	0.014121
	2	64.921	32.4605	2.758284	2.758284	0.009065	0.009065
	3	82.299	41.1495	2.193714	2.193714	0.005148	0.005148
B2	1	44.455	22.2275	3.999508	3.999508	0.018851	0.018851
	2	64.715	32.3575	2.766828	2.766828	0.012191	0.012191
	3	82.122	41.061	2.198238	2.198238	0.00722	0.00722
Posisi Center							
Sample	Peaks	2 theta	theta	d	do	(d-do)/do	ϵ
Ref	1	45.297	22.6485	3.926107	3.925509		
A1	1	45.555	22.7775	3.904163	3.976809	-0.005438	0.005438
A2	1	45.247	22.6235	3.930389	3.974791	0.001243	0.001243
B1	1	45.603	22.8015	3.900108	3.980941	-0.006471	0.006471
B2	1	45.52	22.76	3.907125	3.999508	-0.004683	0.004683

Lampiran 7. Test Piece Standard

AWS D1.1/D1.1M:2004

SECTION 4. QUALIFICATION

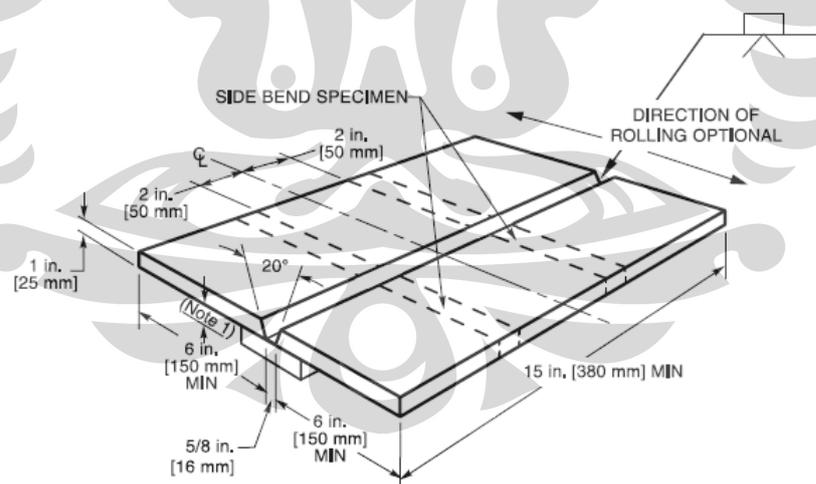


General Note: When RT is used, no tack welds shall be in test area.

Note:

1. The backing thickness shall be 1/4 in. [6 mm] min to 3/8 in. [10 mm] max; backing width shall be 3 in. [75 mm] min when not removed for RT, otherwise 1 in. [25 mm] min.

Figure 4.21—Test Plate for Unlimited Thickness—Welder Qualification (see 4.23.1)



General Notes:

- When RT is used, no tack welds shall be in test area.
- The joint configuration of a qualified WPS may be used in lieu of the groove configuration shown here.

Note:

1. The backing thickness shall be 3/8 in. [10 mm] min to 1/2 in. [12 mm] max; backing width shall be 3 in. [75 mm] min when not removed for RT, otherwise 1-1/2 in. [40 mm] min.

Figure 4.22—Test Plate for Unlimited Thickness—Welding Operator Qualification (see 4.23.2)