



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGUKURAN BESARNYA DISTORSI ANGULAR DAN
TEGANGAN SISA PADA BAJA JIS G3101-SS400 DENGAN
MENGUNAKAN PROSES PENGELASAN FCAW**

SKRIPSI

**ARYA FAJAR PRIMASATYA
0405040112**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JUNI 2009**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGUKURAN BESARNYA DISTORSI ANGULAR DAN
TEGANGAN SISA PADA BAJA JIS G3101-SS400 DENGAN
MENGUNAKAN PROSES PENGELASAN FCAW**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**ARYA FAJAR PRIMASATYA
0405040112**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JUNI 2009**

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 Fajar Primasatya

NPM : 0405040112

Tanda Tangan :

Tanggal : 26 Juni 2009



LEMBAR PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Arya Fajar Primasatya

NPM : 0405040112

Program Studi : Logam

Judul Skripsi : Pengukuran Besarnya Distorsi Angular dan Tegangan Sisa pada Baja JIS G3101-SS400 dengan Menggunakan Proses Pengelasan FCAW

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Winarto, M.Sc, PhD (.....)

Penguji : Dr.Ir Dedi Priadi, DEA (.....)

Penguji : Deni Ferdian, ST.,M.Sc (.....)

Ditetapkan di : Depok, Universitas Indonesia

Tanggal : 3 Juli 2009

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik pada Departemen Metalurgi Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Ir. Winarto M.Sc, Ph.D, selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan dan nasehat sehingga penulisan skripsi ini dapat berjalan dengan baik.;
2. Bapak Ir. M. Rifai Muslih, beserta segenap staf PT.BIN, yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk membantu melakukan pengujian difraksi neutron.
3. Bapak Ir. Darmayadi, segenap juru las dan karyawan PT. Danwo Steel Sejati, yang telah membantu dalam proses pengelasan.
4. Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral; dan
5. Azril Nazahar, rekan sekaligus sahabat yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 26 Juni 2008

Penulis

LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH

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

Nama : Arya Fajar Primasatya
NPM : 0405040708
Departemen : Teknik Metalurgi Material
Fakultas : Teknik Universitas Indonesia
Jenis karya : Skripsi

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

PENGUKURAN BESARNYA DISTORSI ANGULAR DAN TEGANGAN SISA PADA BAJA JIS G3101-SS400 DENGAN MENGGUNAKAN PROSES PENGELASAN FCAW

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 26 Juni 2009

Yang menyatakan

(Arya Fajar Primasatya)

ABSTRAK

Nama : Arya Fajar Primasatya
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Pengukuran Besarnya Distorsi Angular dan Tegangan Sisa pada Baja JIS G3101-SS400 dengan Menggunakan Proses Pengelasan FCAW

Perubahan bentuk dalam produksi baja konstruksi akibat proses pengelasan adalah hal yang sangat mengganggu. Hal ini menyebabkan adanya penambahan biaya produksi dan kehilangan waktu untuk proses perbaikan akibat adanya perubahan bentuk tersebut. Salah satu perubahan bentuk yang mudah diamati dalam produksi baja konstruksi adalah adanya penyimpangan sudut. Penyimpangan sudut dalam produk las disebabkan karena adanya pemanasan dan pendinginan yang tidak seragam pada proses pengelasan yang menyebabkan adanya penyusutan yang tidak seragam. Selain menyebabkan terjadinya penyimpangan sudut adanya pemanasan dan pendinginan yang tidak seragam juga meninggalkan tegangan sisa didalam material. Hadirnya tegangan sisa, terutama tegangan sisa tarik didalam produk las sangat dihindari karena dapat memicu timbulnya retak. Dalam penelitian ini dilakukan pengukuran penyimpangan sudut yang terjadi pada proses pengelasan FCAW dengan ketebalan sampel 10, 16 dan 20mm dan dengan posisi pengelasan vertikal dan horizontal dan juga pengukuran tegangan sisa dengan menggunakan metode difraksi neutron. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa penyimpangan sudut akibat proses pengelasan memiliki besaran yang berbanding lurus dengan ketebalan pengelasan. Sedangkan pada pengujian tegangan sisa menunjukkan bahwa pada daerah terpengaruh panas memiliki nilai tegangan sisa yang paling besar pada produk las yang dihasilkan.

Kata kunci: penyimpangan sudut, tegangan sisa, *flux core arc welding*

ABSTRACT

Nama : Arya Fajar Primasatya
Program Studi : Metallurgy & Materials Engineering
Judul : Angular Distortion and Residual Stress Measurement on
JIS G3101- SS400 Welded Structure by FCAW Method

Distortion on construction steel as result of welding proses is very annoying and avoided. It is make time lost and cost production increment. Angular distortion is one kind of distortion that easy to examined. The angular distortion on welded structure occur because of heating and cooling process that make material expanding and contracting. The non uniform heating and cooling process on welding make an obstruction on expanding and contracting, and results residual stress on material. Residual stress on material especially on tensile stress is very avoided because initiate a crack on material. On this study angular distortion on JIS G3101- SS400 steel plates are measured on FCAW process with 10, 16, and 20mm on thickness, welding position is horizontal and vertical up and measure the residual stress with neutron diffraction measurement. The result shows that angular distortion that occur on material increase with thickness increment and on residual stress measurement shows that the highest stress is occur on heat affected zone.

Key words : angular distortion, residual stress, flux core arc welding

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan	3
1.3. Perumusan Masalah	4
1.4. Ruang Lingkup Penelitian.....	5
BAB II DASAR TEORI.....	6
2.1. Pengetahuan Bahan.....	6
2.1.1. Besi dan Baja	6
2.1.2. Klasifikasi Baja.....	6
2.1.3. Baja Struktural JIS G3101- SS400	9
2.2. Metalurgi Las	10
2.2.1. Struktur Mikro dan Sifat Sifat Mekanik.....	10
2.2.2. Aliran Panas dalam Pengelasan	12
2.2.3. Siklus Termal Daerah Lasan.....	13
2.2.3.1. Mikrostruktur Logam Las.....	14
2.2.3.2. Pembekuan pada Logam Las	16
2.2.3.3. Reaksi Metalurgi yang Terjadi Saat Pembekuan	18
2.2.3.4. Daerah Terpengaruh Panas	19

2.3. Distorsi dan Tegangan Sisa	21
2.3.2. Tegangan Sisa	21
2.3.1.1. Asumsi Terjadinya Tegangan Sisa dan Distorsi	21
2.3.1.2 . Penyebaran Tegangan Sisa Proses Pengelasan	23
2.3.1.3. Pengurangan dan Pembebasan Tegangan Sisa	28
2.3.1.4. Metode Pengukuran Tegangan Sisa	29
2.3.2. Distorsi	30
2.3.2. Faktor yang Mempengaruhi Distorsi dan Tegangan Sisa	37
2.4. <i>Flux Core Arc Welding</i> (FCAW)	42
2.5. Difraksi Neutron	43
2.5.1. Dualisme Gelombang Partikel	43
2.5.2. Prinsip Difraksi	43
2.5.3. Prinsip Metode Difraksi Neutron	46
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	50
3.1. Diagram Alir Penelitian	50
3.2. Proesedur Percobaan	51
3.2.1. Persiapan Sampel Las	51
3.2.2. Proses Pengelasan	52
3.2.3. Pengukuran Penyimpangan Sudut	54
3.2.4. Pengujian Struktur Mikro dan Makro	55
3.2.5. Pengujian Kekerasan Mikro	56
3.2.6. Pengujian Tegangan Sisa dengan Difraksi Neutron	57
3.2.6.1. Spesifikasi Alat	57
3.2.6.2. Prinsip Kerja	59
3.2.6.3. Prosedur Pengujian	61
BAB IV DATA PENELITIAN	64
4.1. Hasil Pengamatan Metalografi	64
4.1.1. Makrostruktur	64
4.1.2. Mikrostruktur	66
4.2. Data Parameter Pengelasan dan Penyimpangan Sudut	68
4.3. Data Hasil Pengujian Kekerasan Mikro F10G1	74
4.4. Data Hasil Pengujian Tegangan Sisa pada F16G1	75

BAB V PEMBAHASAN	76
5.1. Pendahuluan	76
5.1.1. Material Dasar.....	76
5.1.2. Proses Pengelasan	77
5.2. Analisa Hasil Pengujian	78
5.2.1. Pengaruh Distorsi Angular dengan Ketebalan Pelat	78
5.2.2. Pengaruh Besarnya Penyimpangan Sudut dengan Posisi Pengelasan	79
5.2.3. Pengamatan Metalografi.....	81
5.2.3.1. Pengamatan Makrostruktur.....	81
5.2.3.2. Pengamatan Mikrostruktur	83
5.2.4. <i>Micro Hardness</i> (Kekerasan Mikro)	88
5.2.5. Tegangan Sisa	93
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	96
6.1. Kesimpulan.....	96
6.2. Saran	96
DAFTAR PUSTAKA	97
LAMPIRAN	99

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Metode Penghitungan Sudut.....	5
Gambar 2.1	Skema klasifikasi baja paduan.....	7
Gambar 2.2	Aliran panas pada proses pengelasan.....	13
Gambar 2.3	Mikrostruktur dalam logam las.....	14
Gambar 2.4	Tipikal Struktur <i>Widmanstatten</i>	15
Gambar 2.5	Tipikal Struktur <i>Upper Bainite</i>	15
Gambar 2.6	Tipikal mikrostruktur normalisasi.....	16
Gambar 2.7	Pertumbuhan butir pada proses pengelasan.....	17
Gambar 2.8	Mikrostruktur dan gradien temperatur pada proses pengelasan	20
Gambar 2.9	Mekanisme Pemuaian dan Penyusutan	22
Gambar 2.10	Penyebaran panas pada proses pengelasan pelat baja karbon 5mm dengan proses yang berbeda	23
Gambar 2.11	Distribusi Temperatur pada Proses Pengelasan	24
Gambar 2.12	Menunjukkan distribusi tegangan termal	25
Gambar 2.13	Menunjukkan tegangan sisa yang terjadi pada pengelasan tumpul (<i>butt welding</i>).....	27
Gambar 2.14	Proses PWHT pada pengelasan	28
Gambar 2.15	Gaya yang terjadi selama proses pengelasan.....	31
Gambar 2.16	Ketebalan kritis <i>buckling distortion</i> pada pengelasan tumpul.....	32
Gambar 2.17	<i>Buckling Distortion</i>	32
Gambar 2.18	Distorsi longitudinal dan transversal.....	33
Gambar 2.19	Efek besar alur las terhadap besarnya penyimpangan sudut yang terjadi pada pengelasan tumpul	34
Gambar 2.20	Penyimpangan sudut yang terjadi pada pengelasan tumpul	34
Gambar 2.21	Penyimpangan sudut pada pengelasan <i>fillet</i>	35
Gambar 2.22	Distorsi Angular	35
Gambar 2.23	<i>Rotational Distortion</i>	36
Gambar 2.24	Longitudinal <i>Bowing</i>	36
Gambar 2.25	Diagram yang menunjukkan pengaruh perbedaan temperatur selama pengujian tarik pada baja S355.....	38

Gambar 2.26. Nilai koefisien muai panas berbagai jenis material	39
Gambar 2.27 Nilai konduktivitas berbagai jenis material	39
Gambar 2.28 Nilai kapasitas kalor berbagai jenis material	40
Gambar 2.29 Proses Pengelasan FCAW	42
Gambar 2.30 Difraksi yang dihasilkan dari refleksi bidang atom yang berdekatan pada gelombang monokromatik	44
Gambar 2.31 Skematik Percobaan Young terhadap terjadinya interferensi.....	45
Gambar 2.32 Skema dari sebuah <i>neutron diffractometer</i>	46
Gambar 2.33 Prinsip pengukuran regangan	47
Gambar 2.34 Pengukuran regangan sisa pada sampel berbentuk pipa	48
Gambar 2.35 Sketsa pengaturan sampel dan <i>neutron beam</i>	49
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	50
Gambar 3.2 Dimensi sampel yang digunakan dalam penelitian.....	51
Gambar 3.3 Proses Persiapan Sambungan	51
Gambar 3.4 Proses persiapan pengelasan.....	52
Gambar 3.5 Skema Pengukuran Penyimpangan Sudut	54
Gambar 3.6 Sampel yang telah terjadi penyimpangan sudut	54
Gambar 3.7 Skema pemotongan sampel	55
Gambar 3.8 Alat difraksi <i>neutron measurement</i> (DN-1) di Reaktor Serbaguna G.A Siwabessy	58
Gambar 3.9 Skematik alat neutron <i>diffractometer measurement</i>	60
Gambar 3.10 Skematik hamburan neutron.....	60
Gambar 3.11 Pengukuran intensitas neutron (<i>direct beam</i>).....	61
Gambar 3.12 Pola hamburan neutron saat pengukuran tegangan sisa	63
Gambar 4.1 Makrostruktur sampel F10G1, F10G3, F20G1 dan F20G3	64
Gambar 4.2 Makrostruktur sampel F10G1 (7x)	65
Gambar 4.3 Makrostruktur sampel F10G3 (7x)	65
Gambar 4.4 Mikrostruktur F10G1 daerah deposit las (200x).....	66
Gambar 4.5 Mikrostruktur F10G1 daerah terpengaruh panas kasar (200x).....	66
Gambar 4.6 Mikrostruktur F10G1 daerah terpengaruh panas halus (200x).....	67
Gambar 4.7 Mikrostruktur Logam induk F10G1 (200x)	67

Gambar 5.1 Grafik besarnya penyimpangan sudut proses FCAW posisi horizontal (1G) dengan berbagai ketebalan pelat.....	78
Gambar 5.2 Grafik besarnya penyimpangan sudut proses FCAW posisi vertikal (3G) dengan berbagai ketebalan pelat.	78
Gambar 5.3 Grafik besarnya penyimpangan sudut proses FCAW posisi horizontal (1G) dan vertikal (3G) ketebalan pelat 16mm.....	80
Gambar 5.4 Grafik besarnya <i>heat input</i> proses FCAW posisi horizontal (1G) dan vertikal (3G) ketebalan pelat 16mm.	80
Gambar 5.5 Makrostruktur sampel F10G1, F10G3, F20G1 dan F20G3	81
Gambar 5.6 Makrostruktur pada sampel F16G1 (7x)	82
Gambar 5.7 Mikrostruktur pada sampel F10G1 (200x)	83
Gambar 5.8 Mikrostruktur pada sampel F16G1 (200x)	84
Gambar 5.9 Mikrostruktur logam induk pada sampel F10G1 (200x).....	84
Gambar 5.10 Mikrostruktur F10G1 daerah terpengaruh panas halus (200x).....	85
Gambar 5.11 Mikrostruktur F10G1 daerah terpengaruh panas kasar (200x).....	86
Gambar 5.12 Mikrostruktur F10G1 pada daerah deposit las (200x)	88
Gambar 5.13 Grafik kekerasan pada daerah las	89
Gambar 5.14 Grafik nilai kekerasan F16G1 4mm dari permukaan atas sampel	90
Gambar 5.15 Grafik nilai kekerasan F16G1 4mm permukaan bawah sampel.....	91
Gambar 5.16 Grafik nilai kekerasan F16G3 4mm permukaan atas sampel.....	92
Gambar 5.17 Grafik nilai kekerasan F16G3 4mm permukaan bawah sampel	92
Gambar 5.18 Grafik nilai tegangan sisa F16G1 4mm permukaan atas sampel.....	93
Gambar 5.19 Grafik nilai tegangan sisa F16G1 4mm permukaan bawah sampel...	94
Gambar 5.20 Grafik nilai tegangan sisa F16G3 4mm permukaan atas sampel.....	94
Gambar 5.21 Grafik nilai tegangan sisa F16G3 4mm permukaan bawah sampel...	95

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi kimia baja JIS G3101- SS400	10
Tabel 2.2 Spesifikasi kekuatan tarik baja JIS G3101- SS400	10
Tabel 2.3 Teknik Pembebasan Tegangan Sisa pada Lasan	29
Tabel 2.4 Efisiensi dari Beberapa Jenis Pengelasan.	41
Tabel 3.1 Komposisi kimia logam induk (JIS G3101- SS400).....	53
Tabel 3.2 Komposisi kimia kawat las E71T-1	53
Tabel 4.1 Parameter Pengelasan Sampel F10G1	68
Tabel.4.2 Parameter Pengelasan Sampel F10G3	69
Tabel 4.3 Parameter Pengelasan Sampel F16G1	70
Tabel.4.4 Parameter Pengelasan Sampel F16G3	71
Tabel 4.5 Parameter Pengelasan Sampel F20G1	72
Tabel 4.6 Parameter Pengelasan Sampel F20G3	73
Tabel 4.7 Kekerasan Mikro F10G1	74
Tabel 4.8 Data Hasil Pengujian Tegangan Sisa pada F16G1	75

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. MTR Logam Induk.....	99
Lampiran 2. MTR Kawat Las FCAW	100
Lampiran 3. Brosur Kawat Las FCAW	101
Lampiran 4. WPS FCAW-1G	102
Lampiran 5. WPS FCAW- 3G	103
Lampiran 6. Tabel Parameter Pengelasan Sampel F10G1	104
Lampiran 7. Tabel Parameter Pengelasan Sampel F10G3	105
Lampiran 8. Tabel Parameter Pengelasan Sampel F16G1	106
Lampiran 9. Tabel Parameter Pengelasan Sampel F16G3	107
Lampiran 10. Tabel Parameter Pengelasan Sampel F20G1	108
Lampiran 11. Tabel Parameter Pengelasan Sampel F20G3	109
Lampiran 12. Hasil Pengujian Kekerasan	110
Lampiran 13. Hasil Pengamatan Metalografi	112
Lampiran 14. Data pengujian tegangan sisa F16G1 arah normal.....	130
Lampiran 15. Data pengujian tegangan sisa F16G1 arah transversal	131
Lampiran 16. Data pengujian tegangan sisa F16G1 arah longitudinal	132
Lampiran 17. Data pengujian tegangan sisa F16G3 arah normal.....	133
Lampiran 18. Data pengujian tegangan sisa F16G3 arah tranversal.....	134
Lampiran 19. Data pengujian tegangan sisa F16G3 arah longitudinal	135
Lampiran 20. LOG Data pengukuran tegangan sisa	136
Lampiran 21. Contoh penentuan tegangan sisa menggunakan Origin Pro.	141
Lampiran 22. Grafik pengaruh posisi pengelasan terhadap besarnya penyimpangan sudut pada pelat dengan ketebalan 10mm.	142
Lampiran 23. Grafik pengaruh posisi pengelasan terhadap besarnya heat input pada pelat ketebalan 10mm.....	142
Lampiran 24. Grafik pengaruh posisi pengelasan terhadap besarnya penyimpangan sudut pada pelat ketebalan 16mm.	143
Lampiran 25. Grafik pengaruh posisi pengelasan terhadap besarnya heat input pada pelat ketebalan 16mm.....	143

Lampiran 26. Grafik pengaruh posisi pengelasan terhadap besarnya penyimpangan sudut pada pelat ketebalan 20mm.....	144
Lampiran 27. Grafik pengaruh posisi pengelasan terhadap besarnya heat input pada pelat ketebalan 20mm.....	144
Lampiran 28. JIS G 3101 (JISF) Rolled steels for general structure	145



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Baja karbon rendah merupakan jenis baja yang sering digunakan untuk pembuatan konstruksi yang memerlukan sifat keuletan dan ketangguhan yang tinggi. Dengan kekerasan 95 – 145 Brinnel dan kekuatan tarik 320 – 550 MPa, baja karbon rendah sering digunakan sebagai bahan dasar pembuatan kapal, jembatan, rangka dan struktur konstruksi bangunan dan juga mesin. Walaupun pada perakitan konstruksi, proses penyambungan dengan menggunakan mur, baut dan rivet masih dipakai akan tetapi proses penyambungan dengan menggunakan pengelasan lebih banyak digunakan.

Proses pengelasan pada rangka dan konstruksi bangunan sendiri saat ini telah berkembang pesat baik dalam perkembangan teknologi dan alat pengelasan yang semakin canggih, metode dan teknik pengelasan dan juga dalam prosedur dan perencanaan proses pengelasannya, sehingga cacat dalam pengelasan 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 Stir Welding*. Namun 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 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 timbul 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 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 yang terjadi pada material akan berinteraksi selama proses pembekuan deposit las berupa transformasi metalurgi pada material, dan menghasilkan deformasi plastis pada daerah pengelasan. Deformasi plastis yang terjadi pada material akan menyebabkan perubahan dimensi logam atau yang umum disebut dengan distorsi.

Selain menyebabkan tegangan sisa dan distorsi, masukan panas yang tidak merata dari busur listrik selama proses pengelasan akan menyebabkan perubahan terhadap material lasan baik secara makro dan mikro. Secara makro dapat dilihat dari perubahan warna material induk pada daerah terpengaruh panas (*Heat Affected Zone*), dan distorsi atau perubahan bentuk material. Secara mikro, proses pengelasan akan menyebabkan banyak perubahan pada material lasan seperti adanya tegangan sisa, dan perubahan struktur mikro yang akan menyebabkan perubahan pada sifat sifat mekaniknya seperti kekerasan, ketahanan korosi, fatik, dan sifat sifat lainnya, yang merugikan dan mengurangi umur dari material dan kerusakan dini dalam logam lasan.

Dan karena perubahan tersebut lebih banyak terjadi dalam skala mikro, maka adanya tegangan sisa mendapat banyak perhatian dari kalangan praktisi maupun akademisi yang berkecimpung dalam dunia pengelasan, terutama untuk menghilangkan atau mengurangi tegangan sisa yang timbul selama proses pengelasan.

1.2 Perumusan Masalah

Penelitian ini menggunakan baja karbon rendah JIS G3101- SS400. Material ini digunakan untuk berbagai tujuan struktural, bagian mesin, rangka, peralatan otomotif dan pertanian, braket, penempaan (*forging*), roda gigi, tangki dan bagian atau peralatan lain yang dapat dipotong dengan menggunakan *flame cutting*. Dan karena material ini memiliki mampu bentuk dan las yang sangat baik maka sebagian besar penggunaannya berhubungan dengan *mild cold bending*, *mild hot forming*, *punching*, *machining*, dan pengelasan. Material ini juga dapat dilakukan perlakuan panas seperti *normalizing*, *annealing*, *stress relieve*, *carburizing*, dan pengerasan untuk mendapatkan sifat yang diinginkan.

Spesimen yang digunakan pada penelitian ini adalah potongan pelat JIS G3101- SS400 yang berukuran panjang 250mm, lebar 125mm dengan ketebalan bervariasi yaitu 10mm, 16mm, dan 20mm. Material yang sudah dilas kemudian dipotong menjadi beberapa bagian untuk dilakukan pengujian kekerasan, foto mikro dan pengukuran tegangan sisa. Untuk pengujian foto mikro dan kekerasan digunakan sampel dengan ukuran panjang 90mm dan lebar 10 mm sedangkan untuk sampel pengukuran tegangan sisa digunakan sampel dengan ukuran panjang 90mm dan lebar 80mm. Pemotongan sampel menggunakan proses pengerjaan dingin sehingga memperkecil kemungkinan pelepasan tegangan (*stress relieve*) pada saat material dipotong.

Metode pengelasan menggunakan FCAW (*Flux Core Arc Welding*), dengan menggunakan gas pelindung CO₂ (karbon dioksida) 90%, bertujuan untuk menghasilkan penetrasi las yang dalam dan profil lasan yang baik. Proses pengelasan dilakukan secara manual dengan *multipass*, heat input dari lasan diukur dengan menghitung tegangan dan kuat arus pada saat pengelasan menggunakan tang *ampere* dan kecepatan pengelasan diukur dengan menggunakan *stopwatch* pada setiap *pass*-nya. Pengukuran penyimpangan sudut yang terjadi akibat proses pengelasan dilakukan setiap *pass* setelah temperatur logam lasan mencapai $\pm 150^{\circ}\text{C}$.

Pengujian pengujian yang digunakan untuk mendukung penelitian ini adalah :

1. Pengujian Tanpa Merusak (*Non-Destructive Test*) :

1.1. Pengukuran distorsi angular / Penyimpangan Sudut

1.2. Radiografi

1.3. Pengukuran tegangan sisa dengan menggunakan difraksi neutron

2. Pengujian Merusak (*Destructive Test*) :

2.1. Kekerasan mikro (Vickers)

3. Pengujian Metalografi

1.3 Tujuan Penelitian

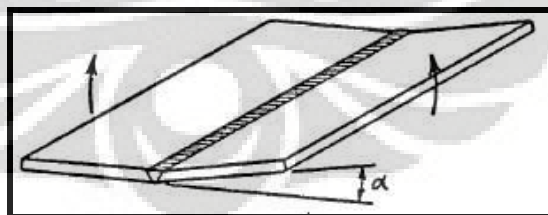
1. Mengukur besarnya distorsi angular / penyimpangan akibat proses pengelasan pada baja JIS G3101- SS400.
2. Memeriksa pengaruh ketebalan pelat terhadap besarnya distorsi angular pada proses pengelasan FCAW pada baja JIS G3101- SS400.
3. Memeriksa pengaruh posisi pengelasan terhadap besarnya distorsi angular pada proses pengelasan FCAW pada baja JIS G3101- SS400.
4. Mengukur besarnya tegangan sisa pada proses pengelasan FCAW pada baja JIS G3101- SS400 menggunakan difraksi neutron.
5. Memeriksa pengaruh posisi pengelasan terhadap besarnya tegangan sisa pada proses pengelasan FCAW pada baja JIS G3101- SS400.
6. Memeriksa pengaruh kekerasan terhadap besarnya tegangan sisa pada baja JIS G3101- SS400.

- Memeriksa korelasi antara besarnya tegangan sisa dengan distorsi angular pada baja JIS G3101- SS400.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian :

- Material logam induk yang digunakan adalah pelat baja spesifikasi JIS G3101- SS 400 dengan ketebalan : 10 mm, 16 mm dan 25 mm.
- Kawat las yang digunakan :
Proses FCAW : AWS A5.20 E71T-1, diameter 1,2 mm
- Parameter las yang digunakan :
Proses FCAW :
Amphere (180 A ÷ 240 A)
Voltage (22 Volt ÷ 30 Volt)
- Gas pelindung (*shielding gas*) yang digunakan :
% CO₂ > 90%
- Posisi Pengelasan yang digunakan adalah Posisi Mendatar (*Flat*) dan Tegak (*Vertikal Up*)
- Distorsi yang diukur adalah distorsi yang terjadi pada ujung benda uji



Gambar 1.1 Metode Penghitungan Sudut

- Pengujian Radiografi
- Pengujian Metalografi
- Pengujian Kekerasan
- Pengujian Tegangan Sisa

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Pengetahuan Bahan

2.1.1 Besi dan Baja

Besi dan baja sampai saat ini menduduki peringkat pertama logam yang paling banyak penggunaannya, besi dan baja mempunyai kandungan unsur utama yang sama yaitu Fe, hanya kadar karbon yang membedakan besi dan baja, penggunaan besi dan baja dewasa ini sangat luas mulai dari peralatan yang sederhana seperti jarum, peniti sampai dengan alat – alat dan mesin berat.

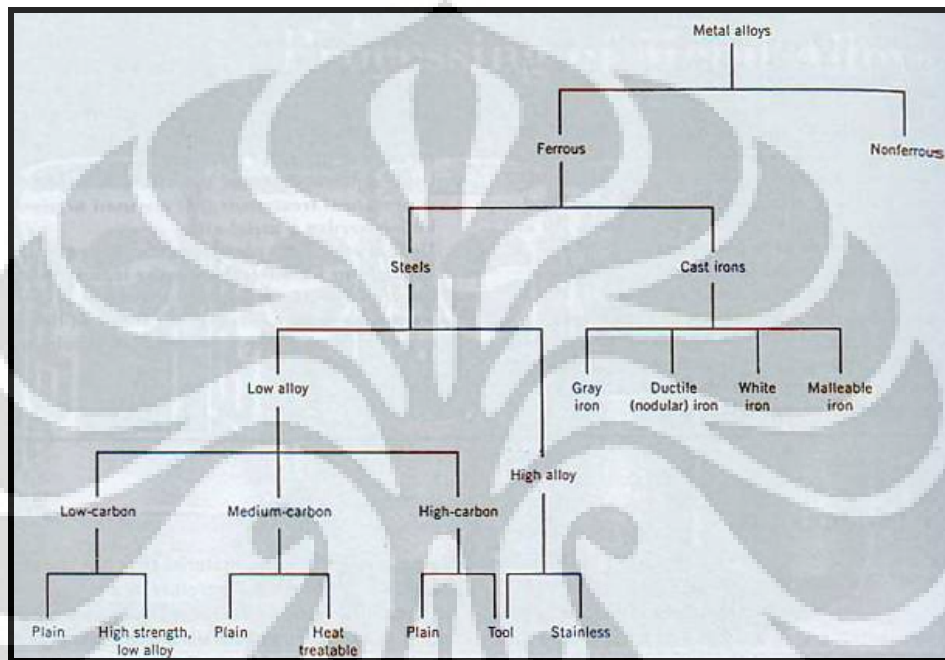
2.1.2 Klasifikasi baja

Baja merupakan jenis material logam yang memiliki kandungan utama Fe (*Ferrous*) dan C (*Carbon*). Kedua unsur ini akan membentuk suatu mikrostruktur yang dikategorikan sebagai baja (*steel*). Pada perkembangannya, material ini digunakan sebagai alat yang sangat berguna bagi perkembangan kebudayaan manusia. Pada jaman dahulu peralatan yang digunakan manusia sebagian besar adalah dari tulang binatang dan batu. Ketika manusia mulai mengenal batu yang memiliki kandungan *ferrous* dan mengolahnya untuk kemudian dibentuk menjadi sebuah peralatan, diketahui bahwa material mengandung *ferrous* ini memiliki kekuatan, ketangguhan serta keuletan yang lebih baik dibanding peralatan tradisional yang terbuat dari batu dan tulang.

Peralatan yang menggunakan material *ferrous* ini sendiri sudah ditemukan sejak sekitar akhir abad ke-13 atau awal abad ke-12 SM. Peralatan pada awal-awal inipun terbatas pada penggunaan sebagai alat pertanian dan alat berperang. Saat ini, dengan berkembangnya teknik pembuatan dan pengolahan material *ferrous*, penggunaan besi dan baja sangat luas dalam sabagai material rekayasa konstruksi dan mulai didapatkan beragam jenis dan klasifikasi material baja yang

penggunaannya sangat bergantung kepada aplikasi dan sifat yang diinginkan pada baja tersebut.

Sesuai dengan Gambar 2.1, secara umum baja karbon (*steel*) dapat diklasifikasikan menjadi 2 bagian yaitu baja karbon (*low alloy steel*) dan baja paduan (*high alloy steel*).



Gambar 2.1 Skema klasifikasi baja paduan^[8]

- a. Baja karbon (*carbon steel*), dibagi menjadi tiga yaitu;
- Baja karbon rendah (*low carbon steel*) → *machine, machinery dan mild steel*
 - 0,05 % - 0,30% C.

Sifatnya mudah ditempa dan mudah di mesin. Penggunaannya:

 - 0,05 % - 0,20 % C : rangka kendaraan, bangunan, pipa, rantai, rivet, skrup, paku.
 - 0,20 % - 0,30 % C : *forgings, bridges, buildings.*
 - Baja karbon menengah (*medium carbon steel*)
 - Kekuatan lebih tinggi daripada baja karbon rendah.

- Sifatnya sulit untuk dibengkokkan, dilas, dipotong. Penggunaan:
 - 0,30 % - 0,40 % C : *connecting rods, crank pins, axles.*
 - 0,40 % - 0,50 % C : *car axles, crankshafts, rails, boilers, auger bits, screwdrivers.*
 - 0,50 % - 0,60 % C : palu dan godam.
- Baja karbon tinggi (*high carbon steel*) → *tool steel*
 - Sifatnya sulit dibengkokkan, dilas dan dipotong. Kandungan 0,60 % - 1,50 % C
 - Penggunaan :
 - screw drivers, blacksmiths hammers, tables knives, screws, hammers, vise jaws, knives, drills. tools for turning brass and wood, reamers, tools for turning hard metals, saws for cutting steel, wire drawing dies, fine cutters.*

b. Baja paduan (*alloy steel*)

Tujuan dilakukan penambahan unsur yaitu :

1. Untuk meningkatkan sifat mekanik baja (kekerasan, keliatan, kekuatan tarik dan sebagainya)
2. Untuk meningkatkan sifat mekanik pada temperatur rendah
3. Untuk meningkatkan daya tahan terhadap reaksi kimia (oksidasi dan reduksi)
4. Untuk membuat sifat-sifat spesial

Baja paduan yang diklasifikasikan menurut kadar karbonnya dibagi menjadi :

1. *Low alloy steel*, jika elemen paduannya $\leq 2,5$ %
2. *Medium alloy steel*, jika elemen paduannya 2,5 – 10 %
3. *High alloy steel*, jika elemen paduannya > 10 %

Selain itu baja paduan dibagi menjadi dua golongan yaitu baja campuran khusus (*special alloy steel*) dan *high speed steel*.

2.1.3 Baja Struktural JIS G3101- SS400

Baja JIS G3101- SS400 merupakan baja karbon rendah yang banyak digunakan pada *general structure*, baja ini digolongkan pada *semi killed steel*, dengan kandungan Fosfor dan sulfur dalam material 0.005% dan kekuatan tarik minimum 400MPa. Dalam dunia industri kini, JIS G3101- SS400 banyak digunakan untuk menggantikan ASTM A.36 dengan alasan bahwa material ini lebih mudah dicari. JIS G3106 adalah jenis baja yang banyak digunakan sebagai *welded structure*, karena memiliki batas nilai C dan Mn sedangkan JIS G3101 digunakan sebagai *general structure*. Namun demikian bukan berarti JIS G3101-SS400 tidak dapat dipakai sebagai *welded structure*, JIS G3101- SS400 dapat digunakan sebagai *welded structure* dengan mencantumkan jumlah karbon dan mangan yang ada pada *mill certificate*-nya.

Karena JIS G3101- SS400 memiliki kandungan karbon yang rendah, memiliki keuletan yang sangat tinggi, mudah dibentuk, dan memiliki mampu las yang sangat baik sehingga banyak digunakan pada proses pengerjaan panas dan dingin seperti *rolling, forging, stamping, punching* dan pengelasan. Baja ini juga dapat dilakukan proses perlakuan panas dan pengerasan untuk mendapatkan sifat mekanis yang sesuai, yaitu dengan *normalizing 900-950°C, annealing 850-900°C, stress relieve 650-900°C, carburizing 900-950°C, hardening 750-800°C*.

Baja ini dapat dibuat dengan proses *open hearth furnace, basic oxygen furnace* atau *electric furnace* untuk jenis baja lempengan dan batangan A36 dibuat dari jenis *killed steel* sedangkan JIS G3101- SS400 dibuat dari *semi killed steel*, untuk mengurangi jumlah oksigen didalam baja dengan tujuan untuk memperbaiki mampu bentuk baja saat dilakukan pengerolan. Struktur mikro dari baja JIS G3101- SS400 adalah ferit perlit yang membentuk struktur pita (banding). Pada Tabel 2.1 dan 2.2 diperlihatkan komposisi kimia dan sifat mekanik dari baja ini.

Tabel 2.1 Komposisi kimia baja JIS G3101- SS400^[21]

Classification		Chemical Compositions				
		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 G3106	SM400A	0.23	0.35	2.5 x C min.	0.035	0.035
	SM400B	0.2	0.55	0.60 - 1.40	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	0.60 - 0.90	0.04	0.05

Tabel 2.2 Spesifikasi sifat mekanik baja JIS G3101- SS400^[21]

Classification		Mechanical Properties					
		Yield Point (Mpa)		Tensile Strength (Mpa)	Elongation % (min.)		
		Thickness			Thickness		
		t ≤ 16	16 ≤ t ≤ 40	t ≤ 5	5 ≤ t ≤ 16	t > 16	
JIS G3101	SS400	245	235	400 - 510	21	17	21
	SS490	285	275	490 - 610	19	15	19
	SS540	400	390	540 min.	16	13	17
JIS G3106	SM400A	245	235	400 - 510	23	18	22
	SM400B	245	235	400 - 510	23	18	22
	SM490A	325	315	400 - 610	22	17	21
	SM490B	325	315	400 - 610	22	17	21
ASTM	A36	250		400 - 550	20		

2.2 Metalurgi Las

2.2.1 Struktur Mikro dan Sifat Sifat Mekanik

Ukuran butir dan struktur butir dalam suatu struktur material sangat erat hubungannya dengan sifat mekanis yang dihasilkan. Struktur butir dalam material ditentukan dari jenis material atau paduan yang ada didalam itu sendiri. Karbon ekuivalen (E_c) adalah salah satu metode pada paduan baja yang sering digunakan untuk mengukur kekerasan maksimum dan mampu las berdasarkan komposisi

kimia paduannya. Semakin tinggi konsentrasi karbon dan elemen paduan lainnya seperti mangan, krom, silikon, *molybdenum*, vanadium, tembaga dan nikel memiliki kecenderungan semakin menambah kekerasan dan menurunkan mampu las material. Besarnya nilai karbon ekuivalen dalam material dapat dihitung melalui beberapa persamaan. Persamaan 2.1 merupakan salah satu formula yang digunakan untuk menghitung nilai karbon ekuivalen menurut IIW :

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (2.1)$$

Untuk memperbaiki sifat baja kadang kadang ditambahkan unsur V dan Nb sebanyak 0.02% sampai 0.08%, yang akan mempertinggi kekuatan baja dengan membentuk endapan halus VN dan NbC pada waktu terjadi transformasi austenite menjadi ferit pada saat pengerolan¹.

Selain dengan komposisi paduan sifat mekanik material juga dapat diatur melalui proses perlakuan panas. Hubungan antara kecepatan pendinginan dan struktur mikro yang terbentuk selama proses tersebut digambarkan dalam diagram yang menghubungkan waktu, suhu dan transformasi yaitu CCT (*Continuous Cooling Transformation*) diagram.

Pada baja karbon ferit perlit, batas luluh dari baja sangat tergantung pada ukuran butir perlit. Hubungan ini oleh “Hall-Petch” dirumuskan dalam persamaan berikut :

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{K_y}{\sqrt{d}} \quad (2.2)$$

dimana :

- σ_y = batas luluh
- σ_0 = tegangan geser dislokasi
- k_y = konstanta (koefisien kekuatan)
- d = besar butir

2.2.2 Aliran Panas dalam Pengelasan^[10]

Variabel variabel terpenting yang mempengaruhi pembekuan logam las adalah :

1. Laju masukan, q , yang ditentukan oleh proses pengelasan, ukuran logam yang dilas.
2. Laju pergerakan busur sepanjang sambungan las, v .
3. Sifat konduktivitas panas dari logam yang dilas, K_s .
4. Tebal logam yang dilas, t

Dalam proses pengelasan, yang diasumsikan bahwa busur las bergerak sepanjang sumbu x , jika ditinjau secara 3 dimensi maka pelat *solid* memiliki persamaan aliran panas sebagai berikut :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 2K_s \cdot v \frac{\partial T}{\partial (x - v \cdot t)} \quad (2.3)$$

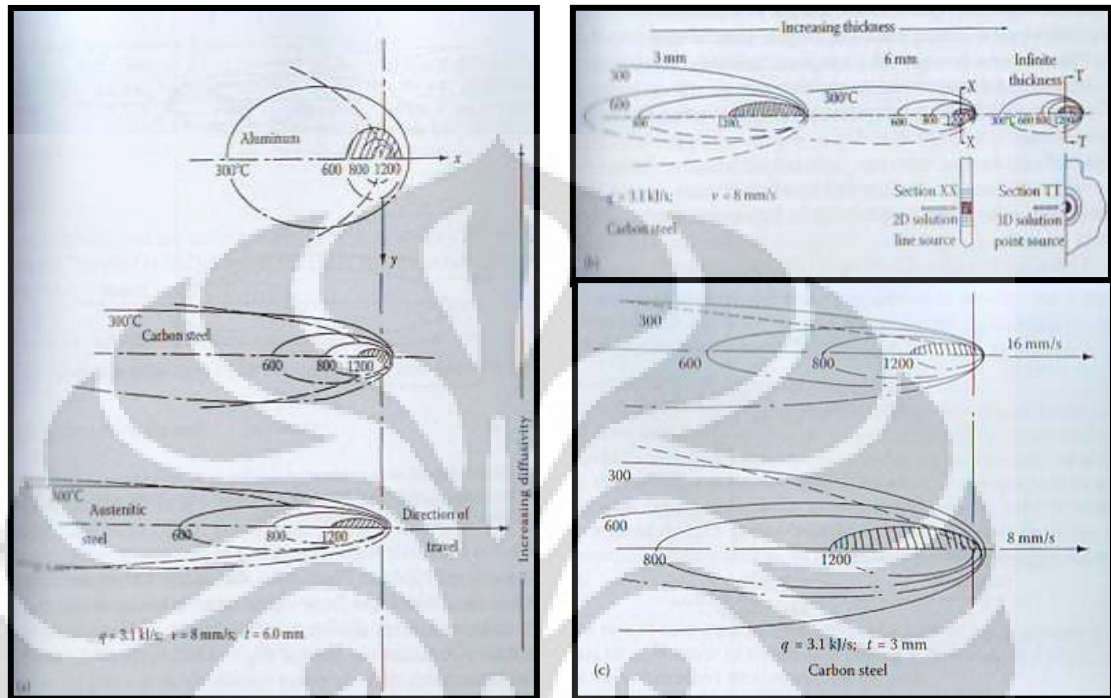
dimana x, y, z merupakan sumbu koordinat dari las dan t adalah waktu.

Dari persamaan ini diperoleh distribusi temperatur disekitar sumber panas yang bergerak dalam bentuk isothermal pada logam, dimana jarak antara garis isothermal dapat diperoleh dari :

$$\lambda(x, y, z) \propto \frac{q}{K_s \cdot v \cdot t} \quad (2.4)$$

Dari persamaan diatas dapat dijabarkan dalam sebuah gambar distribusi panas pada berbagai material, ketebalan material serta kecepatan pengelasan dalam proses pengelasan (Gambar 2.2)

Dengan mengasumsikan distribusi panas dalam logam las, maka parameter K_s , v , t dan q sangat menentukan morfologi pembekuan, dimana dendrit akan selalu tumbuh dengan arah mendekati arah normal *isotherm* (sumber panas).



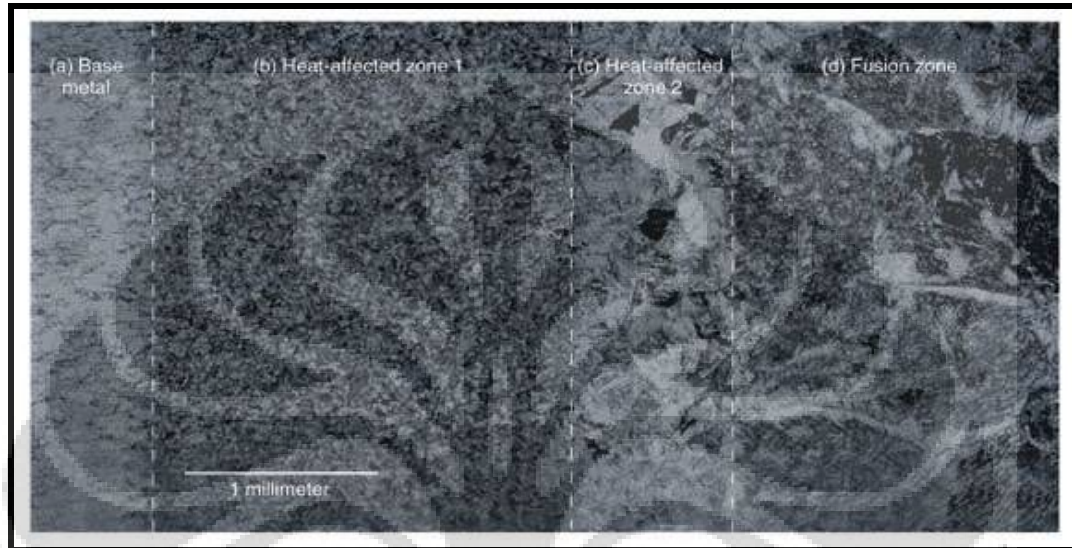
Gambar 2.2 Aliran panas pada proses pengelasan^[10]

- Pengaruh konduktivitas termal (K_s) terhadap distribusi aliran panas
- Pengaruh ketebalan (t) material terhadap distribusi aliran panas
- Pengaruh kecepatan pengelasan (v) terhadap distribusi aliran panas

2.2.3 Siklus Termal Daerah Lasan

Daerah lasan terdiri dari 3 bagian, yaitu : logam las (*weldpool*), daerah terpengaruh panas (*Heat Affected Zone*) atau disingkat dengan HAZ dan logam induk yang tak terpengaruh (*base metal*). Logam las adalah bagian dari logam yang pada waktu pengelasan mencair dan kemudian membeku. Daerah terpengaruh panas atau HAZ adalah logam induk yang bersebelahan dengan logam las yang selama proses pengelasan mengalami siklus termal pemanasan dan pendinginan cepat. Sedangkan logam induk yang tak terpengaruh adalah bagian logam induk dimana panas dan suhu pengelasan tidak menyebabkan terjadinya

perubahan perubahan struktur dan sifat. Disamping ketiga pembagian utama tersebut masih ada satu daerah khusus yang membatasi antara logam las dan HAZ, yang disebut batas las (*fusion line*)^[1].

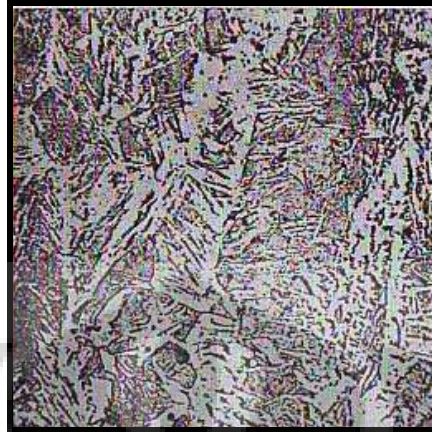


Gambar 2.3 Mikrostruktur dalam logam las

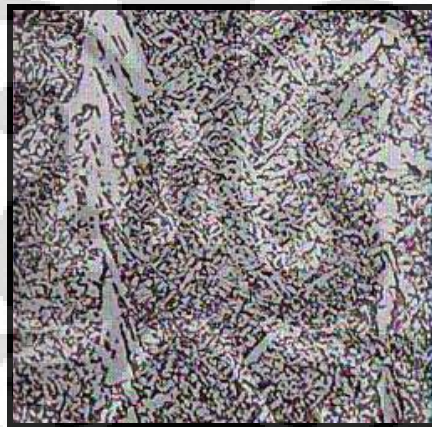
2.2.3.1 Mikrostruktur Logam Las

Mikrostruktur didalam logam lasan sangat rumit dan berbeda dengan proses pengerjaan lainnya seperti *forging* atau *rolling* karena logam las mencair sehingga dapat dikatakan bahwa proses pengelasan memiliki struktur mirip dengan pengecoran logam namun mengalami proses pendinginan yang berbeda.

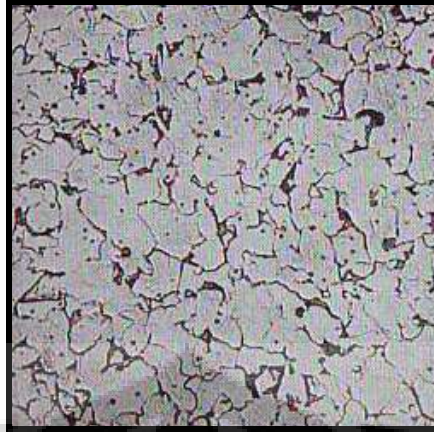
Struktur pada logam lasan umumnya memiliki butir yang halus dan berstruktur *widmanstatten*. Pada proses pendinginan normal ferit akan terbentuk dari fasa *austenite* dan kemudian dikelilingi oleh butir perlit. Namun pada pendinginan yang cepat seperti dalam proses pengelasan butir ferit dan perlit tidak terbentuk akibat pendinginan yang sangat cepat sehingga terbentuk *widmanstatten*, proses pendinginan yang lebih cepat pada proses pengelasan dapat menyebabkan terbentuknya struktur *upper bainite* pada logam las^[9].



Gambar 2.4 Tipikal Struktur *Widmanstätten* pada mikrostruktur logam las baja karbon rendah dengan elektroda netral (etsa HNO_3 , perbesaran 800x)^[9]



Gambar 2.5 Tipikal Struktur *Upper Bainite* pada mikrostruktur logam las baja karbon rendah dengan elektroda netral (etsa HNO_3 , perbesaran 800x)^[9]



Gambar 2.6 Tipikal mikrostruktur logam las yang mengalami proses normalisasi pada pengelasan *multipass* (etsa HNO_3 , perbesaran 800x)^[9]

Pada proses pengelasan *multipass*, panas dari proses pengelasan dapat menyebabkan proses *normalizing* pada deposit logam las sebelumnya. Hal ini menyebabkan butir daerah las dibawah bagian *capping* (bagian paling atas pada lasan, biasanya yang terakhir dilas) memiliki struktur butir yang lebih baik akibat proses *normalizing* yang terjadi pada pengelasan *multipass*.

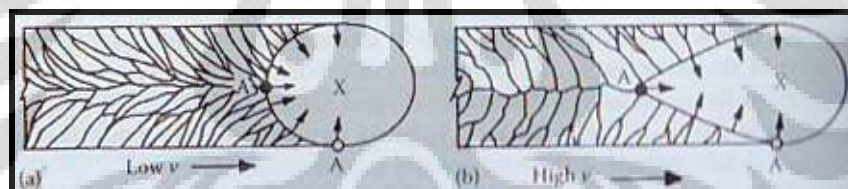
2.2.3.2 Pembekuan pada Logam Las

Pada pengelasan dengan busur listrik merupakan proses pengelasan cair (*fusion welding*), dimana logam pengisi mengalami proses pencairan. Kontak antara logam las dan logam induk akan menyebabkan peleburan pada permukaan logam induk dan pengenceran pada logam pengisi. Efek dari proses pengenceran tersebut adalah sebagai berikut :

1. Komposisi logam cair berubah.
2. Lapisan permukaan oksida pada logam induk dipindahkan ke logam cair.
3. Menurunkan temperatur logam cair.

Pembentukan butir dalam paduan umumnya terjadi akibat proses nukleasi dan pertumbuhan, akan tetapi dalam proses pengelasan tahap nukleasi tidak terjadi. Seperti halnya dalam proses pengecoran logam dimana nukleasi dimulai dari dinding cetakan, demikian pula yang terjadi pada pengelasan dimana panas ditransfer kedalam logam induk dan butir pada logam las tumbuh secara *epitaxial* pada logam induk. Tiap butir pada permukaan logam induk yang berbatasan dengan logam las berfungsi sebagai tempat pertumbuhan butir logam las (*growth site*). Hal inilah yang membedakan antara pengelasan dengan pengecoran, dimana pada proses pengelasan logam las harus menjadi satu dengan logam induk.

Akibat dari butir logam induk yang menjadi tempat pertumbuhan logam las, menyebabkan ukuran butir awal yang terbentuk pada garis fusi akan berukuran sama dengan butir logam induk pada garis fusi saat pembekuan berlangsung. Selain itu, orientasi kristal butir logam las juga akan mempunyai orientasi kristal yang sama dengan orientasi kristal butir logam induk, yang disebut sebagai pertumbuhan *epitaxial*.



Gambar 2.7 Pertumbuhan butir pada proses pengelasan^[10].

Gambar 2.7 merupakan gambar pertumbuhan butir pada saat pengelasan. Pada Gambar A, terlihat kristal yang terbentuk pada proses pengelasan dengan kecepatan rendah dan pada Gambar B terlihat kristal yang terbentuk pada pengelasan dengan kecepatan tinggi. Butir-butir pada garis fusi tumbuh searah dan tegak lurus terhadap garis fusi. Butir yang tumbuh akan membentuk kristal *columnar* yang pertumbuhannya akan menuju ke arah yang sama dengan gerakan sumber panas¹⁰.

2.2.3.3 Reaksi Metalurgi yang Terjadi Saat Pembekuan^[1]

1. Segregasi

Didalam logam las terdapat 3 jenis segregasi, yaitu segregasi makro, segregasi gelombang dan segregasi mikro. Segregasi makro adalah perubahan komponen secara perlahan lahan yang terjadi mulai dari sekitar garis batas las menuju ke garis sumbu las. Segregasi gelombang adalah perubahan komponen karena pembekuan yang terputus yang terjadi pada proses terbentuknya gelombang manik las. Perubahan komponen yang terjadi dalam satu kristal *columnar* atau dalam bagian dari satu kristal.

2. Lubang Halus

Lubang halus terjadi karena adanya adanya gas yang tidak larut dalam logam padat. Lubang halus yang terjadi umumnya disebabkan :

- a. Pelepasan gas karena perbedaan batas kelarutan antara logam cair dan logam padat pada saat pembekuan. Biasanya gas larut dalam baja adalah hidrogen dan nitrogen.
- b. Terbentuknya gas akibat karena adanya reaksi didalam logam las. Reaksi ini misalnya adalah gas pelindung seperti CO₂ atau udara yang menyusup dan terkurung dalam akar kampuh las.
- c. Penyusupan gas kedalam atmosfer busur, reaksi ini umumnya terjadi pada las yang tidak memakai gas pelindung. Sehingga menyebabkan gas asing masuk kedalam busur las.

3. Deoksidasi

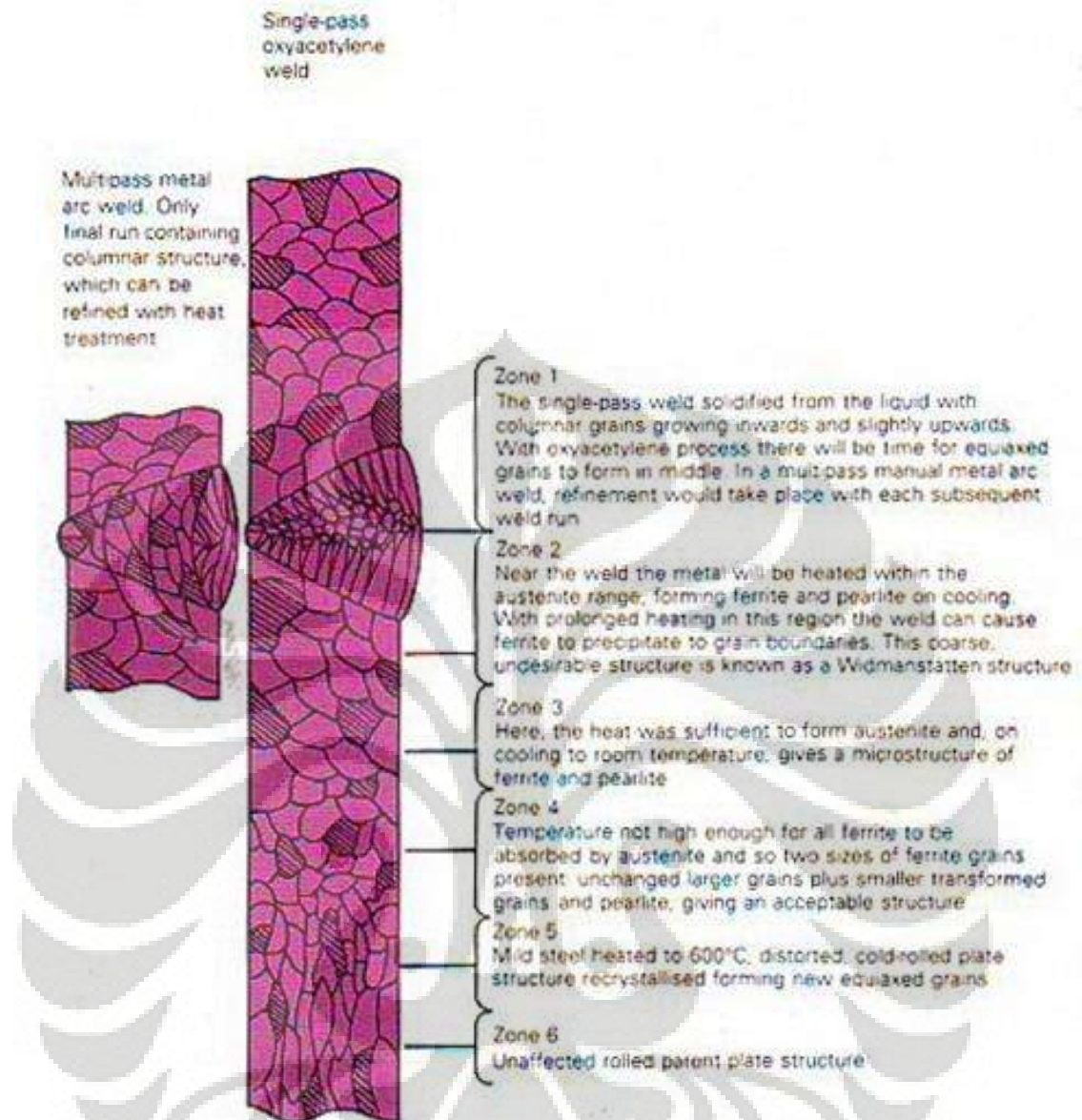
Pada dasarnya sedikit oksigen yang larut dalam baja, akan tetapi oksigen yang larut kemudian membentuk oksida yang stabil dalam baja yang menyebabkan penurunan ketangguhan logam las dan timbulnya retak ataupun korosi sehingga dilakukan usaha usaha untuk menghilangkan oksida dan disebut sebagai proses oksidasi.

Kelarutan oksigen dalam baja ditentukan kadar Si, Mn dan lainnya. Kadar dalam *killed steel* kurang dari 0.01% dan 0.02 pada *semi killed steel*, kelarutan oksida pada saat proses pengelasan ditentukan oleh fluks yang digunakan. Fluks oksida besi atau ilmenit akan menyebabkan kandungan oksida dalam besi mencapai 0.12%, 0.04% pada fluks basa dan hanya 0.01% pada TIG atau MIG, disebabkan karena pada proses ini tidak digunakan fluks, tetapi digunakan gas mulia sebagai gas pelindung. Untuk menurunkan kadar oksigen dalam logam las, biasanya digunakan unsur-unsur deoksidaser seperti : Si, Mn, Al dan Ti.

2.2.3.4 Daerah Terpengaruh Panas

Kepekaan terhadap patah getas menjadi masalah utama pada baja. Struktur kristal BCC pada baja menjadi penyebab terjadi *ductile-brittle transformation* yang menyebabkan kerusakan dalam waktu yang sangat singkat. Dalam proses pengelasan, terutama dalam sambungan las hal ini menjadi masalah yang lebih rumit karena adanya faktor yang ikut membantu seperti : konsentrasi tegangan, struktur yang tidak sesuai dan adanya cacat dalam lasan.

Struktur logam pada daerah terpengaruh panas berubah secara berangsur-angsur dari struktur logam induk ke struktur logam las seperti yang terlihat dalam Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Mikrostruktur dan gradien temperatur pada proses pengelasan^[19]

Lebar dari daerah terpengaruh panas ditentukan oleh aliran panas dan parameter parameter yang mempengaruhi panas yang ditransfer. Selama proses pengelasan, didaerah terpengaruh panas akan mengalami perubahan perubahan secara metalurgi. Termasuk diantaranya adalah rekristalisasi, endapan mengalami pelarutan kembali, pengerasan endapan maupun pengendapan berlebih (*over aging*).

Pada daerah HAZ yang dekat dengan daerah las, kristal tumbuh lebih cepat dan membentuk butir-butir kasar. Daerah ini disebut dengan batas las. Di daerah batas las butir menjadi sangat kasar dan logam menjadi sangat getas akibat siklus termal yang terjadi pada waktu pengelasan. Pada daerah ini terjadi konsentrasi tegangan yang disebabkan diskontinuitas pada kaki manik las, takik las, retak las dan lain sebagainya. Kegetasan pada daerah ini disamping disebabkan oleh butir yang kasar juga disebabkan oleh konsentrasi tegangan pada daerah tersebut. Biasanya untuk mengurangi tegangan yang tinggi dan struktur yang kasar pada daerah tersebut dilakukan proses pemanasan untuk melepaskan tegangan sisa yang terjadi selama proses pengelasan.

2.3 Distorsi dan Tegangan Sisa

2.3.1 Tegangan Sisa

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.

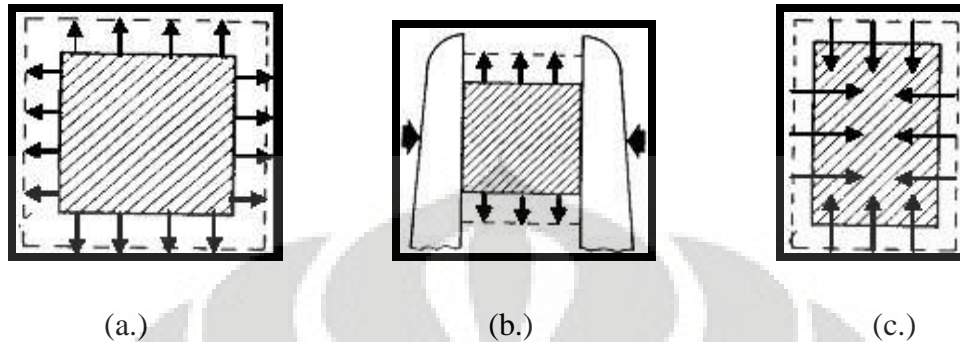
Proses-proses yang menyebabkan tegangan sisa antara lain adalah : pengerolan, pengecoran, perubahan bentuk logam, dan pengelasan.^[7]

2.3.1.1 Asumsi Terjadinya Tegangan Sisa dan Distorsi

Semua logam akan memuai seragam ke segala arah apabila dipanaskan dan akan menyusut ke arah sama ketika mendingin. Pada logam yang tidak mengalami tegangan dan dipanaskan dengan seragam, maka akan dapat memuai tanpa ada rintangan dan menyusut kembali secara seragam pada keadaan semula. (*lihat Gambar 2.9a*)

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. (*lihat Gambar 2.9b*)

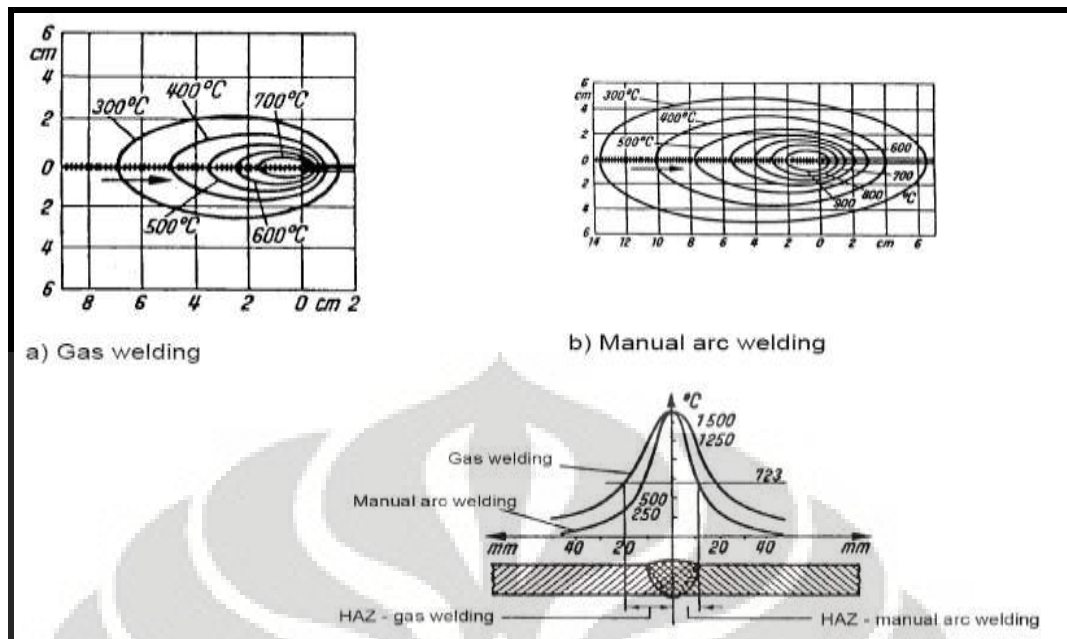
Bila batang tersebut didinginkan ke temperatur ruang maka batang tersebut akan menyusut secara seragam sehingga batang tersebut mengalami perubahan bentuk dari dimensi semula. (*lihat Gambar 2.9c*)



Gambar 2.9 Mekanisme Pemuaian dan Penyusutan^[7]

Pada proses pengelasan terjadi pula siklus pemanasan dan pendinginan. Tetapi proses ini berbeda dengan contoh tes diatas, karena ada banyak faktor penyebab penyusutan yang akan membuat semakin sulit memperkirakan besarnya tegangan sisa dan distorsi yang terjadi pada lasan. Faktor faktor yang mempengaruhi tersebut adalah sebagai berikut :

- Tidak terjadi siklus pemanasan dan pendinginan yang seragam.
- Pemuaian logam yang mengalami pemanasan akan dihalangi oleh logam induk yang memiliki temperatur yang lebih rendah (penghalang ekspansi)
- Penyusutan logam yang mengalami pemanasan juga akan dihalangi oleh logam induk yang memiliki temperatur yang lebih rendah (penghalang kontraksi)
- Logam yang memiliki sifat fisik dan mekanik berbeda akan memiliki nilai penyusutan dan tegangan sisa yang berbeda pula.



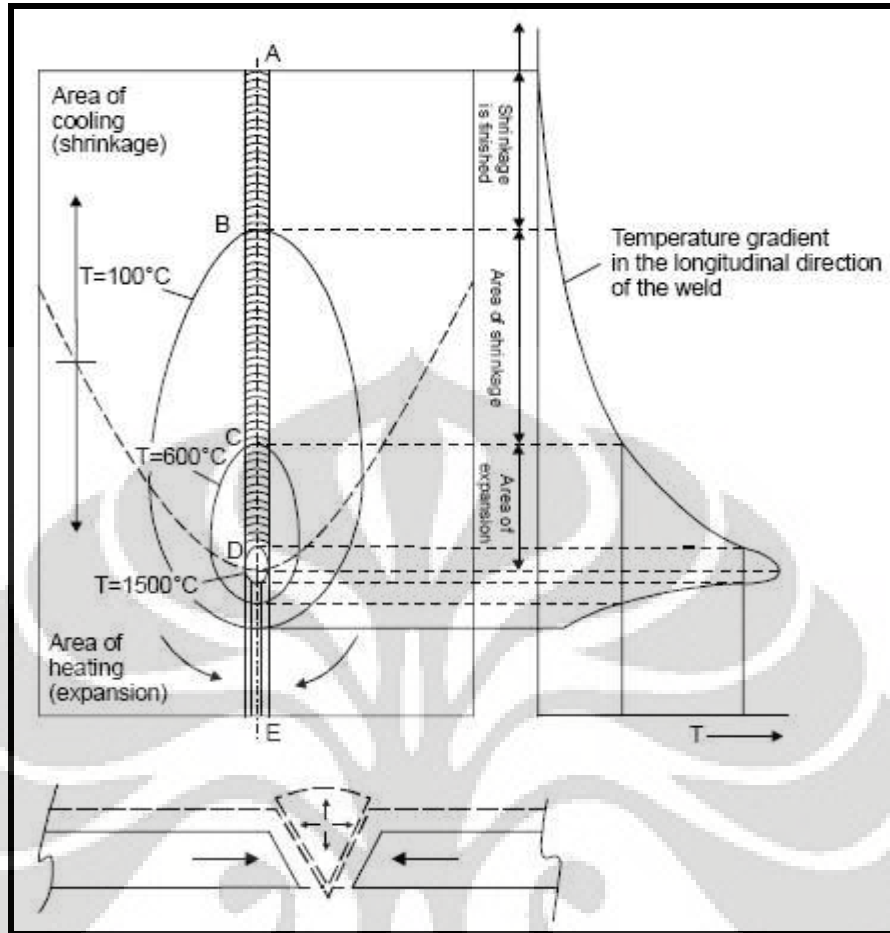
Gambar 2.10 Penyebaran panas pada proses pengelasan pelat baja karbon 5mm dengan proses yang berbeda.^[7]

2.3.1.2 Penyebaran Tegangan Sisa Proses Pengelasan

Pada proses pengelasan, bagian logam induk mengalami pemanasan yang berbeda-beda, dimana logam yang dekat dengan daerah lasan akan mengalami pemanasan hingga hampir mencapai titik lelehnya dan semakin jauh dari daerah lasan maka pemanasan yang timbul juga akan semakin kecil.

Logam induk yang dekat dengan lasan akan memuai ke semua arah akan tetapi dihalangi oleh logam yang lebih dingin. Sehingga akan timbul regangan yang kompleks pada deposit las dan daerah HAZ akibat dari regangan termal.

Pada Gambar 2.11 diperlihatkan perubahan temperatur dan tegangan yang terjadi selama proses pengelasan.

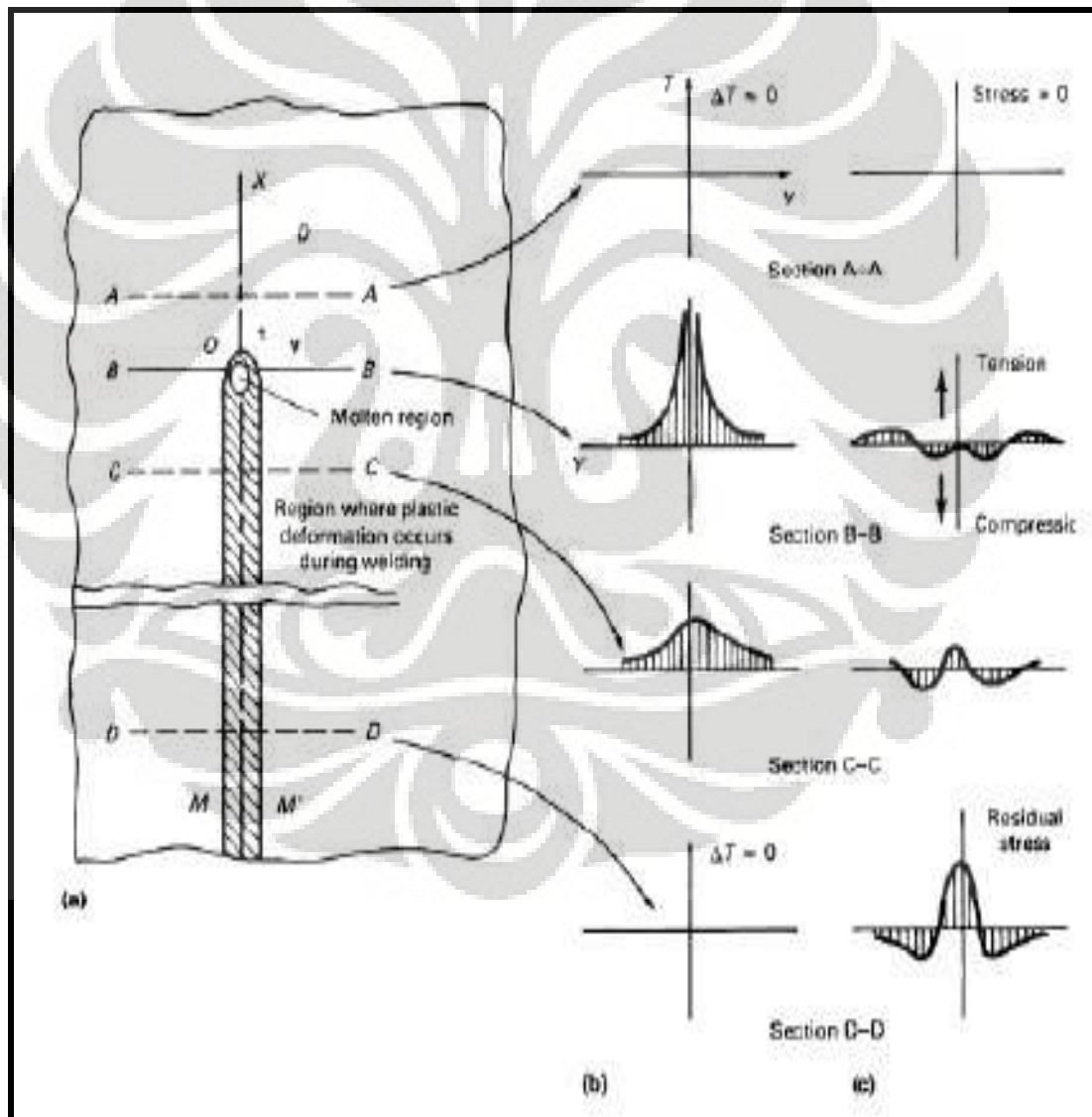


Gambar 2.11 Distribusi Temperatur pada Proses Pengelasan.^[7]

Pada daerah gambar distribusi temperatur pada proses pengelasan tersebut, maka berdasarkan temperatur logam induk pada saat pengelasan dapat kita bagi menjadi 5 bagian :

- A. Adalah wilayah yang terletak jauh dibelakang busur las, wilayah ini memiliki luas yang sangat besar yang terdiri dari daerah lasan yang sudah mendingin, daerah HAZ yang sudah mendingin dan daerah yang tidak terpengaruh panas. ΔT atau perubahan temperaturnya hampir mendekati nol, karena suhu daerah ini hampir sama dengan temperatur ruang.
- B. Adalah wilayah yang terletak dibelakang busur las dan daerah didepan busur las yang tidak jauh dari busur las. Daerah memiliki temperatur sekitar 100°C.

- C. Adalah daerah yang terletak dengan busur las, memiliki temperatur yang tinggi sekitar 600°C .
- D. Daerah dimana terletak logam cair, dimana terletak busur las. Pada daerah ini temperatur sangat tinggi karena diperlukan untuk mencairkan logam. Temperatur 1500°C .
- E. Daerah yang terletak didepan busur las dan belum mengalami proses pemanasan,



Gambar 2.12 Menunjukkan distribusi tegangan termal.^[2]

1. Daerah A-A

Daerah A-A merupakan daerah yang belum mengalami pemanasan sehingga tegangan termal pada daerah tersebut nol.

2. Daerah B-B

Daerah B-B merupakan daerah dimana terletak busur las. Tegangan yang terjadi pada daerah ini dapat dibagi menjadi 3, bagian :

- a. Tegangan tepat pada daerah lasan nol, karena pada daerah tersebut logam mencair sehingga tidak terjadi tegangan.
- b. Daerah yang terletak dekat dengan busur merupakan logam induk yang mengalami pemanasan dengan suhu sekitar 600°C . Pada daerah ini tegangan yang timbul adalah tegangan tekan. Tegangan ini timbul karena ekspansi logam yang timbul ditahan oleh bagian logam yang bersuhu lebih dingin.
- c. Daerah yang terletak jauh dengan busur. Daerah ini memiliki suhu yang lebih rendah dari daerah b, sehingga pada daerah ini akan terjadi tegangan tarik yang besarnya sama dengan tegangan tekan pada daerah b.

3. Daerah C-C

Daerah C-C merupakan daerah yang terletak tidak jauh dibelakang busur las. Tegangan pada daerah ini dapat dibagi menjadi 2 bagian, yaitu a. adalah daerah lasan dan terpengaruh panas yang dekat dengan dengan daerah lasan dan b. adalah daerah terpengaruh panas dan logam induk

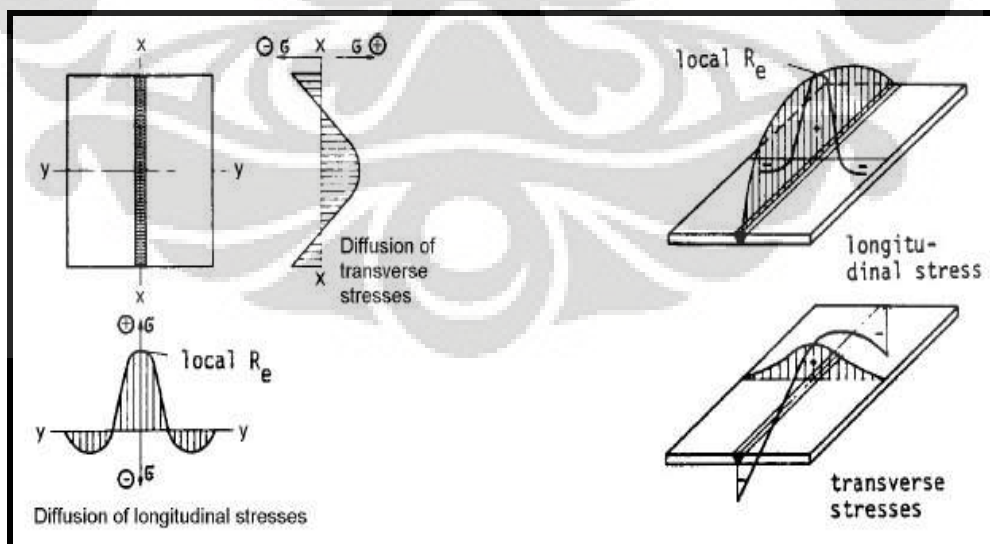
- a. Daerah sambungan yang sudah membeku, daerah ini merupakan logam cair yang telah membeku dengan temperatur sekitar 600°C . Pada daerah terjadi tegangan tarik. Tegangan timbul akibat terjadinya penyusutan logam cair yang ditahan oleh logam disekelilingnya yang memiliki suhu lebih rendah.

- b. Pada daerah yang terletak lebih jauh dari daerah sambungan, merupakan logam induk yang memiliki temperatur lebih rendah. Tegangan yang terjadi pada daerah ini adalah tegangan tekan. Tegangan tekan yang timbul merupakan gaya aksi reaksi yang timbul akibat adanya tegangan tarik pada daerah sambungan.

4. Daerah D-D

Daerah D-D merupakan daerah lasan yang telah dimana sambungan telah membeku dan kembali ke temperatur ruang. Tegangan yang timbul pada daerah ini tidak jauh berbeda dengan daerah C-C, hanya saja nilai tegangan yang ditimbulkan lebih besar. Hal tersebut terjadi karena pada daerah D-D temperatur sambungan telah mencapai temperatur ruang sehingga gaya yang ditimbulkan akibat adanya penyusutan logam lebih besar.

Pada Gambar 2.13 merupakan gambar distribusi tegangan sisa pada bidang longitudinal (tegak lurus arah las) dan bidang transversal (searah dengan arah las). Tegangan sisa pada hasil lasan terutama tegangan tarik, sangatlah berbahaya karena memicu timbulnya retak pada daerah yang mengalami tegangan tarik.



Gambar 2.13. Menunjukkan tegangan sisa yang terjadi pada pengelasan tumpul(*butt welding*), yang dilas dari ujung keujung.

2.3.1.3 Pengurangan dan Pembebasan Tegangan Sisa

Terdapat dua cara untuk membebaskan tegangan sisa, yaitu cara mekanik dan cara termal. Dari kedua cara tersebut cara termal dengan proses anil adalah proses yang paling banyak dilakukan karena memiliki tingkat keberhasilan yang tinggi. Dan dengan teknologi yang makin canggih, proses pembebasan tegangan sisa dengan cara ini makin disenangi dan prosedur untuk proses *PWHT* (*Post Weld Heat Treatment* (**ASME B31.I**) dan (**AWS D1.1**)). Parameter yang perlu diperhatikan dalam proses PWHT adalah :

1. Kecepatan pemanasan
2. Temperatur pemanasan
3. Waktu pemanasan
4. Kecepatan pendinginan



Gambar 2.14 Proses PWHT pada pengelasan^[22]

Tabel 2.3 Teknik Pembebasan Tegangan Sisa pada Lasan^[1]

	Cara	Penjelasan	Keuntungan	Kerugian
Cara mekanik	Penempaan	Logam lasan dan daerah sekitarnya ditempa atau dipukul selama atau setelah pengelasan	Dapat digunakan pada logam-logam ulet. Butir logam dapat menjadi halus.	Tidak dapat digunakan pada logam-logam getas
	Peregangan	Sambungan ditarik sampai terjadi perubahan bentuk plastik.	Sangat baik untuk bejana bentuk bola. Karena geometrinya maka tegangan yang diperlukan dapat dihitung dengan teliti. Pelaksanaannya dapat dilakukan dengan tekanan hidrostatik.	Tidak dapat digunakan pada bentuk-bentuk yang rumit.
	Getaran	Kepada konstruksi diberikan getaran yang dapat memberikan resonansi frekuensi rendah. Karena getaran ini akan terjadi perubahan bentuk plastik setempat.	Pelaksanaannya sederhana.	Tidak dapat digunakan pada konstruksi besar dengan pelat-pelat tebal karena hasilnya tidak merata.
Cara termal	Anil	Lasan dari jenis baja ferit dipanaskan sampai 600 atau 700°C dan yang dari jenis austenit sampai 900°C. Setelah ditahan beberapa waktu pada suhu ini kemudian didinginkan pelan-pelan.	Keberhasilannya tinggi	Tidak dapat digunakan pada konstruksi besar dan sukar untuk dilaksanakan di lapangan.
	Anil suhu tinggi	Lasan dari jenis baja konstruksi umum dipanaskan sampai 900 atau 950°C. Setelah ditahan beberapa lama pada suhu ini kemudian didinginkan pelan-pelan.	Seluruh tegangan sisa dapat dibebaskan.	Diperlukan pemanasan yang merata dan harus dijaga agar tidak terjadi perubahan bentuk.
Cara termal	Pembebasan tegangan dengan suhu rendah	Kedua permukaan daerah lasan selebar 60 sampai 130 mm dipanaskan sampai 150 atau 200°C, yang diikuti dengan pendinginan dengan air.	Baik untuk konstruksi-konstruksi besar.	Pengurangannya terhadap tegangan sisa rendah.

2.3.1.4 Metode Pengukuran Tegangan Sisa

Tegangan sisa pada material dapat dihitung melalui berbagai teknik pengujian. Namun demikian prinsip dasar dari pengukuran tegangan sisa adalah menggunakan “Hukum Hooke”. Pada “Hukum Hooke” dijelaskan bahwa perubahan ukuran disebabkan karena adanya tegangan, karena itu besarnya tegangan dapat dihitung melalui alat yang dapat mengukur perubahan ukuran material secara mikro. Karena tegangan yang ada bersifat mikro maka perubahan ukuran yang terjadi juga dalam ukuran mikro, untuk itu diperlukan alat yang dapat

ukur yang presisi. Berbagai cara dapat dilakukan untuk mengukur besar tegangan sisa, secara garis besar cara tersebut dapat dibagi menjadi 4, yaitu ¹:

1. Metode Pembebasan Tegangan

Metode ini terdiri dari berbagai teknik, yang secara umum memiliki prinsip dengan melakukan pembebasan tegangan pada material dengan cara memotong, membuat lubang, atau menghilangkan permukaan material. Teknik yang digunakan antara lain : *hole drilling* dan *ring core methods, layer removal method, sectioning method*.

2. Metode Difraksi

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

3. Metode yang menggunakan kepekaan terhadap regangan.

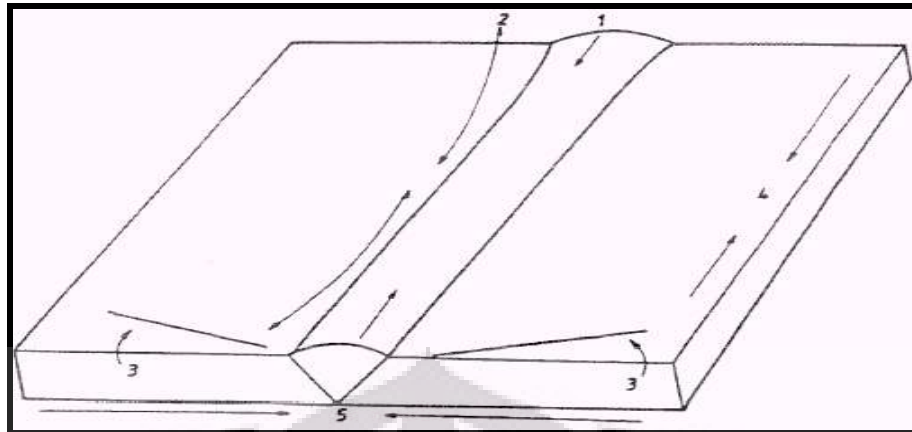
Metode ini menggunakan ultrasonik atau magnetik untuk mengetahui besarnya regangan yang terjadi didalam material yang mengalami tegangan sisa kemudian dibandingkan dengan material tanpa tegangan.

4. Metode Retak

Metode ini dapat dilakukan pada material yang mengalami retak akibat *Hidrogen Induced Cracking*, atau *Stress Corrosion Cracking*.

2.3.2 Distorsi

Distorsi merupakan perubahan bentuk akibat adanya tegangan dalam logam las yaitu tegangan memanjang dan tegangan melintang. Dalam hal ini distorsi atau deformasi ini disebabkan oleh ekspansi (pengembangan) yang tidak seragam dari logam las selama periode pemanasan dan pendinginan. Bila pendinginan ini dibiarkan membeku secara bebas maka volume dari logam cair tersebut akan mengalami penyusutan secara bebas. Proses termal tersebut akan menimbulkan tegangan didalam material yang akan menyebabkan terjadinya distorsi pada logam lasan.



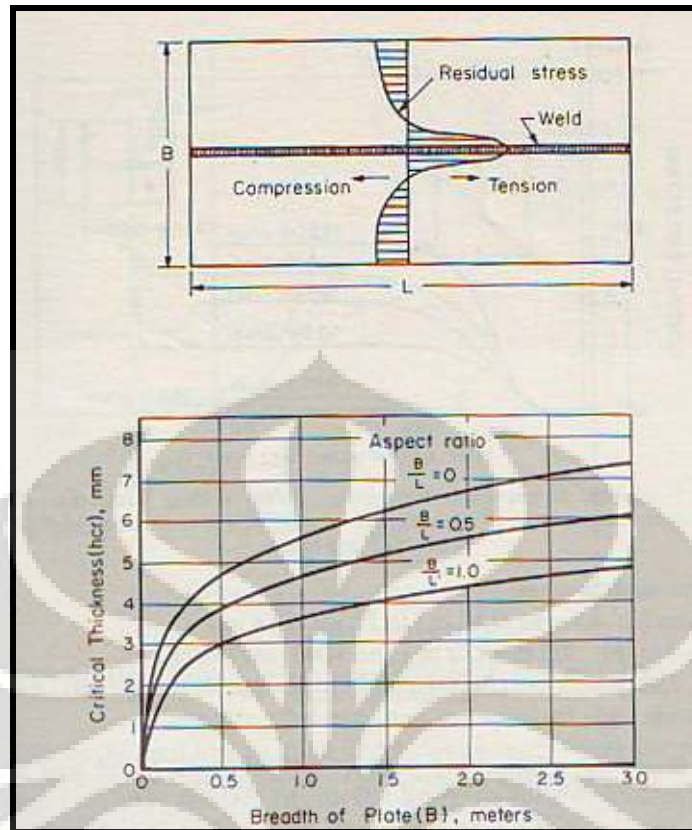
Gambar 2.15 Gaya yang terjadi selama proses pengelasan^[23]

1. Kontraksi disepanjang logam las dan daerah terpengaruh panas
2. Melengkung – karena volume logam cair pada bagian atas lebih banyak ketimbang bagian bawah
3. Distorsi Angular atau Penyimpangan sudut
4. Bagian yang jauh dari logam las bergelombang (pada pelat tipis)
5. Kontraksi pada logam las dan daerah terpengaruh panas tegak lurus dengan lasan.

Akibat gaya-gaya yang terdapat di atas menyebabkan terjadi perubahan dimensi atau yang dikenal dengan distorsi. Menurut Masubuchi, perubahan bentuk yang terjadi lasan dapat dibagi menjadi 6 yaitu :

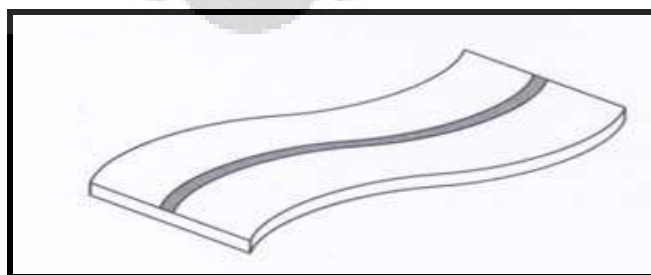
a. *Buckling distortion*

Buckling merupakan penyebab utama distorsi yang terjadi pada pelat dengan ketebalan kurang dari 10mm. *Buckling distortion* terjadi apabila tegangan tekan longitudinal yang terjadi pada daerah lasan nilainya jauh lebih besar dari (*CBL*) *Critical Buckling Load* struktur. Besarnya (*CBL*) *Critical Buckling Load* ditentukan oleh lebar, luas dan ketebalan material. Berikut merupakan hubungan antara ketebalan dengan dengan luas pelat dan luas/lebar pelat.



Gambar 2.16 Ketebalan kritis untuk *buckling distortion* pada pengelasan tumpul^[2]

Gambar diatas menunjukkan sebuah penelitian yang dilakukan oleh “Watanabe dan Satoh”, menunjukkan hubungan antara ketebalan, luas dan luas/lebar pelat pada *buckling distortion*. Contoh : Pelat dengan lebar 2m panjang 1 m ($B = 2$, $B/L = 1$), pelat akan mengalami *buckling* saat dilas apabila ketebalannya kurang dari 4.5mm.



Gambar 2.17 *Buckling Distortion*^[16]

b. Distorsi longitudinal dan transversal

Distorsi ini diakibatkan oleh penyusutan pada daerah lasan yang menyebabkan perubahan dimensi struktur baik secara transversal maupun longitudinal. Pada pengelasan tumpul distorsi longitudinal yang terjadi adalah sekitar 0.1% dari panjang las, nilai ini jauh lebih kecil dari pada distorsi transversal. Terdapat banyak metode untuk menentukan besarnya distorsi transversal yang terjadi pada material, salah satunya menggunakan “Formula Spraragen-Ettinger”^[21] :

$$S = 0.2A_w/t + 0.05d \quad (2.3)$$

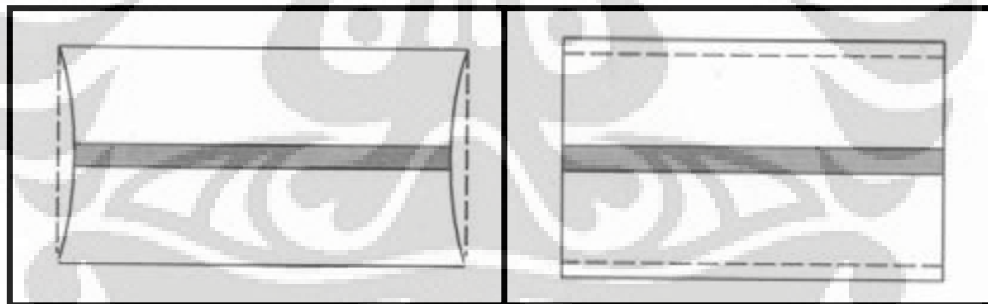
dimana :

S = penyusutan tranversal yang terjadi (in.)

A_w = luas penampang las (in.²)

t = ketebalan pelat, (in)

d = *root opening* (in)



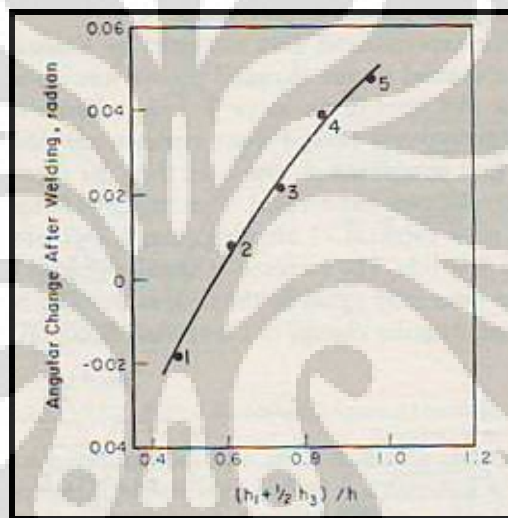
Gambar 2.18 Distorsi longitudinal (kiri) dan transversal (kanan)^[16]

c. Distorsi angular atau penyimpangan sudut

Penyimpangan sudut terjadi karena ketidak seragaman ekspansi termal dan kontraksi pada daerah melintang pelat. Gaya kontraksi paling besar umumnya terjadi pada daerah bagian atas lasan, ini diakibatkan daerah bagian atas memiliki

volume logam cair yang lebih besar sehingga penyusutan yang terjadi pada bagian atas lebih besar. Akibat hal tersebut menyebabkan struktur yang dilas menekuk kearah lasan, sehingga bentuk dari struktur berubah.

Penyimpangan sudut dapat terjadi pada sambungan tumpul (*butt joint*) dan sambungan T (*fillet joint*). Pada sambungan tumpul distorsi yang terjadi lebih banyak dipengaruhi oleh jumlah deposit logam las semakin besar deposit logam las maka penyimpangan sudut yang terjadi juga semakin besar

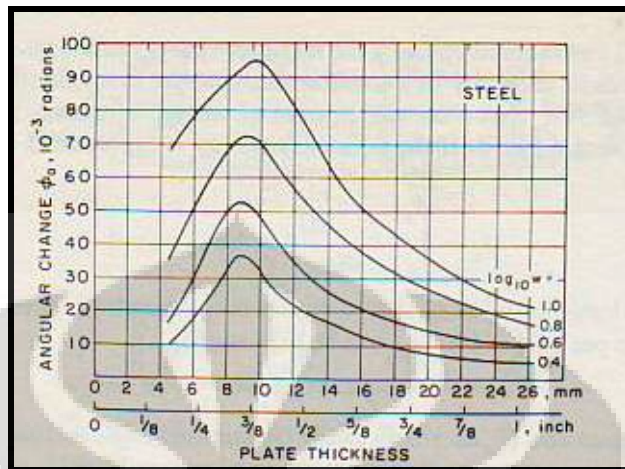


Gambar 2.19 Efek besar alur las terhadap besarnya penyimpangan sudut yang terjadi pada pengelasan tumpul^[2]



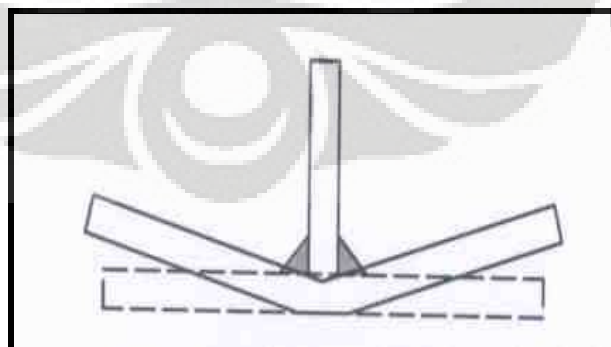
Gambar 2.20 Penyimpangan sudut yang terjadi pada pengelasan tumpul^[18]

Sedangkan pada sambungan T penyimpangan sudut yang terjadi ditentukan juga oleh ketebalan dan kekakuan material.



Gambar 2.21 Penyimpangan sudut pada pengelasan *fillet*^[2]

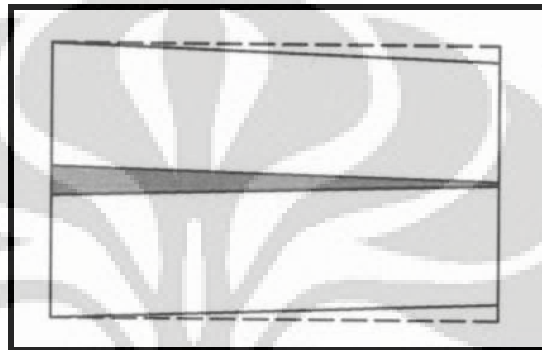
Pada pengelasan T, penyimpangan sudut terbesar terjadi saat ketebalan pelat 9mm. Hal ini disebabkan pada ketebalan pelat yang lebih besar, besarnya penyimpangan sudut yang terjadi dikurangi dengan makin besarnya nilai kekakuan material. Sedangkan pada pelat dengan ketebalan kurang dari 9mm, memiliki nilai penyimpangan sudut yang lebih kecil diakibatkan oleh pemanasan yang terjadi mengurangi momentum tekuk material (*bending moment*).



Gambar 2.22 Distorsi Angular^[16]

d. Rotational distortion

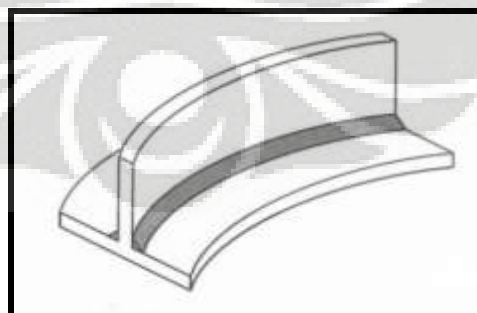
Distorsi jenis ini terjadi akibat perbedaan besarnya penyusutan yang terjadi pada daerah sepanjang las-lasan. Penelitian oleh Kihara dan Masubuchi menyatakan bahwa distorsi jenis ini dipengaruhi oleh masukan panas dan kecepatan pengelasan



Gambar 2.23 *Rotational Distortion*^[16]

e. Longitudinal bowing

Umumnya terjadi pada pengelasan *flange*, *longitudinal bowing* terjadi akibat penyusutan yang tidak merata pada arah longitudinal yang menyebabkan struktur melengkung (*bowing*).



Gambar 2.24 *Longitudinal Bowing*^[16]

2.3.3 Faktor yang Mempengaruhi Distorsi dan Tegangan Sisa

Terjadinya perubahan dimensi akibat proses pengelasan dipengaruhi oleh beberapa hal baik dari faktor internal yaitu material yang digunakan dan faktor eksternal, seperti : adanya penahan, jumlah masukan panas dan lain sebagainya, disini akan kita kelompokkan faktor-faktor yang mempengaruhi besarnya distorsi dan tegangan sisa :

a. Faktor Internal

Faktor internal disini, seperti yang telah disebutkan tadi adalah penyebab penyebab distorsi dan tegangan sisa yang berasal dari material itu sendiri. Penyebab dari material tersebut berasal dari sifat fisik dan mekanik material, yaitu^[7] :

- Modulus Elastisitas E (N/mm^2)
- *Yield Strength* R_{ch} (N/mm^2)
- Koefisien Muai Panas α_T ($\text{mm.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
- Konduktivitas λ (W/mK)
- Kapasitas Kalor c ($\text{kJ.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

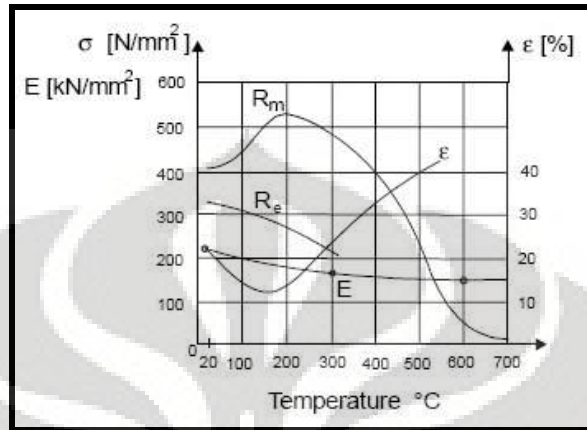
1. Modulus Elastisitas E (N/mm^2)

Modulus ini merupakan derajat kekakuan material. Semakin besar modulus elastisitas material maka ketahanannya terhadap distorsi akan semakin baik. Akan tetapi masalahnya adalah modulus elastisitas sangat tergantung pada temperatur, semakin tinggi temperatur maka nilai modulus elastisnya akan semakin berkurang.

2. *Yield Strength* R_{ch} (N/mm^2)

Agar memungkinkan terjadinya penyusutan pada las-lasan (*weld metal*) selama proses pendinginan, maka tegangan sisa harus mencapai titik luluh dari logam pengisi (*filler metal*). Semakin tinggi *yield strength* dari las-lasan (*weld metal*)

semakin tinggi pula nilai tegangan sisanya. Dan apabila tidak terjadi distorsi maka kemungkinan terjadinya retak (*crack*) akan sangat besar.



Gambar 2.25 Diagram ini menunjukkan pengaruh perbedaan temperatur selama pengujian tarik pada baja S355 oleh “Riebesahm dan Traeger”.

Ketika temperatur mendekati 200°C, baja karbon mencapai nilai titik luluh tertinggi dan elongasi terendah.

3. Koefisien Muai Panas Linier α_T (mm.m⁻¹.K⁻¹)

Koefisien muai panas linier adalah merupakan ukuran ekspansi yang terjadi pada arah longitudinal ketika logam dipanaskan. Sedangkan $\gamma = 3\alpha$, merupakan koefisien pertambahan volume. Semakin tinggi koefisien muai panas suatu material :

- memiliki nilai ekspansi dan kontraksi yang lebih besar
- *shrinkage* atau penyusutannya lebih besar
- kemungkinan terjadinya deformasi juga semakin besar.

α_T Stainless steel	= 0.012 [mm m ⁻¹ K ⁻¹]	
α_T Steel	= 0.017 [mm m ⁻¹ K ⁻¹]	
α_T Copper	= 0.018 [mm m ⁻¹ K ⁻¹]	
α_T Aluminium	= 0.026 [mm m ⁻¹ K ⁻¹]	

Gambar 2.26. Nilai koefisien muai panas berbagai jenis material

4. Konduktivitas λ (W/mK)

Konduktivitas merupakan ukuran seberapa baik suatu material mampu menghantarkan panas. Logam dengan nilai konduktivitas besar akan dengan cepat menyebarkan panas sehingga jika masukan panas tinggi maka perbedaan temperatur antara logam induk dan daerah lasan semakin kecil, tegangan sisa akan semakin kecil dan kemungkinan terjadi distorsi juga semakin kecil. Sedangkan logam yang memiliki nilai koefisien muai panasnya kecil tidak dapat menyebarkan panas dengan cepat, sehingga apabila terjadi perubahan gradien temperatur maka panas tidak akan dapat menyebar secara merata, perbedaan temperatur antara daerah lasan dengan logam induk sangat tinggi, tegangan yang terjadi sangat besar dan kemungkinan terjadi retak besar.

λ Stainless steel	= 0.147 [W/mK]	
λ Steel	= 0.550 [W/mK]	
λ Aluminium	= 2.117 [W/mK]	
λ Copper	= 3.950 [W/mK]	

Gambar 2.27 Nilai konduktivitas berbagai jenis material

5. Kapasitas Kalor c (kJ.Kg.⁻¹.K⁻¹)

Kapasitas kalor adalah jumlah kalor yang dibutuhkan untuk menaikkan 1 kilogram material setiap 1 derajat celcius. Kapasitas kalor sangat tergantung pada temperatur dan naik seiring pertambahan temperatur.

Contohnya pada baja karbon :

C_{Steel} : 0,477 (kJ.Kg.⁻¹.K⁻¹) pada 20°C
 : 0,483 (kJ.Kg.⁻¹.K⁻¹) pada 100°C
 : 0,714 (kJ.Kg.⁻¹.K⁻¹) pada 800°C

Dengan semakin bertambahnya kapasitas kalor maka masukan panas yang dibutuhkan material juga akan semakin meningkat, sehingga hal tersebut akan berpengaruh juga pada :

- Ekspansi termal
- *Shrinkage* dan distorsi
- Kemungkinan retak dan kesulitan lain yang dapat ditimbulkan.

C_{Copper}	= 0.385 [kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]	
C_{Steel}	= 0.477 [kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]	
$C_{\text{Stainless steel}}$	= 0.504 [kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]	
$C_{\text{Aluminium}}$	= 0.920 [kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]	

Gambar 2.28 Nilai kapasitas kalor berbagai jenis material

b. Faktor Eksternal

Faktor eksternal yang mempengaruhi besarnya distorsi dan tegangan sisa, berasal dari lingkungan atau kondisi kondisi pada saat proses pengelasan. Faktor utama yang mempengaruhi jenis dan besar distorsi dapat dikelompokkan kedalam beberapa kelompok seperti :

1. Jumlah penguat/penahan (*Level of Restraint*)
2. Bentuk sambungan. (*Joint design*)
3. Pemasangan komponen (*Component Fit-up*)
4. Ukuran material yang dilas
5. Urutan pengelasan (*Welding Sequence*)
6. Parameter Pengelasan

Parameter prosedur digunakan untuk menentukan besarnya masukan panas yang diterima oleh logam induk. Masukan panas atau heat input dalam proses pengelasan, secara matematis dapat dihitung dengan :

$$Q_B = \frac{IxU}{v} \times 60K \text{ (J / mm)} \quad (2.4)$$

dimana :

Q_b = masukan panas; J/cm

U = tegangan listrik; v

I = kuat arus; A

V = kecepatan pengelasan; cm/menit

$$Q_M = Q_B \times \eta \quad (2.5)$$

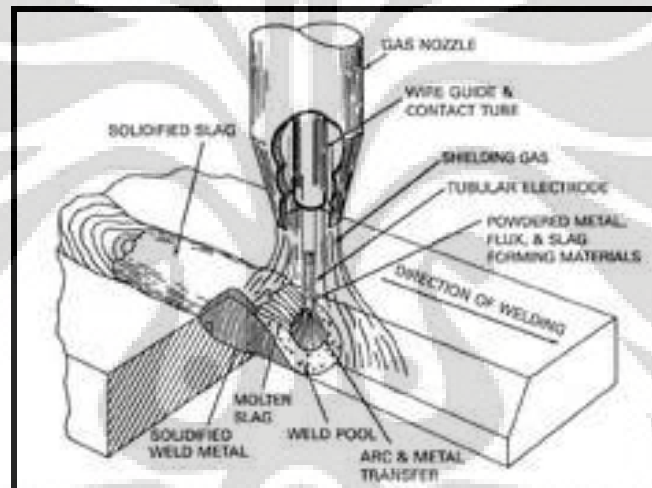
Sedangkan energy yang ke benda kerja (Q_m) tergantung dari efisiensi busur(η), dn dapat dikalkulasikan sesuai dengan persamaan diatas.

Tabel 2.4 Tabel Efisiensi dari Beberapa Jenis Pengelasan.

Welding Process	Efficiency, η	References
Gas tungsten arc (DCSP)	0.50-0.80	4-12
Gas tungsten arc (AC)	0.20-0.50	5, 9
Shielded metal arc	0.65-0.85	3, 9, 10, 12
Gas metal arc	0.65-0.85	9, 10, 12
Submerged arc	0.80-0.99	9, 12, 13
Electroslag	0.55-0.82	13
Gas	0.25-0.80	12, 14, 15
Electron beam	0.80-0.95	12
Laser beam	0.005-0.70	16-20

2.4 Flux Core Arc Welding (FCAW)

FCAW merupakan proses pengelasan yang mengkombinasikan SMAW, MIG, dan SMAW, dimana pada FCAW digunakan kawat las yang berisikan fluks yang dibungkus dan digulung dengan pelat tipis yang terbuat dari baja lunak dengan berat fluks yang digunakan sebesar 10 sampai 30% kawat las secara keseluruhan. FCAW sendiri dibagi menjadi 2 jenis, yaitu : FCAW-S dan FCAW-G. Pada FCAW-G selain digunakan fluks juga digunakan gas sebagai pelindung busur dan logam yang mencair terhadap atmosfer. Sedangkan pada FCAW-S hanya digunakan fluks saja tanpa menggunakan gas pelindung.



Gambar 2.29 Proses Pengelasan FCAW^[4]

Parameter pada proses pengelasan dengan FCAW terdiri dari :

- Arus Listrik
- Tegangan Listrik
- Kecepatan Pengelasan
- Jenis Elektroda
- Gas Pelindung

2.5 Difraksi Neutron

2.5.1 Dualisme Gelombang Partikel

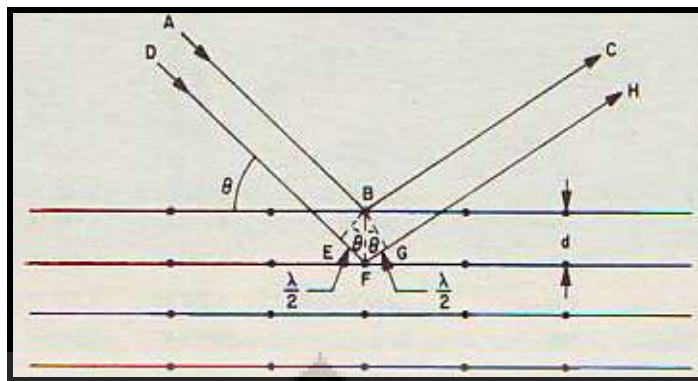
Dalam perambatannya cahaya biasa dipandang sebagai gelombang, misalnya dalam peristiwa interferensi dan difraksi cahaya. Sedangkan dalam peristiwa interaksi cahaya dengan atom dan molekul, misalnya spektrum radiasi benda hitam, efek foto listrik dan efek “Compton”, cahaya dipandang sebagai partikel.

Dalam efek foto listrik dan efek “Compton” dikatakan gelombang (elektromagnetik) bersifat sebagai partikel. Kemudian “Broglie” mengemukakan hipotesisnya bahwa partikel partikel, misalnya elektron, proton dan neutron yang bergerak dengan kecepatan tertentu juga dapat bersifat sebagai gelombang. Hipotes ini dibuktikan oleh percobaan interferensi berkas elektron oleh “Davidsson dan Germer”. Sifat gelombang yang dapat bersifat sebagai partikel dan partikel yang dapat bersifat sebagai gelombang disebut *dualisme gelombang cahaya*.

2.5.2 Prinsip Difraksi

Ketika gaya eksternal atau internal bekerja pada sebuah material kristalin, akan terjadi perubahan pada kisi kristal yang akan mengubah jarak kisi antar atom. Saat proses deformasi yang terjadi melewati batas elastik, maka akan terjadi deformasi plastis yang mengakibatkan tergelincirnya (*slipping*) bidang bidang kisi. Perubahan jarak antar atom (regangan) yang terjadi selalu proporsional dengan tegangan yang ada.

Regangan elastik pada logam yang memiliki struktur kristalin dapat ditentukan dengan pengukuran parameter kisi dengan menggunakan difraksi sinar-X atau neutron. Pengukuran dengan menggunakan cara ini dapat dilakukan karena panjang gelombang yang pendek dari sinar-X atau neutron mampu menembus kisi kristal dan memantulkannya kembali dari bidang atom yang telah ditembus.



Gambar 2.30 Difraksi yang dihasilkan dari refleksi bidang atom yang berdekatan pada gelombang monokromatik^[2].

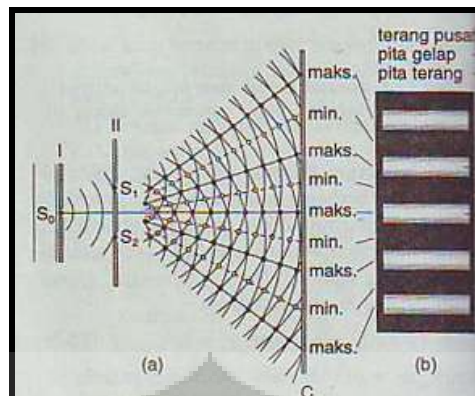
Gambar 2.30 memperlihatkan terjadinya difraksi pada saat neutron jatuh pada permukaan struktur kristal suatu bahan. Pada gambar diatas dapat dilihat bahwa kedua gelombang memiliki panjang lintasan yang berbeda. Gelombang ABC yang dipantulkan oleh atom B memiliki panjang gelombang yang lebih pendek dari gelombang DFH yang dipantulkan oleh atom F. jika d adalah jarak antara kedua bidang (bidang B dan bidang F), maka beda jarak lintasan ABC dan AFH adalah EFG. Jika jarak EF dan EG sama (sudut sinar datang = sudut sinar pantul). Maka :

$$EF = d \cdot \sin\theta \quad (2.6)$$

Dan beda lintasan ABC dan DFH adalah :

$$\Delta s = 2 d \cdot \sin\theta \quad (2.7)$$

Dan karena adanya beda lintasan yang ditempuh oleh kedua gelombang sehingga terjadi interferensi. Interferensi terjadi ketika dua gelombang datang bersama pada suatu tempat, interferensi gelombang menyebabkan adanya interferensi destruktif dan konstruktif. Berikut merupakan diagram skematik terjadinya interferensi.



Gambar 2.31 Skematik Percobaan Young terhadap terjadinya interferensi^[14]

Gambar 2.31 merupakan diagram skematik percobaan celah ganda young yang menjelaskan terjadinya pola interferensi berupa pita gelap terang yang terjadi secara bergantian. Pola gelap menunjukkan terjadi interferensi destruktif sedangkan pita terang menunjukkan terjadinya interferensi konstruktif.

Interferensi konstruktif terjadi apabila beda lintasan kedua sinar (Δs) adalah kelipatan genap ($2n$) dari setengah panjang gelombang (0.5λ). dan terang utama terjadi apabila $n=1$, sehingga :

$$\Delta s = 2n (0.5 \lambda) \quad (2.8)$$

$$2d \cdot \sin\theta = n \lambda \quad (2.9)$$

$$2d \cdot \sin\theta = \lambda \quad (2.10)$$

dimana :

Δs = beda lintasan

λ = panjang gelombang (1.83\AA)

θ = sudut yang dibentuk antara *beam* dan permukaan bidang.

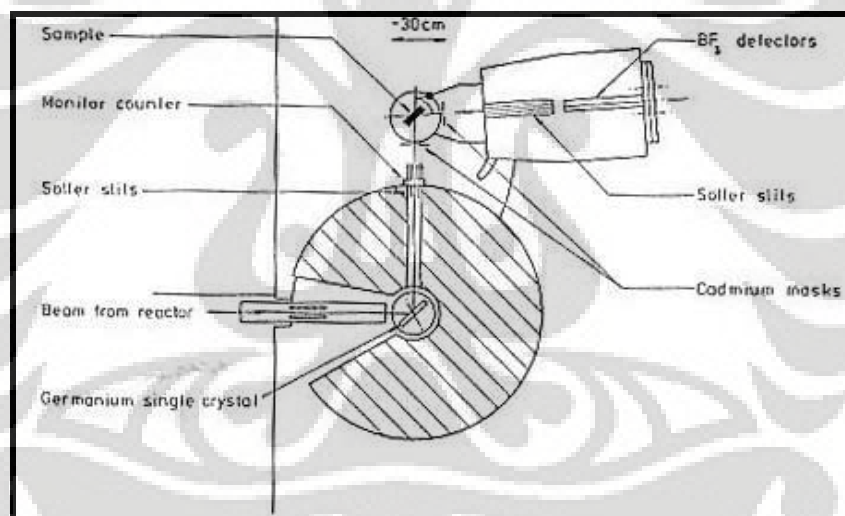
n = menunjukkan pola interferensi yang dibentuk ($n= 1,2,\dots$)

d = jarak antar bidang

2.5.3 Prinsip Metode Difraksi Neutron

Pada bagian ini tidak akan dijelaskan kembali tentang proses difraksi yang menjadi prinsip pengukuran tegangan sisa dengan menggunakan neutron, tetapi lebih kepada alat pengukurnya yaitu *neutron diffractometer*.

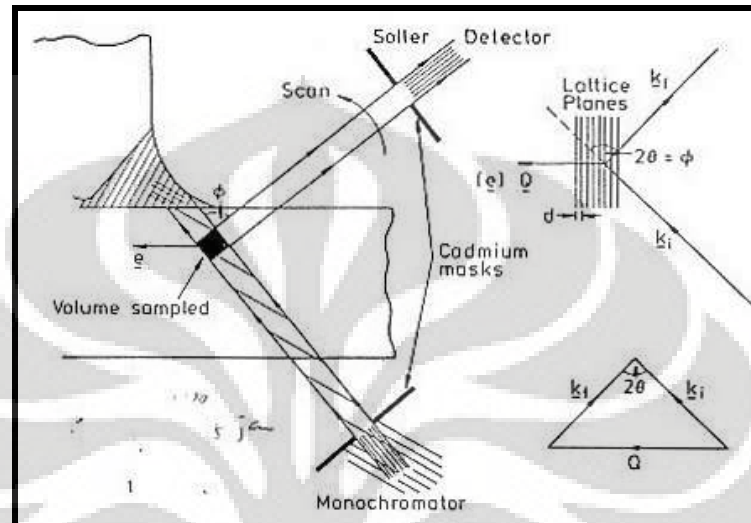
Tidak seperti alat difraksi sinar X yang hanya berukuran 1x1 m, *neutron diffractometer* merupakan sebuah rangkaian peralatan yang terhubung langsung pada sebuah reaktor nuklir untuk menghasilkan neutron. Sehingga bisa jadi perangkat *neutron diffractometer* ini berukuran jauh lebih besar jika dibandingkan dengan alat difraksi sinar X. Pada Gambar 2.32 merupakan tipikal dari *neutron diffractometer* pada sebuah reaktor. Sedangkan Gambar 2.33 merupakan *powder neutron diffractometer* yang digunakan dalam sebuah pengukuran regangan sisa.



Gambar 2.32 Skema dari sebuah *neutron diffractometer*^[24]

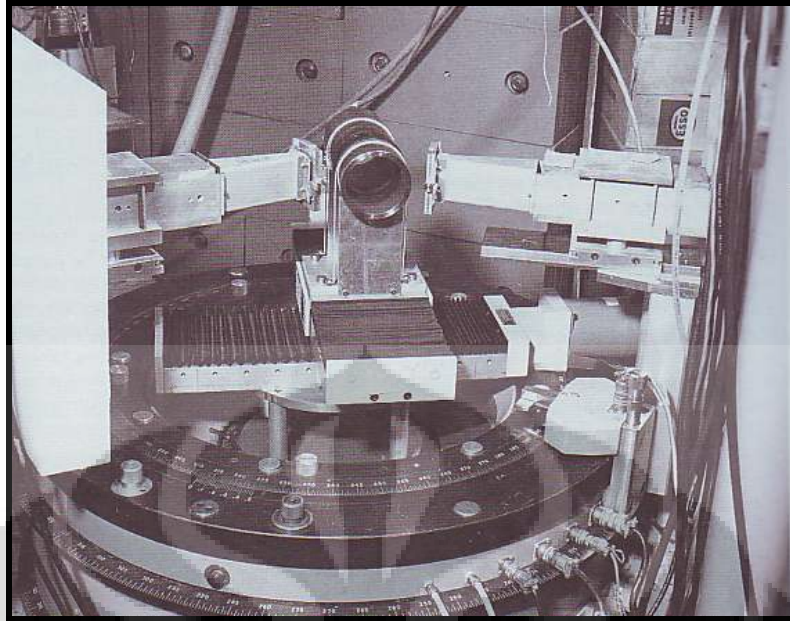
Pada sebuah *neutron diffractometer*, neutron yang berasal dari reaktor pertama dimonokromasi untuk memilih panjang gelombang sesuai dengan “Hukum Refleksi Bragg” melalui sebuah *single crystal monochromator*. Gelombang monokromasi yang dihasilkan kemudian diarahkan kesampel melalui sebuah kolimator dan celah. Kolimator berfungsi untuk mengarahkan neutron agar

neutron yang menuju kesampel tidak bias dan memiliki arah sejajar menuju sampel, sedangkan celah berfungsi untuk menentukan volume dari sampel yang ingin diukur tegangan sisanya.



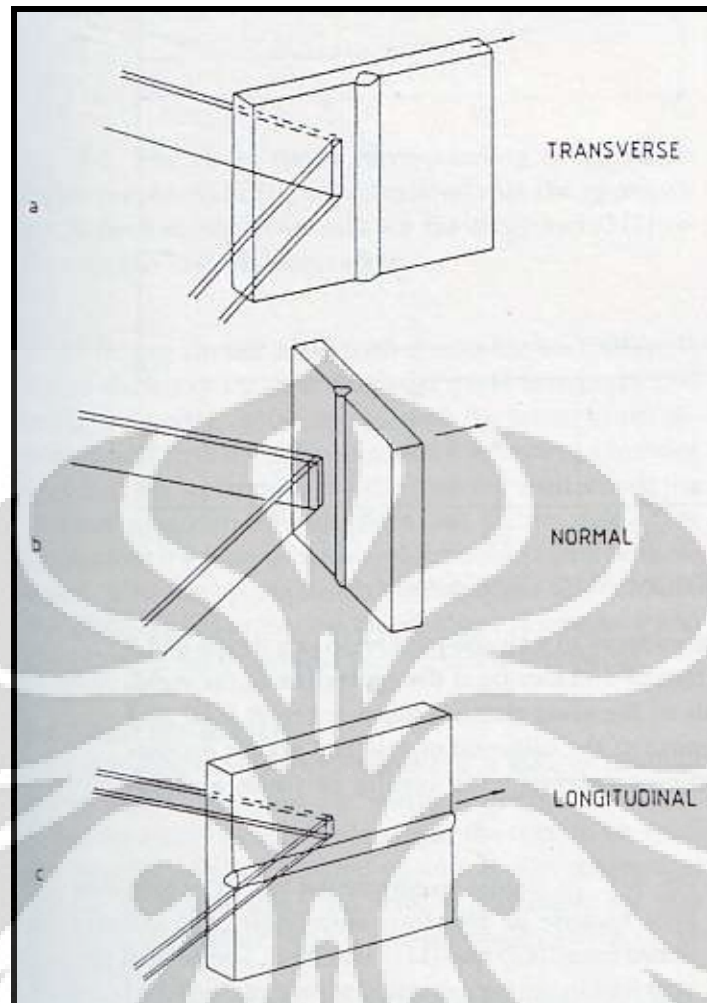
Gambar 2.33 Prinsip pengukuran regangan, menunjukkan penentuan ukuran volume sampel yang diukur dan arah regangan yang diukur.^[24]

Sampel sendiri diletakkan diatas sebuah *goniometer* tiga sumbu yang digerakkan secara otomatis melalui sebuah komputer. Difraksi neutron dari sampel ditangkap oleh detektor, pada detektor juga dipasang celah. Volume yang diukur regangan sisanya merupakan daerah persimpangan dari kedua celah seperti yang terlihat pada Gambar 2.34.



Gambar 2.34 Foto sebuah pengukuran regangan sisa pada sampel berbentuk pipa, *incident beam* (sumber neutron berada disebelah kanan sampel, sedangkan yang berada disebelah kiri sampel adalah detector).^[11]

Berbeda dengan pengukuran tegangan sisa dengan menggunakan sinar-X, dimana arah tegangan sisa yang diukur hanya pada permukaan sampel sehingga arah regangan yang diperoleh merupakan tegangan dua sumbu. Sedangkan pada neutron, karena memiliki energi yang lebih besar dari sinar-X maka pengukuran dapat dilakukan pada bagian dalam sampel sehingga diperoleh tegangan 3 arah atau 3 sumbu. Gambar dibawah berikut merupakan salah satu contoh cara pengukuran tegangan sisa pada sebuah sampel las pada 3 arah, yaitu transversal, normal dan longitudinal.

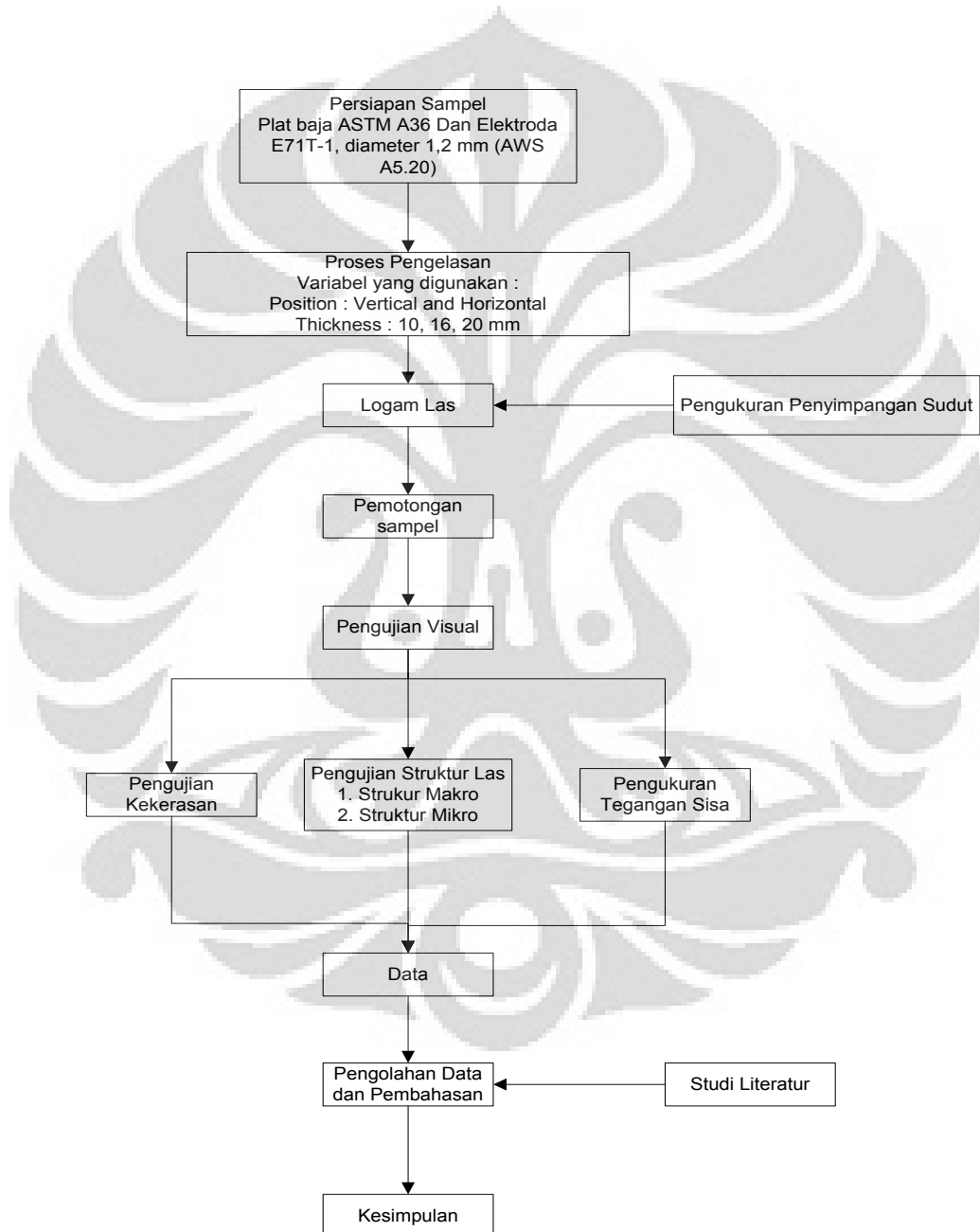


Gambar 2.35 Sketsa pengaturan sampel dan *neutron beam* untuk mengukur tegangan sisa pada arah transversal, normal, dan longitudinal.^[11]

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Tahapan penelitian ini secara garis besar ditunjukkan oleh Gambar 3.1 :

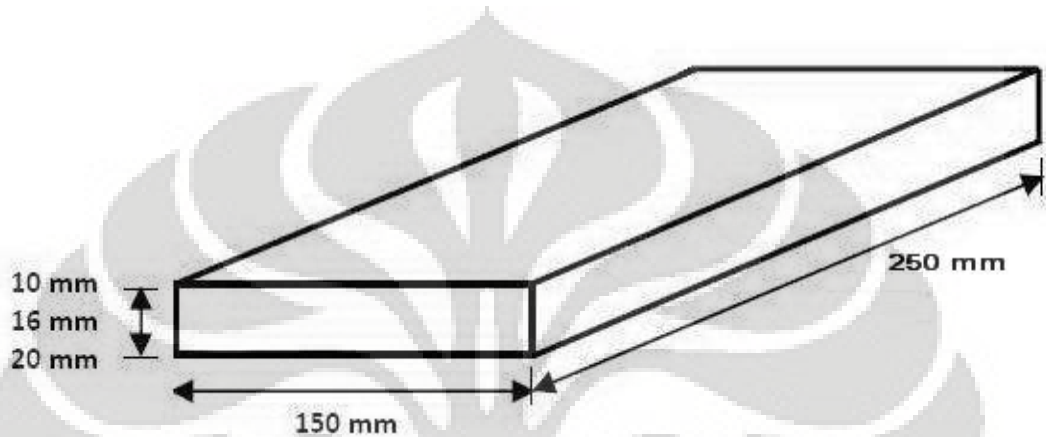


Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Prosedur Percobaan

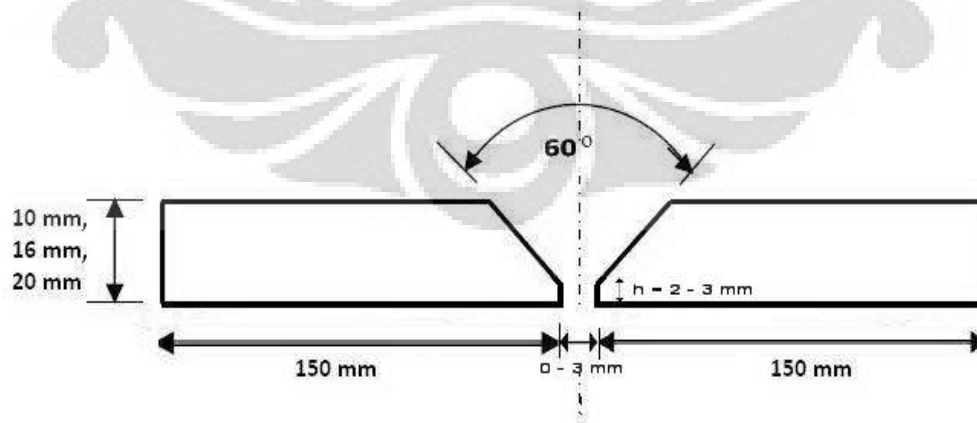
3.2.1 Persiapan Sampel Las

Material yang digunakan sebagai logam induk pada penelitian ini adalah baja JIS G3101- SS400. Sebelum dilakukan proses pengelasan, baja dipotong dengan ukuran 150mm x 250mm. Seperti terlihat pada Gambar 3.2



Gambar 3.2 Dimensi sampel yang digunakan dalam penelitian

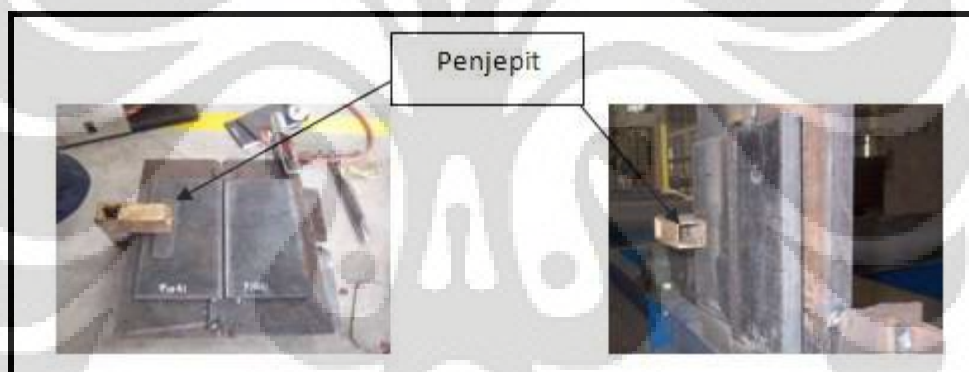
kemudian pada salah satu sisi pelat dibuat alur dengan kemiringan 30° sesuai dengan AWS A5.1-81. Sehingga setelah digabungkan terbentuk alur model V-groove dengan sudut alur 60° .



Gambar 3.3 Proses Persiapan Sambungan

Sampel yang telah dibuat alur kemudian diletakkan diatas pelat baja datar yang memiliki *groove* ditengahnya. Kemudian sampel diletakkan diatas pelat baja tersebut. Sebelum dilakukan pengelasan terlebih dahulu dicek kemiringan pelat dengan menggunakan *waterpass*, pada proses ini diharapkan agar posisi sampel sewaktu pengelasan benar benar datar. Setelah dicek dengan *waterpass* kemudian sampel di-*tack* pada kedua ujungnya agar posisi sampel tidak berubah dan dijepit pada salah satu sisinya, proses penjepitan ini diharapkan agar penyimpangan sudut yang terjadi hanya pada satu sisi saja untuk mempermudah pengukuran penyimpangan sudut yang terjadi.

Berikut merupakan gambar proses persiapan sampel yang dilakukan pada saat proses pengelasan.



Gambar 3.4 Proses persiapan pengelasan, posisi vertikal (kiri) dan posisi horizontal (kanan)

3.2.2 Proses Pengelasan

1. Material logam induk yang digunakan adalah pelat baja (*steel plate*) spesifikasi JIS G3101- SS 400 dengan ketebalan : 9 mm, 16 mm dan 25 mm.
2. Kawat las yang digunakan :
Proses FCAW : AWS A5.20 E71T-1, diameter 1,2 mm

3. Parameter las yang digunakan :

Proses FCAW :

Kuat arus (180 A ÷ 240 A)

Tegangan (22 Volt ÷ 30 Volt)

Kecepatan (508 ÷ 712 cm/menit)

4. Gas pelindung (*shielding gas*) yang digunakan :% CO₂ > 90%

Kecepatan alir (18 ÷ 22 ltr/ menit)

5. Posisi pengelasan yang digunakan adalah posisi mendatar (*Flat*) dan tegak (*Vertikal Up*)

Komposisi kimia logam induk yang dipakai mengikuti komposisi kimia *mill certificate* yang dikeluarkan perusahaan pembuatnya seperti terlihat pada Tabel 3.1 (*mill certificate*, Lampiran 2)

Tabel 3.1 Komposisi kimia logam induk (JIS G3101- SS400)

Unsur	C	Mn	Si	P	S
<i>Mill Cert.</i>	0.16	0.64	0.19	0.01	0.07
SS400	-	-	-	0.05	0.05
ASTM A.36	Max 0.29	0.60 ~ 0.90	Max. 0.40	Max. 0.04	Max. 0.05

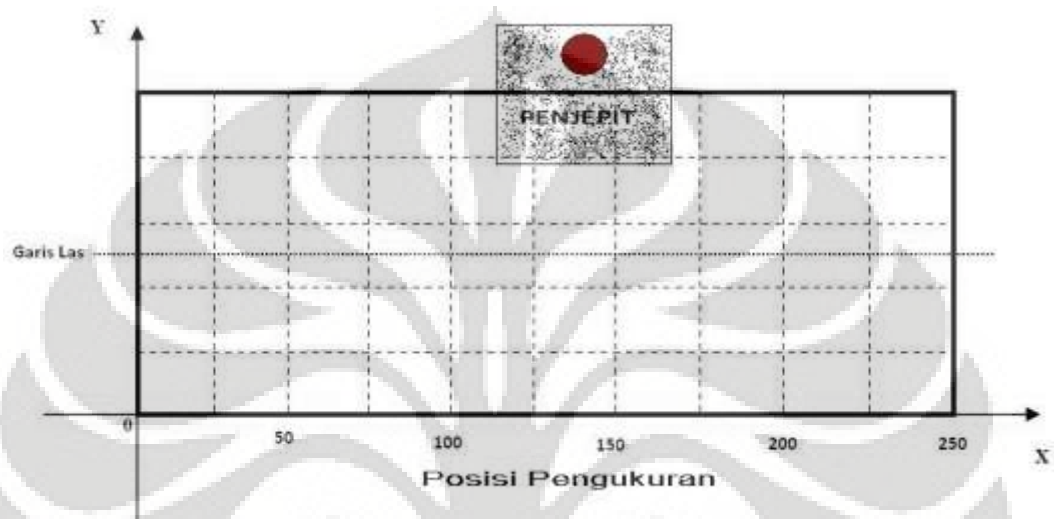
Untuk komposisi kimia kawat las yang dipakai mengikuti komposisi kimia *mill certificate* yang dikeluarkan perusahaan pembuatnya seperti terlihat pada Tabel 3.2. Kawat las jenis ini memiliki fluks titania dan dapat digunakan untuk semua posisi pengelasan. (*mill certificate* E71T-1, Lampiran 3)

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

3.2.3 Pengukuran Penyimpangan Sudut

Pengukuran penyimpangan sudut yang terjadi dilakukan dengan menggunakan penggaris. Pengukuran dilakukan pada beberapa titik pengelasan untuk mengetahui distribusi penyimpangan sudut yang terjadi. Berikut merupakan skema pengukuran penyimpangan sudut yang dilakukan.



Gambar 3.5 Skema Pengukuran Penyimpangan Sudut

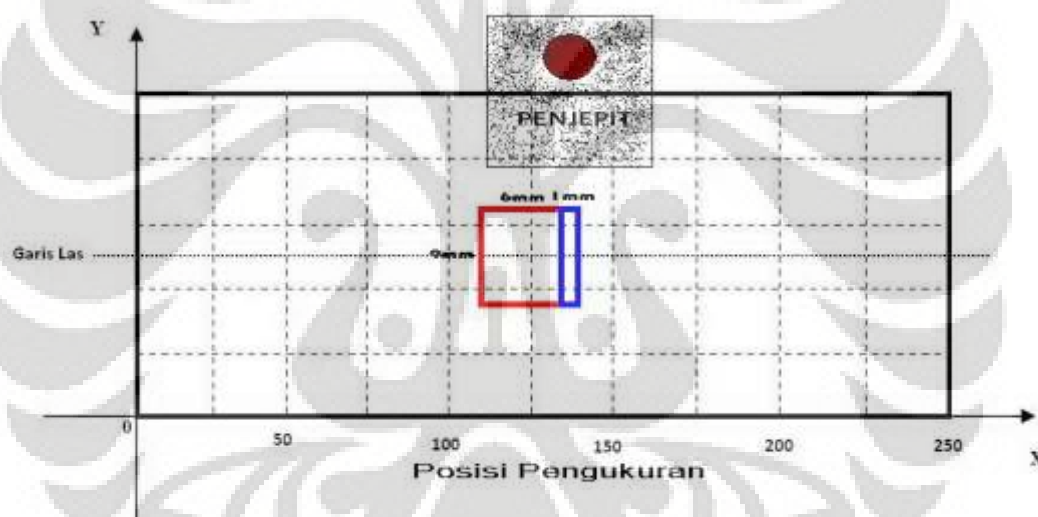
Pengukuran penyimpangan sudut dilakukan setiap 50 mm pada bagian sisi las yang tidak dijepit. Ketinggian dari penyimpangan sudut yang diperoleh kemudian digunakan untuk menghitung penyimpangan sudut.



Gambar 3.6 Sampel yang telah terjadi penyimpangan sudut^[18]

3.2.4 Pengujian Struktur Mikro dan Makro

Sebelum dilakukan pengujian struktur mikro dan makro, sampel terlebih dahulu dipotong menjadi beberapa bagian yaitu: bagian pertama adalah sampel untuk pengujian struktur mikro, makro dan kekerasan sedangkan sampel kedua adalah sampel yang akan digunakan untuk pengujian tegangan sisa menggunakan difraksi neutron. Pemotongan sampel dilakukan dengan menggunakan gerinda potong abrasif, untuk menjaga agar struktur mikro dan tegangan sisa didalam sampel tidak rusak pada saat pemotongan temperatur sampel dijaga kurang dari 100°C dengan menambahkan air secara terus menerus pada saat pemotongan dan dilakukan pengaturan jeda pemotongan untuk menjaga temperatur kurang dari 100°C. Skema pemotongan sampel adalah seperti Gambar 3.7 berikut :



Gambar 3.7 Skema pemotongan sampel, warna biru merupakan sampel untuk struktur mikro dan makro sedangkan warna merah adalah sampel untuk pengukuran tegangan sisa.

Bagian yang telah dipotong berukuran kira kira 1 x 9mm, sampel yang telah dipotong kemudian di-*milling* untuk meratakan permukaan sebelum dilakukan pengamplasan dan pemolesan. Proses *milling* dilakukan dengan meminjam alat di Politeknik Negeri Jakarta. Setelah di-*milling* dan diperoleh permukaan yang cukup baik, sampel kemudian diampelas dengan tingkat

kekasaran amplas #60, #120, #240, #500, #800, #1000 pada piringan berputar dengan menggunakan media pendingin air.

Setelah diampelas #1500 kemudian sampel uji dipoles dengan kain beludru dan serbuk alumina pemolesan dilakukan pada alat poles *ferrous* di laboratorium metalografi dan HST Departemen Metalurgi dan Material FTUI.

Setelah permukaan sampel benar benar rata, bebas goresan dan kotoran kemudian sampel dietsa dengan larutan HCl 0.1%. Sampel yang telah dicelupkan dalam larutan selama 45 detik, kemudian dibilas dengan menggunakan air yang mengalir dan dikeringkan dengan menggunakan pemanas.

Sampel yang telah kering kemudian dilakukan pengamatan struktur makro dengan perbesaran 7x dan struktur mikro dengan perbesaran 200x.

3.2.5 Pengujian Kekerasan Mikro

Pengujian kekerasan ini bertujuan untuk mengamati distribusi kekerasan dari logam las hingga kelogam induk. Hal ini diperlukan karena kekerasan pada sampel las banyak dipengaruhi oleh distribusi panas yang masuk selama proses pengelasan. Variabel yang digunakan yaitu ketebalan sampel dan posisi pengelasan.

Metode yang digunakan dalam pengujian adalah metode penjejakan *Vickers*. Proses pengujiannya adalah sebagai berikut. Sampel yang digunakan adalah sampel yang sudah dilakukan pengujian struktur mikro, sehingga pada saat penjejakan bisa dilihat struktur mikro dari sampel.

Pengujian dilakukan dibagi menjadi dua cara. Pada pengujian dengan tebal sampel 16 mm, pengujian dilakukan pada arah longitudinal 20mm ke bagian kanan dan kiri logam las, pengujian dilakukan setiap 1mm, sehingga pada setiap sampel diambil 40 titik pengujian. Pengujian kekerasan dilakukan pada bagian atas dan bawah, dengan jarak 4 mm dari permukaan atas dan 4 mm dari permukaan bawah, dan titik yang diambil tiap sampel kurang lebih 80 titik. Sedangkan pada sampel

dengan tebal 10, dan 20 mm, pengujian hanya dilakukan pada daerah deposit las, daerah terpengaruh panas kasar, daerah terpengaruh panas halus dan logam induk. Pada masing bagian dilakukan tiga kali penjejakan, nilai yang diperoleh merupakan rata rata dari 3 penjejakan tersebut.

Pada pengujian ini nilai yang diperoleh dari penjejakan adalah diagonal jejak yang kemudian dikonversi menjadi besaran kekerasan material dengan menggunakan formula sebagai berikut :

$$A = \frac{d^2}{2 \sin(136^\circ/2)} \quad (3.1)$$

$$A \approx \frac{d^2}{1.854} \quad (3.2)$$

$$HV = \frac{F}{A} \approx \frac{1.854F}{d^2} \quad (3.3)$$

dimana :

HV = nilai kekerasan *Vickers* (HV)

F = beban penjejakan (300 g)

A = luas daerah yang dijejak

d = diagonal rata-rata jejak.

3.2.6 Pengujian Tegangan Sisa dengan Difraksi Neutron

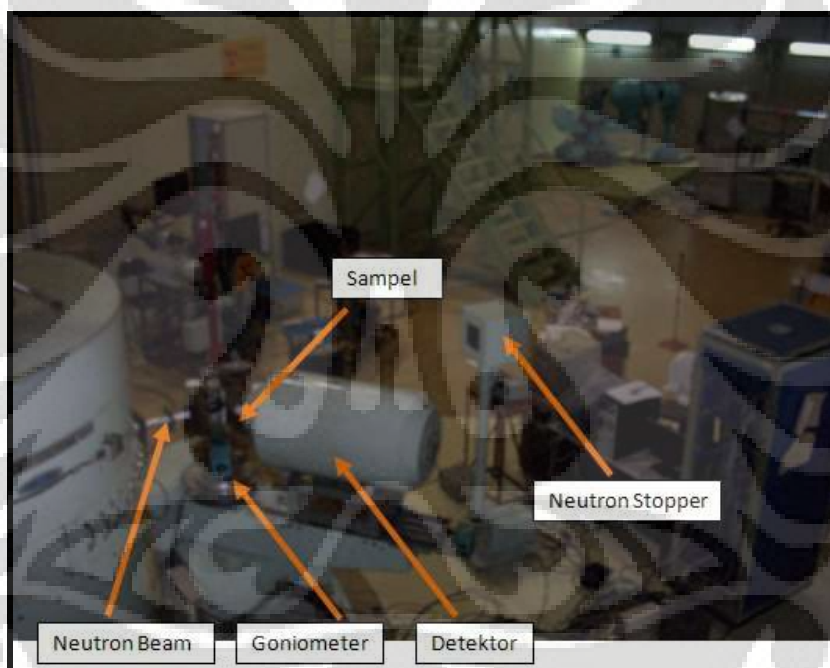
3.2.6.1 Spesifikasi Alat

Monochromator take off angle : 0 – 90 deg

Monochromator type : PG[002], Cu[111], or Si[311] *focused*

2 teta sample table : -10 – 110 deg

<i>Control system</i>	: LABO+ PC
<i>X-Y-Z translating goniometer</i>	: X +/- 70 mm Y +/- 70 mm Z + 50mm
<i>Main detector</i>	: 1D (10" active length) or point detector
<i>Beam Height</i>	: 90 mm
<i>Cryostat</i>	: RT up to 10K
<i>Tensile Rig</i>	: 0 – 100 kg.



Gambar 3.8 Alat difraksi *neutron measurement* (DN-1) di Reaktor Serbaguna G.A Siwabessy

Sample type

Material : *metals, ceramics in powder or bulk*

Max. dimension : $50 \times 100 \times 10 \text{ mm}^3$

Difraktometer merupakan suatu alat yang digunakan untuk mempelajari struktur dan pola difraksi yang dihasilkan oleh bahan tersebut. Alat ini memiliki banyak fungsi selain untuk pengujian tegangan sisa alat ini juga dapat digunakan untuk melihat struktur material, cacat dan kekosongan didalam material dan berbagai tujuan lainnya. Dalam difraksi panjang gelombang yang dihasilkan tergantung dari monokromator yang digunakan, monokromator berfungsi untuk mengubah gelombang polikromatik yang dihasilkan oleh reactor neutron menjadi satu buah gelombang (monokromatik). Pada penelitian ini monokromator yang digunakan adalah silikon *single crystal*, dengan bidang [311] dan panjang gelombang yang dihasilkan adalah 1.8358513 Å. Ukuran slit yang digunakan pada pengujian ini adalah 5mm untuk kisi pada detektor dan kisi pada ujung *neutron beam*, dengan jarak antara sampel dengan *incident slit* 170mm dan jarak antara sampel dengan *detector slit* adalah 95mm.

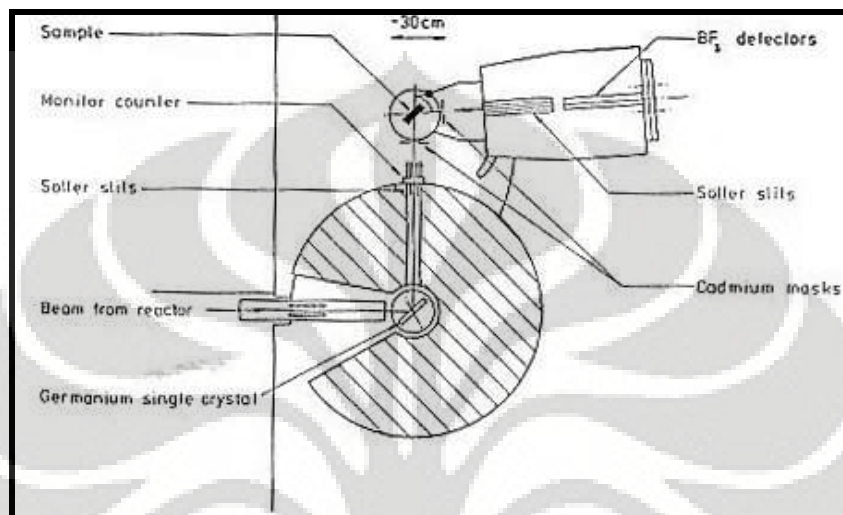
Peralatan yang digunakan pada pengujian difraksi neutron terdiri dari :

1. Reaktor sebagai sumber neutron.
2. Peralatan untuk menempatkan monokromator
3. *Goniometer*, berfungsi untuk mengatur posisi sampel dan sudut hamburan. Terdiri dari arah X, Y, Z, θ , 2θ .
4. Detektor/sistem pencacah untuk mengukur intensitas hamburan yang dihasilkan material.

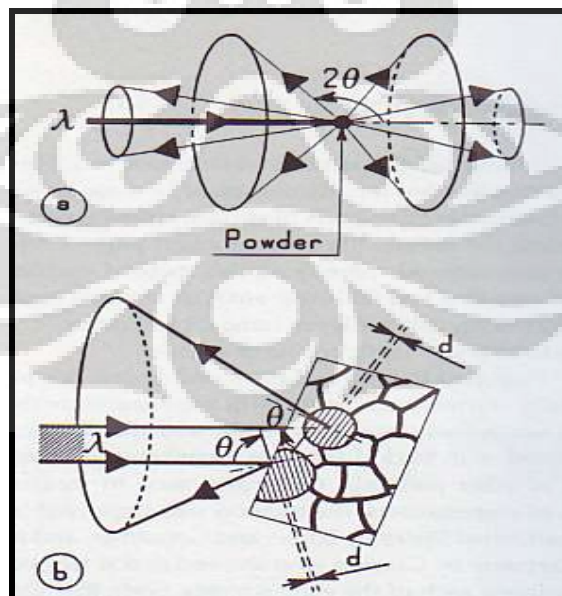
3.2.6.2 Prinsip Kerja

Prinsip kerja dari difraksi neutron dapat dilihat pada Gambar 3.7. Pertama-tama berkas neutron polikromatik yang berasal dari reaktor diubah menjadi gelombang monokromatik dengan menggunakan *single cell* silikon, sinar monokromatik tersebut kemudian dilewatkan *collimator* untuk memperoleh gelombang neutron yang searah. Neutron yang sudah searah sebelum keluar terlebih dahulu dilewatkan *incident slit*. Fungsi *incident slit* adalah untuk mengatur besarnya / banyaknya neutron yang akan dikeluarkan. Setelah keluar dari *incident slit* neutron akan dilewatkan pada sampel, pada saat ini sebagian

besar neutron akan dilewatkan begitu saja oleh sampel dan sebagian lagi akan dihamburkan oleh bidang kital tertentu pada detektor. Neutron yang dihamburkan oleh bidang yang dihamburkan oleh bidang tersebut dapat diperoleh jarak antar bidang (d) dari kristal. Perubahan pada jarak antar kristal menunjukkan adanya tegangan didalam material.



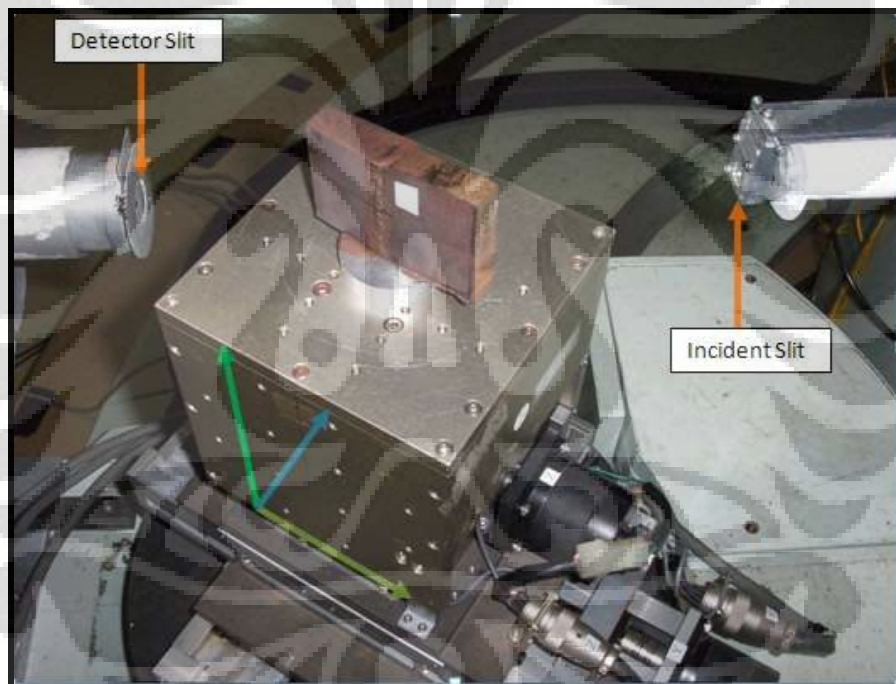
Gambar 3.9 Skematik alat neutron *diffractometer measurement*.



Gambar 3.10 Skematik hamburan neutron pada sampel serbuk (a) dan pada sampel polikristal (b)

3.2.6.3 Prosedur Pengujian

1. Pengujian difraksi neutron harus dilakukan saat neutron tersedia, pada umumnya neutron di Reaktor Serbaguna G.A Siwabessy, tersedia 4 hari dalam seminggu.
2. Setelah neutron tersedia, hal yang dilakukan pertama adalah membuka katup yang untuk membuka dan menutup neutron.
3. Mengarur lebar *slit* yang akan digunakan.
4. Kalibrasi *goniometer* dan *theodolit*.
5. Kalibrasi posisi neutron beam pada sudut 0° .
6. Kalibrasi panjang gelombang dari neutron dengan menggunakan silikon standar.

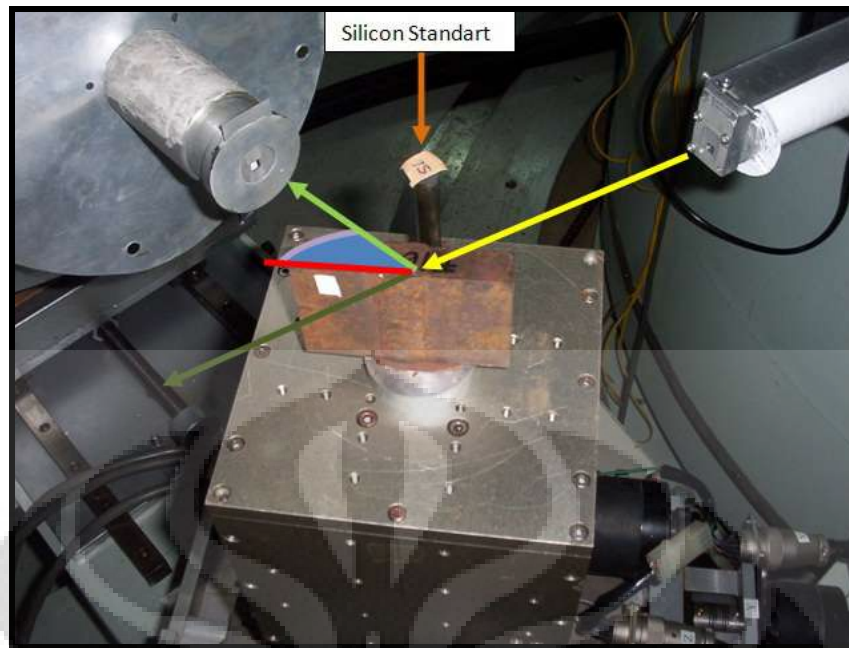


Gambar 3.11 Pengukuran intensitas neutron (*direct beam*)

(Panah tiga sumbu dibawah merupakan sumbu pergerakan yang dapat dilakukan oleh *goniometer*)

Persiapan Sampel

1. Sebelum sampel diuji terlebih dahulu ditentukan daerah yang akan dilakukan pengujian tegangan sisa.
2. Pertama adalah kedalaman sampel yang akan diuji, dalam penentuan kedalaman sampel yang akan diuji dipengaruhi pula oleh lebar *slit* yang akan digunakan dan sudut hamburan yang digunakan.
3. Penentuan bidang kristal yang akan diuji, pada baja terdapat 2 sudut hamburan pada sudut $53,75^\circ$ dan $79,6^\circ$.
4. Setelah sampel ditentukan daerah yang akan diuji dilakukan mapping sampel kemudian sampel diletakkan diatas *goniometer* dan dilakukan pengujian.
5. Pengujian pertama yang dilakukan adalah pengukuran sudut puncak hamburan, yaitu dengan meletakkan sampel pada sudut hamburan 78.5° hingga 80.6° untuk menentukan puncak hamburan dari material.
6. Setelah diketahui puncak hamburannya, sampel diletakkan pada puncak hamburan dan diukur banyaknya hamburan neutron tiap menit, ini untuk menentukan waktu pengukuran yang dibutuhkan sampel.
7. Kemudian yang terakhir adalah pembuatan program pengaturan pengukuran, program ini dibuat untuk mengatur pergerakan *goniometer* ketika mengukur titik titik pada sampel yang akan diuji.

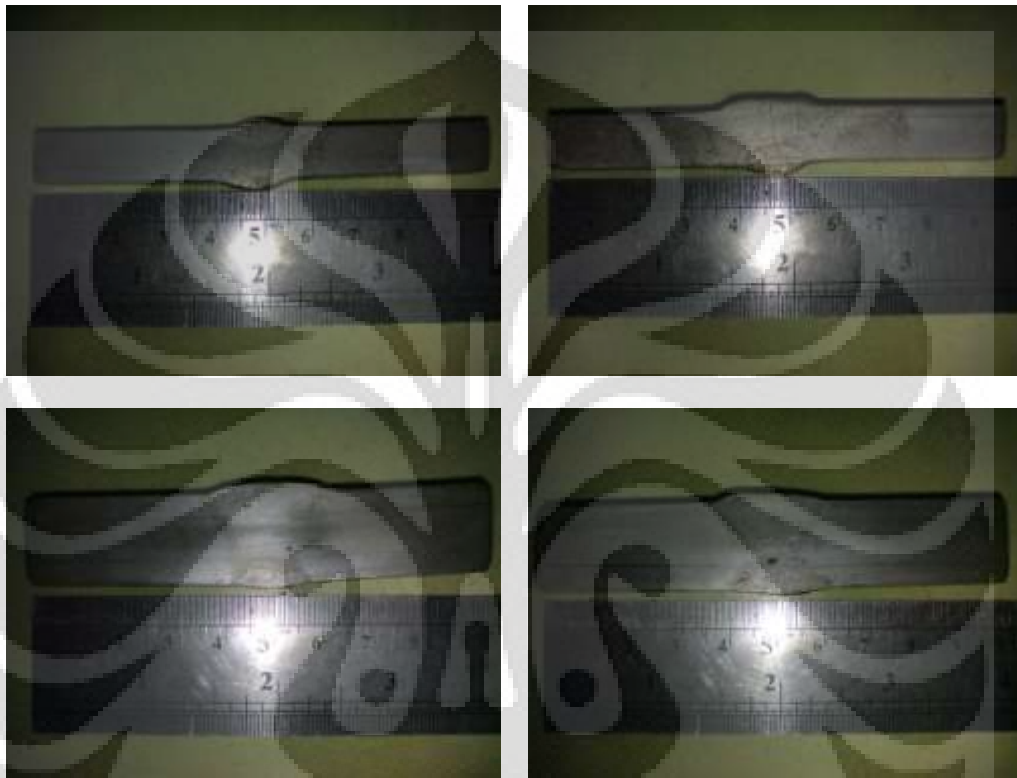


Gambar 3.12 Pola hamburan neutron saat pengukuran tegangan sisa. Pada gambar di atas neutron beam sebagian besar diteruskan dan sebagian lagi dihamburkan ke detektor dengan sudut 2θ . Gambar lingkaran biru adalah sudut θ dari sampel ke detektor.

BAB IV DATA PENELITIAN

4.1 Hasil Pengamatan Metalografi

4.1.1 Makrostruktur

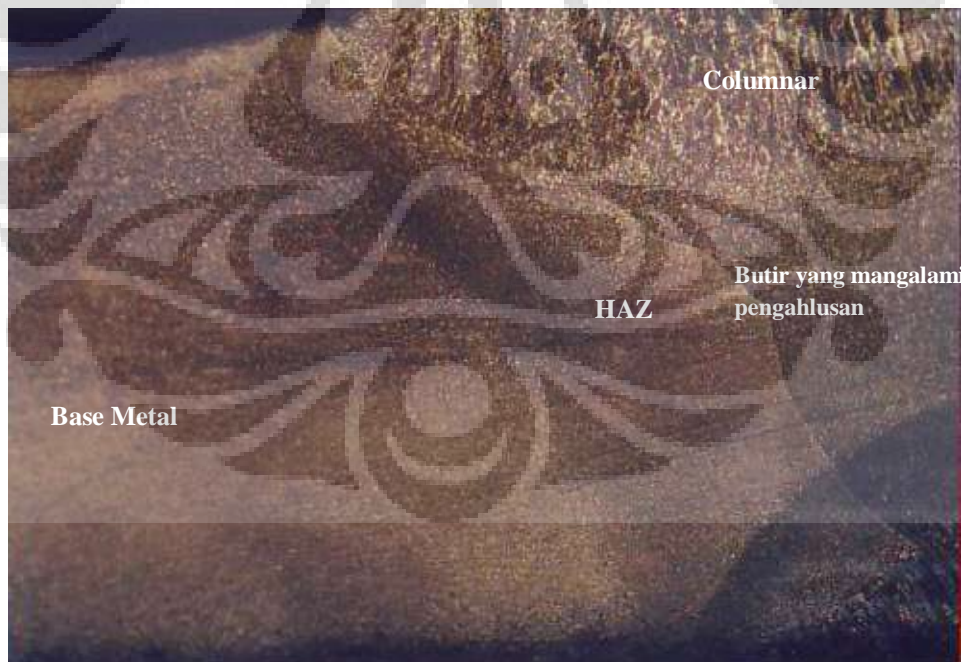


Gambar 4.1 Makrostruktur sampel F10G1, F10G3, F20G1 dan F20G3

Makrostruktur dengan Perbesaran 7x



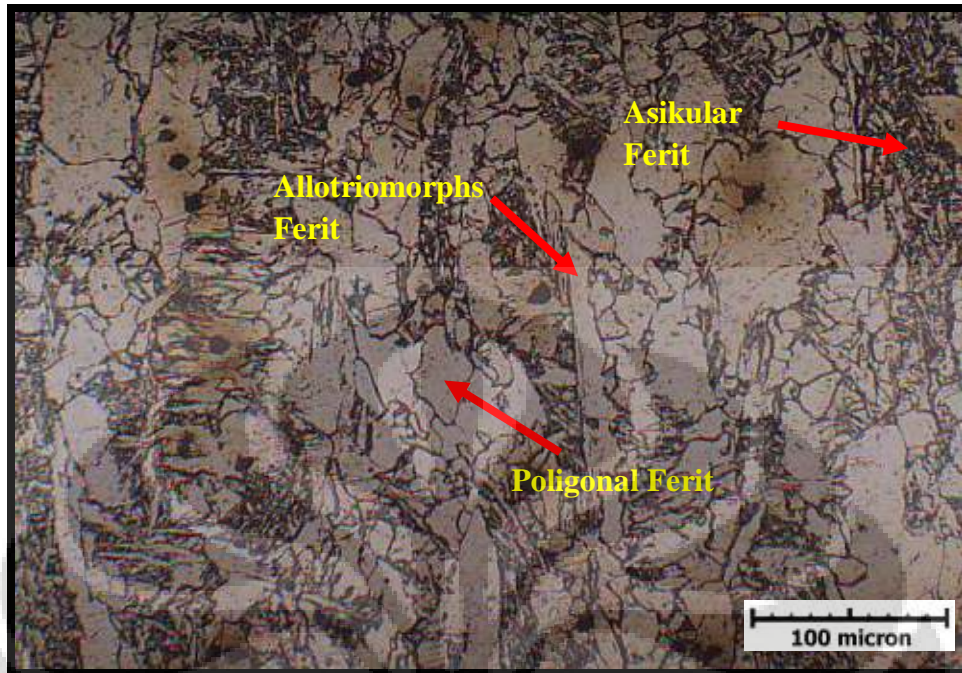
Gambar 4.2 Makrostruktur Pada sampel F10G1 (perbesaran 7x)



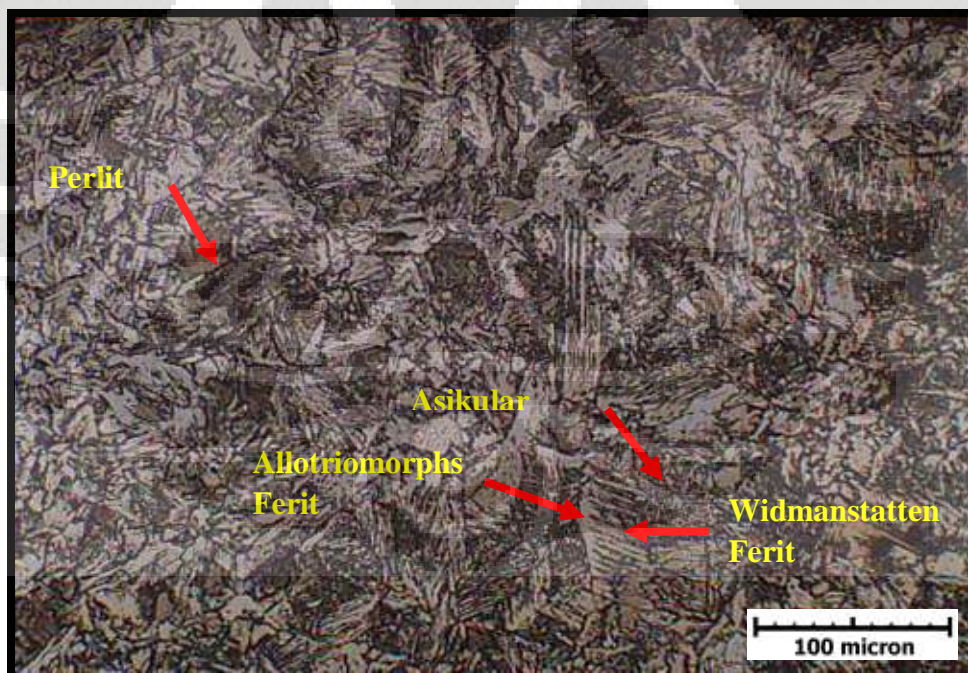
Gambar 4.3 Makrostruktur Pada sampel F10G3 (perbesaran 7x)

- Gambar selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 13.

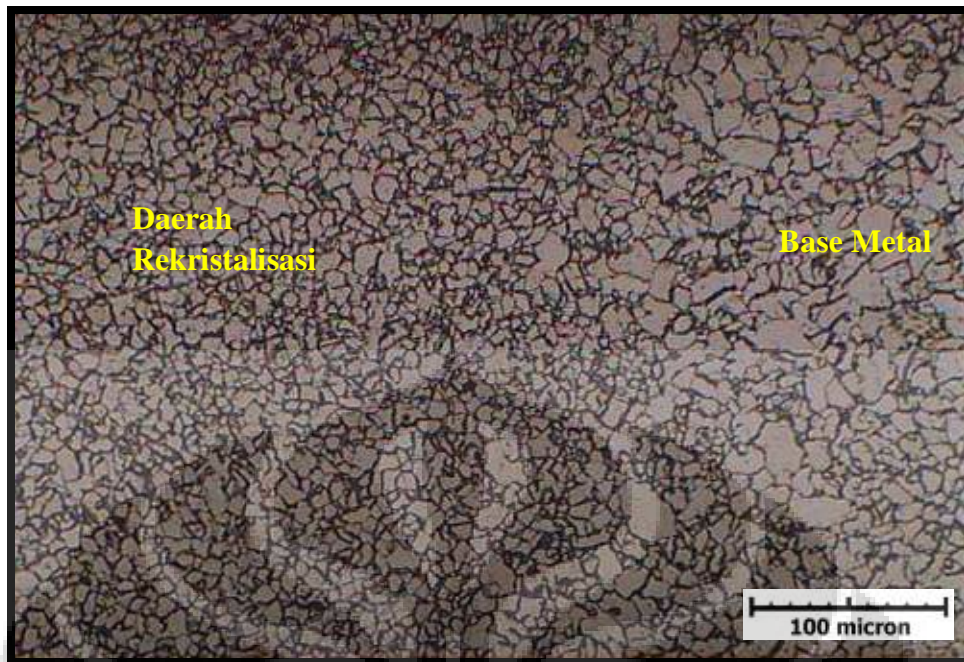
4.1.2 Mikrostruktur



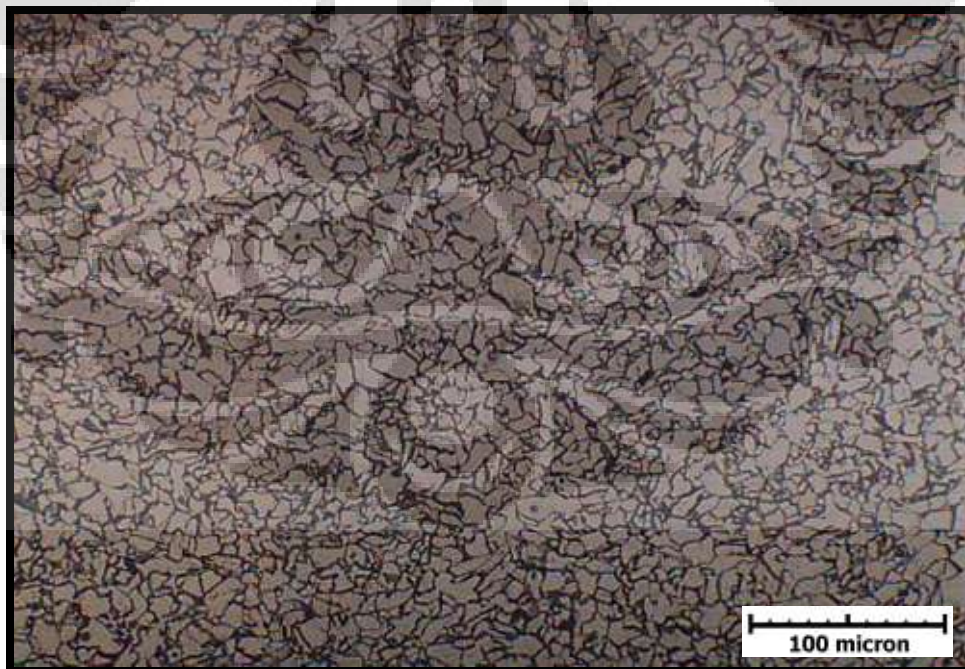
Gambar 4.4 Mikrostruktur F10G1 pada daerah deposit las (perbesaran 200x)



Gambar 4.5 Mikrostruktur F10G1 pada daerah terpengaruh panas kasar (diatas A_1) (perbesaran 200x)



Gambar 4.6 Mikrostruktur F10G1 pada daerah terpengaruh panas halus (dibawah A_1) (perbesaran 200x)



Gambar 4.7 Mikrostruktur Logam induk F10G1 (perbesaran 200x)

- Gambar selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 13.

Tabel 4.3 Parameter Pengelasan Sampel F16G1

DATA PENGELASAN

Date 24-Jan-09
 Size (mm) 150 x2
 Sample Code F16G1
 Welder's Name Apsu G.

Run No.	Current (A)				Voltage (V)				Duration (second)	Travel Speed (mm/min)	Angular Distortion				Heat Input Kj/mm			
	1	2	3	4	1	2	3	4			average	θ	θ	θ		θ	θ rata-rata	
1	129	137	132		23.46	25.1	24.91		24.46	149	121	0.382	0.382	0.382	0.382	0.38197	1.61	
2	155	147	161		23.56	23.81	23.89		23.75	136	132	0.955	0.955	0.955	0.955	0.95497	1.66	
3	237	227	243		26.89	24.59	26.13		25.87	81	222	1.528	1.528	1.528	1.528	1.52807	1.65	
4	237	226	240		29.22	39.27	30.64		33.04	105	171	1.910	1.910	1.910	1.910	1.91021	2.71	
rata-rata										189.25	26.78	117.75	161.70	1.91				

Tabel.4.4 Parameter Pengelasan Sampel F16G3

DATA PENGELASAN

Date: 25-Jan-09
 Size (mm): 250 x 300 x2
 Sample Code: F16G3
 Welder's Name: Rahmat

Run No.	Current (A)				Voltage (V)				Duration (second)	Travel Speed (mm/min)	Angular Distortion				Heat Input KJ/mm										
	1	2	3	4	1	2	3	4			average	θ	θ	θ		θ	θ rata-rata								
1	156	133	145	163	149.25	22.11	22.39	22.7	21.09	22.07	162	111	0	0	0	0	0	0.764	0.764	0.764	0.764	0.764	0.76397	1.78	
2	148	162	154	136	150.00	23.31	22.77	22.4	22.96	22.86	225	80	1.337	1.337	1.337	1.337	1.337	1.337	1.337	1.337	1.337	1.33702	2.57		
3	167	127	173	169	159.00	23.89	23.66	25.11	23.91	24.14	174	103	2.101	2.101	2.101	2.101	2.101	2.101	2.101	2.101	2.101	2.10132	2.23		
4	237	237	239	240	238.25	17.2	16.6	15.7	14.9	16.10	224	80	3.057	3.057	3.057	3.057	3.057	3.057	3.057	3.057	3.057	3.05723	2.86		
rata-rata					174.13					21.29	196.25	93.73													2.36

Tabel 4.5 Parameter Pengelasan Sampel F20G1

DATA PENGELASAN

Date 24-Jan-09
 Size (mm) 150 x2
 Sample Code F20G1
 Welder's Name Raboqet

Run No...	Current (A)				Voltage (V)				Duration (second)	Travel Speed (mm/min)	Angular Distortion						Heat Input KJ/mm		
	1	2	3	4	1	2	3	4			average	θ	θ	θ	θ	θ		θ	θ rata-rata
1	134	119	131		25.6	25.14	24.83		25.19	122	148	0.382	0.382	0.382	0.382	0.382	0.382	0.35014	1.31
2	144	168	161		26	26.17	15.83		22.67	105	171	0.573	0.573	0.573	0.573	0.573	0.573	0.57297	1.25
3	209	215	228		30.21	30.11	30.4		30.31	97	186	1.337	1.337	1.337	1.337	1.337	1.337	1.33702	2.13
4	216	219	213		30.61	30.35	30.58		30.51	135	133	2.101	2.101	2.101	2.101	2.101	2.101	2.10132	2.97
5	211	209	209		30.18	30.4	30.31		30.30	171	105	2.675	2.675	2.675	2.675	2.675	2.675	2.73851	3.62
rata-rata									27.79	126.00	148.63								2.26
									185.73										

Tabel 4.6 Parameter Pengelasan Sampel F20G3

DATA PENGELASAN

Date: 25-Jan-09
 Size (mm): 150 x2
 Sample Code: F20G3
 Welder's Name: Agus G.

Run No.	Current (A)				Voltage (V)				Duration (second)	Travel Speed (mm/min)	Angular Distortion						Heat Input KJ/mm			
	1	2	3	4	1	2	3	4			average	θ	θ	θ	θ	θ		θ	θ	θ rata-rata
1	134	120	115	130	124.75	21.3	20.4	21.09	20.99	20.95	111	162	0.764	0.764	0.764	0.764	0.764	0.764	0.76397	0.97
2	127	145	132	133	134.25	21.96	22.22	21.92	22.49	22.15	126	143	0.955	0.955	0.955	0.955	0.955	0.92314	1.25	
3	145	169	181	176	167.75	23.14	23.58	23.73	24.41	23.72	163	110	1.337	1.337	1.337	1.337	1.337	1.33702	2.16	
4	167	184	163	158	168.00	25.71	26	26.04	25.62	25.84	140	129	1.940	1.910	1.719	1.719	1.719	1.81467	2.03	
5	208	211	201	193	203.25	25.79	25.78	25.98	25.72	25.82	145	124	3.057	2.484	2.484	2.484	2.484	2.57920	2.54	
6	221	208	212	221	215.50	25.91	26	25.88	25.7	25.87	158	114	4.205	4.205	4.205	4.205	4.205	4.20547	2.94	
rate-rata					168.92					24.06	140.50	130.35							1.98	

4.3 Data Hasil Pengujian Kekerasan Mikro F10G1

Tabel 4.7 Kekerasan Mikro F10G1

F10G1	Base Metal Left		Fine HAZ Left		Coarse HAZ Left		Weld Metal		Coarse HAZ Right		Fine HAZ Right		Base Metal Right	
	d1	d2	d1	d2	d1	d2	d1	d2	d1	d2	d1	d2	d1	d2
1	60	61.5	50.5	53	56	58	54	55	55.5	57.5	50.5	58	62	68
2	56	60	52	60	56.5	56.5	53.5	54.5	56	56	55	58	68.5	68.5
3	58	58.5	58	56	55	56.5	54	55	56	56	55	59	70.5	68.5
d average	59		54.9167		56.4167		54.3333		56.1667		55.9167		67.6667	
HV	159.7816719		184.4262125		174.7495795		188.4075426		176.3086758		177.8887307		121.4734645	

* daerah yang ditahan adalah sisi kanan sampel

Data selengkapnya dapat dilihat di Lampiran 12

4.4 Data Hasil Pengujian Tegangan

Tabel 4.8 Data Hasil Pengujian Tegangan Sisa pada F16G1

38(d0)	normal	do	1.433010702					Poisson's Ratio	v	0.3		
38(d0)	transverse	do	1.432668985	x = longitudinal	$E/(1+\nu)(1-2\nu)$	63692307692	Pa	Stress (σ)	x	$E/(1+\nu)(1-2\nu)*((1-\nu)\epsilon_x+\nu(\epsilon_y+\epsilon_z))$		
38(d0)	longitudinal	do	1.432996601	y = transverse					y	$E/(1+\nu)(1-2\nu)*((1-\nu)\epsilon_y+\nu(\epsilon_x+\epsilon_z))$		
2Theta offset			-0.0537	z = normal					z	$E/(1+\nu)(1-2\nu)*((1-\nu)\epsilon_z+\nu(\epsilon_y+\epsilon_x))$		
	Posisi		arah	2θ corr	d	ε	$((1-\nu)\epsilon_x+\nu(\epsilon_y+\epsilon_z))$	σ	Pa	σ	Mpa	
11	-20	A	normal	79.68016	1.432810433	-0.000139754	-0.000166053	-10576274.4		-10.5762744		
10	-15	A	normal	79.70267	1.432473205	-0.000375082	-0.000202104	-12872445.43		-12.87244543		
9	-10	A	normal	79.69368	1.432607861	-0.000281115	-0.000129794	-8266851.197		-8.266851197		
8	-8	A	normal	79.72849	1.432086653	-0.00064483	-0.000229898	-14642710.44		-14.64271044		
7	-5	A	normal	79.68485	1.432740153	-0.000188797	-0.000308867	-19672434.31		-19.67243431		
1	0	A	normal	79.66229	1.4330783	4.71723E-05	-0.000290996	-18534188.74		-18.53418874		
2	5	A	normal	79.71195	1.432221211	-0.000550932	-0.000474548	-30225083.8		-30.2250838		
3	8	A	normal	79.66393	1.433053711	3.00135E-05	5.00724E-05	3189226.493		3.189226493		
4	10	A	normal	79.69722	1.432554833	-0.000318119	-9.14773E-05	-5826400.382		-5.826400382		
5	15	A	normal	79.6987	1.432532665	-0.000333589	-0.000182334	-11613269.01		-11.61326901		
6	20	A	normal	79.70443	1.432446847	-0.000393475	-0.000242866	-15468699.58		-15.46869958		
44	-20	B	normal	79.66084	1.433100041	6.2344E-05	0.000319074	20322582.24		20.32258224		
43	-15	B	normal	79.67898	1.432828117	-0.000127414	0.000475699	30298364.27		30.29836427		
42	-10	B	normal	79.71942	1.432222408	-0.000550096	-0.000140751	8964750.355		8.964750355		
41	-8	B	normal	79.71214	1.432331397	-0.00047404	0.000229226	14599950.95		14.59995095		
40	-5	B	normal	79.71868	1.432233486	-0.000542366	-0.000191078	-12170206.66		-12.17020666		
34	0	B	normal	79.72579	1.432127062	-0.000616632	-0.000207729	-13230753.44		-13.23075344		
35	2	B	normal	79.74795	1.431795503	-0.000848004	-0.000518816	-33044599.8		-33.0445998		
36	4	B	normal	79.7418	1.431887498	-0.000783807	-0.000397842	-25339497.69		-25.33949769		
37	8	B	normal	79.74724	1.431806122	-0.000840593	-0.00041064	-26154579.9		-26.1545799		
38	13	B	normal	79.69865	1.432533414	-0.000333066	-8.02388E-05	-5110595.354		-5.110595354		
39	18	B	normal	79.68728	1.432703743	-0.000214205	0.000258138	16441433.85		16.44143385		

* Data selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 14 hingga Lampiran 19

BAB V PEMBAHASAN

5.1 Pendahuluan

5.1.1 Material Dasar

Dari komposisi logam induk yaitu JIS G3101- SS400, dapat dilihat bahwa logam yang digunakan adalah baja karbon rendah. Baja jenis ini banyak digunakan dalam konstruksi karena mampu las dan mampu bentuknya yang baik. Faktor faktor yang mempengaruhi mampu las dari baja karbon rendah adalah kekuatan impak dan kepekaan terhadap retak las.

Kekuatan impak pada baja karbon rendah dapat ditingkatkan dengan menurunkan kadar karbon C dan kadar mangan Mn. Suhu transisi dari kekuatan impak menjadi turun dengan naiknya rasio Mn/C. Semakin tinggi harga perbandingan Mn/C maka nilai dari kekuatan impaknya semakin baik. Dari komposisi yang diperoleh pada *mill certificate*, baja karbon yang digunakan memiliki kadar karbon 0,16%, silikon 0,54% dan mangan 0,64%, sehingga nilai karbon ekivalennya adalah 0,26 dan perbandingan nilai Mn/C adalah 4. Dari nilai karbon ekivalen dan rasio Mn/C tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa material yang digunakan memiliki mampu las yang baik, keuletan yang tinggi, kekuatan impak tinggi dan memiliki kepekaan terhadap retak las yang rendah^[1]. Pengaruh jumlah sulfur dan fosfor dalam material dapat menurunkan mampu bentuk material pada saat proses pengerjaan panas. Selain itu kadar sulfur yang tinggi dapat menyebabkan pada baja dapat meningkatkan terjadinya retak las.

Kawat las yang digunakan memiliki adalah elektroda E71T-1, kawat las jenis ini memiliki kekuatan tarik 414 - 483 MPa. Kawat las jenis ini biasa digunakan pada pengelasan baja karbon rendah dengan gas pelindung CO₂, kawat las yang digunakan biasanya mengandung 10-30% fluks. Fluks yang digunakan memiliki bahan dasar titania yang berfungsi sebagai deoksidator, pemantap busur dan pembentuk terak yang menghasilkan sifat mekanik yang baik, busur yang

mantap, percikan berkurang, manik las yang halus dan kelarutan hidrogen sedikit.^[1]

5.1.2 Proses Pengelasan

Untuk mendapatkan hasil pengelasan yang baik pada setiap proses pengelasan yang dilakukan, sebelum dan saat pengelasan dilakukan pengukuran arus, tegangan, kecepatan pengelasan dan suhu logam yang akan digunakan pada setiap *pass*-nya. Perbedaan parameter, terutama pada arus, tegangan listrik dan kecepatan pengelasan banyak dipengaruhi oleh gaya gravitasi, kecepatan pembekuan logam las dan daerah yang akan dilas. Daerah yang akan dilas disini misalnya adalah bagian *root*, *capping*, ataupun tengah pengelasan akan memerlukan parameter pengelasan yang berbeda.

Secara umum pengelasan yang dilakukan pada bagian *root* akan memerlukan arus listrik yang lebih kecil. Hal ini disebabkan karena saat pengelasan bagian *root*, merupakan saat yang paling fundamental dimana juru las harus menyatukan dua logam las yang memiliki celah akar (*root gap*) tertentu. Sehingga umumnya juru las lebih berhati-hati pada saat pengelasan bagian *root*. Sedangkan pada saat pengelasan *capping*, karena *capping* memiliki permukaan yang paling lebar maka umumnya juru las dapat menggunakan arus dan tegangan listrik yang tinggi untuk mengelas bagian tersebut.

Pada posisi pengelasan horizontal, logam cair dari las dapat mengisi daerah las dengan baik dengan dibantu gaya gravitasi. Adanya gaya gravitasi menyebabkan logam las cair dapat mengisi semua bagian dari daerah las sehingga kecepatan pengelasan pada posisi horizontal yang lebih tinggi dibandingkan dengan posisi pengelasan vertikal.

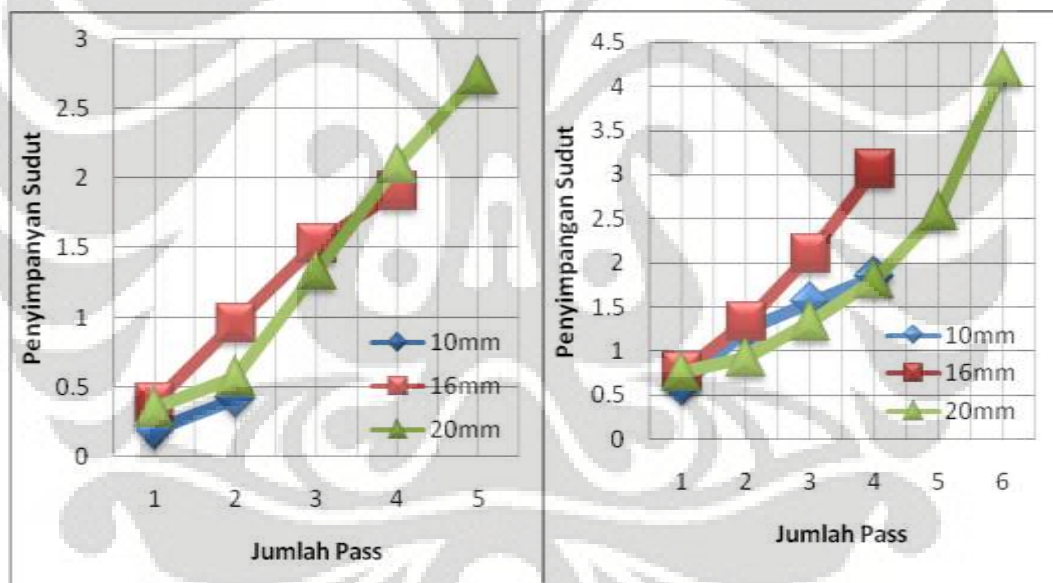
Sedangkan pada posisi vertikal, arus dan tegangan yang digunakan tidak boleh terlalu besar. Tujuannya digunakan arus yang tidak terlalu besar adalah untuk menghindari logam las cair yang mengalir kebawah. Jadi pada saat pengelasan, juru las sedapat mungkin menjaga agar logam las cair membeku sebelum menetes kebawah pada bidang vertikal logam induk. Penggunaan arus dan tegangan yang tidak terlalu besar juga bertujuan untuk menghasilkan busur

listrik yang lebih pendek sehingga gaya tarik antara permukaan logam las cair dengan busur las dapat menahan logam las cair untuk menetes kebawah.

5.2 Analisa Hasil Pengujian

5.2.1 Pengaruh Distorsi Angular dengan Ketebalan Pelat

Secara umum penyimpangan sudut yang terjadi pada pengelasan tumpul diakibatkan oleh penyusutan yang terjadi pada kampuh las selama proses pendinginan, sehingga semakin banyak logam pengisi yang dimasukkan akan menyebabkan penyimpangan sudut yang semakin besar. Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 merupakan grafik penyimpangan sudut yang terjadi dari penelitian yang dilakukan.



Gambar 5.1

Gambar 5.2

Gambar 5.1 (kiri) Grafik besarnya penyimpangan sudut pada proses FCAW posisi horizontal (1G) dalam berbagai ketebalan pelat.

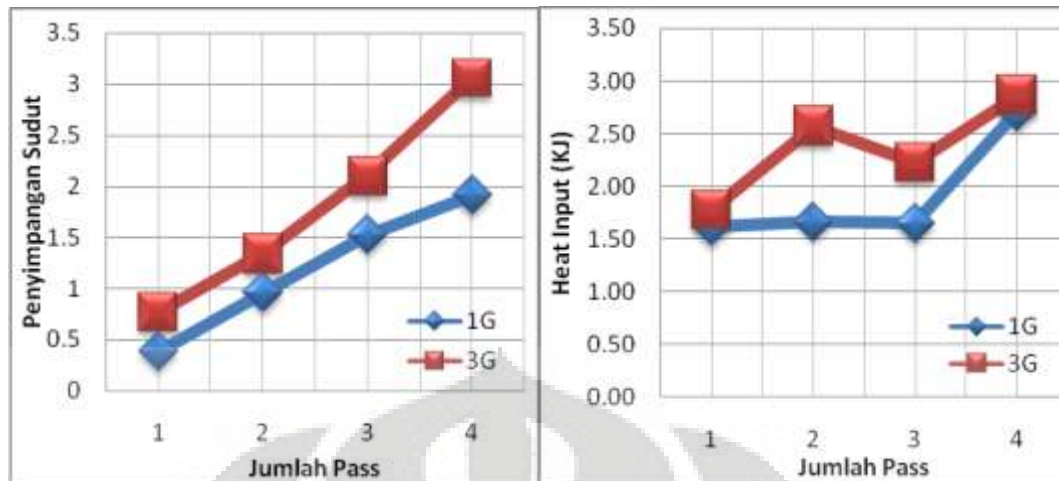
Gambar 5.2 (kanan) Grafik besarnya penyimpangan sudut pada proses FCAW posisi vertikal (3G) dalam berbagai ketebalan pelat.

Hasil yang diperoleh dari penelitian yang dilakukan pada pengelasan FCAW posisi horizontal, sampel dengan tebal 10mm penyimpangan sudut rata rata yang terjadi adalah 0.41° , ketebalan 16mm penyimpangan sudut yang terjadi rata rata adalah 1.91° dan pada ketebalan 20mm penyimpangan sudut yang terjadi rata rata adalah 2.74° . Pada pengelasan dengan posisi vertikal hasil yang diperoleh memiliki kecenderungan yang sama, pada ketebalan 10mm penyimpangan sudut yang terjadi rata rata adalah 1.85° , pada ketebalan 16mm penyimpangan sudut yang terjadi rata rata adalah 3.06° dan ketebalan sampel 20mm penyimpangan sudut yang terjadi rata rata adalah 4.21° .

Pada pengujian yang dilakukan terhadap pengelasan tumpul pada sampel dengan ketebalan 10, 16, dan 20mm dengan posisi pengelasan vertikal dan mendatar menunjukkan kecenderungan hasil yang sama yaitu semakin tebal logam yang dilas menunjukkan penyimpangan sudut yang terjadi akan semakin besar. Hal ini disebabkan semakin tebalnya logam yang dilas akan menyebabkan deposit las juga akan semakin besar. Besarnya deposit las ada pada kampuh las dapat dilihat dari banyaknya *pass* yang dilakukan pada proses pengelasan. Semakin besarnya deposit pada kampuh las akan menyebabkan penyusutan yang terjadi pada kampuh las pada saat temperatur turun juga akan semakin besar yang pada akhirnya akan menyebabkan penyimpangan sudut yang dihasilkan juga akan semakin besar.^[2]

5.2.2 Pengaruh Besarnya Penyimpangan Sudut dengan Posisi Pengelasan

Pada pengujian ini posisi pengelasan yang diujikan adalah pengelasan dengan posisi vertikal dan horizontal. Dari hasil yang diperoleh akan dilihat pengaruh dari posisi pengelasan terhadap besarnya penyimpangan sudut yang terjadi.



Gambar 5.3

Gambar 5.4

Gambar 5.3 (kiri) Grafik besarnya penyimpangan sudut pada proses FCAW posisi horizontal (1G) dan vertikal (3G) dengan ketebalan pelat 16mm.

Gambar 5.4 (kanan) Grafik besarnya *heat input* yang diberikan pada proses FCAW posisi horizontal (1G) dan vertikal (3G) dengan ketebalan pelat 16mm.

Dari pengujian diperoleh yang menunjukkan pada posisi pengelasan vertikal mengalami distorsi angular yang lebih besar dibandingkan dengan posisi pengelasan horizontal. Pada posisi pengelasan horizontal penyimpangan sudut rata rata yang terjadi adalah 1.91° , sedangkan pada posisi pengelasan vertikal penyimpangan sudut rata rata yang terjadi adalah 3.06° .

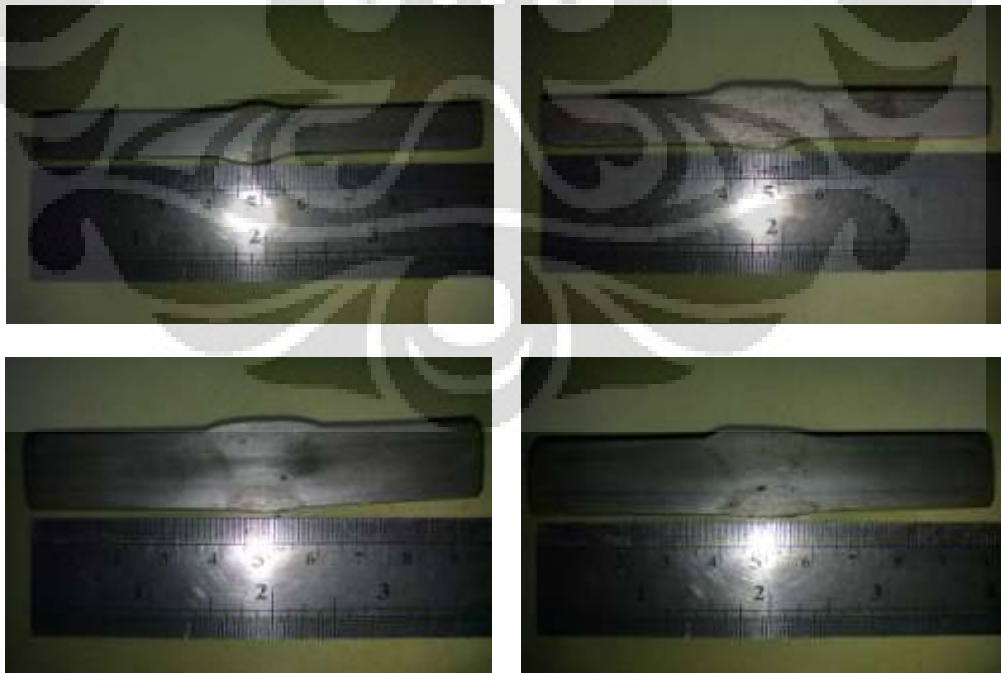
Besarnya nilai distorsi angular pada posisi pengelasan vertikal ini dikarenakan pada posisi pengelasan vertikal arus dan tegangan yang digunakan dalam pengelasan lebih kecil dibandingkan posisi pengelasan horizontal. Penggunaan arus dan tegangan yang kecil pada proses pengelasan vertikal menyebabkan kecepatan pengelasan menjadi lebih lambat dan deposit logam tiap *pass* juga lebih sedikit. Sehingga pengelasan dengan posisi vertikal membutuhkan *pass* yang lebih banyak dibandingkan posisi pengelasan horizontal. Sehingga total *heat input* pada proses pengelasan vertikal adalah 9.44KJ/mm dengan nilai *heat input* rata rata setiap *pass* adalah 2.36KJ/mm lebih besar dibandingkan posisi

pengelasan horizontal adalah 7.63 KJ/mm dengan rata rata nilai *heat input* setiap *pass* 1.91KJ/mm.

5.2.3 Pengamatan Metalografi

5.2.3.1 Pengamatan Makrostruktur

Dari hasil foto makro yang diperoleh pada Gambar 4.5 (deposit las F10G1, F10G3, F20G1 dan F20G3) menunjukkan bahwa daerah deposit las terlihat lebih terang jika dibandingkan dengan daerah logam induk. Hal ini disebabkan bagian deposit las mengandung lebih sedikit karbon (0,05%), sedangkan kandungan karbon pada logam induk (0.16%) (Tabel 4.1). Pada pengelasan ini digunakan pengelasan bertingkat (*multipass*), sehingga dapat dilihat pada daerah deposit las memiliki struktur yang gelap dan terang. Daerah gelap merupakan batas antar *pass* pada proses pengelasan, pada daerah gelap umumnya mengandung jumlah karbon dan inklusi yang lebih tinggi apabila tidak dilakukan pembersihan terak las. Semakin banyak daerah gelap terang yang dihasilkan maka *pass* yang digunakan dalam pengelasan semakin banyak.



Gambar 5.5 Makrostruktur sampel F10G1, F10G3, F20G1 dan F20G3

Dari foto makro struktur yang diperoleh juga dapat dilihat adanya pembatasan antara daerah logam induk, daerah terpengaruh panas dan kampuh las. Luas kampuh las pada hasil las ditentukan oleh ketebalan plat, lebar alur, sudut alur yang digunakan, proses pengelasan yang digunakan, dan banyaknya logam induk yang ikut mencair. Sedangkan luas daerah terpengaruh panas (HAZ) pada lasan sangat dipengaruhi oleh jumlah masukan panas. Masukan panas pada logam berbanding lurus dengan ketebalan logam las, masukan panas pada pengelasan dengan posisi pengelasan vertikal rata rata setiap passnya adalah (2.36KJ/mm), lebih besar nilainya jika dibandingkan dengan posisi pengelasan horizontal (1G) (1.91KJ/mm). Daerah kampuh las dan daerah terpengaruh panas terluas terjadi pada ketebalan 20 mm dengan posisi pengelasan vertikal. Hubungan jumlah masukan panas dan banyaknya *pass* yang digunakan dapat dilihat pada tabel parameter pengelasan (lampiran 6 -12)



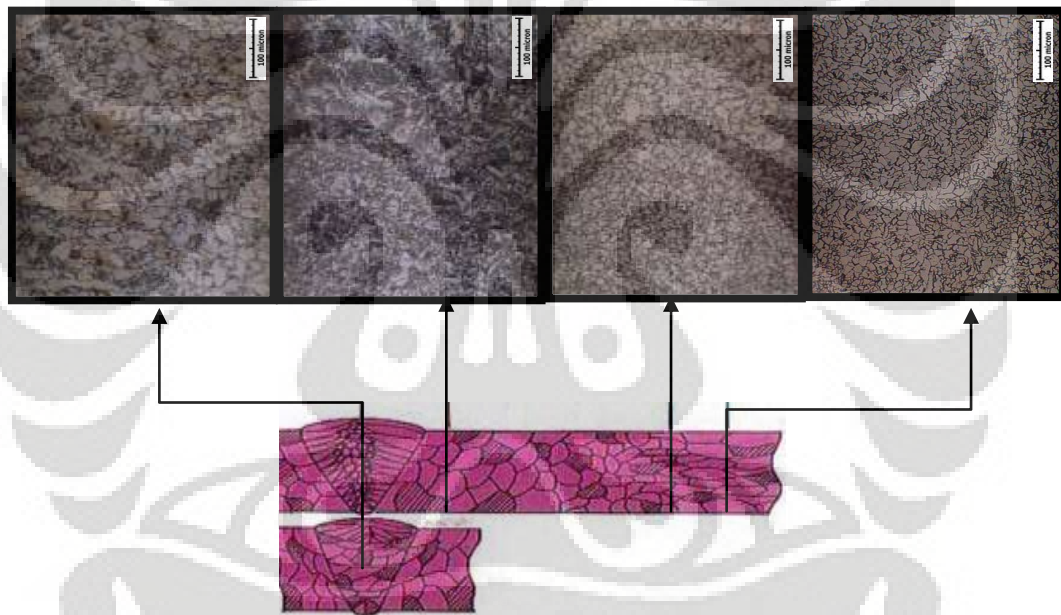
Gambar 5.6 Makrostruktur pada sampel F16G1 (perbesaran 7x)

Dari foto makrostruktur dengan perbesaran 7x, dapat dilihat adanya butir columnar dan butir yang mengalami penghalusan pada hasil lasan yang diperoleh. Butir columnar pada lasan terbentuk karena adanya pembekuan logam cair yang

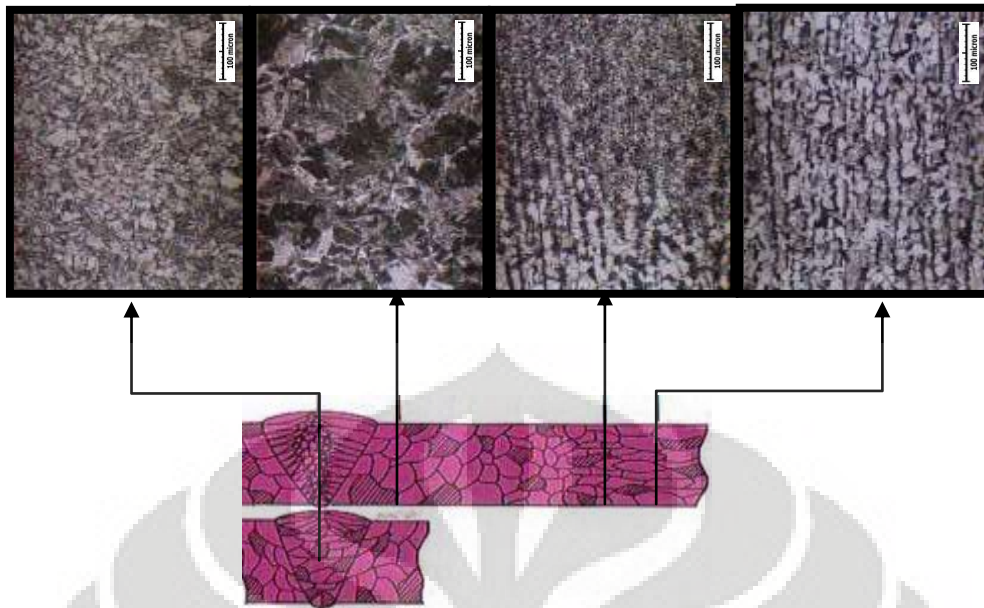
cepat dengan dibantu logam induk, sedangkan butir yang mengalami penghalusan terbentuk karena adanya pemanasan berulang ulang pada proses pengelasan bertingkat.^[7]

5.2.3.2 Pengamatan Mikrostruktur

Pada pengamatan mikrostruktur bagian yang dilakukan pengamatan adalah mikrostruktur logam induk, mikrostruktur daerah terpengaruh panas halus, mikrostruktur daerah terpengaruh panas kasar dan daerah deposit las. Gambar 4.13 dan 4.14 berikut merupakan salah satu mikrostruktur dari sampel dengan ketebalan 10mm dan 16 mm posisi pengelasan horizontal.



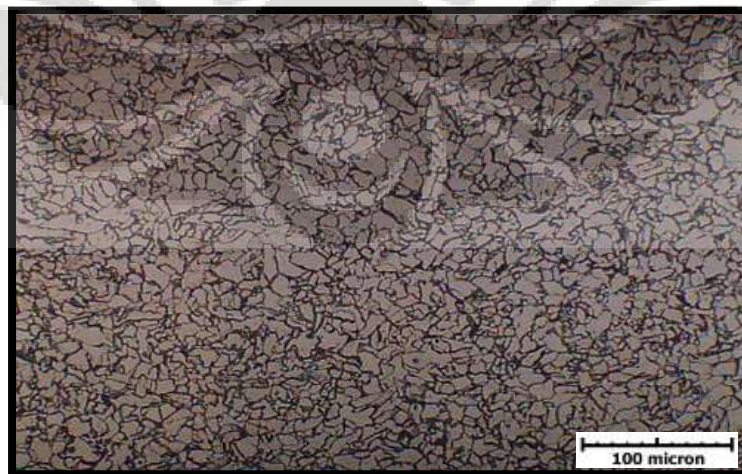
Gambar 5.7 Mikrostruktur pada sampel F10G1 (200x)



Gambar 5.8 Mikrostruktur pada sampel F16G1 (200x)

Mikrostruktur Logam Induk

Struktur mikro pada logam induk, sangat dipengaruhi oleh proses perlakuan yang dilakukan sebelumnya. Pada struktur mikro dari logam yang diperoleh dari pengujian berbentuk pipih yang terdiri dari butir poligonal ferit dan perlit. Gambar struktur mikro dari logam induk dapat dilihat pada Gambar 4.15, daerah terang merupakan butir ferit dan daerah gelap merupakan butir perlit.



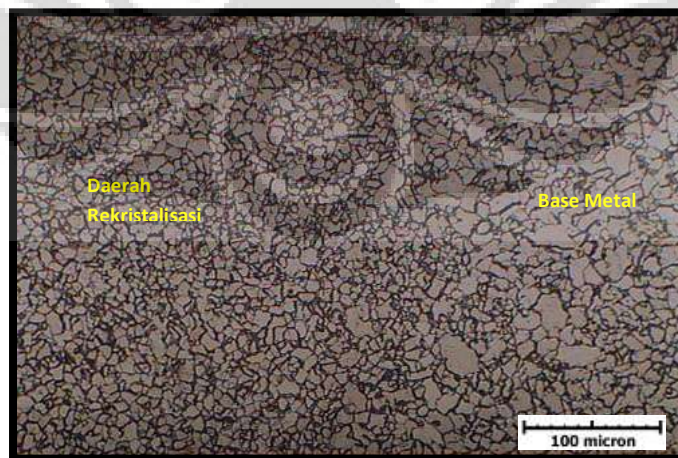
Gambar 5.9 Mikrostruktur logam induk pada sampel F10G1 (200x)

Butir yang berbentuk pipih ini diakibatkan oleh proses pengerjaan sebelumnya, yaitu proses *rolling*. Proses *rolling* ini menyebabkan butir yang terbentuk menjadi pipih akibat deformasi yang terjadi pada proses pengerolan. Ukuran butir pada sampel sendiri berbanding lurus dengan ketebalan sampel, semakin tebal sampel maka ukuran butir akan semakin besar. Hal ini dikarenakan pelat yang tipis akan mengalami deformasi yang lebih besar pada saat proses pengerolan, sehingga menyebabkan butir yang terbentuk semakin kecil.

Mikrostruktur Daerah Terpengaruh Panas

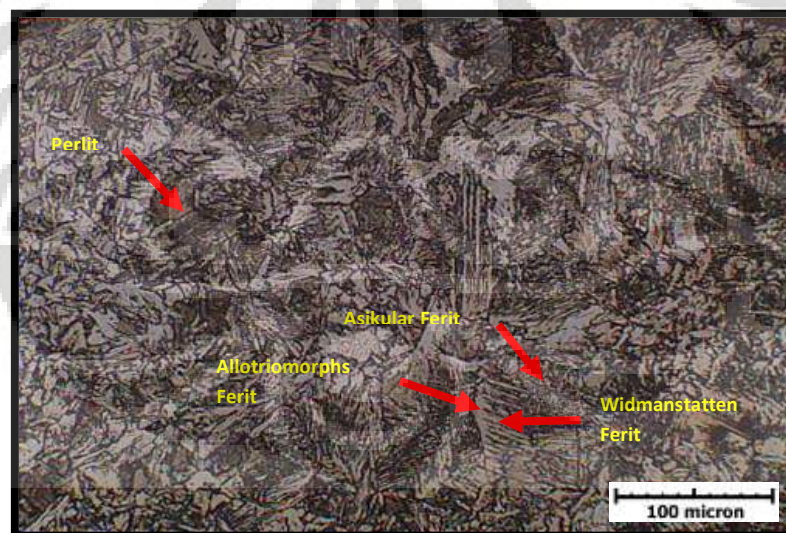
Daerah terpengaruh Panas disini dapat dibagi menjadi dua, yaitu daerah terpengaruh panas dibawah A_1 temperatur austenisasi dan diatas temperatur austenisasi.

Daerah terpengaruh panas dibawah temperatur austenisasi memiliki bentuk butir yang halus yang terdiri dari butir *equiaxed* ferit dan perlit. Bentuk butir yang halus ini terbentuk karena terjadinya rekristalisasi pada butir pipih pada pelat akibat proses *tempering*. Daerah ini pada saat proses pengelasan mengalami pemanasan pada suhu dibawah 700°C . Rekristalisasi terjadi karena butir memiliki *internal stress* yang cukup besar akibat proses pengerjaan logam sebelumnya (pengerolan) akibatnya pada temperatur dibawah 700°C , butir akan melepaskan *internal stress* yang ada dengan membentuk butir baru. Gambar 4.16 merupakan mikrostruktur dari daerah terpengaruh panas halus.



Gambar 5.10 Mikrostruktur F10G1 pada daerah terpengaruh panas halus (200x)

Bentuk butir pada daerah terpengaruh panas diatas garis A_1^1 , sangatlah kompleks. Mikrostruktur yang terbentuk terdiri dari berbagai macam butir. Hal ini disebabkan pada daerah ini terjadi transformasi fasa dari austenite menjadi ferit dan perlit dimana bentuk butir ferit dan perlit yang terbentuk dipengaruhi oleh temperatur austenisasi yang dialami material dan kecepatan pendinginan yang terjadi. Pada bagian yang terletak antara A_1 dan A_3 akan mengalami proses akan mengalami proses *partial tempered* sehingga sebagian akan terjadi proses rekristalisasi menjadi butir baru dan sebagian membentuk ferit. Pada daerah yang mengalami proses austenisasi sepenuhnya pada proses pendinginan yang lambat akan membentuk butir yang diinginkan yaitu ferit dan perlit, yang memiliki keuletan tinggi dan kekerasan yang tidak terlalu tinggi. Sedangkan daerah yang berbatasan dengan logam las (*fusion line*), akan membentuk struktur yang sangat kompleks yang terdiri dari *widmanstatten ferit*, asikular ferit, *allotriomorphs ferit*, sedikit bainit atas, dan perlit. Komposisi dari masing bentuk butir itu sendiri sangat dipengaruhi oleh kecepatan pendinginan, adanya *internal stress*, dan temperatur pada daerah tersebut. Gambar 4.17 merupakan mikrostruktur dari daerah terpengaruh panas kasar.

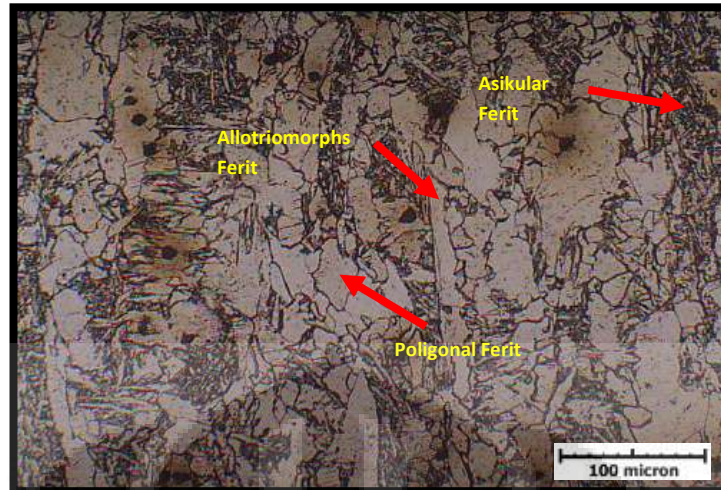


Gambar 5.11 Mikrostruktur F10G1 pada daerah terpengaruh panas kasar (200x)

Pada pengujian yang dilakukan diperoleh bahwa bahwa bentuk butir pada daerah terpengaruh panas, akan semakin besar dengan semakin tebalnya pelat. Hal ini disebabkan semakin tebal logam yang dilas maka *heat input* akan semakin besar yang menyebabkan butir yang terbentuk juga semakin besar. Sedangkan pada pengelasan vertikal memiliki daerah *widmanstatten ferit* dan *allotriomorphic ferit* memiliki daerah yang lebih luas dibandingkan pada pengelasan horizontal. Pada pengelasan horizontal butir yang terbentuk pada adalah *widmanstatten ferit*, *allotriomorphic ferit*, asikular ferit dan sedikit bainit. Bentuk butir pada daerah terpengaruh panas, banyak dipengaruhi oleh *heat input*. Semakin besar *heat input* akan menyebabkan butir yang diperoleh akan semakin besar. Dan semakin besar *heat input* juga akan meningkatkan rasio *widmanstatten ferit* dan *allotriomorphic* yang terbentuk¹⁷.

Mikrostruktur Daerah Deposit Las

Secara umum deposit las pada pengelasan bertingkat (*multipass*) dapat dibagi menjadi dua bagian, yaitu daerah dengan bentuk butir *columnar* dan butir yang telah mengalami penghalusan butir. Butir *columnar* terbentuk pada bagian yang terakhir dilas, pada percobaan ini butir *columnar* terjadi pada bagian *capping*. Sedangkan butir yang telah mengalami penghalusan butir terdapat pada bagian pengelasan dibawah *capping*, adanya suhu yang tinggi pada saat pengelasan menyebabkan bagian ini mengalami perlakuan panas, sehingga butir *columnar* yang terbentuk menjadi lebih halus membentuk butir poligonal ferit dan perlit. Semakin tebal logam yang disambung menyebabkan wilayah yang mengalami penghalusan butir akan semakin besar. Selain itu semakin tebal logam yang disambung juga menyebabkan butir yang terbentuk semakin baik akibat pemanasan berulang ulang (*tempering*) yang menyebabkan poligonal ferit yang terbentuk lebih merata.



Gambar 5.12 Mikrostruktur F10G1 pada daerah deposit las (200x)

Pada butir yang berbentuk *columnar*, bentuk butir terdiri dari *allotriomorphs* ferit, *widmanstatten* ferit, asikular ferit dan sebagian terbentuk perlit. Butir *columnar* terbentuk disebabkan oleh proses nukleasi logam las cair yang cepat karena dibantu oleh logam induk yang memiliki temperatur lebih rendah. Pada saat mencapai temperatur berada dibawah A_3 , mulai terbentuk *allotriomorphs* ferit pada batas batas butir austenit. Munculnya *allotriomorphs* ferit pada batas butir kemudian akan diikuti oleh *widmanstatten* ferit. Sedangkan nukleasi asikular ferit biasanya berasal dari partikel non metal yang ada pada logam las cair.

Faktor faktor dalam proses pengelasan yang mempengaruhi terbentuknya struktur mikro pada daerah deposit las adalah besarnya *heat input* yang digunakan, jumlah *pass*, kecepatan pendinginan yang dilakukan dan gravitasi.

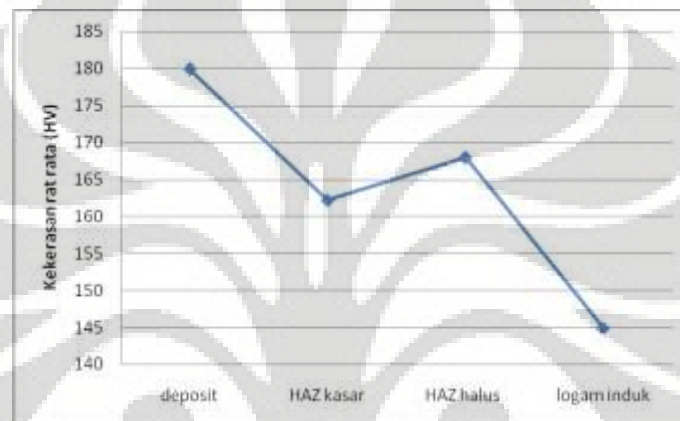
5.2.4 *Micro Hardness* (Kekerasan Mikro)

5.2.4.1 Pengaruh Ketebalan Pelat terhadap Kekerasan Mikro

Ketebalan 10 dan 20 mm

Pada sampel dengan ketebalan 10 dan 20 mm dilakukan penjejukan pada bagian deposit las, daerah terpengaruh panas kasar, daerah terpengaruh panas

halus dan logam induk. Dari pengujian yang dilakukan, hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa kekerasan yang tertinggi terdapat pada bagian deposit las. Hal ini disebabkan karena komposisi dari logam pengisi yang digunakan mengandung lebih banyak Mangan (Mn) dan Silikon (Si) yang lebih tinggi dibandingkan dengan logam induk. Mangan pada baja berfungsi untuk *solid solution strengthening* yang dapat meningkatkan kekerasan pada baja. Sedangkan silikon berfungsi sebagai deoksidator dan meningkatkan kekuatan ferit. Berikut merupakan grafik rata rata kekerasan pada masing masing bagian.



Gambar 5.13 Grafik kekerasan pada daerah las

Daerah terpengaruh panas kasar memiliki kekerasan (160HV) dibawah deposit las (180HV), dan daerah terpengaruh panas halus (170HV). Pengerasan pada daerah ini disebabkan karena terbentuknya struktur *widmanstatten* ferit, asikular ferit dan bainit yang meningkatkan kekerasan pada baja. Sedangkan pada daerah terpengaruh panas halus memiliki kekerasan sedikit diatas daerah terpengaruh panas kasar, hal ini disebabkan pada daerah ini ferit dan perlit yang terbentuk memiliki ukuran butir yang kecil sehingga kekerasannya meningkat.

Sedangkan pada daerah logam induk memiliki kekerasan yang paling rendah (145HV), karena pada bagian ini tidak mengalami perlakuan panas yang cukup signifikan sehingga tidak terjadi perubahan mikrostruktur yang mempengaruhi kekerasan.

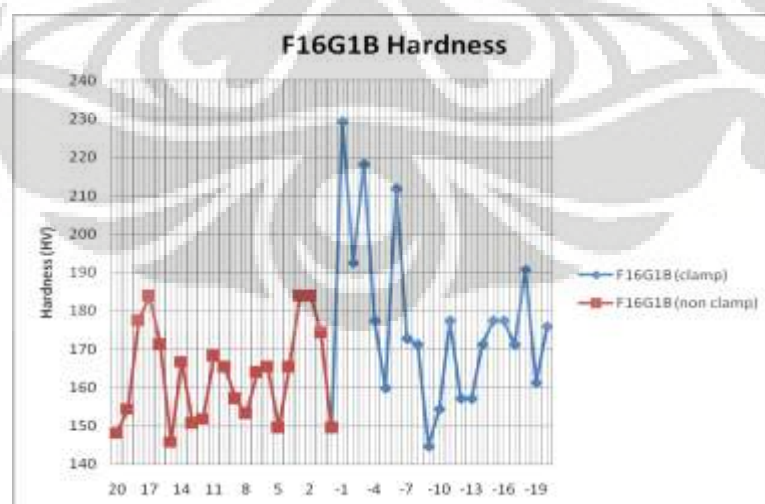
Secara umum semakin tebal sampel akan menyebabkan kekerasan dari logam yang semakin rendah. Pertama, hal ini disebabkan karena semakin tebal

sampel maka ukuran butirnya akan semakin besar. Sehingga menyebabkan nilai kekerasannya lebih kecil. Kedua, semakin tebal sampel akan menyebabkan pemanasan yang terjadi akan semakin besar akibat masukan panas yang juga semakin besar. Hal ini menyebabkan terjadi *grain growth*, pada daerah terpengaruh panas yang pada akhirnya menyebabkan nilai kekerasan pada sampel yang lebih tebal lebih kecil dibandingkan sampel yang lebih tipis.

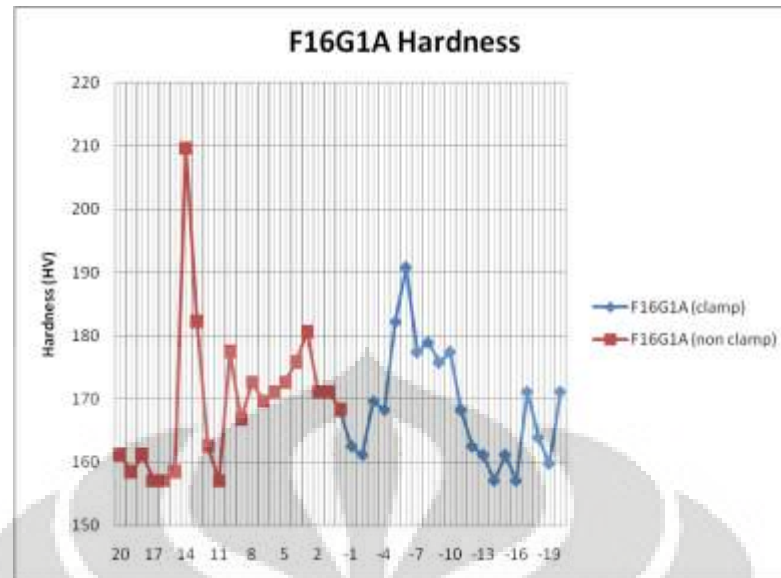
Dari pengujian yang dilakukan menunjukkan bahwa pengaruh posisi pengelasan terhadap kekerasan sampel yang dilas dengan posisi pengelasan vertikal memiliki nilai kekerasan yang lebih besar dibandingkan dengan dengan sampel dengan posisi pengelasan horizontal. Kemudian karena pada proses pengelasan vertikal menggunakan arus dan tegangan yang lebih rendah, menyebabkan proses pendinginan yang terjadi juga lebih cepat sehingga struktur yang dihasilkan lebih halus dan memiliki kekerasan yang lebih tinggi.

Kekerasan Mikro Ketebalan 16 mm

Pada sampel dengan ketebalan 16 mm, pengujian dilakukan setiap 1mm pada bagian atas dan bawah sampel sepanjang 20 mm kekanan dan kekiri dari logam pengisi/deposit.

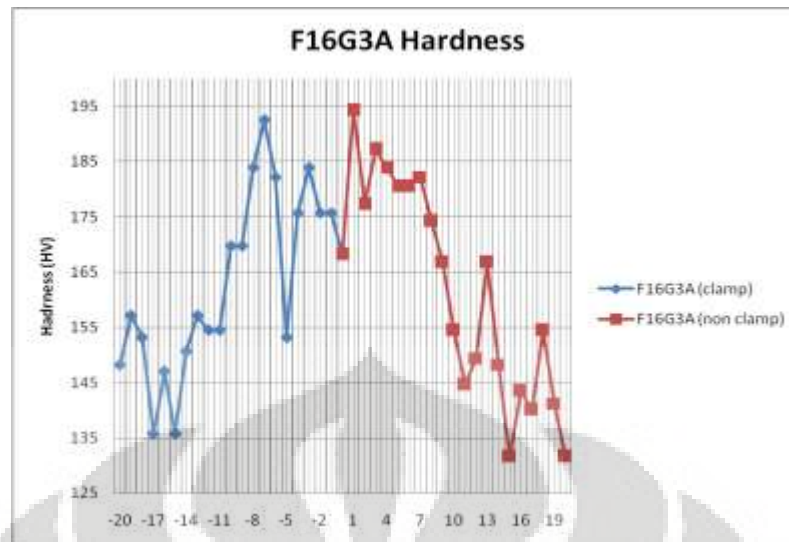


Gambar 5.14 Grafik nilai kekerasan F16G1 4mm dari permukaan atas sampel

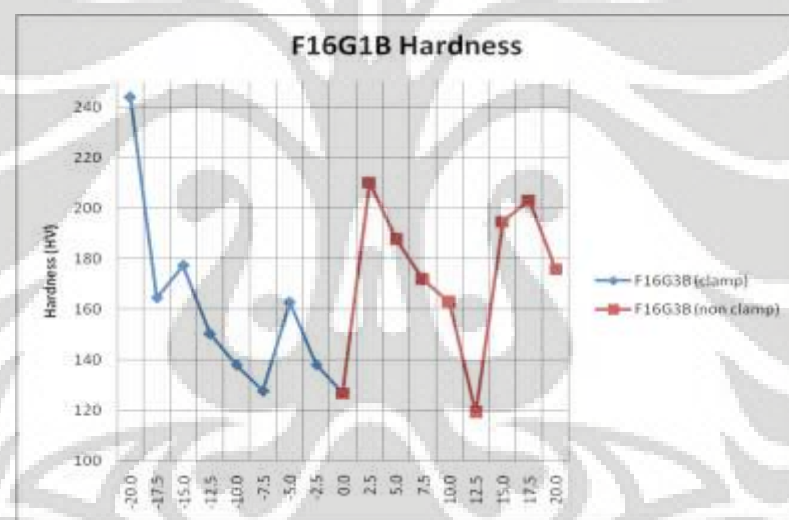


Gambar 5.15 Grafik nilai kekerasan F16G1 4mm dari permukaan bawah sampel

Dari pengujian pada sampel F16G1 (Gambar 4.20 dan Gambar 4.21) diperoleh nilai yang menunjukkan bahwa kekerasan tertinggi terdapat pada daerah terletak pada daerah deposit didekat *fusion line*, dan kemudian nilainya akan cenderung menurun semakin jauh dari daerah lasan kecuali pada titik 13A dan 14A. Hal ini sesuai jika dibandingkan dengan nilai tegangan sisa yang diperoleh dari pengujian. Dari data pengujian tegangan sisa yang dilakukan menunjukkan bahwa daerah *fusion line* memiliki nilai tegangan sisa yang paling tinggi, akibat dari besarnya tegangan sisa pada daerah tersebut menyebabkan kekerasan pada daerah tersebut tinggi. Sedangkan nilai yang tinggi pada titik 13A dan 14A dikarenakan pada daerah tersebut memiliki mikrostruktur yang halus akibat proses rekristalisasi, hal lain yang dapat menyebabkan nilai kekerasan pada titik tersebut sangat tinggi adalah adanya karbida (Fe_3C) pada titik tersebut saat dilakukan penjejukan. Pengaruh proses penahanan pada sampel F16G1 mengakibatkan nilai kekerasan pada daerah yang mengalami proses penahanan (*clamping*) memiliki nilai yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan nilai kekerasan pada daerah yang tidak mengalami penahanan (*non clamping*). Hal ini disebabkan daerah yang mengalami penahanan akan memiliki tegangan sisa yang lebih besar dibandingkan daerah yang tidak mengalami proses penahanan.



-20 -16 -15 -11 -10 -8 -7 -1 0 1 6 7 9 10 15 16 20
 Gambar 5.16 Grafik nilai kekerasan F16G3 4mm dari permukaan atas sampel

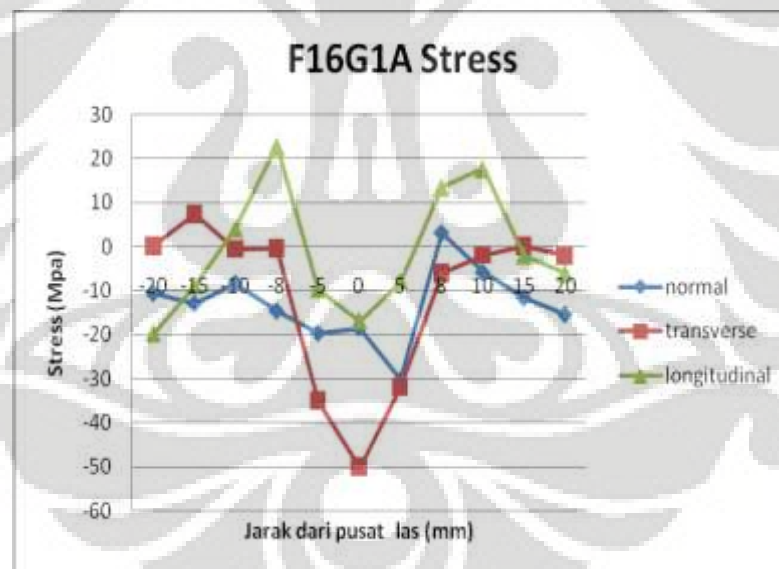


-20 -18 -15 -13 -10 -8 -5 -3 0 3 5 8 10 13 15 18 20
 Gambar 5.17 Grafik nilai kekerasan F16G3 4mm dari permukaan bawah sampel

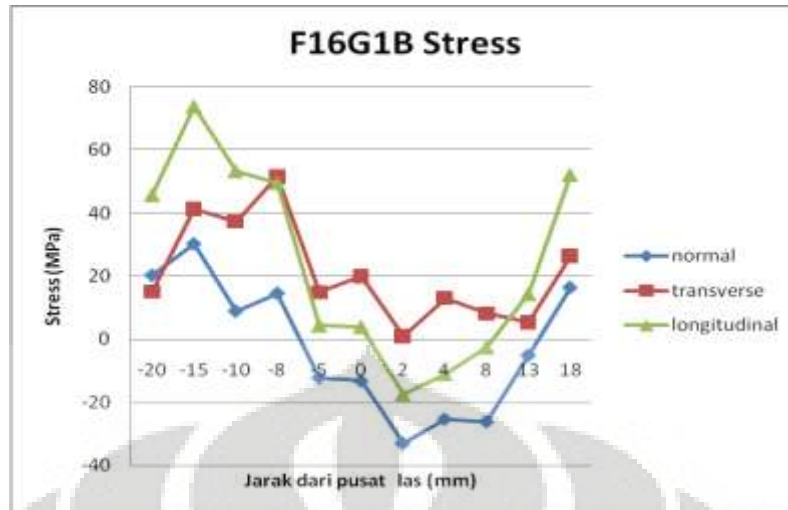
Sedangkan pada sampel F16G3 (Gambar 4.15 dan Gambar 4.14) nilai kekerasan yang diperoleh tidak jauh berbeda dari sampel F16G1 dimana kekerasan tertinggi berada pada daerah logam las yang berada didekat *fusion line*. Hanya saja pada Gambar 4.16, F16G3B menunjukkan bahwa nilai kekerasan pada daerah yang mengalami penahanan terus meningkat dari mulai titik -7.5 hingga -20mm.

5.2.5 Tegangan Sisa

Dari pengujian tegangan sisa pada sampel F16G1A (bagian atas) pada bidang longitudinal (tegak lurus dengan arah lasan) diperoleh nilai tegangan sisa pada daerah deposit logam adalah tegangan tekan yang nilainya terus turun dan merubah menjadi tegangan tarik yang mencapai puncaknya (23MPa) pada daerah terpengaruh panas kasar (8mm), kemudian nilainya terus turun hingga kembali menjadi tegangan tekan pada daerah terpengaruh panas halus dan logam induk. Sedangkan pada bidang transversal nilai tegangan sisa sebagian besar merupakan tegangan tekan kecuali pada titik (-15) dan (-20) yang merupakan tegangan tarik dengan nilai yang rendah, nilai tegangan tekan tertinggi berada pada pusat las (50 Mpa). Sedangkan pada bagian F16G1B, menunjukkan bahwa pada daerah yang dilakukan penahanan (+) mengalami perluasan tegangan sisa. Hal ini ditunjukkan dari nilai tegangan sisa pada daerah yang dilakukan penahanan terus naik dari pusat las hingga titik (18).

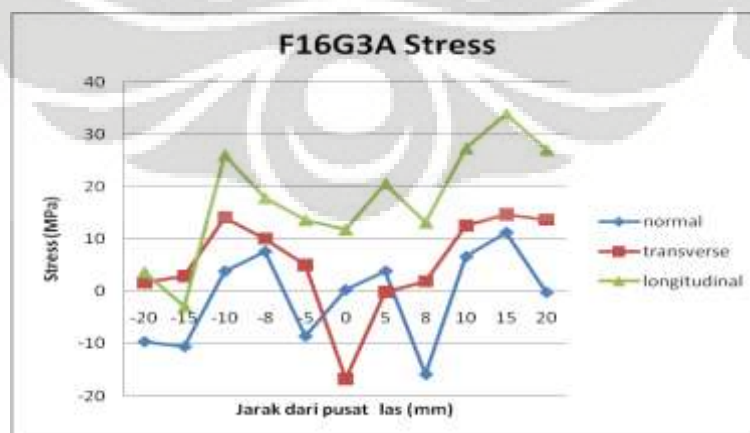


Gambar 5.18 Grafik nilai tegangan sisa F16G1 4mm dari permukaan atas sampel

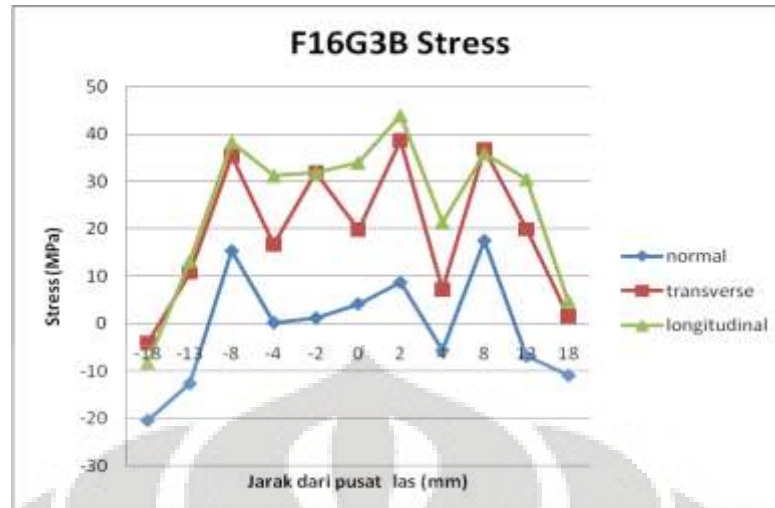


Gambar 5.19 Grafik nilai tegangan sisa F16G1 4mm permukaan bawah sampel

Tegangan sisa pada sampel F16G3A menunjukkan adanya perluasan puncak nilai tegangan tarik. Jika pada F16G1A puncak tegangan tarik terdapat pada titik (-8) dan (10) maka pada F16G3A daerah puncak bergeser pada titik (-10) dan (15). Pergeseran ini disebabkan karena *heat input* yang digunakan pada pengelasan vertikal lebih besar sehingga grafik tegangan sisa yang diperoleh sedikit berubah. Sedangkan pengaruh penahanan pada posisi pengelasan vertikal memiliki efek yang sama dengan posisi horizontal yaitu menyebabkan nilai tegangan sisa yang daerah yang mengalami penahanan lebih besar dibandingkan daerah yang tidak mengalami penahanan.



Gambar 5.20 Grafik nilai tegangan sisa F16G3 4mm dari permukaan atas sampel



-20 -18 -15 -13 -10 -8 -5 -3 0 3 5 8 10 13 15 18 20

Gambar 5.21 Grafik nilai tegangan sisa F16G3 4mm permukaan bawah sampel

Jika dibandingkan nilai tegangan sisa daerah bagian atas las (A) dan daerah bagian bawah (B), maka dapat dilihat bahwa tegangan sisa pada daerah bawah lasan memiliki nilai tegangan sisa dalam bentuk tegangan tarik yang lebih besar dibandingkan bagian atas. Tegangan sisa tarik dalam proses pengelasan sangatlah dihindari karena dapat menginisiasi retak dan menimbulkan kegagalan dalam material.

Tegangan sisa terbesar umumnya terjadi pada arah longitudinal, sedangkan nilai tegangan sisa terkecil terjadi pada arah normal. Pengaruh posisi pengelasan terhadap besarnya tegangan sisa pada, pengujian yang dilakukan terlihat bahwa tegangan sisa pada sisi bawah (B), pada posisi pengelasan horizontal memiliki nilai yang lebih besar dari posisi pengelasan vertikal. Ini disebabkan distorsi angular yang terjadi pada posisi horizontal ditahan oleh berat sampel, sehingga menghasilkan tegangan sisa dalam material yang lebih besar. Sedangkan pada posisi (A) nilai tegangan sisa pada posisi horizontal tidak jauh berbeda dengan posisi pengelasan vertikal akan tetapi pada posisi pengelasan vertikal puncak tegangan tarik yang dihasilkan lebih lebar. Ini disebabkan oleh *heat input* yang digunakan pada posisi pengelasan vertikal lebih besar dari posisi pengelasan horizontal.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

1. Semakin tebal pelat akan menyebabkan distorsi angular yang terjadi juga akan semakin besar.
2. Posisi pengelasan vertikal menghasilkan nilai distorsi angular yang lebih besar jika dibandingkan posisi pengelasan horizontal.
3. Nilai tegangan sisa (tegangan tarik) yang tertinggi berada pada daerah terpengaruh panas kasar.
4. Nilai tegangan sisa pada bagian bawah sampel memiliki nilai yang lebih tinggi jika dibandingkan bagian atas sampel.
5. Posisi pengelasan vertikal menghasilkan kurva tegangan sisa yang memiliki nilai tegangan tarik lebih lebar dibandingkan posisi horizontal.
6. Pada daerah yang mempunyai tegangan sisa tinggi memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi pula.
7. Sisi yang mengalami penahanan (*clamping*) memiliki nilai tegangan sisa dan kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan sisi yang bebas.
8. Perubahan mikrostruktur pada baja JIS G3101- SS400 mempengaruhi besarnya nilai kekerasan mikro dan sifat dari produk las yang dihasilkan.

6.2 Saran

Dilakukan pemeriksaan lebih lanjut tentang tegangan sisa pada sampel dengan ketebalan 10 dan 20mm.


DAFTAR PUSTAKA

1. H. Wiryosumarto dan T. Okumura, *Teknologi Pengelasan Logam*, P.T Pradnya Paramita, Jakarta, 2004
2. K. Masubuchi, *Analysis of Welded Structures*, Massachusetts Institute of Technology, USA, Pergamon Press Ltd, First Edition, 1980
3. Welding Hand Book, *Welding Technology*, 8th. Ed, vol. 1, AWS, Ohio, USA, 1990
4. Welding Hand Book, *Welding Process*, 8th. Ed, vol. 2, AWS, Ohio, USA, 1990
5. Welding Material Hand Book, *Naval Construction Force*, Virginia, July, 1991
6. Welding Hand Book, *Metal and Their Weldability* , 7th. Ed. Vol.4, AWS, Miami, Florida, USA, 1976
7. SLV Duisburg GmbH, *Welding Engineer's Current Knowledge*, edition 2000,1999
8. William D. Callister, Jr, *Materials Science and Engineering An Introduction*, The University of Utah, John Wiley & Sons, Inc-6th ed, 2004.
9. T.M Noren and C. Pfeiffer, *Applied Steel Welding Metallurgy*, ESAB Elektriska Svetsningsaktiebolaget, Gothenburg, Sweden
10. D. A. Porter, K. E. Easterling and Mohamed Y. Sherif, *Phase Transformation in Metals and Alloys*, CRC Press, 2009
11. Jian Lu, *Handbook of Measurement of Residual Stresses*, Society for Experimental Mecahnics, Inc, France, The Fairmont Press, Inc, 1996
12. B. D Cullity, *Element of X-Ray Diffraction*, Addison, 1956
13. Ganiyanti A.S., *Gelombang dan Optika*, Universitas Indonesia, Edisi III, 1981

14. Marthen Kanginan, *Seribu Pena Fisika*, Penerbit Erlangga, 1997
15. American Welding Society, *Structural Welding Code – AWS D1.1/D1.1M : 2006, 20th Edition*, (Miami, American Welding Society, 2006).Sluzalec, Andrzej, *Theory of Thermomechanical Processes in Welding*, Technical University of Czestovia, Poland, 2005
16. Ikeagu, Chukwugozie Raymond, *Evaluating the Effect of Different Welding Processes on the Distortion of 4mm Thick DH36 Ship Panels*, Cranfield University, September, 2007
17. Leonard E. Samuel, *Optical Microscopy of Carbon Steel*, ASM, Ohio, USA, 1980
18. V. Vel Murugan dan V. Gunaraj, *Effect of Process Parameters on Angular Distortion of Gas Metal Arc Welded Structural Steel Pelates*, AWS, 2005
19. *Heat Flow in Welding Lecture*, Suranaree University of Technology.
20. Hanneline E. Kawulusan, *Pengukuran Tegangan Sisa pada Hasil Las Aluminium 5052-H32 dengan Metode Difraksi Sinar-X*, Universitas Indonesia, 1991
21. JIS G 3101 (JISF), *Rolled steels for general structure*, Japan Standards Association, 2004
22. <http://hazwelding.wordpress.com/2008/04/29/pwht-welding/>
23. J.Ray Mc. Dermott Middle East, Inc. *Juru las Training Program Module*
24. M.T Hutching, A.D. Krawitz, *Measurement of Residual and Applied Stress Using Neutron Diffraction*, Kluwer Academic Publishers, Netherland, 1992
25. R.W.K Honeycombe, H.K.D.H Bhadeshia, *Steel Microstructure and Properties*, Gray Publishing, Tunbridge Wells, Kent, 1995
26. S. Gibson, *Practical welding*, The MacMillan Press Ltd, 1994

Lampiran 2. MTR Kawat Las FCAW

UT. P. SUHARDI



CERTIFICATE OF WELDING CONSUMABLES

(4021, HWASAN-RO, ONSAN-EBU, ULSAN, KOREA / TEL. 052-231-3434 / FAX. 052-237-3311)

CUSTOMER: PT. ADHIREKSA DATE: JUN 19, 2007 Certificate No.: CSO-0706-A066

Brand Name	Classification	Diameter (mm)	Lot No.	Weight (kg)	Remark
CSF-71T	AWS E71T-1	1.2	709703	14.040	

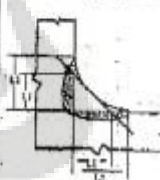
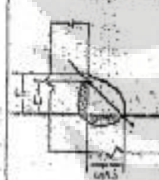
1. APPLIED CODE: AWS A.5.20-95

Item	Tension Test				Charpy Absorbed Energy		3. RADIOGRAPHIC TEST	4. HEAT TREATMENT
	Y.P (Mpa)	T.S (Mpa)	Elong (%)	R.A (%)	(J) at -18 °C			
Spec. (min.)	400	480	22		27		Fig.4	NR
Result	530 ✓	607 ✓	31.0 ✓		67, 63, 70 AVE. = 66.6	Accept		

CHEMICAL COMPOSITION (Weld Metal Filler Metal) (unit: %)

Elements	C	Mn	Si	P	S	CU	Ni	Cr	Mo	V	Fe
Spec. (max.)	0.18	1.75	0.90	0.03	0.03	0.35	0.50	0.20	0.30	0.08	
Result	0.047 ✓	1.22 ✓	0.54 ✓	0.017 ✓	0.007 ✓	0.01 ✓	0.01 ✓	0.02 ✓	0.03 ✓	0.02 ✓	

6. FILLET WELD TEST (unit: mm)

Welding Position	Item	Fillet Weld Size			Distance Between Length of fillet legs	Convexity	Dimension of Fillet Weld	
		L1	L2	L3			Concave fillet	Convex fillet
FH	Spec. (max.)	Not required						
	Result							
OH	Spec. (max.)	9.5			3.2	2.4		
	Result	7.8	8.3	7.8	0.5	0.6		
V	Spec. (max.)	9.5			3.2	2.4		
	Result	7.7	8.1	7.7	0.4	0.5		

7. THE OTHER TESTS

Item	Moisture Test		Hydrogen Test		Bend Test		Remark
	max.	(%)	max.	(ml/100g)	Crack	max. num	
Spec.							
Result	NR		NR		Result	NR	
						NR	

We hereby certify that the above materials are satisfactory in compliance with the requirement specified in the contract.
Our quality system is certified in accordance with ISO9001:2000 by DNV CERTIFICATION B.V., THE NETHERLAND.

REVIEWED: _____
ASME - SFA AS.1
ASME - SFA AS.20
27/05

S. H. J. e

Manager of Quality Assurance Department

CS-500-ENG-P2 CHOSUN WELDING CO., LTD. A4(210 X 297)

Lampiran 3. Brosur Kawat Las FCAW

Flux Cored Wire for Gas Shielded Arc Welding

CSF-71T

For mild steel and 50kgf/cm class high tensile strength steel

KS-D7104 YFW-C500R
BS-23313 YFW-C500R
AWS-A5.20 E71T-1

Applications

Butt, fillet welding of mild steel & 50kgf/cm high tensile strength steels of structure such as ships, bridges, buildings or storage tanks etc.

Characteristics

- (1) CSF-71T is a titania type flux cored wire and designed for all-position welding by single pass & multi pass with CO₂ gas-shielding.
- (2) It provides the excellent usability with stable arc, less spattering, good bead appearance, better slag removal, and less quantity of welding time comparable to solid wire.
- (3) It provides a good welding efficiency thank to high deposition rate particularly.

Notes on usage

- (1) The optimum flow of CO₂ for shielding is 20-25 l/min.
- (2) The distance between tip & base metal is to be 20-25mm.
- (3) Protect the weld with a screen to prevent blowholes caused by wind where the wind velocity is 2m/sec and more.
- (4) Thick heavy plate should be welded under proper preheating & interpass temperature.

Typical chemical composition of weld metal(%) (shielding gas : CO₂)

C	Mn	Si	P	S
0.05	1.28	0.48	0.015	0.012

Typical mechanical properties of weld metal (shielding gas : CO₂)

YF N/mm ² (lbf/in ²)	TS N/mm ² (kgf/cm ²)	EL (%)	IV-1(kgf·cm)	
			0P(0.2P)	-20C(0°F)
518(52.8)	584(59.6)	28.0	92(9.4)	75(7.7)

Size & recommended current range(DC+)

Dia. (mm)		1.2 (0.045)	1.4 (0.052)	1.6 (1/16)
FLAT H-FILLET	Amp	150-320	180-400	180-450
V-UP	Amp	150-260	150-270	180-280
V-DOWN	Amp	200-300	220-310	250-320
GH	Amp	150-260	160-310	180-310

Approval : ABS, BV, DNV, GL, LR, NK, KR

Lampiran 4. WPS FCAW-1G

WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS) YES
PREQUALIFIED _____ QUALIFIED BY TESTING
or PROCEDURE QUALIFICATION RECORDS (PQR) YES

Identification # WPS_DSS - 02G_ AWS D1.1
 Revision 4 Date 06-16-08 By Darmeyadi
 Authorized by Ir. Hendra Lahidin Date 04-11-07
 Type : Manual Semi-automatic
 Machine Automatic

Company Name : PT. Danwo Steel Sejati
 Welding Process(es) : FCAW
 Supporting PQR No (s) : PQR- DSS - 02G

JOIN DESIGN USED
 Type : Butt
 Single : Double Weld
 Backing : Yes No
 Backing Material : Weld Metal
 Root Opening : 0-3 mm Root face Dimension 0-3 mm
 Groove Angle : 45° Radius (J-U) : N/A
 Back Gouging : Yes No Methode Carbon Arc Gouging and Grinding

POSITION
 Position of Groove 1G, 2G Fillet N/A
 Vertical Progression Up Down

ELECTRICAL CHARACTERISTICS
 Transfer Mode (GMAW) Short-Circuiting
 Globular Spray
 Current AC DCEP DCEN Pulsed
 Other _____
 Tungsten Electrode (GTAW) Size : N/A Type : N/A

BASE METAL
 Material Spec ASTM A36
 Type or Grade N/A
 Thickness : Groove : 3 mm - Unlimited Fillet : _____
 Diameter (Pipe) : N/A

FILLER METALS
 AWS Specification A5.20
 AWS Classification E.71T-1

SHIELDING
 Flux : N/A Gas CO₂
 Composition 100% CO₂
 Electrode - Flux (Class) Flow Rate 35 - 45CFH
 Gas Cup Size # 4

PREHEAT
 Preheat Temp , min : _____ Max _____
 0°C (thickness : 3 - 20 mm incl) 316 °C
 10°C (thickness : over 20 - 38 mm incl)
 65°C (thickness : over 38 - 65 mm incl)
 110°C (thickness : over 65 mm)
 Interpass Temp , min : _____ Max _____
 0°C (thickness : 3 - 20 mm incl) 316 °C
 10°C (thickness : over 20 - 38 mm incl)
 65°C (thickness : over 38 - 65 mm incl)
 110°C (thickness : over 65 mm)

POSTWELD HEAT TREATMENT
 Temp N/A
 Time N/A

TECHNIQUE
 Stringer or Weave Bead : Both
 Multi-pass or Single-pass (per side) Multi-pass
 Number of Electrodes 1
 Electrode Spacing Longitudinal N/A
 Lateral N/A
 Angle N/A
 Contact Tube to Work Distance 12 - 25 mm
 Peening N/A
 Interpass Cleaning Wire Brush

WELDING PROCEDURE

Pass or Weld Layer	Process	Filler Metals		Current		Volts	Travel Speed (mm/min)	Joint Details
		Class	Dia (mm)	Type & Polarity	Amps or Wire Feed Speed			
ALL	FCAW	E71T-1	1.2	DCEP	200 - 280	23 - 28	200 - 400	

PT. DANWO STEEL SEJATI
 PREPARED BY [Signature]
 Ir. Darmeyadi
 QC - Manager

PEMERINTAH KABUPATEN KARAWANG
 DINAS TENAGA KERJA DAN TRANSKRASI
 REVIEWED/APPROVED BY [Signature]
 PIL. KEPALA
 DINAS TENAGA KERJA DAN TRANSKRASI
 KABUPATEN KARAWANG
 H. RUSKANDAR, SH. MM
 NIP. 380201877

Lampiran 5. WPS FCAW- 3G

WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS) YES
 PREQUALIFIED _____ QUALIFIED BY TESTING
 or PROCEDURE QUALIFICATION RECORDS (PQR) YES

Identification # WPS_DSS - 03G_ AWS D1.1
 Revision 4 Date 06-16-08 By Darmayadi
 Authorized by Ir. Hendra Lahidin Date 04-11-07
 Type : Manual Semi-automatic
 Machine Automatic

Company Name : PT. Danwo Steel Sejati
 Welding Process(es) : FCAW
 Supporting PQR No (s) : PQR- DSS - 03G

JOIN DESIGN USED

Type : Butt
 Single : Double Weld
 Backing : Yes No
 Backing Material : Weld Metal
 Root Opening : 0-3 mm Root face Dimension 0-3 mm
 Groove Angle : 60° Radius (J - U) N/A
 Back Gouging : Yes No Methode Carbon Arc Gouging and Grinding

POSITION

Position of Groove 3G Fillet N/A
 Vertical Progression Up Down

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Transfer Mode (GMAW) Short-Circuiting
 Globular Spray
 Current AC DCEP DCEN Pulsed
 Other _____

BASE METAL

Material Spec ASTM A36
 Type or Grade N/A
 Thickness : Groove : 3 mm - Unlimited Fillet : _____
 Diameter (Pipe) : N/A

TECHNIQUE

Stringer or Weave Bead : Both
 Multi-pass or Single-pass (per side) Multi-pass
 Number of Electrodes 1
 Electrode Spacing Longitudinal N/A
 Lateral N/A
 Angle N/A
 Contact Tube to Work Distance 12 - 25 mm
 Peening N/A
 Interpass Cleaning Wire Brush

FILLER METALS

AWS Specification A5.20
 AWS Classification E.71T-1

SHIELDING

Flux : N/A Gas CO₂
 Composition 100% CO₂
 Electrode - Flux (Class) Flow Rate 35 - 45CFH
 Gas Cup Size # 4

PREHEAT

Preheat Temp , min : _____ Max _____
 0°C (thickness : 3 - 20 mm incl) 316 °C
 10°C (thickness : over 20 - 38 mm incl)
 65°C (thickness : over 38 - 65 mm incl)
 110°C (thickness : over 65 mm)
 Interpass Temp , min _____ Max _____
 0°C (thickness : 3 - 20 mm incl) 316 °C
 10°C (thickness : over 20 - 38 mm incl)
 65°C (thickness : over 38 - 65 mm incl)
 110°C (thickness : over 65 mm)

POSTWELD HEAT TREATMENT

Temp N/A
 Time N/A

WELDING PROCEDURE

Pass or Weld Layer	Process	Filler Metals		Type & Polarity	Current	Volts	Travel Speed (mm/min)	Joint Details
		Class	Dia (mm)		Amps or Wire Feed Speed			
ALL	FCAW	E71T-1	1.2	DCEP	200 - 280	23 - 28	200 - 400	

PT. DANWO STEEL SEJATI
 PREPARED BY

 Ir. Darmayadi
 QC - Manager

REVISI/ APPROVED BY

 H. RUSKANUR, SH, MM
 NIP. 316031677

Lampiran 7. Tabel Parameter Pengelasan Sampel F10G3

DATA PENGELASAN

Date 24-Jan-09
 Size (mm) 250 x 300 150 x 2
 Sample Code F10G3
 Welder's Name A980.G.

Run No.	Current (A)				Voltage (V)				Duration (second)	Travel Speed (mm/min)	Angular Distortion				Heat Input KJ/mm				
	1	2	3	4	1	2	3	4			θ	θ	θ	θ		θ rata-rata			
									average										
1	121	114	147	134	22.12	22.45	21.95	21.89	22.10	160	113	0.764	0.764	0.764	0.573	0.382	0.60480	1.52	
2	158	178	163	173	22.58	22.61	22.14	22.53	22.47	130	138	1.337	1.337	1.337	1.337	1.146	0.955	1.24151	1.64
3	171	186	159	173	23.26	23.38	23.88	23.51	23.51	260	59	1.719	1.719	1.719	1.719	1.337	1.146	1.55992	3.51
4	173	166	185	177	24.93	25.18	25.82	24.7	25.16	164	110	2.101	1.910	1.910	1.910	1.719	1.528	1.84653	2.41
rata-rata									23.31	178.50	107.49								2.27

Lampiran 8. Tabel Parameter Pengelasan Sampel F16G1

DATA PENGELASAN

Date 24-Jan-09
 Size (mm) 250 x 300 150 x2
 Sample Code F16G1
 Welder's Name Agus G.

Run No.	Current (A)				Voltage (V)				Duration (second)	Travel Speed (mm/min)	Angular Distortion						Heat Input KJ/mm	
	1	2	3	4	1	2	3	4			average	θ	θ	θ	θ	θ		θ
1	129	137	132		23.46	25.1	24.81		24.46	149	121	0.382	0.382	0.382	0.382	0.382	0.38197	1.61
2	155	147	161		23.56	23.81	23.89		23.75	136	132	0.955	0.955	0.955	0.955	0.955	0.95497	1.66
3	237	227	243		25.67	26.89	26.13		25.87	81	222	1.528	1.528	1.528	1.528	1.528	1.52807	1.65
4	237	236	240		23.33	29.22	30.64		33.04	105	171	1.910	1.910	1.910	1.910	1.910	1.91021	2.71
rata-rata					189.25				26.78	117.75	161.70							1.91

Lampiran 9. Tabel Parameter Pengelasan Sampel F16G3

DATA PENGELASAN

Date 25-Jan-09

Size (mm) 150 x2

Sample Code F16G3

Welder's Name Rahmat

Run No.	Current (A)				Voltage (V)				Duration (second)	Travel Speed (mm/min)	Angular Distortion				Heat Input KJ/mm			
	1	2	3	4	1	2	3	4			average	θ	θ	θ		θ	θ rata-rata	
1	156	133	145	163	149.25	22.11	22.39	22.7	21.09	22.07	162	111	0.764	0.764	0.764	0.764	0.76397	1.78
2	148	162	154	136	150.00	23.31	22.77	22.4	22.96	22.86	225	80	1.337	1.337	1.337	1.337	1.33702	2.57
3	167	127	173	169	159.00	23.89	23.66	25.11	23.91	24.14	174	103	2.101	2.101	2.101	2.101	2.10132	2.23
4	237	237	239	240	238.25	17.2	16.6	15.7	14.9	16.10	224	80	3.057	3.057	3.057	3.057	3.05723	2.86
rata-rata					174.13					21.29	196.25	93.73						2.36

Lampiran 10. Tabel Parameter Pengelasan Sampel F20G1

DATA PENGELASAN

Date 24-Jan-09
 Size (mm) 150 x2
 Sample Code F20G1
 Welder's Name Rehmawati

Run No.	Current (A)				Voltage (V)				Duration (second)	Travel Speed (mm/min)	Angular Distortion						Heat Input KJ/mm	
	1	2	3	4	1	2	3	4			average	θ	θ	θ	θ	θ		θ
1	134	119	131		25.6	25.14	24.83		122	148	0.382	0.382	0.382	0.382	0.382	0.382	0.35014	1.31
2	144	168	161		26	26.17	15.83		105	171	0.573	0.573	0.573	0.573	0.573	0.573	0.57297	1.25
3	209	215	228		30.21	30.11	30.4		97	186	1.337	1.337	1.337	1.337	1.337	1.337	1.33702	2.13
4	216	219	213		30.61	30.35	30.58		135	133	2.101	2.101	2.101	2.101	2.101	2.101	2.10132	2.97
5	211	209	209		30.18	30.4	30.31		171	105	2.675	2.675	2.675	2.675	2.675	2.675	2.73851	3.62
rate-rata									185.73	27.79	126.00	148.63						2.26

Lampiran 11. Tabel Parameter Pengelasan Sampel F20G3

DATA PENGELASAN

Date 25-Jan-09
 Size (mm) 150 x2
 Sample Code F20G3
 Welder's Name AP50.G.

Run No.	Current (A)				Voltage (V)				Duration (second)	Travel Speed (mm/min)	Angular Distortion						Heat Input KJ/mm				
	1	2	3	4	1	2	3	4			average	θ	θ	θ	θ	θ		θ	θ rata-rata		
1	134	120	115	130	124.75	21.3	20.4	21.09	20.99	20.95	111	162	0.764	0.764	0.764	0.764	0.764	0.764	0.764	0.76397	0.97
2	127	145	132	133	134.25	21.96	22.22	21.92	22.49	22.15	126	143	0.955	0.955	0.955	0.955	0.955	0.955	0.955	0.92314	1.25
3	145	169	181	176	167.75	23.14	23.58	23.73	24.41	23.72	163	110	1.337	1.337	1.337	1.337	1.337	1.337	1.337	1.33702	2.16
4	167	184	163	158	168.00	25.71	26	26.04	25.62	25.84	140	129	1.910	1.910	1.719	1.719	1.719	1.910	1.81467	2.03	
5	208	211	201	193	203.25	25.79	25.78	25.98	25.72	25.82	145	124	3.057	2.484	2.484	2.484	2.484	2.484	2.484	2.57920	2.54
6	221	208	212	221	215.50	25.91	26	25.88	25.7	25.87	158	114	4.205	4.205	4.205	4.205	4.205	4.205	4.205	4.20547	2.94
rate-rate					168.92					24.06	140.50	130.35									1.98

Lampiran 12. Hasil Pengujian Kekerasan

Tabel Kekerasan Mikro F10G1

F10G1	Base Metal Left		Fine HAZ Left		Coarse HAZ Left		Weldpool		Coarse HAZ Right		Fine HAZ Right		Base Metal Right	
	d1	d2	d1	d2	d1	d2	d1	d2	d1	d2	d1	d2	d1	d2
1	60	61.5	50.5	53	56	58	54	55	55.5	57.5	50.5	58	62	68
2	56	60	52	60	56.5	56.5	53.5	54.5	56	56	55	58	68.5	68.5
3	58	58.5	58	56	55	56.5	54	55	56	56	55	59	70.5	68.5
<u>d average</u>	59		54.9167		56.4167		54.3333		56.1667		55.9167		67.6667	
HV	159.7816719		184.4262125		174.7495795		188.4075426		176.3086758		177.8887307		121.4734645	

* daerah yang ditahan adalah sisi kanan sampel

Tabel Kekerasan Mikro F10G3

F10G3	Base Metal Left		Fine HAZ Left		Coarse HAZ Left		Weldpool		Coarse HAZ Right		Fine HAZ Right		Base Metal Right	
	d1	d2	d1	d2	d1	d2	d1	d2	d1	d2	d1	d2	d1	d2
1	55.5	65	55	52	57	54.5	53	56	59	57	51.5	55	60.5	56
2	56.5	61.5	54.5	55.5	58	53.5	41	42	57	59	53	53	50	60
3	61.5	58	56	53	56	58	58.5	55.5	60	57.5	54	40	55.5	57
<u>d average</u>	59.6667		54.3333		56.1667		51		58.25		51.0833		56.5	
HV	156.2310789		188.4075426		176.3086758		213.8408304		163.9227099		213.1437133		174.2344741	

* daerah yang ditahan adalah sisi kiri sampel

Lampiran Pengujian Kekerasan

lanjutan

Tabel Kekerasan Mikro F20G1

F20G1	Base Metal Left		Fine HAZ Left		Coarse HAZ Left		Weldpool		Coarse HAZ Right		Fine HAZ Right		Base Metal Right	
	d1	d2	d1	d2	d1	d2	d1	d2	d1	d2	d1	d2	d1	d2
1	70	71	66	68			63	66	63.5	69	65.5	68	63	66
2	73.5	71	69	67.5	NOT FOUND		63.5	60	67.5	65	65	64	63.5	65
3	72	68	68	70			66.5	70	65	64	68	67.5	63.5	65
<u>d average</u>	70.9167		68.0833				64.8333		65.6667		66.3333		64.3333	
HV	110.5947106		119.9911909				132.3226783		128.9855446		126.4058988		134.3875003	

* daerah yang ditahan adalah sisi kanan sampel

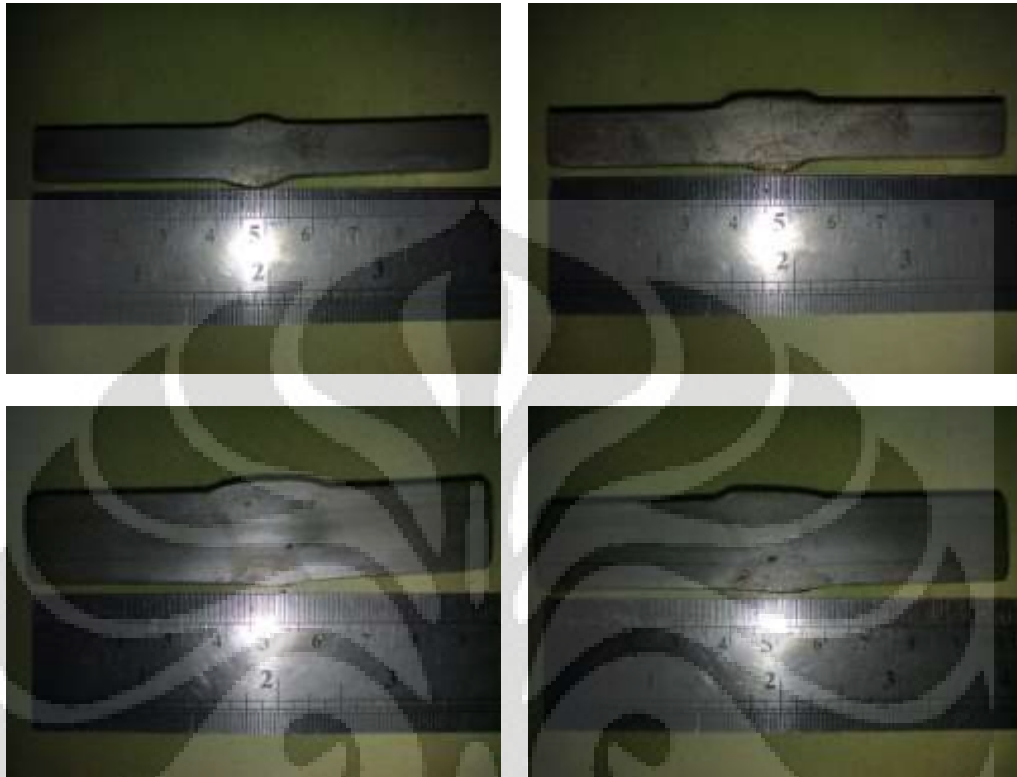
Tabel Kekerasan Mikro F20G3

F20G3	Base Metal Left		Fine HAZ Left		Coarse HAZ Left		Weldpool		Coarse HAZ Right		Fine HAZ Right		Base Metal Right	
	d1	d2	d1	d2	d1	d2	d1	d2	d1	d2	d1	d2	d1	d2
1	62	60	56	56	57	59	56	54.5	60	62.5	59.5	58	61	62.5
2	61	59	58	56	58	55	53.5	54.5	59.5	64	60	60	62	62
3	56	59	56	57	57.5	58.5	54.5	56	62	61.5	58	59.5	61	62.5
<u>d average</u>	59.5		56.5		57.5		54.8333		61.5833		59.1667		61.8333	
HV	157.1075489		174.2344741		168.2268431		184.9872045		146.6576088		158.8827614		145.4740957	

* daerah yang ditahan adalah sisi kiri sampel

Lampiran 13. Hasil Pengamatan Metalografi

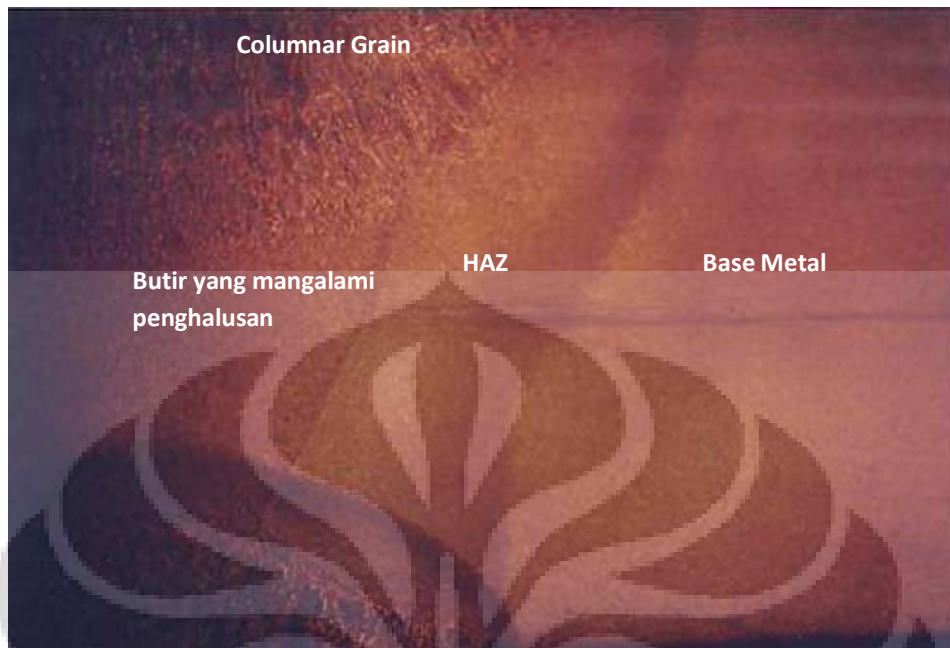
Makrostruktur



Gambar Makrostruktur sampel F10G1, F10G3, F20G1 dan F20G3

lanjutan

Makrostruktur dengan Perbesaran 7x



Gambar Makrostruktur Pada sampel F10G1 (perbesaran 7x)

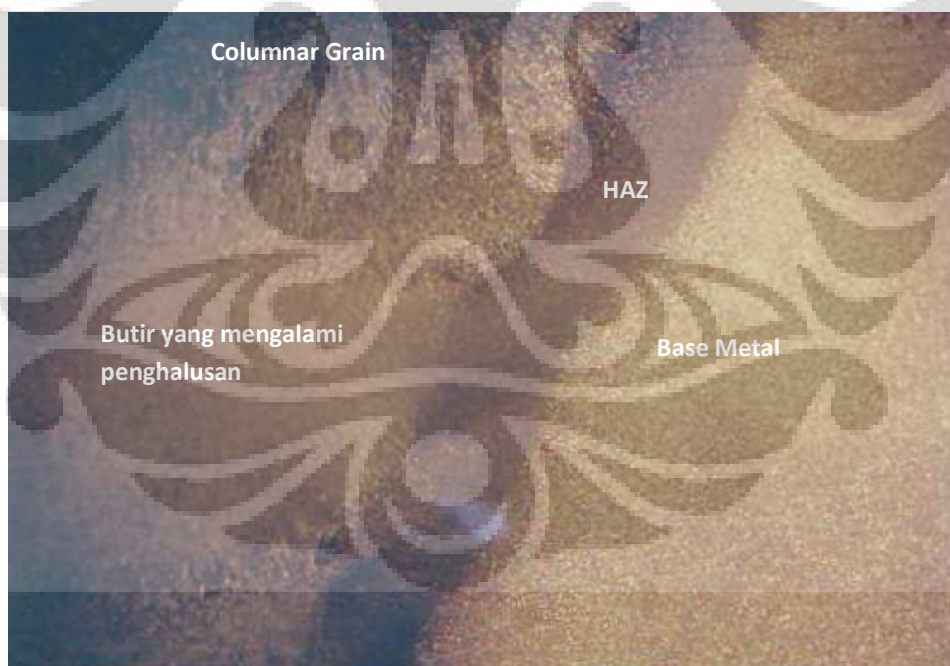


Gambar Makrostruktur Pada sampel F10G3 (perbesaran 7x)

lanjutan

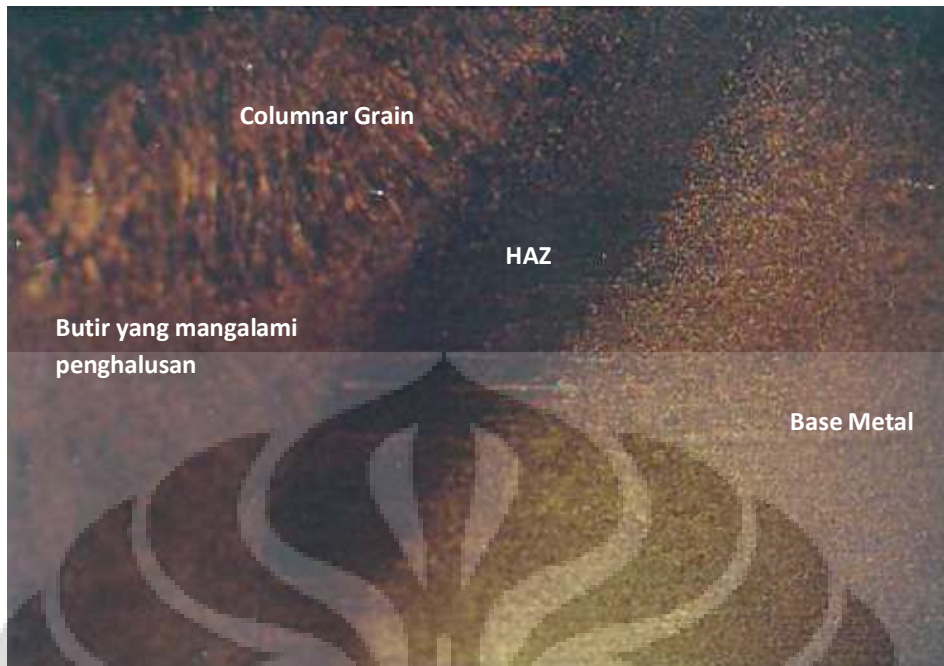


Gambar Makrostruktur Pada sampel F16G1 (perbesaran 7x)

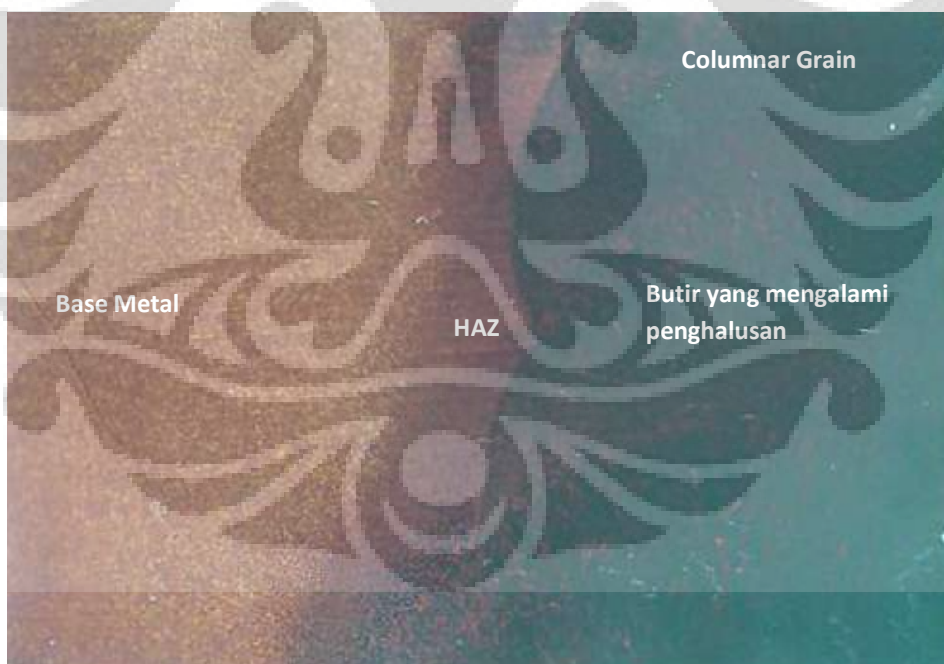


Gambar Makrostruktur Pada sampel F16G3 (perbesaran 7x)

lanjutan



Gambar Makrostruktur Pada sampel F20G1 (perbesaran 7x)

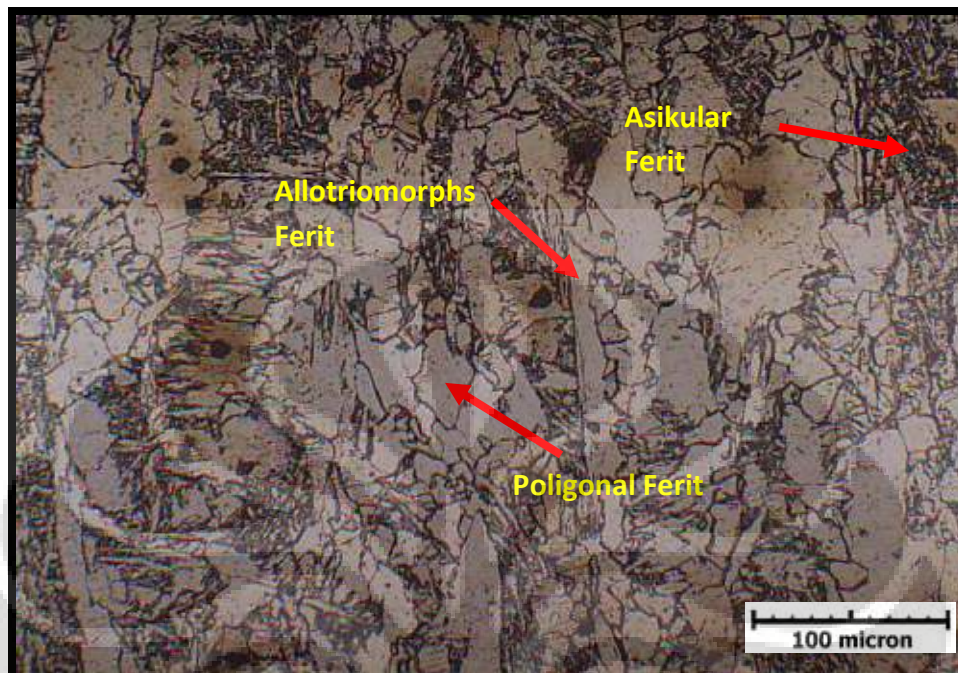


Gambar Makrostruktur Pada sampel F20G3 (perbesaran 7x)

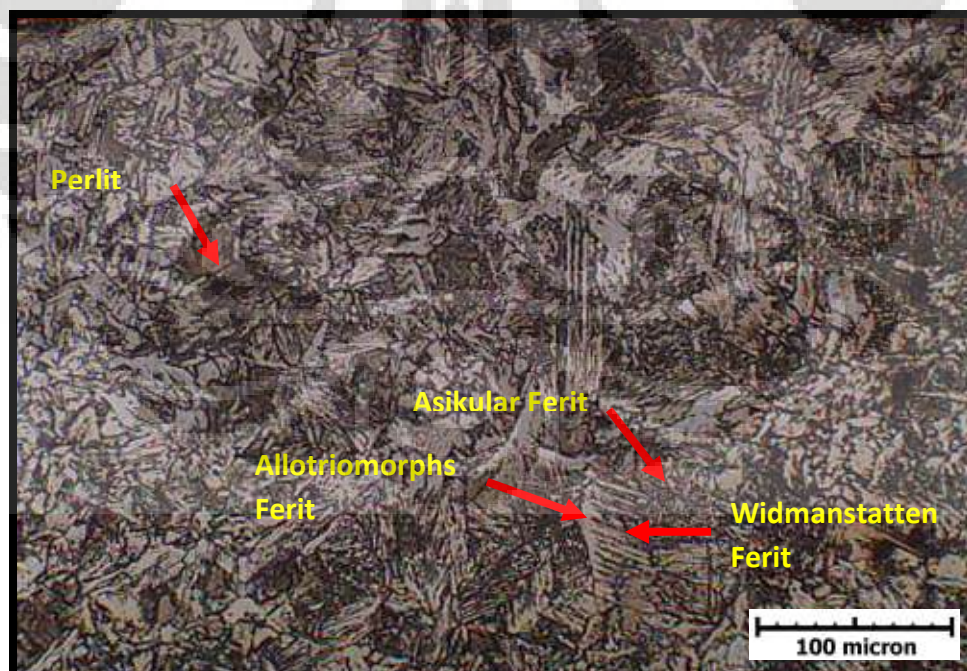
lanjutan

Mikrostruktur

Mikrostruktur F10G1

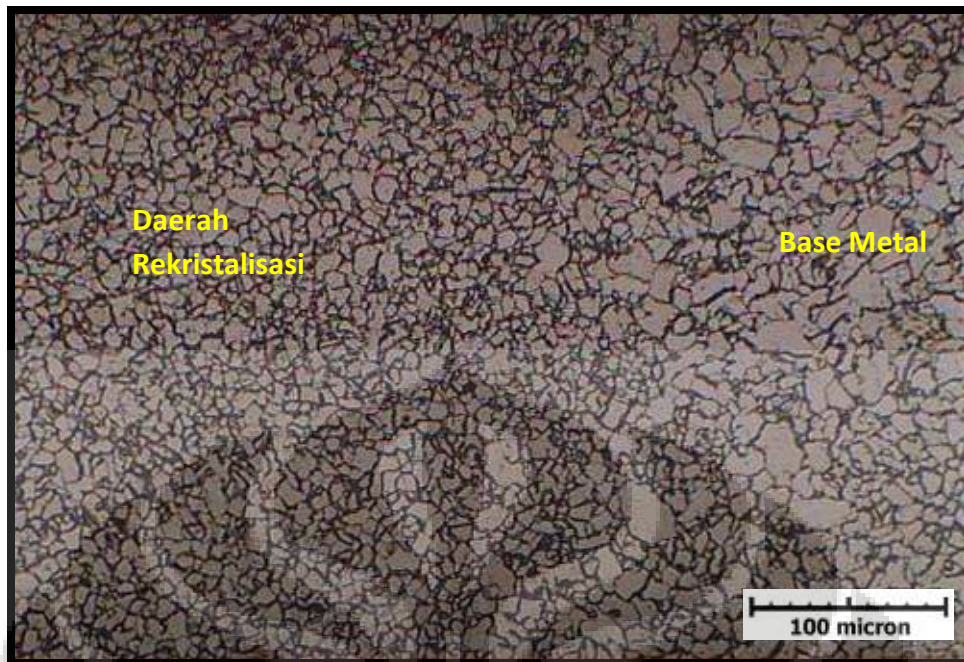


Gambar Mikrostruktur F10G1 pada daerah deposit las (perbesaran 200x)

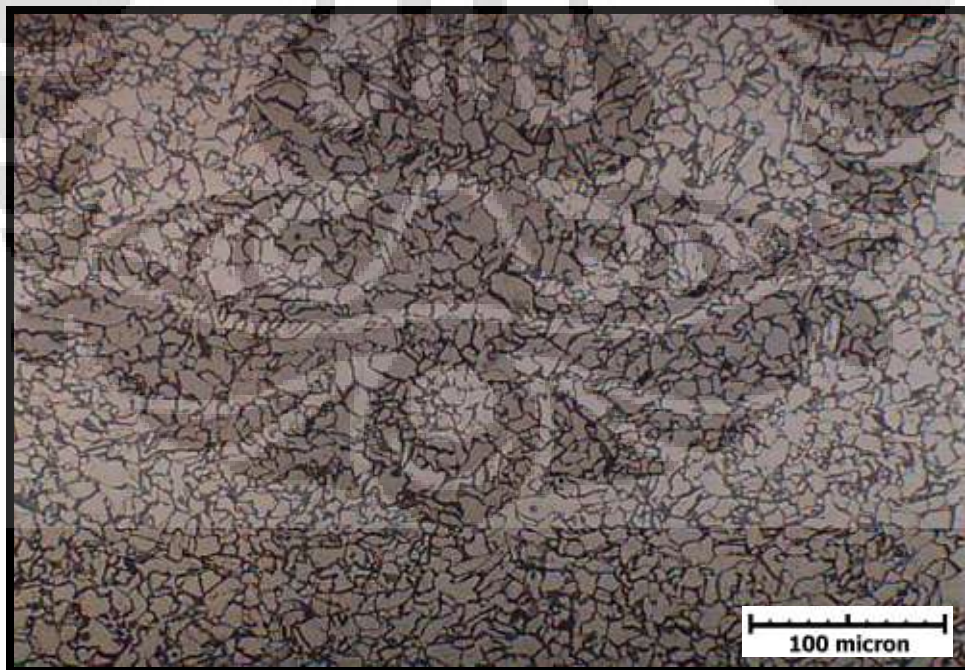


Gambar Mikrostruktur F10G1 pada daerah terpengaruh panas kasar (diatas A_1)
(perbesaran 200x)

lanjutan



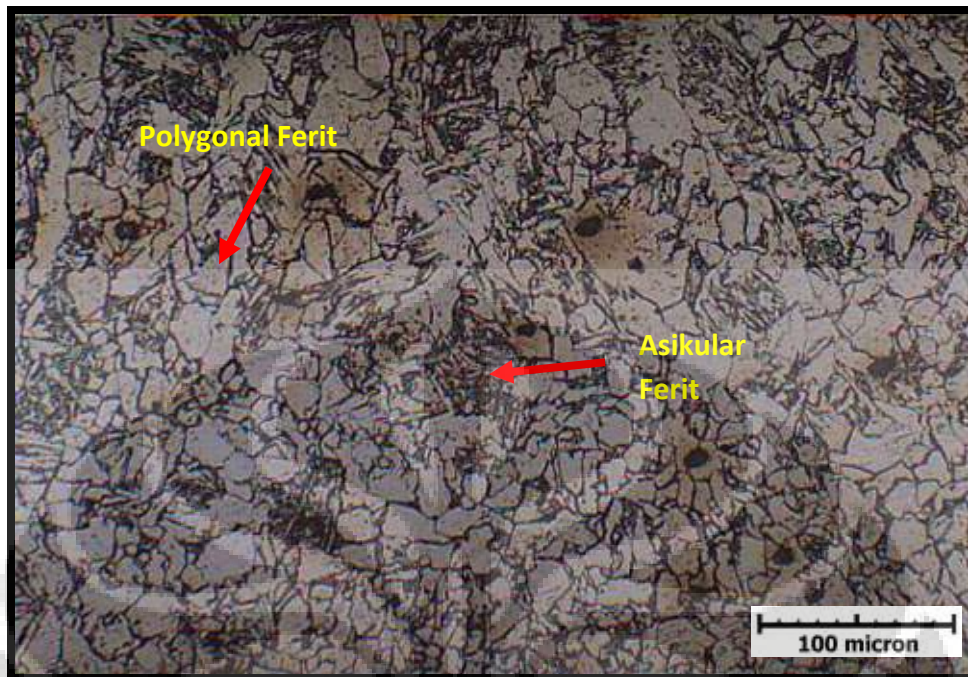
Gambar Mikrostruktur F10G1 pada daerah terpengaruh panas halus (dibawah A_1)
(perbesaran 200x)



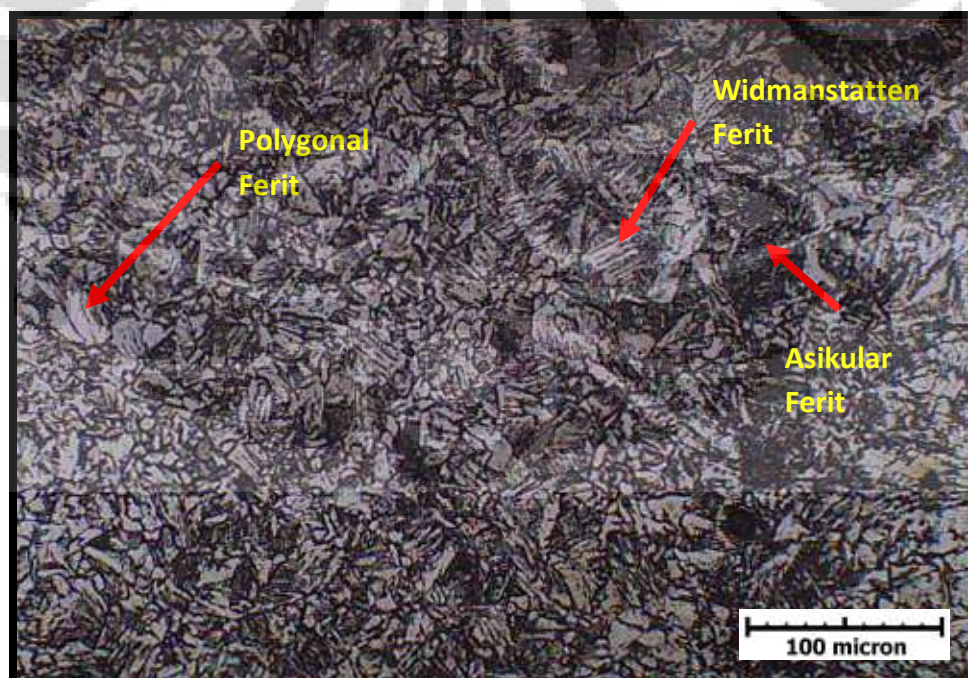
Gambar Mikrostruktur Logam induk F10G1 (perbesaran 200x)

lanjutan

Mikrostruktur F10G3

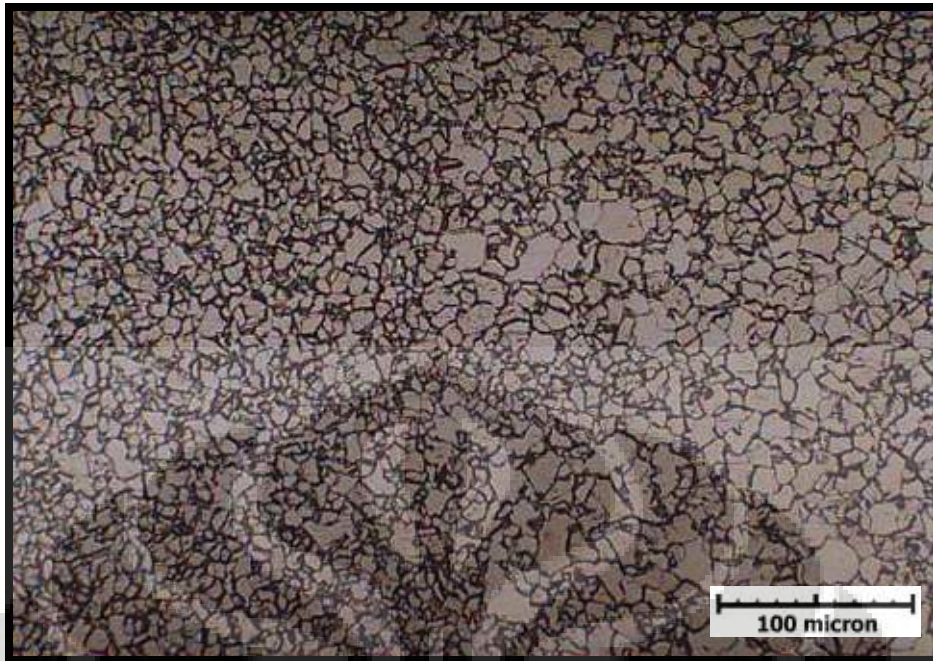


Gambar Mikrostruktur F10G3 pada daerah deposit las (perbesaran 200x)

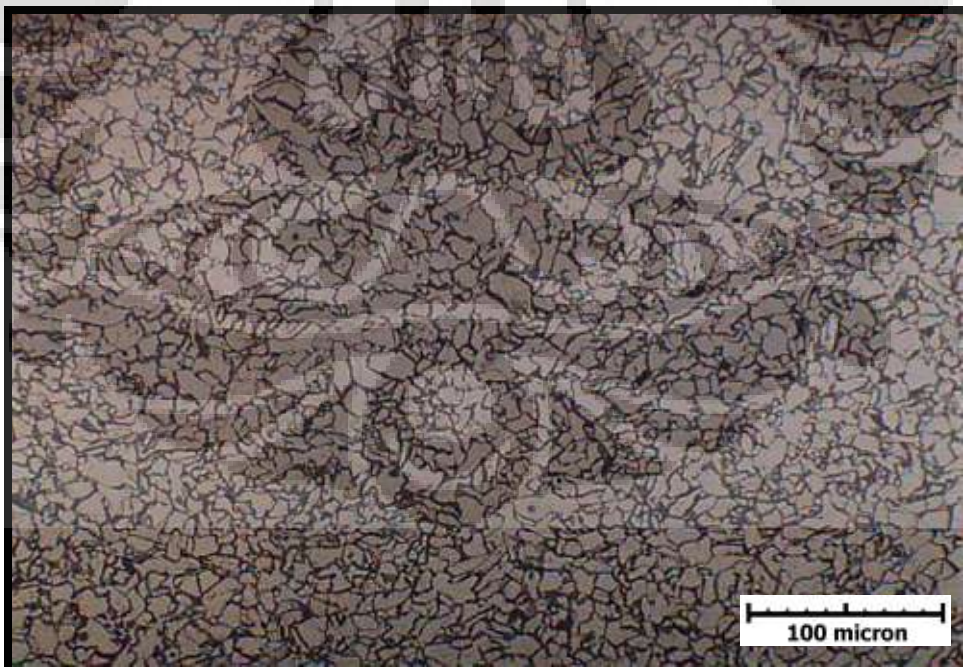


Gambar Mikrostruktur F10G3 pada daerah terpengaruh panas kasar (diatas A_1)
(perbesaran 200x)

lanjutan



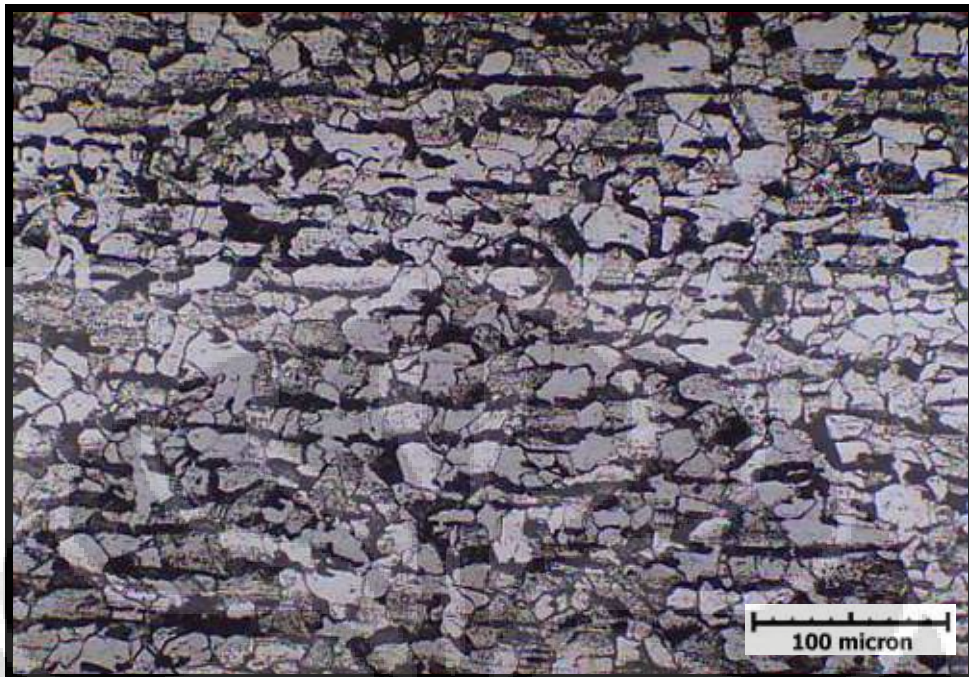
Gambar Mikrostruktur F10G3 pada daerah terpengaruh panas halus (dibawah A_1)
(perbesaran 200x)



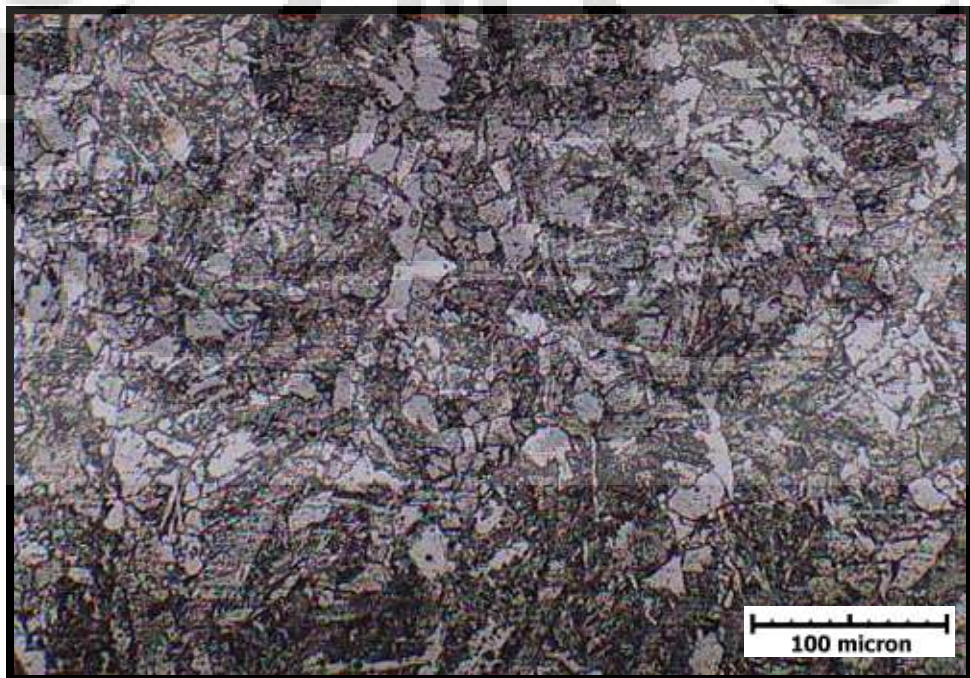
Gambar Mikrostruktur Logam induk F10G3 (perbesaran 200x)

lanjutan

Mikrostruktur F16G1

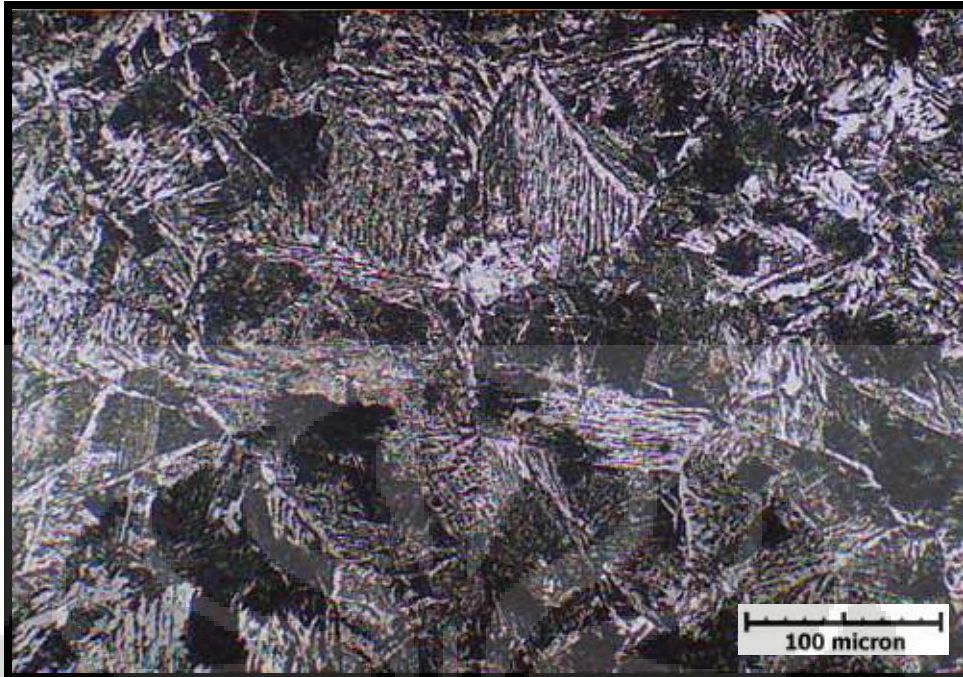


Gambar Mikrostruktur Logam induk F16G1 (perbesaran 200x)

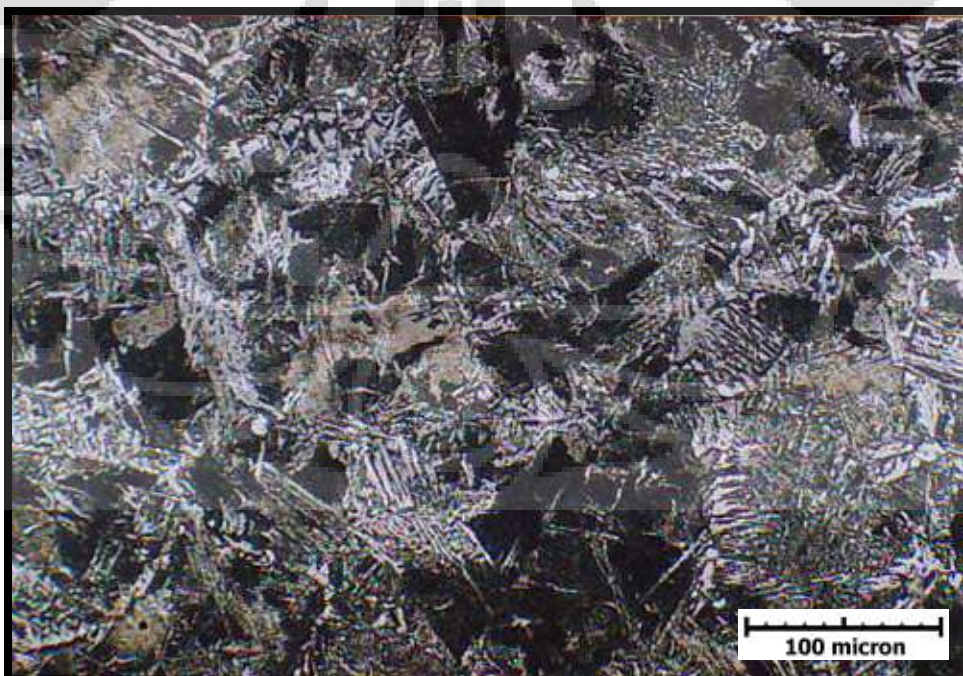


Gambar Mikrostruktur F16G1 pada daerah deposit las (perbesaran 200x)

lanjutan

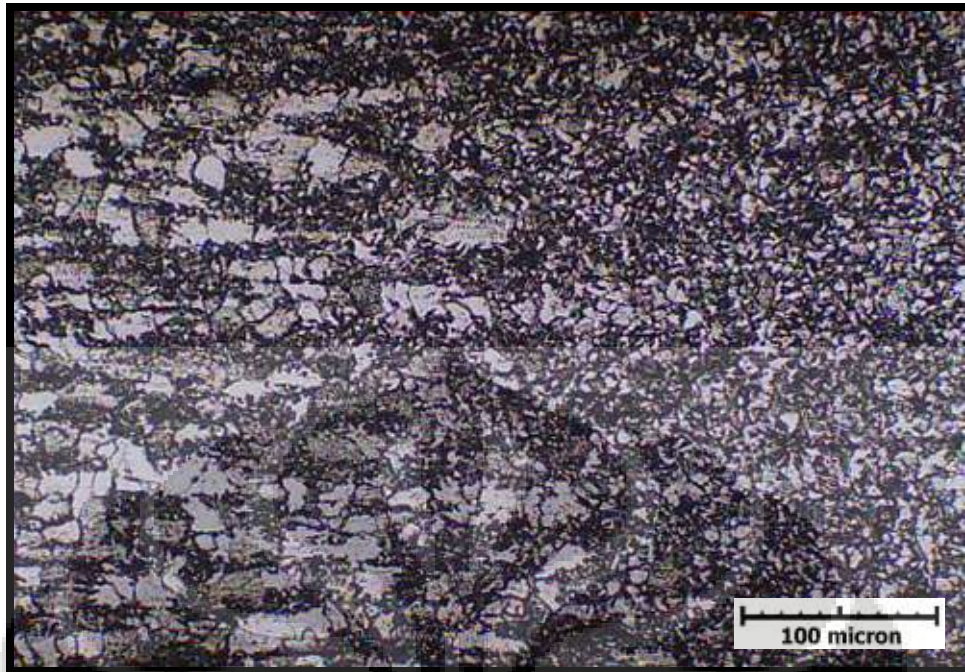


Gambar Mikrostruktur F16G1 pada daerah terpengaruh panas kasar (diatas A_1) yang mengalami proses penahanan (perbesaran 200x)

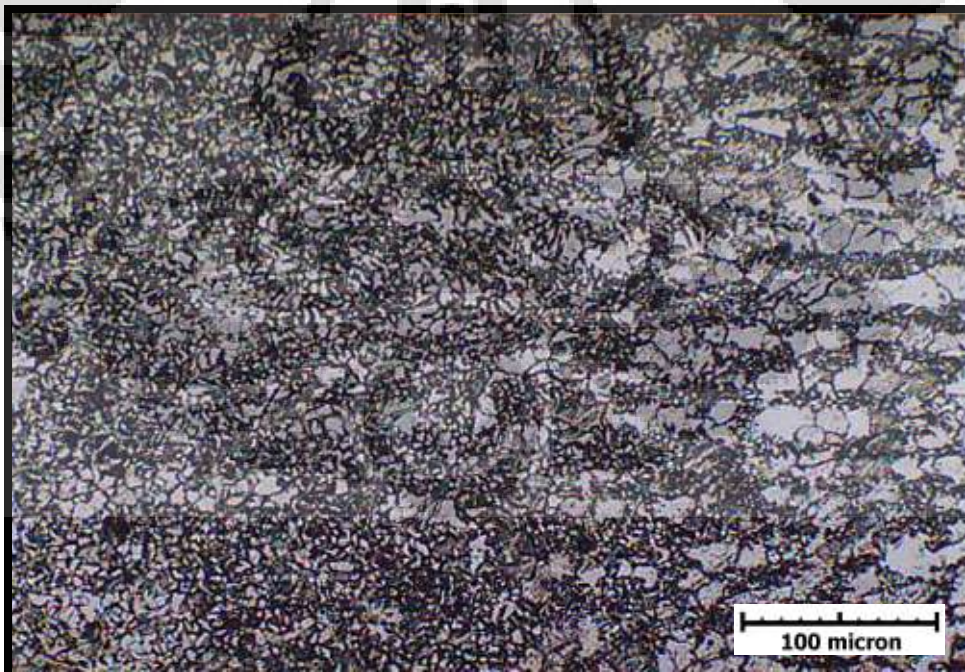


Gambar Mikrostruktur F16G1 pada daerah terpengaruh panas kasar (diatas A_1) yang tidak mengalami proses penahanan (perbesaran 200x)

lanjutan



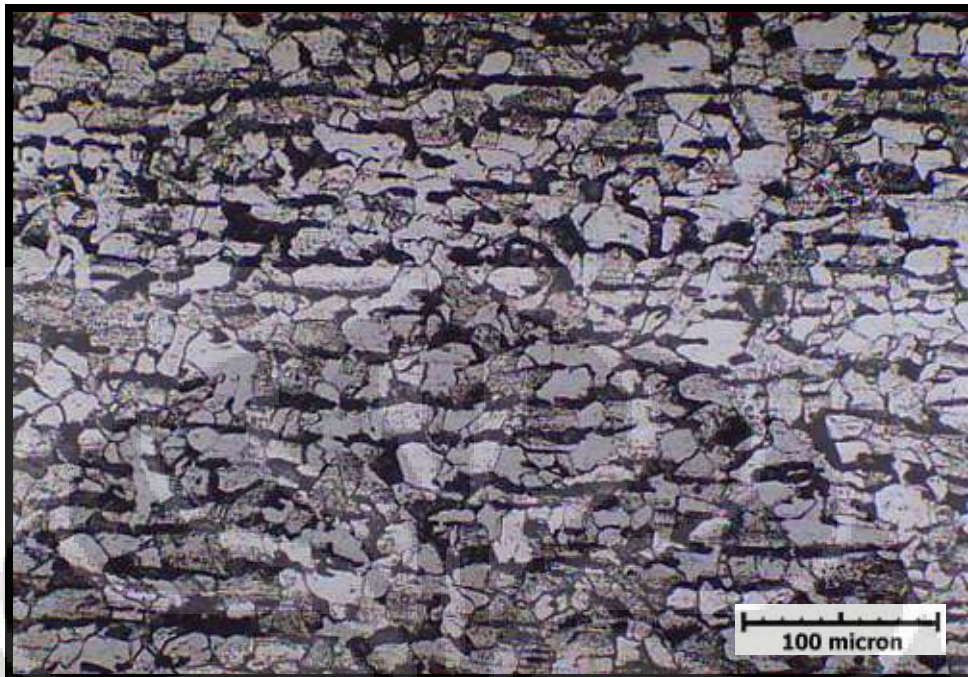
Gambar Mikrostruktur F16G1 pada daerah terpengaruh panas halus (dibawah A_1) yang mengalami proses penahanan (perbesaran 200x)



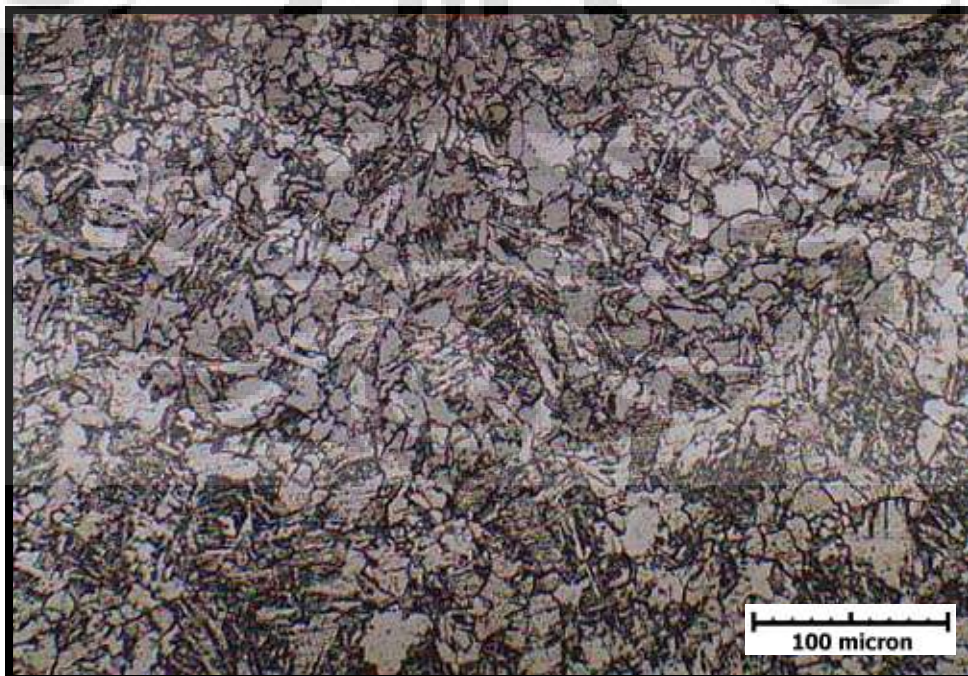
Gambar Mikrostruktur F16G1 pada daerah terpengaruh panas halus (dibawah A_1) yang tidak mengalami proses penahanan (perbesaran 200x)

lanjutan

Mikrostruktur F16G3

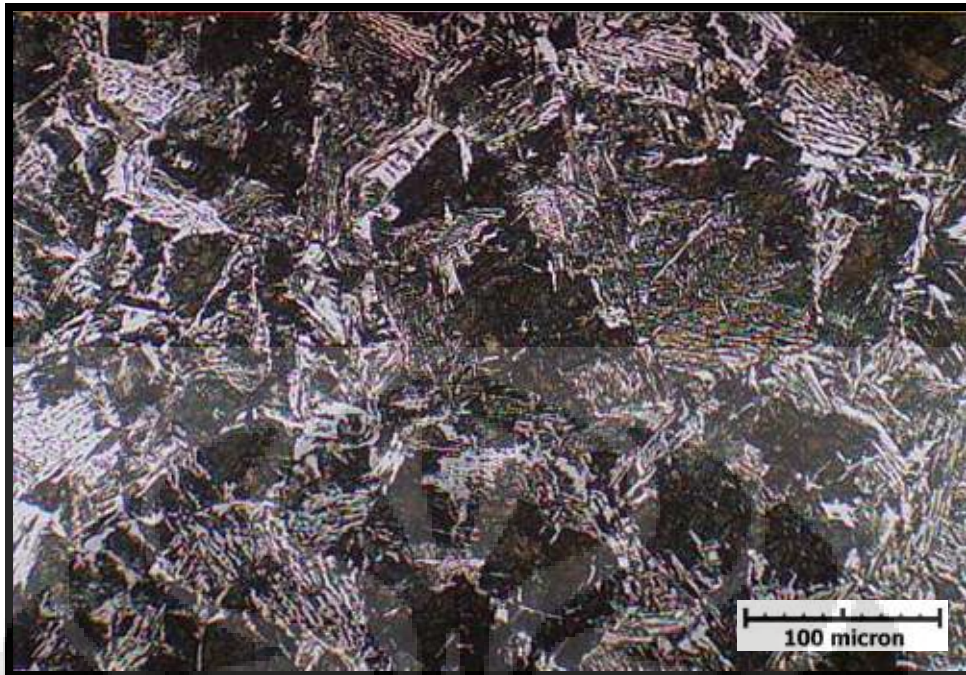


Gambar Mikrostruktur Logam induk F16G3 (perbesaran 200x)

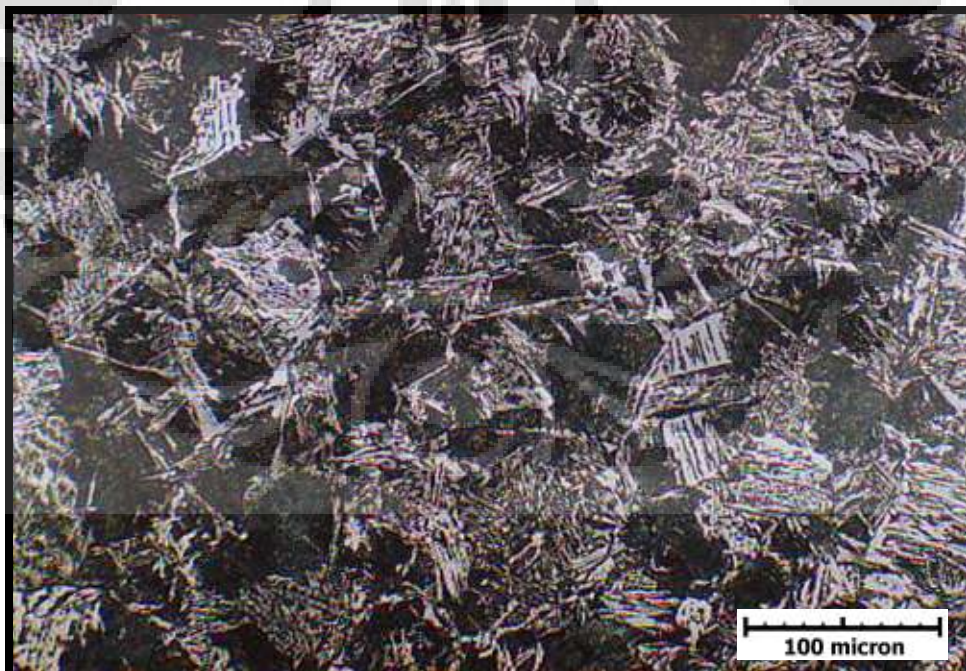


Gambar Mikrostruktur F16G1 pada daerah deposit las (perbesaran 200x)

lanjutan

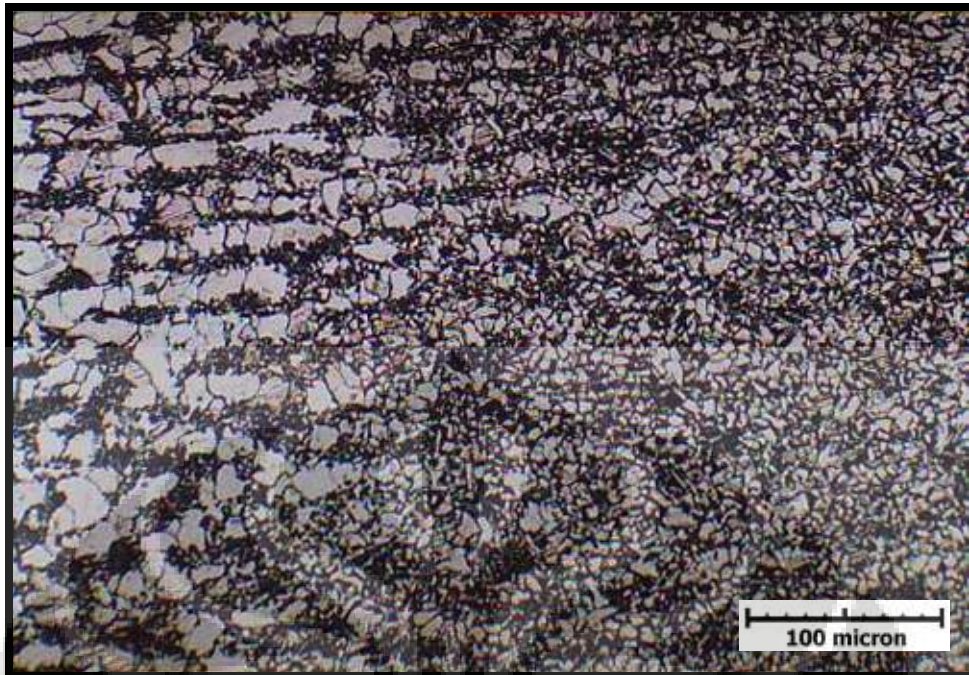


Gambar Mikrostruktur F16G3 pada daerah terpengaruh panas kasar (diatas A_1) yang mengalami proses penahanan (perbesaran 200x)

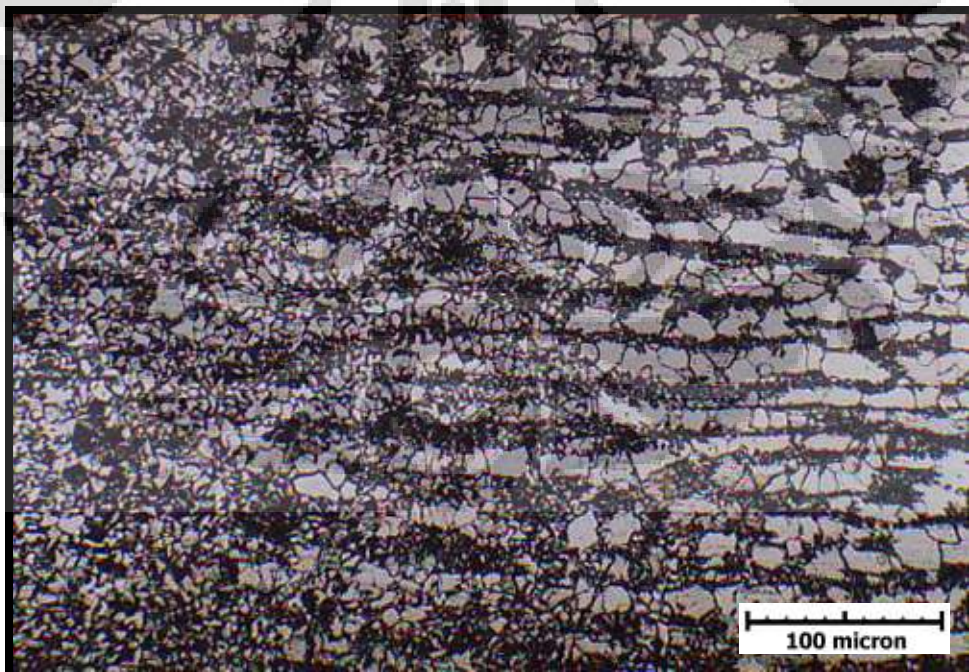


Gambar Mikrostruktur F16G3 pada daerah terpengaruh panas kasar (diatas A_1) yang tidak mengalami proses penahanan (perbesaran 200x)

lanjutan



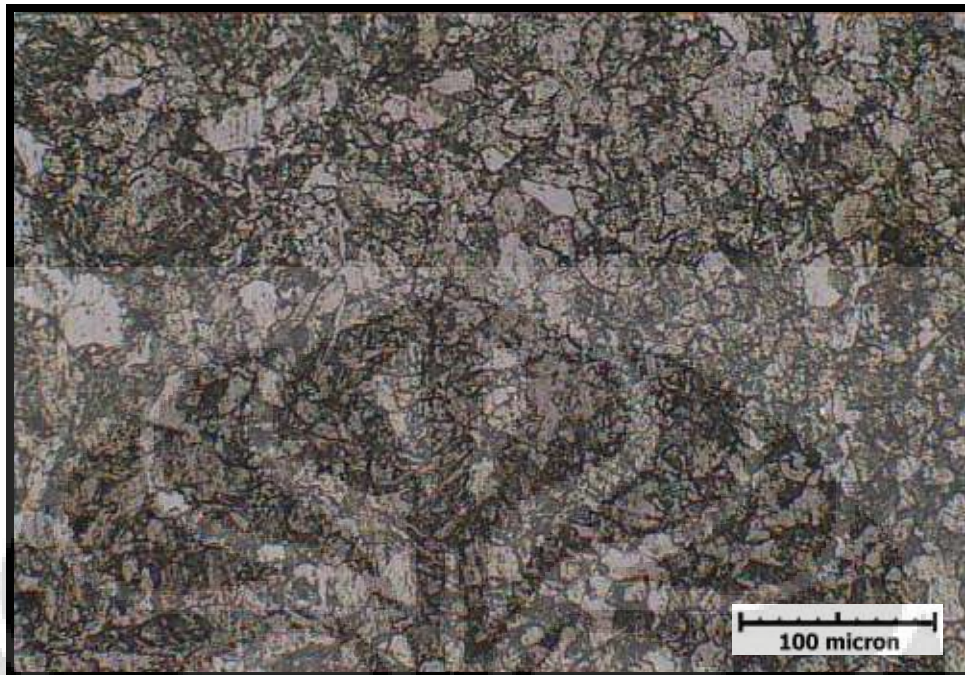
Gambar Mikrostruktur F16G3 pada daerah terpengaruh panas halus (dibawah A_1) yang mengalami proses penahanan (perbesaran 200x)



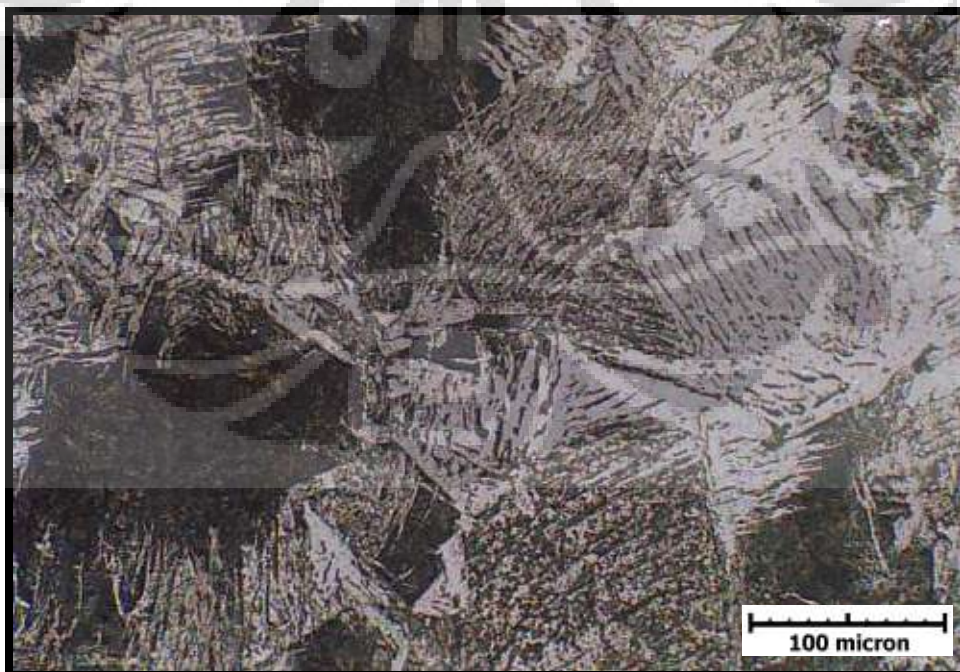
Gambar Mikrostruktur F16G3 pada daerah terpengaruh panas halus (dibawah A_1) yang tidak mengalami proses penahanan (perbesaran 200x)

lanjutan

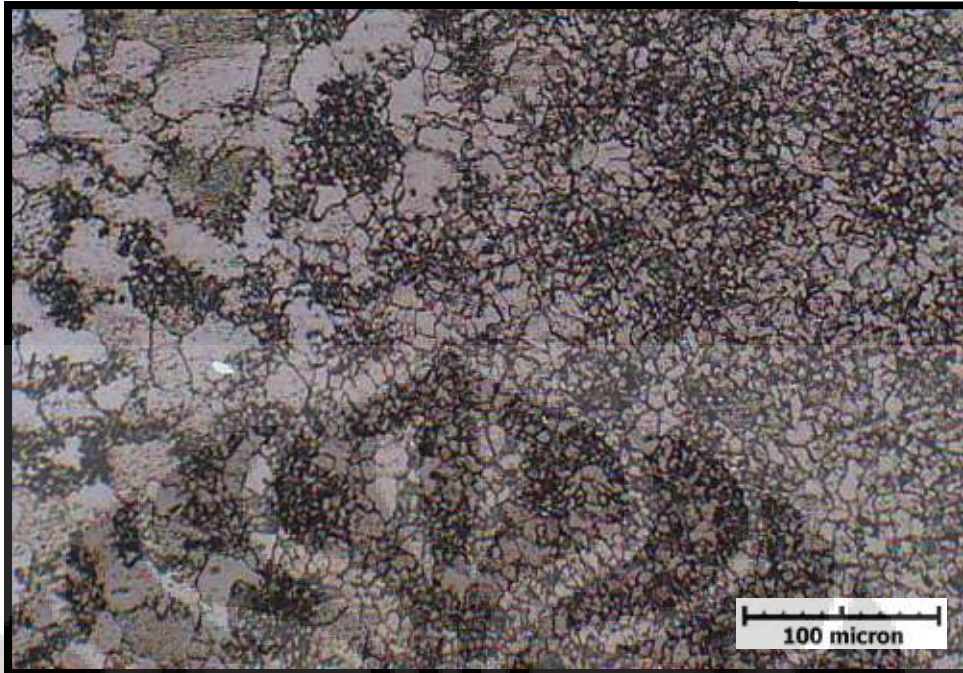
Mikrostruktur F20G1



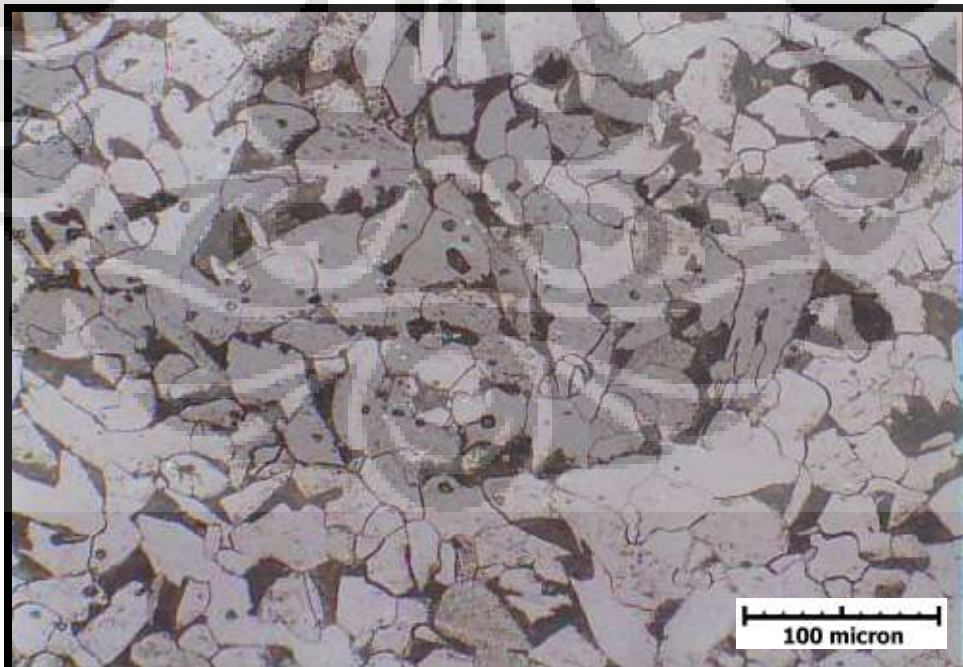
Gambar Mikrostruktur F16G1 pada daerah deposit las) (perbesaran 200x)

Gambar Mikrostruktur F16G1 pada daerah terpengaruh panas kasar (diatas A_1)
(perbesaran 200x)

lanjutan



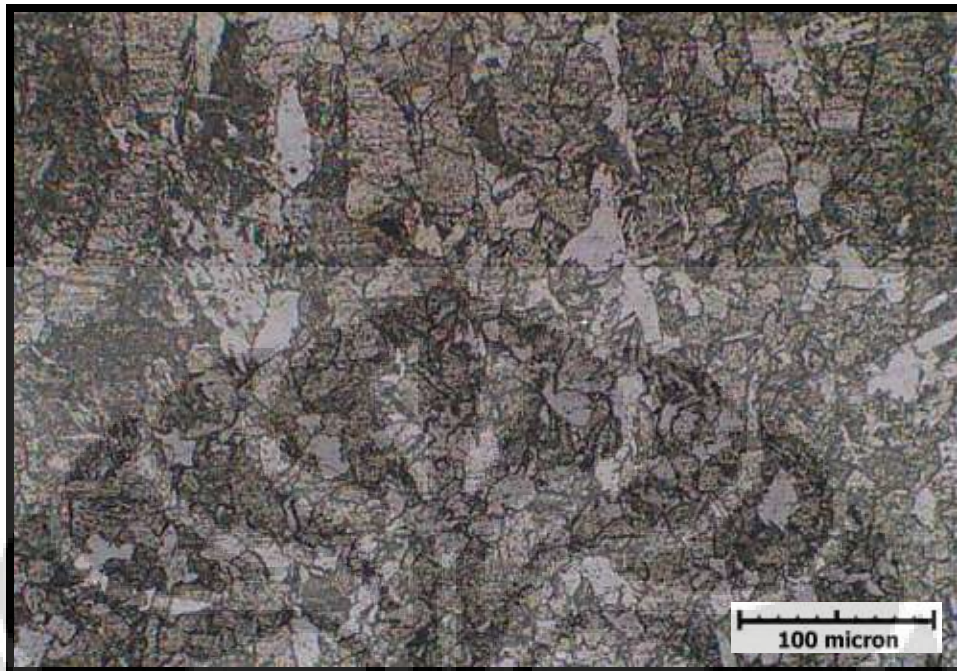
Gambar Mikrostruktur F16G1 pada daerah terpengaruh panas halus (dibawah A₁)
(perbesaran 200x)



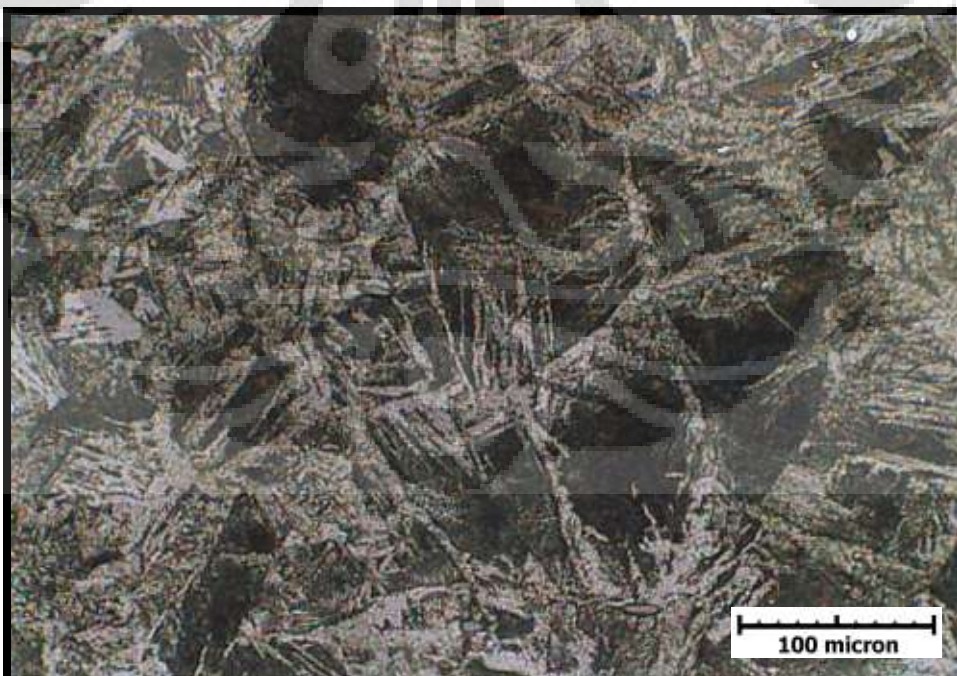
Gambar Mikrostruktur Logam Induk F20G1(perbesaran 200x)

Mikrostruktur F20G3

lanjutan

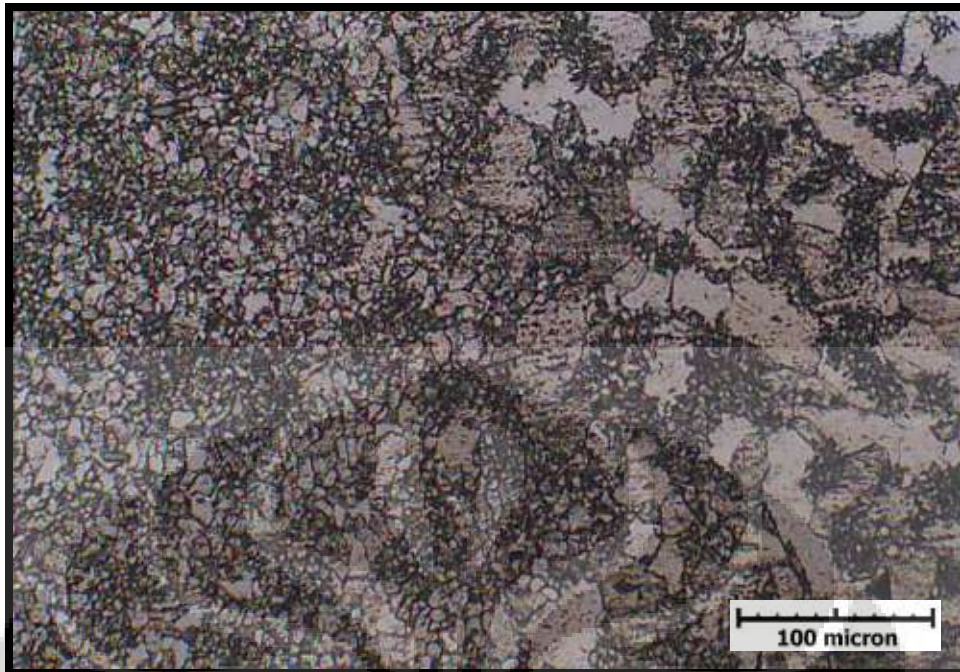


Gambar Mikrostruktur F16G3 pada daerah deposit las (perbesaran 200x)

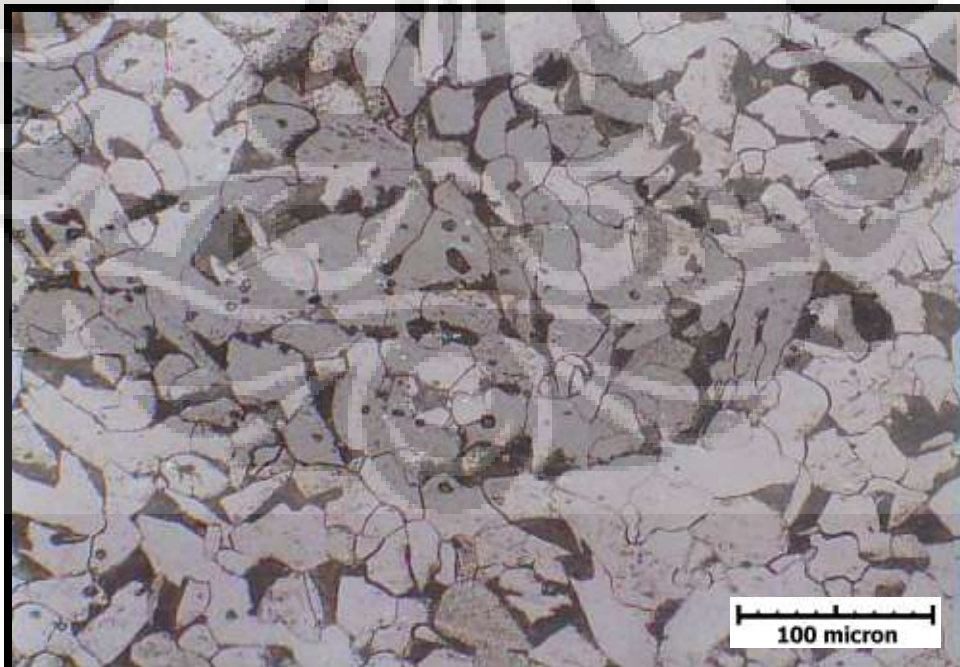


Gambar Mikrostruktur F16G3 pada daerah terpengaruh panas kasar (diatas A_1)
(perbesaran 200x)

lanjutan



Gambar Mikrostruktur F16G3 pada daerah terpengaruh panas halus (dibawah A₁)
(perbesaran 200x)



Gambar Mikrostruktur Logam Induk F20G1 (perbesaran 200x)

Lampiran 14. Data pengujian tegangan sisa F16G1 arah normal

Lambda(avr) 111 to 331 =		1.835851349						Modulus Elasticity	E	207,000,000,000	Pa	
38(d0)	normal	do	1.433010702					Poisson's Ratio	v	0.3		
38(d0)	transverse	do	1.432668985	x = longitudinal	$E/(1+v)(1-2v)$	63692307692	Pa	Stress (σ)	x	$E/(1+v)(1-2v)*((1-v)\epsilon_x+v(\epsilon_y+\epsilon_z))$		
38(d0)	longitudinal	do	1.432996601	y = transverse					y	$E/(1+v)(1-2v)*((1-v)\epsilon_y+v(\epsilon_x+\epsilon_z))$		
2Theta offset			-0.0537	z = normal					z	$E/(1+v)(1-2v)*((1-v)\epsilon_z+v(\epsilon_y+\epsilon_x))$		
	Posisi		arah	2θ corr	d	ε	$((1-v)\epsilon_x+v(\epsilon_y+\epsilon_z))$	σ	Pa	σ	Mpa	
11	-20	A	normal	79.68016	1.432810433	-0.000139754	-0.000166053	-10576274.4		-10.5762744		
10	-15	A	normal	79.70267	1.432473205	-0.000375082	-0.000202104	-12872445.43		-12.87244543		
9	-10	A	normal	79.69368	1.432607861	-0.000281115	-0.000129794	-8266851.197		-8.266851197		
8	-8	A	normal	79.72849	1.432086653	-0.00064483	-0.000229898	-14642710.44		-14.64271044		
7	-5	A	normal	79.68485	1.432740153	-0.000188797	-0.000308867	-19672434.31		-19.67243431		
1	0	A	normal	79.66229	1.4330783	4.71723E-05	-0.000290996	-18534188.74		-18.53418874		
2	5	A	normal	79.7195	1.432221211	-0.000550932	-0.000474548	-30225083.8		-30.2250838		
3	8	A	normal	79.66393	1.433053711	3.00135E-05	5.00724E-05	3189226.493		3.189226493		
4	10	A	normal	79.69722	1.432554833	-0.000318119	-9.14773E-05	-5826400.382		-5.826400382		
5	15	A	normal	79.6987	1.432532665	-0.000333589	-0.000182334	-11613269.01		-11.61326901		
6	20	A	normal	79.70443	1.432446847	-0.000393475	-0.000242866	-15468699.58		-15.46869958		
44	-20	B	normal	79.66084	1.433100041	6.2344E-05	0.000319074	20322582.24		20.32258224		
43	-15	B	normal	79.67898	1.432828117	-0.000127414	0.000475699	30298364.27		30.29836427		
42	-10	B	normal	79.71942	1.432222408	-0.000550096	0.000140751	8964750.355		8.964750355		
41	-8	B	normal	79.71214	1.432331397	-0.00047404	0.000229226	14599950.95		14.59995095		
40	-5	B	normal	79.71868	1.432233486	-0.000542366	-0.000191078	-12170206.66		-12.17020666		
34	0	B	normal	79.72579	1.432127062	-0.000616632	-0.000207729	-13230753.44		-13.23075344		
35	2	B	normal	79.74795	1.431795503	-0.000848004	-0.000518816	-33044599.8		-33.0445998		
36	4	B	normal	79.7418	1.431887498	-0.000783807	-0.000397842	-25339497.69		-25.33949769		
37	8	B	normal	79.74724	1.431806122	-0.000840593	-0.00041064	-26154579.9		-26.1545799		
38	13	B	normal	79.69865	1.432533414	-0.000333066	-8.02388E-05	-5110595.354		-5.110595354		
39	18	B	normal	79.68728	1.432703743	-0.000214205	0.000258138	16441433.85		16.44143385		

Lampiran 15. Data pengujian tegangan sisa F16G1 arah transversal

Lambda(avr) 111 to 331 =		1.835851349						Modulus Elasticity	E	207,000,000,000	Pa	
38(d0)	normal	do	1.433010702					Poisson's Ratio	v	0.3		
38(d0)	transverse	do	1.432668985	x = longitudinal	$E/(1+v)(1-2v)$	63692307692	Pa	Stress (σ)	x	$E/(1+v)(1-2v)*((1-v)\epsilon_x+v(\epsilon_y+\epsilon_z))$		
38(d0)	longitudinal	do	1.432996601	y = transverse					y	$E/(1+v)(1-2v)*((1-v)\epsilon_y+v(\epsilon_x+\epsilon_z))$		
2Theta offset			-0.0537	z = normal					z	$E/(1+v)(1-2v)*((1-v)\epsilon_z+v(\epsilon_y+\epsilon_x))$		
	Posisi		arah	2θ corr	d	ε	$((1-v)\epsilon_y+v(\epsilon_y+\epsilon_z))$	σ	Pa	σ	Mpa	
22	-20	A	transverse	79.66324	1.433064056	0.000275759	1.5263E-07	9721.360113		0.00972136		
21	-15	A	transverse	79.64964	1.433268002	0.000418113	0.000115174	7335723.497		7.335723497		
20	-10	A	transverse	79.6878	1.432695952	1.88233E-05	-9.81824E-06	-625346.3339		-0.625346334		
19	-8	A	transverse	79.69795	1.432543899	-8.73096E-05	-6.88938E-06	-438800.5576		-0.438800558		
18	-5	A	transverse	79.76556	1.431532168	-0.000793495	-0.000550746	-35078282.85		-35.07828285		
12	0	A	transverse	79.80381	1.43096064	-0.001192421	-0.000786833	-50115205.05		-50.11520505		
13	5	A	transverse	79.74881	1.431782639	-0.000618667	-0.000501643	-31950777.25		-31.95077725		
14	8	A	transverse	79.7217	1.432188279	-0.000335531	-9.61456E-05	-6123732.995		-6.123732995		
15	10	A	transverse	79.70561	1.432429176	-0.000167386	-3.11839E-05	-1986175.976		-1.986175976		
16	15	A	transverse	79.67757	1.432849248	0.000125823	1.43101E-06	91144.60778		0.091144608		
17	20	A	transverse	79.67692	1.43285899	0.000132623	-3.24267E-05	-2065328.286		-2.065328286		
33	-20	B	transverse	79.70307	1.432467215	-0.000140835	0.000237803	15146206.84		15.14620684		
32	-15	B	transverse	79.6605	1.433105139	0.000304435	0.000648438	41300536.42		41.30053642		
31	-10	B	transverse	79.63578	1.433475928	0.000563245	0.000586087	37329240.62		37.32924062		
30	-8	B	transverse	79.59644	1.434066543	0.000975493	0.000809039	51529591.98		51.52959198		
29	-5	B	transverse	79.63971	1.433416962	0.000522087	0.000234703	14948768.27		14.94876827		
23	0	B	transverse	79.62375	1.433656466	0.00068926	0.000314627	20039343.32		20.03934332		
24	2	B	transverse	79.64293	1.433368654	0.000488368	1.57327E-05	1002053.252		1.002053252		
25	4	B	transverse	79.62035	1.433707502	0.000724883	0.000205633	13097262.23		13.09726223		
26	8	B	transverse	79.64103	1.433397158	0.000508264	0.000128903	8210150.38		8.21015038		
27	13	B	transverse	79.68193	1.432783908	8.02165E-05	8.50743E-05	5418578.51		5.41857851		
28	18	B	transverse	79.67275	1.432921491	0.000176249	0.00041432	26388997.59		26.38899759		

Lampiran 16. Data pengujian tegangan sisa F16G1 arah longitudinal

Lambda(avr) 111 to 331 =		1.835851349						Modulus Elasticity	E	207,000,000,000	Pa	
38(d0)	normal	do	1.433010702					Poisson's Ratio	v	0.3		
38(d0)	transverse	do	1.432668985	x = longitudinal	$E/(1+v)(1-2v)$	63692307692	Pa	Stress (σ)	x	$E/(1+v)(1-2v)*((1-v)\epsilon_x+v(\epsilon_y+\epsilon_z))$		
38(d0)	longitudinal	do	1.432996601	y = transverse					y	$E/(1+v)(1-2v)*((1-v)\epsilon_y+v(\epsilon_x+\epsilon_z))$		
2Theta offset			-0.0537	z = normal					z	$E/(1+v)(1-2v)*((1-v)\epsilon_z+v(\epsilon_y+\epsilon_x))$		
	Posisi		arah	2θ corr	d	ε	$((1-v)\epsilon_z+v(\epsilon_y+\epsilon_x))$	σ	Pa	σ	Mpa	
1	-20	A	Longitudinal	79.71587	1.432275552	-0.000503176	-0.000311421	-19835146.52		-19.83514652		
2	-15	A	Longitudinal	79.68845	1.432686213	-0.000216601	-0.000138711	-8834830.035		-8.834830035		
3	-10	A	Longitudinal	79.6482	1.433289601	0.000204466	6.4439E-05	4104267.745		4.104267745		
4	-8	A	Longitudinal	79.58891	1.434179666	0.000825588	0.00035827	22819018.14		22.81901814		
5	-5	A	Longitudinal	79.6482	1.433289601	0.000204466	-0.000151561	-9653288.144		-9.653288144		
6	0	A	Longitudinal	79.657	1.433157622	0.000112366	-0.000264918	-16873250.11		-16.87325011		
7	5	A	Longitudinal	79.63694	1.433458522	0.000322346	-0.000125237	-7976653.93		-7.97665393		
8	8	A	Longitudinal	79.62643	1.433616241	0.000432408	0.00021103	13441001.63		13.44100163		
9	10	A	Longitudinal	79.60998	1.433863191	0.00060474	0.000277666	17685207.59		17.68520759		
10	15	A	Longitudinal	79.66346	1.433060758	4.47708E-05	-3.09901E-05	-1973828.234		-1.973828234		
11	20	A	Longitudinal	79.67004	1.432962113	-2.40676E-05	-9.51029E-05	-6057325.784		-6.057325784		
12	-20	B	Longitudinal	79.56666	1.434514069	0.001058947	0.000717716	45712961.43		45.71296143		
13	-15	B	Longitudinal	79.51717	1.435258624	0.001578526	0.001158075	73760466.03		73.76046603		
14	-10	B	Longitudinal	79.55422	1.434701125	0.001189482	0.000836582	53283848.61		53.28384861		
15	-8	B	Longitudinal	79.58232	1.434278688	0.000894689	0.000776718	49470958.48		49.47095848		
16	-5	B	Longitudinal	79.65756	1.433149224	0.000106506	6.84706E-05	4361048.383		4.361048383		
17	0	B	Longitudinal	79.66228	1.43307845	5.7117E-05	6.17703E-05	3934292.994		3.934292994		
18	2	B	Longitudinal	79.6906	1.432654002	-0.000239079	-0.000275246	-17531059.91		-17.53105991		
19	4	B	Longitudinal	79.68898	1.432678273	-0.000222142	-0.000173177	-11030011.87		-11.03001187		
20	8	B	Longitudinal	79.65968	1.433117435	8.4322E-05	-4.06734E-05	-2590583.396		-2.590583396		
21	13	B	Longitudinal	79.62671	1.433612038	0.000429475	0.000224778	14316620.35		14.31662035		
22	18	B	Longitudinal	79.55474	1.434693305	0.001184025	0.00081743	52064032.51		52.06403251		

Lampiran 17. Data pengujian tegangan sisa F16G3 arah normal

Lambda(avr) 111 to 331 =		1.835851349						Modulus Elasticity	E	207,000,000,000	Pa
38(d0)	normal	do	1.433010702					Poisson's Ratio	v	0.3	
38(d0)	transverse	do	1.432668985	x = longitudinal	$E/(1+v)(1-2v)$	63692307692	Pa	Stress (σ)	x	$E/(1+v)(1-2v)*((1-v)\epsilon_x+v(\epsilon_y+\epsilon_z))$	
38(d0)	longitudinal	do	1.432996601	y = transverse					y	$E/(1+v)(1-2v)*((1-v)\epsilon_y+v(\epsilon_x+\epsilon_z))$	
2Theta offset			-0.0537	z = normal					z	$E/(1+v)(1-2v)*((1-v)\epsilon_z+v(\epsilon_y+\epsilon_x))$	
	Posisi		arah	2 θ corr	d	ϵ	$((1-v)\epsilon_x+v(\epsilon_y+\epsilon_z))$	σ	Pa	σ	Mpa
11	-20	A	normal	79.69923	1.432524727	-0.000339129	-0.000150985	-9616587.594		-9.616587594	
10	-15	A	normal	79.69742	1.432551837	-0.00032021	-0.000166314	-10592935.11		-10.59293511	
9	-10	A	normal	79.69055	1.432654751	-0.000248393	6.0273E-05	3838925.243		3.838925243	
8	-8	A	normal	79.66905	1.432976953	-2.35506E-05	0.000119395	7604561.396		7.604561396	
7	-5	A	normal	79.70776	1.43239698	-0.000428274	-0.000134671	-8577516.399		-8.577516399	
1	0	A	normal	79.66175	1.433086397	5.28224E-05	4.31606E-06	274899.9443		0.274899944	
2	5	A	normal	79.67345	1.432910998	-6.9576E-05	6.07294E-05	3867997.596		3.867997596	
3	8	A	normal	79.72583	1.432126463	-0.00061705	-0.000249521	-15892540.69		-15.89254069	
4	10	A	normal	79.68221	1.432779712	-0.000161191	0.00010432	6644406.924		6.644406924	
5	15	A	normal	79.67644	1.432866184	-0.000100849	0.000176677	11252990.32		11.25299032	
6	20	A	normal	79.7027	1.432472756	-0.000375395	-3.16925E-06	-201856.9093		-0.201856909	
22	-18	B	normal	79.71515	1.432286331	-0.000505488	-0.000320334	-20402786.18		-20.40278618	
21	-13	B	normal	79.72407	1.432152805	-0.000598667	-0.000198206	-12624174.11		-12.62417411	
20	-8	B	normal	79.68628	1.432718726	-0.000203749	0.000240339	15307751.94		15.30775194	
19	-4	B	normal	79.70772	1.432397579	-0.000427856	3.19476E-06	203481.3338		0.203481334	
18	-2	B	normal	79.71854	1.432235581	-0.000540903	1.86553E-05	1188200.646		1.188200646	
12	0	B	normal	79.70132	1.432493424	-0.000360973	6.54386E-05	4167935.662		4.167935662	
13	2	B	normal	79.71327	1.432314478	-0.000485847	0.000136004	8662405.065		8.662405065	
14	4	B	normal	79.70766	1.432398478	-0.000427229	-8.7754E-05	-5589252.942		-5.589252942	
15	8	B	normal	79.67924	1.43282422	-0.000130133	0.000274352	17474136.85		17.47413685	
16	13	B	normal	79.7303	1.432059566	-0.000663732	-0.000107844	-6868833.418		-6.868833418	
17	18	B	normal	79.70388	1.432455084	-0.000387727	-0.000171596	-10929316.17		-10.92931617	

Lampiran 18. Data pengujian tegangan sisa F16G3 arah transversal

Lambda(avr) 111 to 331 =			1.835851349					Modulus Elasticity	E	207,000,000,000	Pa
38(d0)	normal	do	1.433010702					Poisson's Ratio	v	0.3	
38(d0)	transverse	do	1.432668985	x = longitudinal	$E/(1+v)(1-2v)$	63692307692	Pa	Stress (σ)	x	$E/(1+v)(1-2v)*((1-v)\epsilon_x+v(\epsilon_y+\epsilon_z))$	
38(d0)	longitudinal	do	1.432996601	y = transverse					y	$E/(1+v)(1-2v)*((1-v)\epsilon_y+v(\epsilon_x+\epsilon_z))$	
2Theta offset			-0.0537	z = normal					z	$E/(1+v)(1-2v)*((1-v)\epsilon_z+v(\epsilon_y+\epsilon_x))$	
	Posisi		arah	2 θ corr	d	ϵ	$((1-v)\epsilon_y+v(\epsilon_y+\epsilon_z))$	σ	Pa	σ	Mpa
33	-20	A	transverse	79.67962	1.432818525	0.000104379	2.6418E-05	1682623.218		1.682623218	
32	-15	A	transverse	79.66963	1.432968259	0.000208893	4.53268E-05	2886970.299		2.886970299	
31	-10	A	transverse	79.67455	1.432894511	0.000157417	0.000222597	14177723.53		14.17772353	
30	-8	A	transverse	79.68243	1.432776416	7.49867E-05	0.00015881	10114989.01		10.11498901	
29	-5	A	transverse	79.67955	1.432819574	0.000105111	7.8683E-05	5011502.144		5.011502144	
23	0	A	transverse	79.7484	1.431788772	-0.000614387	-0.000262568	-16723535.48		-16.72353548	
24	5	A	transverse	79.71095	1.432349214	-0.000223199	-7.19744E-07	-45842.18271		-0.045842183	
25	8	A	transverse	79.68164	1.432788254	8.32498E-05	3.05992E-05	1948932.647		1.948932647	
26	10	A	transverse	79.68265	1.432773119	7.26856E-05	0.000197871	12602876.36		12.60287636	
27	15	A	transverse	79.68618	1.432720225	3.57656E-05	0.000231323	14733513.31		14.73351331	
28	20	A	transverse	79.6732	1.432914746	0.000171541	0.000215605	13732393.11		13.73239311	
44	-18	B	transverse	79.67674	1.432861687	0.000134506	-6.43358E-05	-4097697.303		-4.097697303	
43	-13	B	transverse	79.65914	1.433125532	0.000318669	0.000168729	10746731		10.746731	
42	-8	B	transverse	79.63424	1.433499035	0.000579374	0.000553588	35259322.46		35.25932246	
41	-4	B	transverse	79.66847	1.432985648	0.00022103	0.000262749	16735111.39		16.73511139	
40	-2	B	transverse	79.62627	1.433618642	0.000662859	0.00050016	31856357.18		31.85635718	
34	0	B	transverse	79.66556	1.433029273	0.000251481	0.00031042	19771368.36		19.77136836	
35	2	B	transverse	79.62364	1.433658117	0.000690412	0.000606507	38629860.16		38.62986016	
36	4	B	transverse	79.68257	1.432774318	7.35224E-05	0.000112547	7168353.267		7.168353267	
37	8	B	transverse	79.62982	1.433565364	0.000625671	0.000576674	36729679.33		36.72967933	
38	13	B	transverse	79.65263	1.433223157	0.000386812	0.000312374	19895792.23		19.89579223	
39	18	B	transverse	79.67972	1.432817027	0.000103333	2.48287E-05	1581397.154		1.581397154	

Lampiran 19. Data pengujian tegangan sisa F16G3 arah longitudinal

Lambda(avr) 111 to 331 =			1.835851349					Modulus Elasticity	E	207,000,000,000	Pa
38(d0)	normal	do	1.433010702					Poisson's Ratio	v	0.3	
38(d0)	transverse	do	1.432668985	x = longitudinal	$E/(1+v)(1-2v)$	63692307692	Pa	Stress (σ)	x	$E/(1+v)(1-2v)*((1-v)\epsilon_x+v(\epsilon_y+\epsilon_z))$	
38(d0)	longitudinal	do	1.432996601	y = transverse					y	$E/(1+v)(1-2v)*((1-v)\epsilon_y+v(\epsilon_x+\epsilon_z))$	
2Theta offset			-0.0537	z = normal					z	$E/(1+v)(1-2v)*((1-v)\epsilon_z+v(\epsilon_y+\epsilon_x))$	
	Posisi		arah	2 θ corr	d	ϵ	$((1-v)\epsilon_z+v(\epsilon_y+\epsilon_x))$	σ	Pa	σ	Mpa
1	-20	A	Longitudinal	79.65019	1.433259753	0.000183637	5.81212E-05	3701874.355		3.701874355	
2	-15	A	Longitudinal	79.66928	1.432973505	-1.61173E-05	-4.46772E-05	-2845593.502		-2.845593502	
3	-10	A	Longitudinal	79.60823	1.43388947	0.000623078	0.000408861	26041325.4		26.0413254	
4	-8	A	Longitudinal	79.63163	1.433538201	0.000377949	0.000279995	17833535.01		17.83353501	
5	-5	A	Longitudinal	79.6252	1.433634702	0.000445291	0.000214755	13678228.56		13.67822856	
6	0	A	Longitudinal	79.61945	1.433721012	0.000505521	0.000185396	11808277.42		11.80827742	
7	5	A	Longitudinal	79.61158	1.433839167	0.000587974	0.00032375	20620361.69		20.62036169	
8	8	A	Longitudinal	79.61761	1.433748634	0.000524797	0.000207218	13198201.3		13.1982013	
9	10	A	Longitudinal	79.60555	1.433929715	0.000651163	0.000429262	27340687.45		27.34068745	
5	15	A	Longitudinal	79.59245	1.434126482	0.000788474	0.000532407	33910200.74		33.91020074	
6	20	A	Longitudinal	79.60148	1.43399084	0.000693818	0.000424516	27038409.34		27.03840934	
4	-18	B	Longitudinal	79.66992	1.432963912	-2.28123E-05	-0.000127263	-8105687.048		-8.105687048	
3	-13	B	Longitudinal	79.62785	1.433594929	0.000417536	0.000208276	13265549.99		13.26554999	
	-8	B	Longitudinal	79.60116	1.433995646	0.000697172	0.000600708	38260453.54		38.26045354	
10	-4	B	Longitudinal	79.5925	1.43412573	0.00078795	0.000489517	31178466.46		31.17846646	
11	-2	B	Longitudinal	79.60457	1.433944433	0.000661433	0.00049959	31820024.78		31.82002478	
12	0	B	Longitudinal	79.5905	1.434155777	0.000808918	0.000533395	33973139.36		33.97313936	
13	2	B	Longitudinal	79.58214	1.434281392	0.000896576	0.000688973	43882292.88		43.88229288	
14	4	B	Longitudinal	79.60749	1.433900582	0.000630832	0.000335471	21366892.29		21.36689229	
15	8	B	Longitudinal	79.61115	1.433845623	0.00059248	0.000563397	35884085.04		35.88408504	
1	13	B	Longitudinal	79.59112	1.434146463	0.000802417	0.000478616	30484149.16		30.48414916	
2	18	B	Longitudinal	79.64582	1.433325301	0.000229379	7.52472E-05	4792664.838		4.792664838	

Lampiran 20. LOG Data pengukuran tegangan sisa

no.	mulai	selesai	hasil pengujian		sudut			waktu		code	keterangan		
27	5/16/2009 11:00	5/16/2009 11:27	E561R027.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	60	SEC	7937	UI FCAW F16G1 0mm Norm A Slit 5x5 5x5 170 95		
28	5/16/2009 11:27	5/16/2009 11:54	E561R028.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	60	SEC	7927	UI FCAW F16G1 5mm Norm A Slit 5x5 5x5 170 95		
29	5/16/2009 11:54	5/16/2009 12:22	E561R029.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	60	SEC	8092	UI FCAW F16G1 8mm Norm A Slit 5x5 5x5 170 95		
30	5/16/2009 12:23	5/16/2009 12:50	E561R030.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	60	SEC	7946	UI FCAW F16G1 10mm Norm A Slit 5x5 5x5 170 95		
31	5/16/2009 12:50	5/16/2009 13:17	E561R031.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	60	SEC	8023	UI FCAW F16G1 15mm Norm A Slit 5x5 5x5 170 95		
32	5/16/2009 13:17	5/16/2009 13:45	E561R032.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	60	SEC	7905	UI FCAW F16G1 20mm Norm A Slit 5x5 5x5 170 95		
33	5/16/2009 13:45	5/16/2009 14:13	E561R033.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	60	SEC	8113	UI FCAW F16G1 -5mm Norm A Slit 5x5 5x5 170 95		
34	5/16/2009 14:13	5/16/2009 14:40	E561R034.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	60	SEC	8046	UI FCAW F16G1 -8mm Norm A Slit 5x5 5x5 170 95		
35	5/16/2009 14:40	5/16/2009 15:07	E561R035.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	60	SEC	7937	UI FCAW F16G1 -10mm Norm A Slit 5x5 5x5 170 95		
36	5/16/2009 15:07	5/16/2009 15:35	E561R036.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	60	SEC	7927	UI FCAW F16G1 -15mm Norm A Slit 5x5 5x5 170 95		
37	5/16/2009 15:35	5/16/2009 16:02	E561R037.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	60	SEC	8003	UI FCAW F16G1 -20mm Norm A Slit 5x5 5x5 170 95		
38	5/16/2009 16:06	5/16/2009 16:45	E561R038.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	7903	UI FCAW F16G1 0mm Transv. A Slit 5x5 5x5 170 95		
2	5/17/2009 10:42	5/17/2009 11:25	E562R002.CSV	S2	78.5	81	0.1	90	SEC	8152	UI FCAW F16G1 5mm Transv. A Slit 5x5 5x5 170 95		
3	5/17/2009 11:25	5/17/2009 12:08	E562R003.CSV	S2	78.5	81	0.1	90	SEC	8087	UI FCAW F16G1 8mm Transv. A Slit 5x5 5x5 170 95		
4	5/17/2009 12:08	5/17/2009 12:51	E562R004.CSV	S2	78.5	81	0.1	90	SEC	8033	UI FCAW F16G1 10mm Transv. A Slit 5x5 5x5 170 95		
5	5/17/2009 12:51	5/17/2009 13:34	E562R005.CSV	S2	78.5	81	0.1	90	SEC	8179	UI FCAW F16G1 15mm Transv. A Slit 5x5 5x5 170 95		
6	5/17/2009 13:34	5/17/2009 14:17	E562R006.CSV	S2	78.5	81	0.1	90	SEC	8038	UI FCAW F16G1 20mm Transv. A Slit 5x5 5x5 170 95		
7	5/17/2009 14:17	5/17/2009 15:01	E562R007.CSV	S2	78.5	81	0.1	90	SEC	8104	UI FCAW F16G1 -5mm Tranvs. A Slit 5x5 5x5 170 95		
8	5/17/2009 15:01	5/17/2009 15:43	E562R008.CSV	S2	78.5	81	0.1	90	SEC	8016	UI FCAW F16G1 -8mm Tranvs. A Slit 5x5 5x5 170 95		
9	5/17/2009 15:44	5/17/2009 16:27	E562R009.CSV	S2	78.5	81	0.1	90	SEC	8161	UI FCAW F16G1 -10mm Tranvs. A Slit 5x5 5x5 170 95		
10	5/17/2009 16:27	5/17/2009 17:10	E562R010.CSV	S2	78.5	81	0.1	90	SEC	8138	UI FCAW F16G1 -15mm Tranvs. A Slit 5x5 5x5 170 95		
11	5/17/2009 17:10	5/17/2009 17:52	E562R011.CSV	S2	78.5	81	0.1	90	SEC	7959	UI FCAW F16G1 -20mm Tranvs. A Slit 5x5 5x5 170 95		
12	5/17/2009 17:52	5/17/2009 18:36	E562R012.CSV	S2	78.5	81	0.1	90	SEC	8200	UI FCAW F16G1 0mm Transv. B Slit 5x5 5x5 170 95		
13	5/17/2009 18:36	5/17/2009 19:19	E562R013.CSV	S2	78.5	81	0.1	90	SEC	8077	UI FCAW F16G1 2mm Transv. B Slit 5x5 5x5 170 95		
14	5/17/2009 19:19	5/17/2009 20:02	E562R014.CSV	S2	78.5	81	0.1	90	SEC	8134	UI FCAW F16G1 4mm Transv. B Slit 5x5 5x5 170 95		
15	5/17/2009 20:02	5/17/2009 20:45	E562R015.CSV	S2	78.5	81	0.1	90	SEC	8064	UI FCAW F16G1 8mm Transv. B Slit 5x5 5x5 170 95		
16	5/17/2009 20:45	5/17/2009 21:28	E562R016.CSV	S2	78.5	81	0.1	90	SEC	8149	UI FCAW F16G1 13mm Transv. B Slit 5x5 5x5 170 95		
17	5/17/2009 21:28	5/17/2009 22:11	E562R017.CSV	S2	78.5	81	0.1	90	SEC	8184	UI FCAW F16G1 18mm Transv. B Slit 5x5 5x5 170 95		
18	5/17/2009 22:11	5/17/2009 22:54	E562R018.CSV	S2	78.5	81	0.1	90	SEC	8031	UI FCAW F16G1 -2mm Tranvs. B Slit 5x5 5x5 170 95		
19	5/17/2009 22:54	5/17/2009 23:37	E562R019.CSV	S2	78.5	81	0.1	90	SEC	8147	UI FCAW F16G1 -4mm Tranvs. B Slit 5x5 5x5 170 95		

20	5/17/2009 23:37	5/18/2009 0:20	E562R020.CSV	S2	78.5	81	0.1	90	SEC	8165	UI FCAW F16G1 -8mm Tranvs. B Slit 5x5 5x5 170 95
21	5/18/2009 0:20	5/18/2009 1:03	E562R021.CSV	S2	78.5	81	0.1	90	SEC	8124	UI FCAW F16G1 -13mm Tranvs. B Slit 5x5 5x5 170 95
22	5/18/2009 1:03	5/18/2009 1:46	E562R022.CSV	S2	78.5	81	0.1	90	SEC	8079	UI FCAW F16G1 -18mm Tranvs. B Slit 5x5 5x5 170 95
23	5/18/2009 1:49	5/18/2009 2:06	E562R023.CSV	S2	78.5	81	0.1	30	SEC	8137	UI FCAW F16G1 0mm Norm B Slit 5x5 5x5 170 95
24	5/18/2009 2:06	5/18/2009 2:23	E562R024.CSV	S2	78.5	81	0.1	30	SEC	8052	UI FCAW F16G1 2mm Norm B Slit 5x5 5x5 170 95
25	5/18/2009 2:23	5/18/2009 2:40	E562R025.CSV	S2	78.5	81	0.1	30	SEC	8099	UI FCAW F16G1 4mm Norm B Slit 5x5 5x5 170 95
26	5/18/2009 2:40	5/18/2009 2:57	E562R026.CSV	S2	78.5	81	0.1	30	SEC	8192	UI FCAW F16G1 8mm Norm B Slit 5x5 5x5 170 95
27	5/18/2009 2:57	5/18/2009 3:15	E562R027.CSV	S2	78.5	81	0.1	30	SEC	8129	UI FCAW F16G1 13mm Norm B Slit 5x5 5x5 170 95
28	5/18/2009 3:15	5/18/2009 3:31	E562R028.CSV	S2	78.5	81	0.1	30	SEC	8055	UI FCAW F16G1 18mm Norm B Slit 5x5 5x5 170 95
29	5/18/2009 3:31	5/18/2009 3:48	E562R029.CSV	S2	78.5	81	0.1	30	SEC	8066	UI FCAW F16G1 -2mm Norm B Slit 5x5 5x5 170 95
30	5/18/2009 3:48	5/18/2009 4:06	E562R030.CSV	S2	78.5	81	0.1	30	SEC	8264	UI FCAW F16G1 -4mm Norm B Slit 5x5 5x5 170 95
31	5/18/2009 4:06	5/18/2009 4:24	E562R031.CSV	S2	78.5	81	0.1	30	SEC	8243	UI FCAW F16G1 -8mm Norm B Slit 5x5 5x5 170 95
32	5/18/2009 4:24	5/18/2009 4:41	E562R032.CSV	S2	78.5	81	0.1	30	SEC	8152	UI FCAW F16G1 -13mm Norm B Slit 5x5 5x5 170 95
33	5/18/2009 4:41	5/18/2009 4:59	E562R033.CSV	S2	78.5	81	0.1	30	SEC	8180	UI FCAW F16G1 -18mm Norm B Slit 5x5 5x5 170 95
6	5/18/2009 13:07	5/18/2009 13:08	E563R006.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	30	SEC	16743	UI FCAW F16G3 0mm Norm A Slit 5x5 5x5 170 95
7	5/18/2009 13:13	5/18/2009 13:14	E563R007.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	30	SEC	8302	UI FCAW F16G3 -5mm Norm A Slit 5x5 5x5 170 95
8	5/18/2009 13:14	5/18/2009 13:30	E563R008.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	30	SEC	8215	UI FCAW F16G3 0mm Norm A Slit 5x5 5x5 170 95
9	5/18/2009 13:30	5/18/2009 13:45	E563R009.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	30	SEC	8070	UI FCAW F16G3 5mm Norm A Slit 5x5 5x5 170 95
10	5/18/2009 13:45	5/18/2009 14:01	E563R010.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	30	SEC	8088	UI FCAW F16G3 8mm Norm A Slit 5x5 5x5 170 95
11	5/18/2009 14:01	5/18/2009 14:17	E563R011.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	30	SEC	8193	UI FCAW F16G3 10mm Norm A Slit 5x5 5x5 170 95
12	5/18/2009 14:17	5/18/2009 14:34	E563R012.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	30	SEC	8109	UI FCAW F16G3 15mm Norm A Slit 5x5 5x5 170 95
13	5/18/2009 14:34	5/18/2009 14:48	E563R013.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	30	SEC	8030	UI FCAW F16G3 20mm Norm A Slit 5x5 5x5 170 95
14	5/18/2009 14:48	5/18/2009 15:04	E563R014.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	30	SEC	8071	UI FCAW F16G3 -5mm Norm A Slit 5x5 5x5 170 95
15	5/18/2009 15:04	5/18/2009 15:20	E563R015.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	30	SEC	8080	UI FCAW F16G3 -8mm Norm A Slit 5x5 5x5 170 95
16	5/18/2009 15:20	5/18/2009 15:36	E563R016.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	30	SEC	7973	UI FCAW F16G3 -10mm Norm A Slit 5x5 5x5 170 95
17	5/18/2009 15:36	5/18/2009 15:53	E563R017.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	30	SEC	8008	UI FCAW F16G3 -15mm Norm A Slit 5x5 5x5 170 95
18	5/18/2009 15:53	5/18/2009 16:09	E563R018.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	30	SEC	8001	UI FCAW F16G3 -20mm Norm A Slit 5x5 5x5 170 95
24	5/18/2009 18:43	5/18/2009 19:17	E563R024.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	75	SEC	8058	UI FCAW F16G3 0mm Transv. A Slit 5x5 5x5 170 95
25	5/18/2009 19:17	5/18/2009 19:50	E563R025.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	75	SEC	7874	UI FCAW F16G3 5mm Transv. A Slit 5x5 5x5 170 95
26	5/18/2009 19:50	5/18/2009 20:23	E563R026.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	75	SEC	7923	UI FCAW F16G3 8mm Transv. A Slit 5x5 5x5 170 95
27	5/18/2009 20:23	5/18/2009 20:56	E563R027.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	75	SEC	7950	UI FCAW F16G3 10mm Transv. A Slit 5x5 5x5 170 95
28	5/18/2009 20:57	5/18/2009 21:30	E563R028.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	75	SEC	7998	UI FCAW F16G3 15mm Transv. A Slit 5x5 5x5 170 95
29	5/18/2009 21:30	5/18/2009 22:03	E563R029.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	75	SEC	7843	UI FCAW F16G3 20mm Transv. A Slit 5x5 5x5 170 95

lanjutan

30	5/18/2009 22:03	5/18/2009 22:36	E563R030.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	75	SEC	8011	UI FCAW F16G3 -5mm Tranvs. A Slit 5x5 5x5 170 95
31	5/18/2009 22:36	5/18/2009 23:09	E563R031.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	75	SEC	7969	UI FCAW F16G3 -8mm Tranvs. A Slit 5x5 5x5 170 95
32	5/18/2009 23:09	5/18/2009 23:42	E563R032.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	75	SEC	7879	UI FCAW F16G3 -10mm Tranvs. A Slit 5x5 5x5 170 95
33	5/18/2009 23:42	5/19/2009 0:15	E563R033.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	75	SEC	7860	UI FCAW F16G3 -15mm Tranvs. A Slit 5x5 5x5 170 95
34	5/19/2009 0:16	5/19/2009 0:50	E563R034.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	75	SEC	8198	UI FCAW F16G3 -20mm Tranvs. A Slit 5x5 5x5 170 95
35	5/19/2009 0:50	5/19/2009 1:23	E563R035.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	75	SEC	8035	UI FCAW F16G3 0mm Tranvs. B Slit 5x5 5x5 170 95
36	5/19/2009 1:23	5/19/2009 1:58	E563R036.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	75	SEC	8124	UI FCAW F16G3 2mm Tranvs. B Slit 5x5 5x5 170 95
37	5/19/2009 1:58	5/19/2009 2:31	E563R037.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	75	SEC	8003	UI FCAW F16G3 4mm Tranvs. B Slit 5x5 5x5 170 95
38	5/19/2009 2:31	5/19/2009 3:04	E563R038.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	75	SEC	7861	UI FCAW F16G3 8mm Tranvs. B Slit 5x5 5x5 170 95
39	5/19/2009 3:04	5/19/2009 3:37	E563R039.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	75	SEC	7957	UI FCAW F16G3 13mm Tranvs. B Slit 5x5 5x5 170 95
40	5/19/2009 3:37	5/19/2009 4:10	E563R040.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	75	SEC	8004	UI FCAW F16G3 18mm Tranvs. B Slit 5x5 5x5 170 95
41	5/19/2009 4:11	5/19/2009 4:44	E563R041.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	75	SEC	8091	UI FCAW F16G3 -2mm Tranvs. B Slit 5x5 5x5 170 95
42	5/19/2009 4:44	5/19/2009 5:17	E563R042.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	75	SEC	7970	UI FCAW F16G3 -4mm Tranvs. B Slit 5x5 5x5 170 95
43	5/19/2009 5:17	5/19/2009 5:50	E563R043.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	75	SEC	7938	UI FCAW F16G3 -8mm Tranvs. B Slit 5x5 5x5 170 95
44	5/19/2009 5:50	5/19/2009 6:23	E563R044.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	75	SEC	7974	UI FCAW F16G3 -13mm Tranvs. B Slit 5x5 5x5 170 95
45	5/19/2009 6:23	5/19/2009 6:56	E563R045.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	75	SEC	7950	UI FCAW F16G3 -18mm Tranvs. B Slit 5x5 5x5 170 95
46	5/19/2009 7:00	5/19/2009 7:15	E563R046.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	30	SEC	7899	UI FCAW F16G3 0mm Norm B Slit 5x5 5x5 170 95
47	5/19/2009 7:15	5/19/2009 7:31	E563R047.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	30	SEC	8009	UI FCAW F16G3 2mm Norm B Slit 5x5 5x5 170 95
48	5/19/2009 7:31	5/19/2009 7:47	E563R048.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	30	SEC	7898	UI FCAW F16G3 4mm Norm B Slit 5x5 5x5 170 95
49	5/19/2009 7:47	5/19/2009 8:01	E563R049.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	30	SEC	7843	UI FCAW F16G3 8mm Norm B Slit 5x5 5x5 170 95
50	5/19/2009 8:01	5/19/2009 8:17	E563R050.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	30	SEC	7945	UI FCAW F16G3 13mm Norm B Slit 5x5 5x5 170 95
51	5/19/2009 8:17	5/19/2009 8:33	E563R051.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	30	SEC	7937	UI FCAW F16G3 18mm Norm B Slit 5x5 5x5 170 95
52	5/19/2009 8:33	5/19/2009 8:49	E563R052.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	30	SEC	8080	UI FCAW F16G3 -2mm Norm B Slit 5x5 5x5 170 95
53	5/19/2009 8:49	5/19/2009 9:05	E563R053.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	30	SEC	8008	UI FCAW F16G3 -4mm Norm B Slit 5x5 5x5 170 95
54	5/19/2009 9:05	5/19/2009 9:21	E563R054.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	30	SEC	7996	UI FCAW F16G3 -8mm Norm B Slit 5x5 5x5 170 95
55	5/19/2009 9:21	5/19/2009 9:37	E563R055.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	30	SEC	7931	UI FCAW F16G3 -13mm Norm B Slit 5x5 5x5 170 95
56	5/19/2009 9:37	5/19/2009 9:52	E563R056.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	30	SEC	7878	UI FCAW F16G3 -18mm Norm B Slit 5x5 5x5 170 95
2	5/24/2009 13:46	5/24/2009 14:25	E580R002.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	7967	UI FCAW F16G1 0mm Long A Slit 5x5 5x5 170 95
3	5/24/2009 14:25	5/24/2009 15:05	E580R003.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8091	UI FCAW F16G1 5mm long A Slit 5x5 5x5 170 95
4	5/24/2009 15:05	5/24/2009 15:46	E580R004.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8171	UI FCAW F16G1 8mm long A Slit 5x5 5x5 170 95
5	5/24/2009 15:46	5/24/2009 16:25	E580R005.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8068	UI FCAW F16G1 10mm long A Slit 5x5 5x5 170 95
6	5/24/2009 16:25	5/24/2009 17:05	E580R006.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8053	UI FCAW F16G1 15mm long A Slit 5x5 5x5 170 95
7	5/24/2009 17:05	5/24/2009 17:45	E580R007.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8332	UI FCAW F16G1 20mm long A Slit 5x5 5x5 170 95

lanjutan

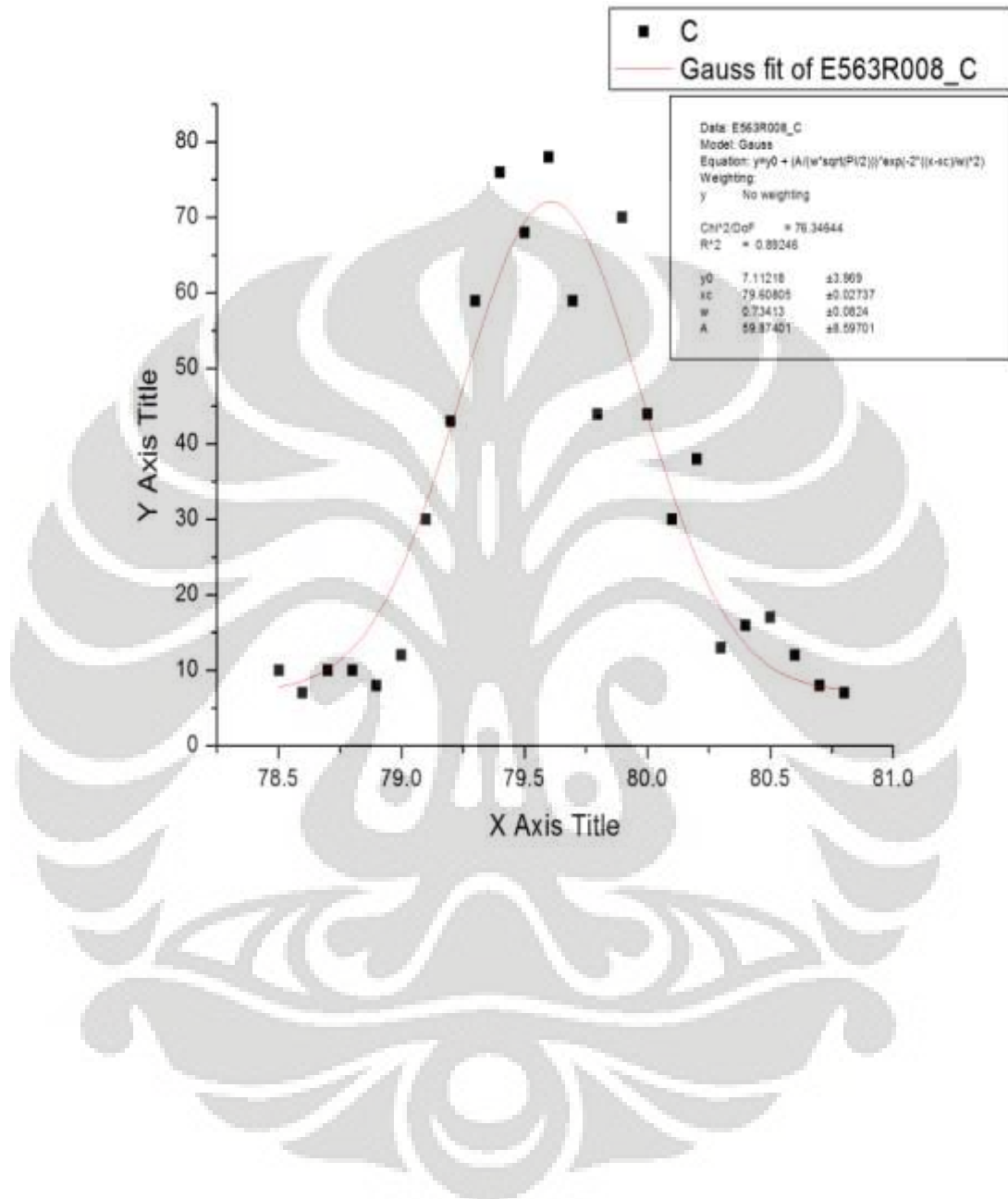
8	5/24/2009 17:45	5/24/2009 18:25	E580R008.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8092	UI FCAW F16G1 -5mm long A Slit 5x5 5x5 170 95
9	5/24/2009 18:25	5/24/2009 19:04	E580R009.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8067	UI FCAW F16G1 -8mm long A Slit 5x5 5x5 170 95
10	5/24/2009 19:04	5/24/2009 19:44	E580R010.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8012	UI FCAW F16G1 -10mm long A Slit 5x5 5x5 170 95
11	5/24/2009 19:44	5/24/2009 20:23	E580R011.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8106	UI FCAW F16G1 -15mm long A Slit 5x5 5x5 170 95
12	5/24/2009 20:23	5/24/2009 21:02	E580R012.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8138	UI FCAW F16G1 -20mm long A Slit 5x5 5x5 170 95
13	5/24/2009 21:02	5/24/2009 21:42	E580R013.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8123	UI FCAW F16G1 0mm long B Slit 5x5 5x5 170 95
14	5/24/2009 21:42	5/24/2009 22:21	E580R014.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8167	UI FCAW F16G1 2mm long B Slit 5x5 5x5 170 95
15	5/24/2009 22:21	5/24/2009 23:00	E580R015.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8238	UI FCAW F16G1 4mm long B Slit 5x5 5x5 170 95
16	5/24/2009 23:00	5/24/2009 23:40	E580R016.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8229	UI FCAW F16G1 8mm long B Slit 5x5 5x5 170 95
17	5/24/2009 23:40	5/25/2009 0:19	E580R017.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8274	UI FCAW F16G1 13mm long B Slit 5x5 5x5 170 95
18	5/25/2009 0:19	5/25/2009 0:58	E580R018.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8372	UI FCAW F16G1 18mm long B Slit 5x5 5x5 170 95
19	5/25/2009 0:59	5/25/2009 1:38	E580R019.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8237	UI FCAW F16G1 -2mm long B Slit 5x5 5x5 170 95
20	5/25/2009 1:38	5/25/2009 2:17	E580R020.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8285	UI FCAW F16G1 -4mm long B Slit 5x5 5x5 170 95
21	5/25/2009 2:17	5/25/2009 2:57	E580R021.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8276	UI FCAW F16G1 -8mm long B Slit 5x5 5x5 170 95
22	5/25/2009 2:57	5/25/2009 3:36	E580R022.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8300	UI FCAW F16G1 -13mm long B Slit 5x5 5x5 170 95
23	5/25/2009 3:36	5/25/2009 4:15	E580R023.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8224	UI FCAW F16G1 -18mm long B Slit 5x5 5x5 170 95
24	5/25/2009 4:16	5/25/2009 4:55	E580R024.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8149	UI FCAW F16G3 0mm Long A Slit 5x5 5x5 170 95
25	5/25/2009 4:55	5/25/2009 5:35	E580R025.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8249	UI FCAW F16G3 5mm long A Slit 5x5 5x5 170 95
26	5/25/2009 5:35	5/25/2009 6:14	E580R026.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8292	UI FCAW F16G3 8mm long A Slit 5x5 5x5 170 95
27	5/25/2009 6:14	5/25/2009 6:53	E580R027.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8384	UI FCAW F16G3 10mm long A Slit 5x5 5x5 170 95
28	5/25/2009 6:53	5/25/2009 7:33	E580R028.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8312	UI FCAW F16G3 -5mm long A Slit 5x5 5x5 170 95
29	5/25/2009 7:33	5/25/2009 8:12	E580R029.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8199	UI FCAW F16G3 -8mm long A Slit 5x5 5x5 170 95
30	5/25/2009 8:12	5/25/2009 8:51	E580R030.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8271	UI FCAW F16G3 -10mm long A Slit 5x5 5x5 170 95
31	5/25/2009 8:52	5/25/2009 9:32	E580R031.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8359	UI FCAW F16G3 -15mm long A Slit 5x5 5x5 170 95
32	5/25/2009 9:32	5/25/2009 10:13	E580R032.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8389	UI FCAW F16G3 -20mm long A Slit 5x5 5x5 170 95
33	5/25/2009 10:13	5/25/2009 10:52	E580R033.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8104	UI FCAW F16G3 0mm long B Slit 5x5 5x5 170 95
34	5/25/2009 10:52	5/25/2009 11:32	E580R034.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8317	UI FCAW F16G3 2mm long B Slit 5x5 5x5 170 95
1	5/25/2009 11:33	5/25/2009 12:12	E580R035.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8314	UI FCAW F16G3 4mm long B Slit 5x5 5x5 170 95
2	5/25/2009 12:12	5/25/2009 12:51	E580R036.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8498	UI FCAW F16G3 8mm long B Slit 5x5 5x5 170 95
3	5/25/2009 12:51	5/25/2009 13:31	E580R037.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8471	UI FCAW F16G3 -2mm long B Slit 5x5 5x5 170 95
4	5/25/2009 13:31	5/25/2009 14:10	E580R038.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8415	UI FCAW F16G3 -4mm long B Slit 5x5 5x5 170 95
5	5/25/2009 14:10	5/25/2009 14:49	E580R039.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8344	UI FCAW F16G3 -8mm long B Slit 5x5 5x5 170 95
6	5/25/2009 14:50	5/25/2009 14:52	E580R040.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	90	SEC	8392	UI FCAW F16G3 -13mm long B Slit 5x5 5x5 170 95

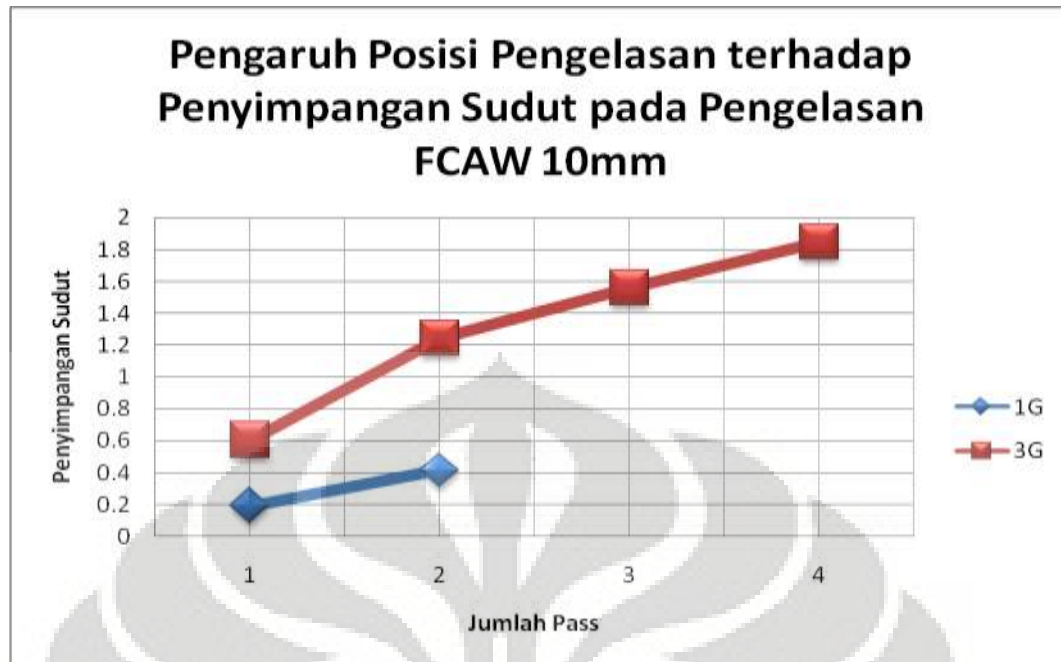
lanjutan

35	5/25/2009 22:32	5/25/2009 23:22	E580R069.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	120	SEC	8255	UI FCAW F16G3 13mm Long B Slit 5x5 5x5 170 95
36	5/25/2009 23:22	5/26/2009 0:14	E580R070.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	120	SEC	8558	UI FCAW F16G3 18mm long B Slit 5x5 5x5 170 95
37	5/26/2009 0:14	5/26/2009 1:06	E580R071.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	120	SEC	8387	UI FCAW F16G3 15mm long A Slit 5x5 5x5 170 95
38	5/26/2009 1:06	5/26/2009 1:58	E580R072.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	120	SEC	8431	UI FCAW F16G3 20mm long A Slit 5x5 5x5 170 95
39	5/26/2009 1:58	5/26/2009 2:50	E580R073.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	120	SEC	8383	UI FCAW F16G3 -13mm Long B Slit 5x5 5x5 170 95
40	5/26/2009 2:50	5/26/2009 3:43	E580R074.CSV	S2	78.5	80.8	0.1	120	SEC	8611	UI FCAW F16G3 -18mm long B Slit 5x5 5x5 170 95

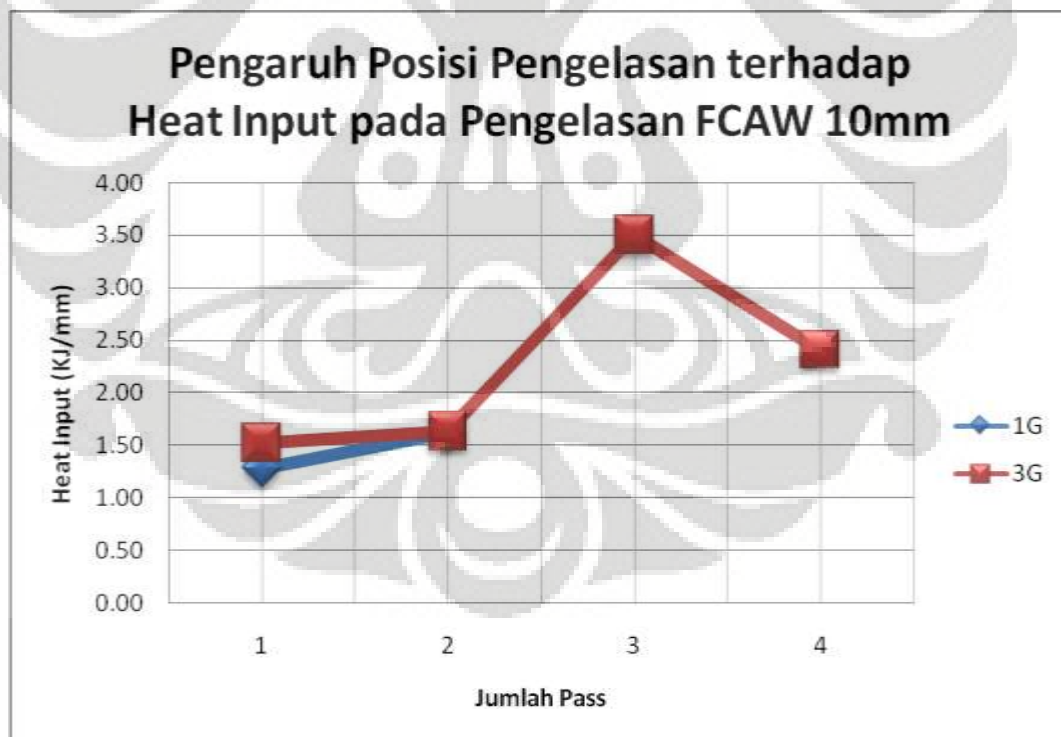


Lampiran 21. Contoh penentuan tegangan sisa dengan menggunakan Origin Lab.

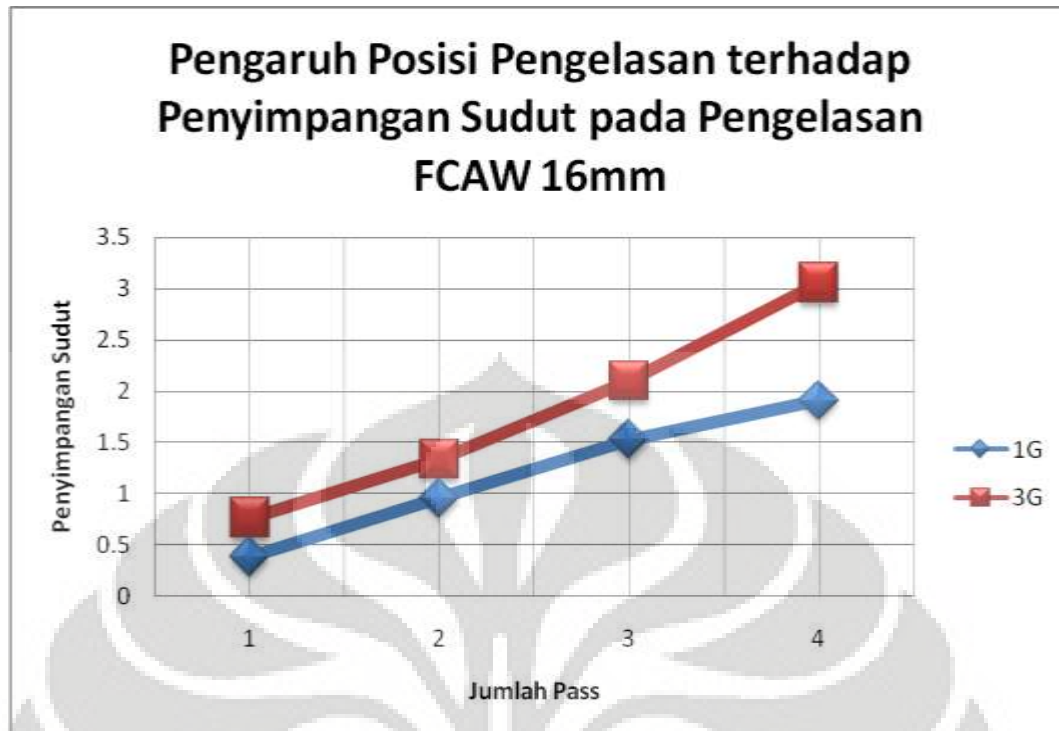




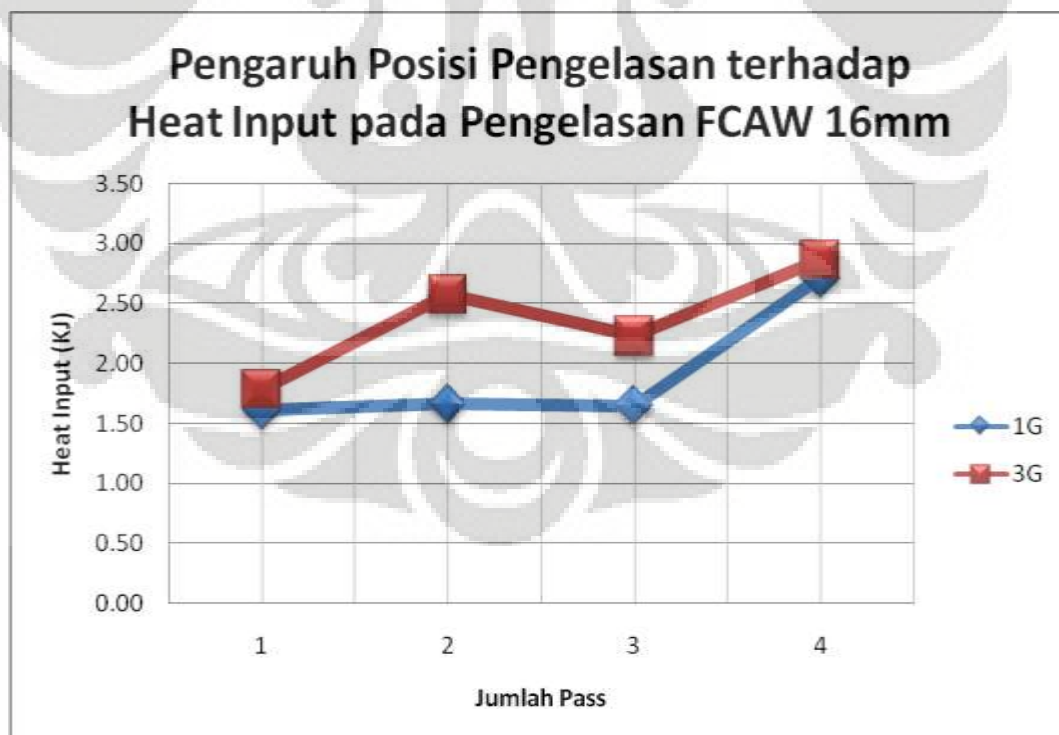
Lampiran 22. Gambar Grafik pengaruh posisi pengelasan terhadap besarnya penyimpangan sudut yang terjadi pada pelat dengan ketebalan 10mm.



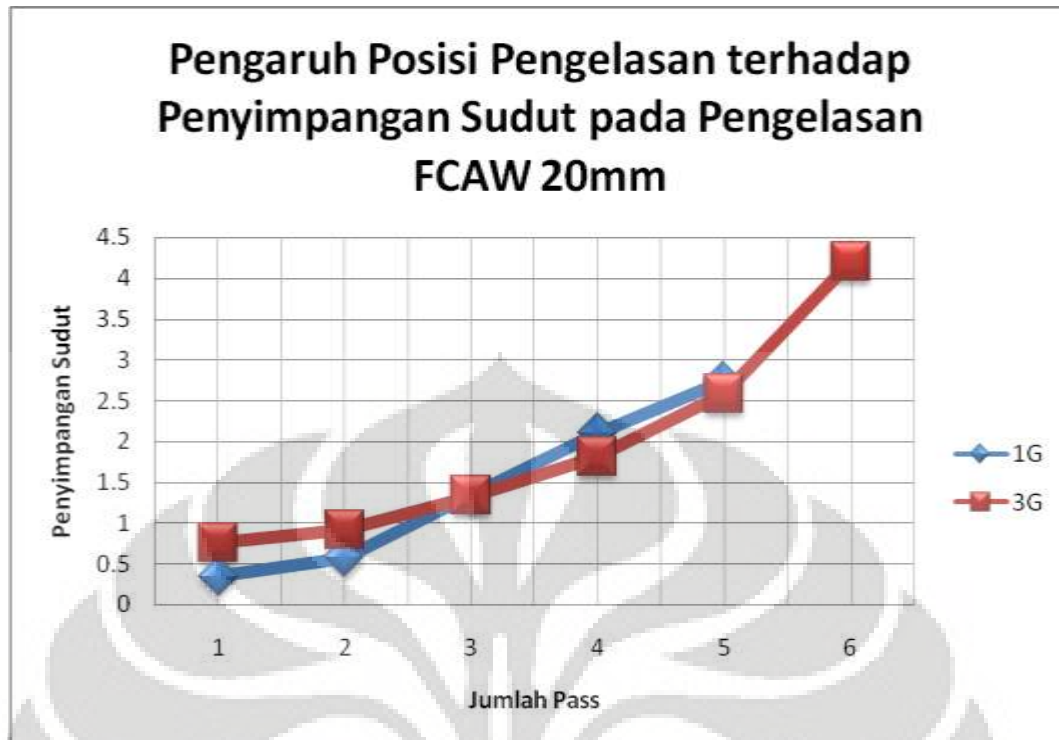
Lampiran 23. Gambar Grafik pengaruh posisi pengelasan terhadap besarnya heat input yang terjadi pada pelat dengan ketebalan 10mm.



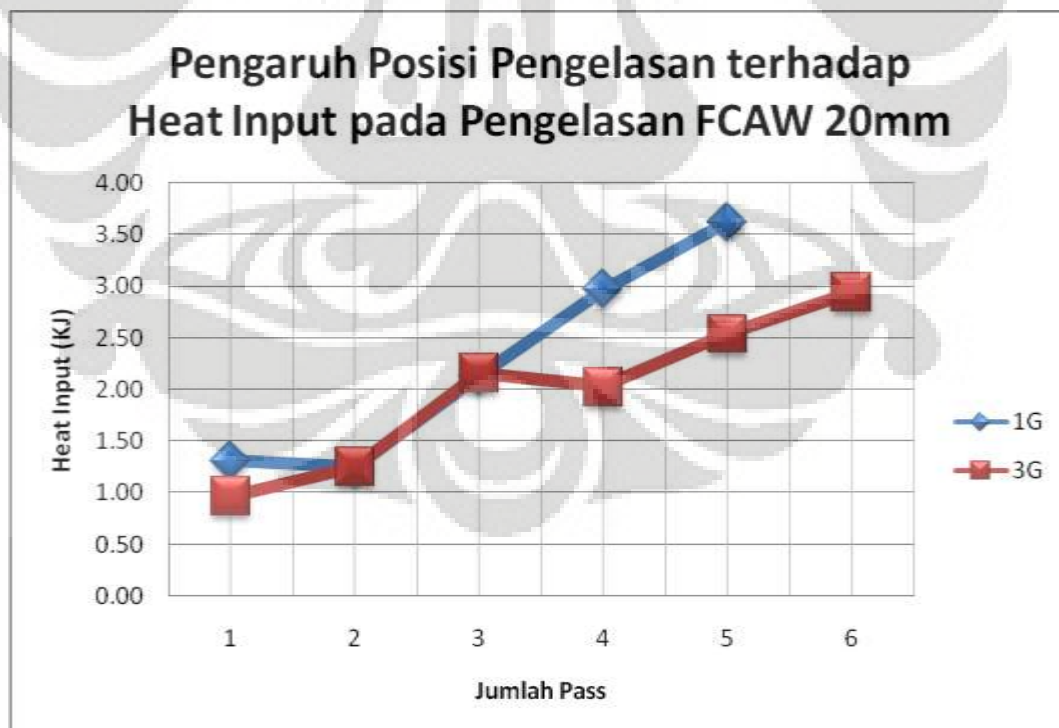
Lampiran 24. Gambar Grafik pengaruh posisi pengelasan terhadap besarnya penyimpangan sudut yang terjadi pada pelat dengan ketebalan 16mm.



Lampiran 25. Gambar Grafik pengaruh posisi pengelasan terhadap besarnya heat input yang terjadi pada pelat dengan ketebalan 16mm.



Lampiran 26. Gambar Grafik pengaruh posisi pengelasan terhadap besarnya penyimpangan sudut yang terjadi pada pelat dengan ketebalan 20mm.



Lampiran 27. Gambar Grafik pengaruh posisi pengelasan terhadap besarnya heat input yang terjadi pada pelat dengan ketebalan 20mm.