



UNIVERSITAS INDONESIA

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

SKRIPSI

**AULIA SANI
0606074615**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JULI 2010**



UNIVERSITAS INDONESIA

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

SKRIPSI

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Teknik**

**AULIA SANI
0606074615**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JULI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Aulia Sani
NPM : 0606074615

**Tanda Tangan :
Tanggal : 5 Juli 2010**



HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Aulia Sani
NPM : 0606074615
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Pengaruh Ketebalan Pelat Terhadap
Tegangan Sisa dan Distorsi Angular pada
Baja JIS G 3101 SS400 Dilas dengan Proses
GMAW Semi Otomatis

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

DEWAN PENGUJI

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

Penguji 1 : Dr. Ir. Badrul Munir, M.Sc ()

Penguji 2 : Dr. Ir. Dedi Priadi, DEA ()

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 5 Juli 2010

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah Yang Maha Kuasa, karena atas kuasa dan rahmat- Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Metalurgi dan Material pada 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. Dr. Ir. Winarto, M.Sc selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
2. Dr. Ir. Sutopo, M.Sc selaku dosen pembimbing akademik yang telah membimbing penulis selama kuliah di Metallurgi FTUI;
3. Ayahanda Haromain Amrullah, Ibunda Hj. Zuhriah, untuk kasih sayang dan doa yang tiada henti. Dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral;
4. Abdillah Enstein sebagai rekan tugas akhir dan sahabat yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini;
5. Amri, Aridho, Zulfahmi, Fiki, Fandi, Raden, Anugrah, Ronald, Paul, Ferdy, Aldhi, Wandu, Zulfikar, Adi Gunawan, Chadut, Dika, Desto, Indra, Fahmi, dan segenap teman-teman Metallurgi 2006;
6. Bapak Ahmad Ashari, ST yang telah mengajarkan penulis mengelas;
7. Afiat, Rifqi, Miftah, Panji, Hadi, Mochi, Iqbal, Heru, Bintang, Ikhsan, Sony, dan segenap teman-teman alumni SMAN 13 yang telah membantu memberi semangat kepada penulis;

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

Depok, 23 Juni 2010

Aulia Sani



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

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

Nama : Aulia Sani
NPM : 0606074615
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Departemen : Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

Pengaruh Ketebalan Pelat Terhadap Tegangan Sisa dan Distorsi Angular pada Baja JIS G 3101 SS400 Dilas dengan Proses GMAW Semi Otomatis

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

Dibuat di : Depok
Pada Tanggal : 5 Juli 2010
Yang menyatakan

(Aulia Sani)

ABSTRAK

Nama : Aulia Sani
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : **Pengaruh Ketebalan Pelat Terhadap Tegangan Sisa dan Distorsi Angular pada Baja JIS G 3101 SS400 Dilas dengan Proses Gmaw Semi Otomatis**

Telah dilakukan penelitian terhadap besarnya distorsi angular terhadap ketebalan pelat serta pengukuran tegangan sisa dengan menggunakan difraksi sinar X. Pengelasan dilakukan dengan metode GMAW yang dibantu dengan Bug-O. Posisi pengelasan yaitu posisi posisi datar (1G) menurut AWS dilakukan dengan parameter ketebalan pelat 10 mm, 16 mm dan 20 mm. Pengukuran distorsi angular menggunakan *dial gauge*. Berturut-turut nilai perubahan sudut distorsi *angular* untuk ketebalan 10, 16, 20 mm yaitu $4,75^{\circ}$, $7,74^{\circ}$, dan $11,71^{\circ}$. Pengukuran tegangan sisa dilakukan pada pelat 10 dan 20 mm di bagian logam las dan 5 mm ke arah dari logam las. Tegangan sisa tarik pada pelat 20 mm lebih besar dari pada pelat 10 mm. Pelat 20 mm memiliki tegangan sisa sebesar 750 MPa pada jarak 5mm dari pusat las sedangkan pelat 10 mm memiliki tegangan sisa sebesar 562 Mpa untuk posisi yang sama. Sedangkan pada logam las, tegangan sisa yang muncul berupa tegangan sisa tekan pelat 20 mm sebesar 186 MPa, dan pada pelat 10 mm sebesar 257 Mpa.

Kata kunci : distorsi angular, tebal pelat, tegangan sisa, GMAW

ABSTRACT

Name : Aulia Sani
Study Program : Metallurgy and Materials Engineering
Title : Effect of Plate Thickness to Residual Stress and Angular Distortion on JIS 3101 SS400 Steel Plate Welded by Semi-Automatic GMAW Process

Research about welding angular distortion concerning on plate thickness has been conducted. Welding process is done by GMAW method using Bug-O. This research comes along with residual stress measurement on 10 and 20 mm of plate thickness by using X-Ray diffraction. The welding position is in flat position (1G) according to AWS code which done with 10 mm, 16 mm and 20 mm of plate thickness. The angular distortion measurement has been done using dial gauge. As follow as the value of angular distortion for 10, 16 and 20 mm of thickness on flat position is $4,75^{\circ}$, $7,74^{\circ}$ and $11,71^{\circ}$. The measurement of residual stress on 10 and 20 mm of thickness is conducted on weldment and 5 mm from weldment. The result of residual stress on various plate shows that the thicker plate has higher value of residual stress.

Keyword: angular distortion, plate thickness, residual stress, GMAW

DAFTAR ISI

| | |
|--|------|
| HALAMAN JUDUL | i |
| HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS | ii |
| HALAMAN PENGESAHAN | iii |
| UCAPAN TERIMA KASIH | iv |
| LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH | v |
| ABSTRAK | vii |
| <i>ABSTRACT</i> | viii |
| DAFTAR ISI | ix |
| DAFTAR TABEL | xi |
| DAFTAR GAMBAR | xii |
| BAB 1 | 1 |
| PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Perumusan Masalah | 2 |
| 1.3 Tujuan Penelitian | 3 |
| 1.4 Ruang Lingkup Penelitian | 3 |
| BAB 2 | 4 |
| DASAR TEORI | 4 |
| 2.1 Baja Struktural JIS G3101-SS400 | 4 |
| 2.2 Pengelasan <i>Gas Metal Arc</i> (GMAW) | 4 |
| 2.2.1 Proses Pengelasan | 4 |
| 2.2.2 Pengelasan Otomatis | 5 |
| 2.3 Metalurgi Las | 6 |
| 2.3.1 Diagram Fasa dan Diagram CCT | 6 |
| 2.3.2 Struktur Mikro | 8 |
| 2.3.3 Daerah Terpengaruh Panas | 9 |
| 2.4 Tegangan Sisa | 9 |
| 2.4.1. Tegangan Sisa Makro dan Mikro | 10 |
| 2.4.2 Pengaruh Tegangan Sisa Terhadap Sifat Mekanis | 12 |
| 2.5 Pengukuran Tegangan Sisa | 12 |
| 2.5.1 Metode Difraksi Sinar X Untuk Mengukur Tegangan Sisa | 12 |
| 2.6 Distorsi Pada Pengelasan | 12 |
| 2.6.1 Pengertian | 12 |
| 2.6.2 Jenis – Jenis Distorsi | 14 |

| | |
|--|----|
| BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN..... | 16 |
| 3.1 Diagram Penelitian..... | 16 |
| 3.2 Alat dan Bahan..... | 17 |
| 3.2.1 Alat..... | 17 |
| 3.2.2 Bahan..... | 17 |
| 3.3 Prosedur pengelasan..... | 17 |
| 3.3.1 Persiapan sampel..... | 17 |
| 3.3.2 Proses Pengelasan..... | 17 |
| 3.3 Pengukuran distorsi..... | 18 |
| 3.5 Uji Visual..... | 19 |
| 3.6 Pengujian-Pengujian | 19 |
| 3.6.1 Pengamatan Struktur Makro Dan Mikro | 19 |
| 3.6.2 Pengujian Kekerasan di daerah Logam Las, Haz dan Logam Induk | 20 |
| 3.6.3 Pengukuran Tegangan Sisa..... | 20 |
| BAB 4 DATA DAN PEMBAHASAN | 23 |
| 4.1 Data dan analisa ketebalan pelat terhadap nilai distorsi angular | 23 |
| 4.2 Data dan analisa nilai kekerasan dan struktur mikro | 27 |
| 4.2.1 Data dan analisa nilai kekerasan logam las, HAZ, dan logam dasar | 27 |
| 4.2.2 Data dan analisa struktur mikro | 29 |
| 4.3 Data dan analisa tegangan sisa | 34 |
| BAB 5 | 37 |
| PENUTUP | 37 |
| 5.1 Kesimpulan..... | 37 |
| 5.2 Saran..... | 37 |
| REFERENSI..... | 40 |
| LAMPIRAN | 41 |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|-------------|---|----|
| Gambar 2.1 | Metode Pengelasan GMA..... | 5 |
| Gambar 2.2 | HAZ pada baja karbon dan diagram fasa | 7 |
| Gambar 2.3 | Perbandingan Pengelasan dan <i>Heat Treating</i> | 7 |
| Gambar 2.4 | Struktur mikro pengelasan baja karbon rendah | 8 |
| Gambar 2.5 | Penyusutan dan penyusutan yang terhambat sebagai akibat dari distribusi temperature yang tidak merata | 11 |
| Gambar 2.6 | Menunjukkan tegangan sisa yang terjadi pada pengelasan | 12 |
| Gambar 2.7 | Mekanisme penyusutan | 13 |
| Gambar 2.8 | Distorsi longitudinal..... | 14 |
| Gambar 2.9 | Distorsi melintang | 14 |
| Gambar 2.10 | Distorsi angular | 15 |
| Gambar 2.11 | Jenis-jenis distorsi | 15 |
| Gambar 3.1 | Metodologi Penelitian | 16 |
| Gambar 3.2 | Dial Gauge..... | 18 |
| Gambar 3.3 | Ilustrasi pengukuran distorsi angular | 19 |
| Gambar 3.4 | Lokasi pengambilan Foto mikro dan uji kekerasan | 19 |
| Gambar 3.5 | Penampang indenter uji mikrohardness | 20 |
| Gambar 3.6 | Sistem celah pada goniometer difraktometer sinar-X..... | 21 |
| Gambar 4.1 | Hubungan antara ketebalan pelat terhadap nilai distorsi angular .. | 25 |
| Gambar 4.2 | Hubungan jumlah pass dengan distorsi angular pada berbagai macam ketebalan..... | 26 |
| Gambar 4.3 | Nilai kekerasan di berbagai daerah pada pelat yang berbeda | 29 |

DAFTAR TABEL

| | |
|---|----|
| Tabel 4.1 Parameter Pengelasan GMAW pada Pelat 10 mm..... | 23 |
| Tabel 4.2 Parameter Pengelasan GMAW pada Pelat 16 mm..... | 23 |
| Tabel 4.3 Parameter Pengelasan GMAW pada Pelat 20 mm..... | 24 |
| Tabel 4.4 Nilai kekerasan pelat 10 mm..... | 27 |
| Tabel 4. 5 Nilai kekerasan pelat 16 mm..... | 28 |
| Tabel 4.6 Nilai kekerasan pelat 20 mm..... | 28 |



BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Baja karbon rendah adalah jenis baja yang luas dipakai sebagai bahan konstruksi karena kemudahan pengubahan bentuk dan kemampu lasan yang relatif cukup baik. Salah satu baja karbon rendah yang biasa dipakai sebagai bahan konstruksi adalah baja karbon jenis JIS G 3101 SS400. Jika dibandingkan dengan UNS (Unified Numbering System), maka baja ini cukup dekat dengan baja ASTM A36. Baja JIS G3101 SS400 atau yang lebih dikenal dengan bahasa dagang SS400 memiliki kandungan karbon yang cukup rendah sehingga relatif mudah diubah bentuk, dan mudah dilas.

Pengelasan adalah penggabungan setempat dari beberapa logam atau bukan logam, baik dengan pemanasan, dengan atau tanpa penekanan, atau hanya disebabkan dan dengan atau tanpa logam pengisi.

Perkembangan teknologi pengelasan hingga saat ini cukup pesat; mulai dari rekayasa parameter, hingga penemuan metode-metode baru yang menghasilkan kualitas lasan lebih baik dan juga lebih cepat, salah satunya adalah pengelasan GMA (Gas Metal Arc). Pengelasan GMA adalah salah satu metode pengelasan fusi dengan menggunakan elektroda *consumable* yang *continuous* dan gas pelindung untuk mendapatkan hasil pengelasan yang lebih baik.

Selain pengembangan metode seperti disebut di atas, perkembangan metode pengelasan ke arah otomatisasi juga terus berkembang. Dengan penggunaan *mechanized tracking system*, maka pengelasan bisa dilakukan dengan lebih cepat sehingga produktifitas dan efisiensi dari pengelasan bisa dicapai.

Meskipun teknologi pengelasan terus berkembang, cacat yang dihasilkan dari proses pengelasan tidak bisa dihindari. Salah satu permasalahan yang biasa ditemukan dalam pengelasan adalah distorsi. Distorsi adalah penyimpangan dimensi yang terjadi karena siklus pemanasan dan pendinginan selama proses pengelasan. Distorsi ada berbagai bentuk, salah satunya adalah distorsi angular atau penyimpangan sudut.

Waktu tambahan diperlukan untuk memperbaiki lasan yang terdistorsi sehingga tambahan biaya semakin meningkat. Distorsi tidak dapat dihindari, tapi dapat dikontrol. Untuk itu pengelasan tanpa distorsi diperlukan untuk mencapai hasil lasan yang baik dan juga ekonomis.

Dalam proses pengelasan, bagian yang dilas menerima panas pengelasan setempat, sehingga distribusi temperatur tidak merata. Distribusi panas yang tidak merata ini mengakibatkan temperatur logam las hingga daerah terpengaruh panas (HAZ) lebih tinggi dibanding dengan *base metal*. Pada saat logam las membeku, penyusutan terjadi dan logam melakukan gaya penyusutan terhadap daerah sekelilingnya dan daerah HAZ. Pada awal pembekuan, gaya yang diadukan relatif kecil karena logam las masih panas. Akan tetapi pada saat lasan mencapai temperatur ruang maka tegangan penyusutan meningkat. Tegangan penyusutan, yang tertinggal dalam logam lasan ini menyebabkan tegangan sisa. Tegangan sisa menyebabkan dua efek berbahaya, yaitu distorsi dan kerusakan dini dari lasan^[1].

1.2 Perumusan Masalah

Penelitian dilakukan dengan menggunakan material baja karbon rendah untuk aplikasi struktural dengan jenis material JIS G 3101 SS400. Proses pengelasan yang digunakan adalah proses *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) dengan *mechanized tracking welding* (BUG-O). Pengamatan yang dilakukan adalah melihat besarnya distorsi angular dengan berdasarkan ketebalan pelat yang berbeda dan besarnya masukan panas saat pengelasan per pass dan membandingkan tegangan sisa yang hadir pada logam dasar, HAZ dan kampuh las. Pengujian-pengujian yang dilakukan pada hasil lasan antara lain:

1. Pengujian merusak: Kekerasan Vickers
2. Pengujian tanpa merusak: - Pengukuran distorsi
- Pengukuran tegangan sisa
3. Pengujian metalografi

1.3 Tujuan Penelitian

1. Mengetahui pengaruh hubungan antara ketebalan dengan besarnya distorsi angular pada metode pengelasan GMAW dengan *mechanized tracking welding*.
2. Mengetahui pengaruh ketebalan material yang dilas terhadap tegangan sisa pada daerah logam dasar, HAZ dan kampuh las.
3. Mengetahui pengaruh jumlah pass terhadap besarnya distorsi angular.
4. Mengetahui hubungan kekerasan dengan tegangan sisa pada lasan.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian:

1. Bahan Dasar
Baja JIS G3101 SS400 dengan dimensi 250 mm x 150 mm. dengan ketebalan 10 mm, 16 mm, dan 20 mm.
2. Parameter Proses
 - Proses pengelasan *Gas Metal Arc* (GMAW) dengan parameter kuat arus 150-200 Ampere, tegangan listrik 22-25 Volt, kecepatan las 120 cm/menit dan tipe sambungan *butt joint*, gas pelindung yang digunakan adalah CO₂ dengan debit 18 L/menit.
 - Pengelasan dibantu dengan *mechanized tracking system (Bug-O system)*.
 - Kawat Elektroda : AWS A.518 ER 70S-6, diameter 1,2 mm.
3. Karakterisasi Material :
 - Uji mikrohardness, dilakukan dengan standard ASTM E384
 - Pengamatan struktur mikro dan makro
 - Pengukuran distorsi angular
 - Pengukuran tegangan sisa dengan difraktometer sinar x

BAB 2 DASAR TEORI

2.1 Baja Struktural JIS G3101-SS400

Baja JIS G3101 SS400 atau identik dengan ASTM A 36 termasuk kedalam *Mild (Low Carbon) Steels*. *Low carbon steels* biasanya memiliki kandungan karbon hingga 0,25% C dengan 0,4 sampai 0,7% Mn, 0,1 sampai 0,5% Si, dan sedikit sulfur, pospor, dan unsur lain yang tersisa. Baja ini tidak dikuatkan dengan unsur paduan selain karbon. Baja jenis ini mengandung sedikit mangan untuk stabilisasi sulfur dan silikon untuk deoksidasi. *Mild Steels* paling sering digunakan pada *as-rolles, forged, atau annealed* dan jarang ditemper atau dikuench.

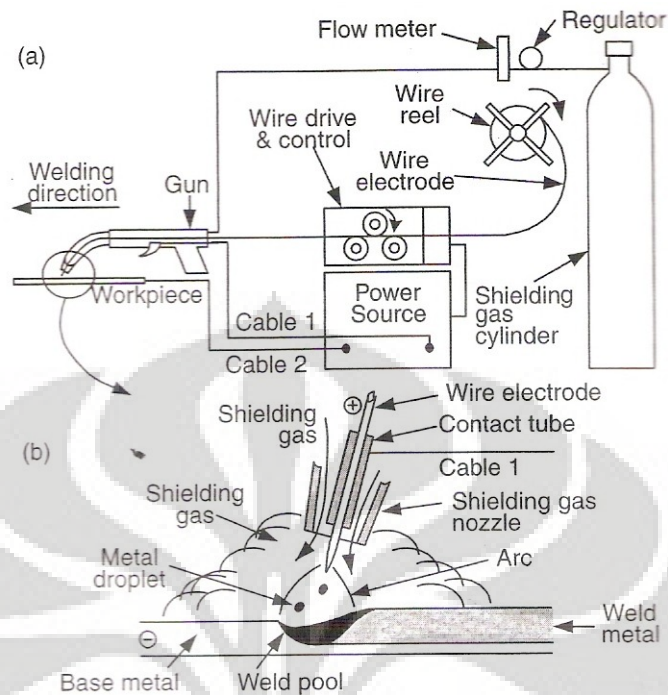
Kategori *mild steel* yang paling luas dipakai adalah *low carbon* (C <0.08% dengan Mn ≤0.4%) yang digunakan untuk *forming* dan *packaging*. *Mild steels* dengan kandungan karbon dan mangan yang lebih tinggi juga digunakan untuk produk struktural seperti pelat, lembaran, batangan, dan *structural sections*.

Sebelum penggunaan HSLA (*High Strength Low Alloy Steels*), *mild steel* jenis ini biasa digunakan untuk bagian struktural otomotif, jembatan, dan gedung. Baja jenis ini memiliki *weldability* dan *yield strength* yang cukup baik.^[3]

2.2 Pengelasan Gas Metal Arc (GMAW)

2.2.1 Proses Pengelasan

Pengelasan GMA adalah proses melebur dan menyambung logam dengan memanaskannya menggunakan busur listrik yang distabilkan diantara kawat elektroda yang continues dan logam. Gas pelindung busur dan logam cair didapatkan dengan menggunakan gas inert seperti argon dan helium, inilah mengapa pengelasan GMA juga biasa disebut dengan istilah pengelasan Metal Inert Gas (MIG). Karena gas yang noninert juga digunakan, seperti CO₂, pengelasan GMA adalah istilah yang lebih tepat. Pada pengelasan GMA, jenis arus yang digunakan adalah DCEP (*Direct Current Electrode Positive*).



Gambar 2.1 Metode Pengelasan GMA^[7]

Gas yang biasa digunakan dalam proses pengelasan GMA untuk material ferrous adalah CO_2 . Keuntungan dari penggunaan gas ini adalah kecepatan pengelasan lebih tinggi, penetrasi lebih dalam, dan biayanya lebih rendah. Kekurangan dari penggunaan CO_2 sebagai gas pelindung adalah spattering atau cipratan yang lebih banyak dibanding gas pelindung lain seperti argon ataupun helium. Dan untuk menghindari cipratan yang berlebihan maka arus yang relatif rendah digunakan untuk menjaga busur yang pendek.

Keuntungan dari proses pengelasan GMA adalah hasil lasan yang lebih bersih dibanding dengan pengelasan SMA. Dibanding dengan GTA, pengelasan GMA memiliki laju deposisi yang lebih tinggi. Kemampuan untuk menggunakan GMA juga rendah, dan kestabilan busur seperti pada GTA juga tidak terlalu diperlukan. Meskipun demikian, Gun pengelasan GMA yang biasanya relative besar bisa menyulitkan menjangkau area yang sempit atau sudut.^[7]

2.2.2 Pengelasan Otomatis

Automasi pengelasan terbagi menjadi dua macam, yaitu pengelasan semi otomatis dan pengelasan otomatis penuh (*full automatic*). Pengelasan disebut semi otomatis ketika operator meletakkan *torch* ke sambungan las secara manual, lalu

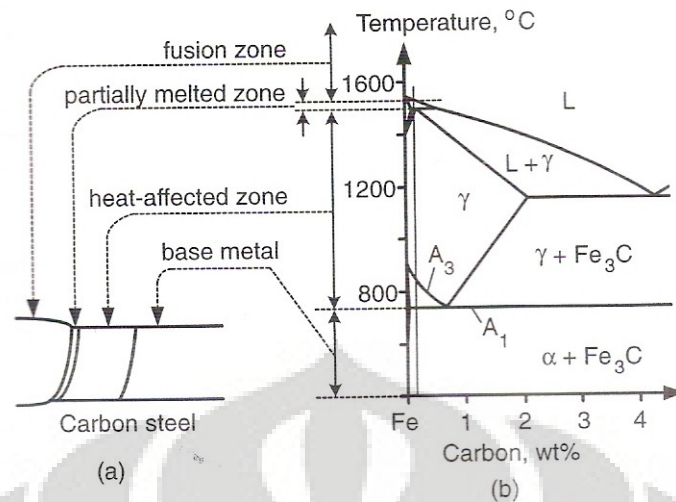
pergerakan *torch* atau benda kerja dan parameter pengelasan dikontrol oleh pengendali secara otomatis untuk menjamin pengelasan yang baik dan berulang. Ketika pengelasan selesai, operator mengganti bagian yang telah selesai dilas dan proses mulai lagi dari awal. Pengelasan *full automatic* menggunakan mesin yang bisa mengganti atau meletakkan *torch* ke bagian benda yang dilas, mengendalikan parameter pengelasan, mengatur kualitas lasan, dan setelah produk selesai dilas, mesin secara otomatis melepaskannya. Detail dari kerja spesifik bisa saja diatur atau tidak oleh operator.^[20]

Otomasi pengelasan memiliki banyak keuntungan. Di antara keuntungan itu adalah meningkatkan produksi, meningkatkan kualitas hasil lasan, mengurangi beban kerja, dan mengurangi distorsi akibat pengelasan, memperbaiki lingkungan kerja, dan bisa beradaptasi dengan lingkungan kerja.^[19]

2.3 Metalurgi Las

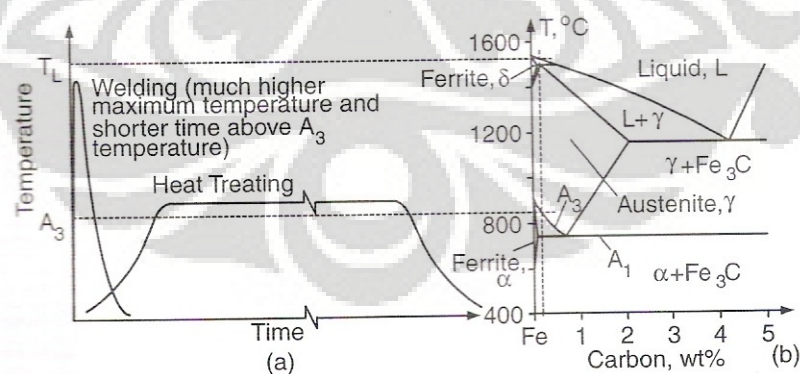
2.3.1 Diagram Fasa dan Diagram CCT

HAZ pada baja karbon sangat berhubungan dengan diagram fasa Fe-C. Diagram fasa Fe-C dan diagram continuous-cooling transformation untuk heat treatment baja karbon bisa berguna juga untuk pengelasan, tapi ada beberapa perbedaan mendasar antara pengelasan dan heat treatment yang harus diperhatikan. Proses termal selama pengelasan dan heat treatment sangat berbeda satu sama lain. Yang pertama, pada pengelasan temperatur puncak pada HAZ bisa mendekati 1500°C. Pada heat treatment, temperatur maksimum hanya mendekati 900°C, yang tidak terlalu jauh di atas temperatur kritis A₃ hingga austenite terbentuk. Yang kedua, laju pemanasan tinggi dan waktu tahan di atas A₃ singkat selama proses pengelasan. Pada heat treatment, laju pemanasan lebih lambat dan waktu tahan di atas A₃ lebih lama. Temperatur A₁ dan A₃ selama heat treatment lebih sering diartikan sebagai temperatur Ac₁ dan Ac₃.



Gambar 2.2 HAZ pada baja karbon dan diagram fasa^[7]

Gabungan laju pemanasan yang tinggi dan waktu tahan yang singkat di atas A_{c3} pada pengelasan bisa menghasilkan pembentukan austenite yang tidak seragam selama pemanasan. Ini terjadi karena tidak cukup waktu bagi atom karbon di austenite untuk berdifusi dari koloni pearlite dengan kandungan karbon tinggi ke koloni ferrite dengan kandungan karbon rendah. Selama pendinginan cepat, yang lebih dahulu berubah menjadi koloni martensit karbon tinggi sedangkan yang lebih terakhir berubah menjadi koloni ferrit karbon rendah. Akibatnya kekerasan mikro pada HAZ bisa sangat beragam pada lasan dengan laju pemanasan yang tinggi.



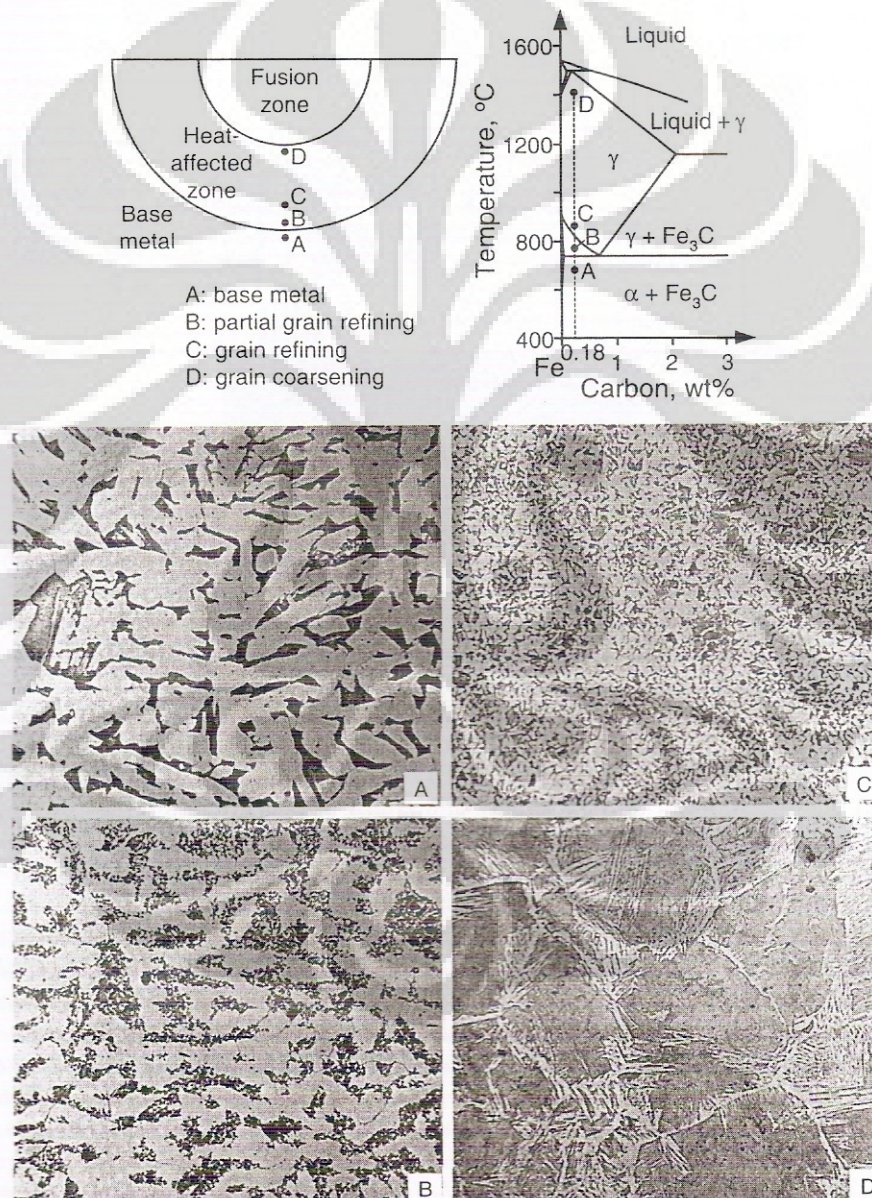
Gambar 2.3 Perbandingan Pengelasan dan Heat Treatment^[7]

Sebagai hasil temperatur puncak selama pengelasan, pertumbuhan butir bisa terjadi di sekitar batas fusi. Semakin lambat laju pemanasan, semakin lama waktu tahan di atas A_{c3} semakin hebat pertumbuhan butir. Sedangkan pada heat

treatment, temperatur maksimum yang dikerjakan hanya sekitar 900°C untuk mencegah pertumbuhan butir.^[7]

2.3.2 Struktur Mikro

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



Gambar 2.4 Struktur mikro pengelasan baja karbon rendah^[7]

Logam dasar terdiri dari ferrite yang terang dan pearlite yang gelap. Struktur mikro HAZ bisa dibagi menjadi tiga bagian: partial grain refining, grain-refining, dan daerah grain-coarsening. Temperatur puncak pada posisi ini ditandai pada diagram fasa.^[7]

2.3.3 Daerah Terpengaruh Panas

Kepekaan struktur kristal BCC pada baja menjadi penyebab terjadi ductile-brittle transformation yang menyebabkan kerusakan dalam waktu singkat. Dalam proses pengelasan, terutama dalam sambungan lasan hal ini menjadi masalah yang lebih rumit karena ada fakto-faktor lain seperti konsentrasi tegangan, struktur yang tidak sesuai dan cacat lasan.

Lebar daerah terpengaruh panas ditentukan oleh aliran panas. Selama proses pengelasan daerah terpengaruh panas akan mengalami perubahan-perubahan secara metalurgi, seperti rekristalisasi, pelarutan endapan, pengerasan, maupun pengendapan berlebih. Pada daerah HAZ yang dekat dengan lasan, kristal tumbuh lebih cepat dan membentuk butir-butir kasar. daerah ini disebut dengan batas las. Daerah ini butir menjadi kasar dan logam menjadi lebih getas akibat siklus termal yang terjadi pada waktu pengelasan. Pada daerah ini terjadi konsentrasi tegangan yang disebabkan diskontinuitas pada kaki manik las, takik las, dan lain-lain. Biasanya untuk mengurangi tegangan yang tinggi dan stuktur yang kasar pada daerah tersebut dilakukan proses pemanasan untuk melepaskan tegangan sisa yang dihasilkan oleh pengelasan.^[7]

2.4 Tegangan Sisa

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

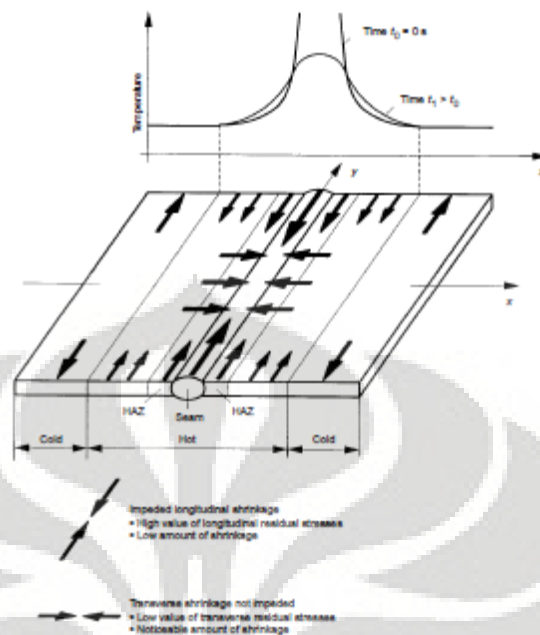
Tegangan sisa yang dihasilkan dari pengelasan termasuk ke dalam tegangan sisa yang dihasilkan oleh perlakuan panas dengan berbagai tahap. Tegangan sisa yang disebabkan ekspansi termal dan kompresi digolongkan sebagai tegangan dalam termal (*thermal internal stress*).^[1]

2.4.1. Tegangan Sisa Makro dan Mikro

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

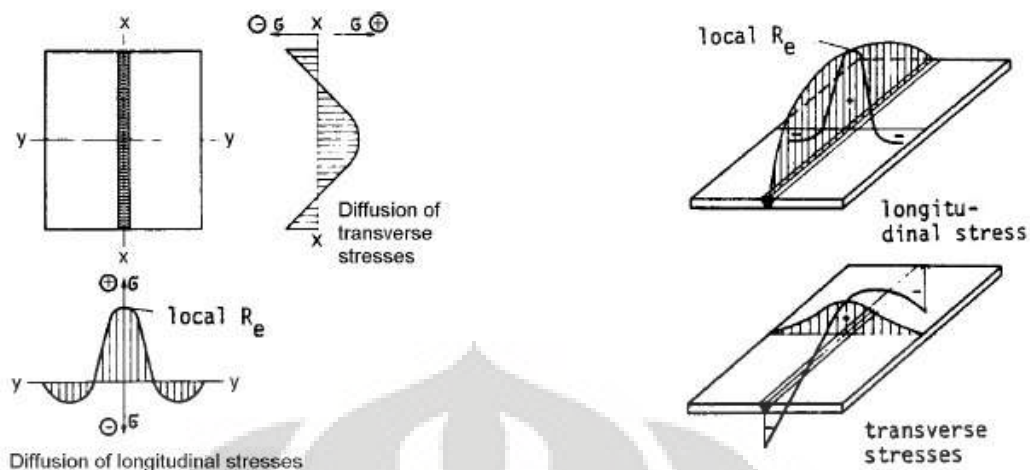
Tegangan sisa yang dihasilkan pengelasan adalah akibat dari distribusi temperature yang tidak seragam di sekitar sambungan las yang timbul pada berbagai proses pengelasan yang berbeda. Ada berbagai macam aspek dan parameter yang berkontribusi pada jumlah dan distribusi tegangan sisa pengelasan. Tegangan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

Tegangan sisa yang dipengaruhi oleh proses penyusutan terjadi karena proses penyusutan yang terhambat, terjadi ketika daerah yang dipanaskan dan didinginkan bersebelahan. Prinsip dasarnya adalah volume yang dipanaskan menyusut selama proses pendinginan berdasarkan pada koefisien ekspansi termal material yang dilas dan perbedaan temperature yang ada. Diasumsikan bahwa volume yang melebur tidak memberikan gaya kepada volume sekitar. Akibatnya, sambungan las dan volume sekitar yang tidak meleleh selama proses pengelasan memiliki suhu yang berbeda dan tegangan sisa pun terjadi. Hal ini bisa diilustrasikan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Penyusutan dan penyusutan yang terhambat sebagai akibat dari distribusi temperatur yang tidak merata^[21]

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



Gambar 2.6 Menunjukkan tegangan sisa yang terjadi pada pengelasan tumpul (*butt welding*), yang dilas dari ujung keujung^[1]

2.4.2 Pengaruh Tegangan Sisa Terhadap Sifat Mekanis

Tegangan sisa dalam logam las menyebabkan dua efek utama. Pertama, tegangan sisa akan menyebabkan distorsi, dan kedua, tegangan sisa akan menyebabkan kerusakan dini pada logam las. Terhadap kekuatan statik, tegangan sisa dapat dikatakan tidak mempengaruhi kekuatan statik logam selama logam induk dan logam las memiliki keuletan yang cukup baik. Selain itu, tegangan sisa juga bisa menyebabkan HIC (*Hydrogen Induced Cracking*), *brittle fracture* jika dikombinasikan dengan tegangan tarik, kegagalan fatigue, dan *Stress Corrosion Cracking*.^[18]

2.5 Pengukuran Tegangan Sisa

2.5.1 Metode Difraksi Sinar X Untuk Mengukur Tegangan Sisa

Jika suatu batang dengan luas penampang A diberi gaya tarik sebesar F , maka tegangan yang terjadi adalah $=F/A$ dengan arah y . Tegangan yang bekerja dengan arah gaya tegak lurus terhadap permukaan disebut tegangan normal. Dengan arah y tegangan memberikan regangan sebesar

2.6 Distorsi Pada Pengelasan

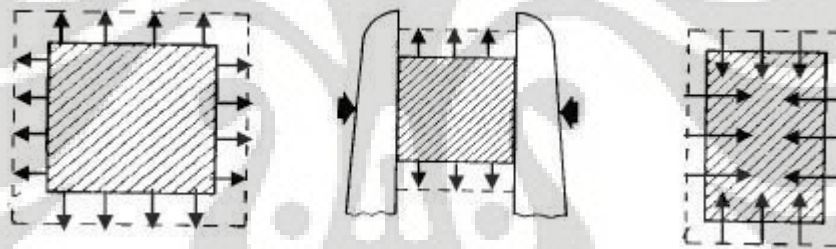
2.6.1 Pengertian

Distorsi merupakan perubahan bentuk akibat adanya tegangan dalam logam las yaitu tegangan memanjang dan tegangan melintang. Dalam hal ini distorsi ini disebabkan oleh ekspansi (pengembangan) yang tidak merata dari

logam las selama periode pemanasan dan pendinginan. Bila logam cair ini dibiarkan membeku secara bebas maka volume dari logam cair tersebut akan mengalami penyusutan secara bebas.^[15]

Bila sebuah logam dipanaskan secara merata maka akan terjadi ekspansi atau pengembangan ke segala arah dan setelah terjadi pendinginan maka akan terjadi kontraksi secara merata sampai dimensi semula. Bila suatu batang mendapat tahanan selama dipanaskan maka ekspansi ke arah lateral tidak akan terjadi namun volume ekspansi harus terjadi sehingga batang akan mengalami ekspansi ke arah vertikal. Bila batang tersebut kembali ke temperatur kamar maka kontraksi tetap terjadi ke segala arah secara merata sehingga batang sekarang menjadi berubah bentuk dari bentuk semula.^[15]

Ilustrasi mekanisme penyusutan dapat terlihat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Mekanisme penyusutan^[15]

Secara umum, ada beberapa faktor yang memberikan kesempatan lebih besar untuk terjadinya distorsi, antara lain:

- i. Koefisien ekspansi termal yang tinggi
- ii. *Yield strength* yang tinggi
- iii. Konduktivitas termal yang rendah
- iv. Modulus elastisitas rendah

Menurut parameter pengelasan, juga terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi terjadinya distorsi:

- i. Tipe penyampungan dan preparasi
- ii. Urutan pengelasan
- iii. Prosedur pengelasan

- iv. Pengelasan bersambung atau pengelasan terputus – putus
- v. Jumlah *pass* pengelasan
- vi. Tegangan alami yang terdapat di dalam struktur las
- vii. *Pre-* dan *post-weld heating*
- viii. Arus, kecepatan las dan jarak busur.

2.6.2 Jenis – Jenis Distorsi

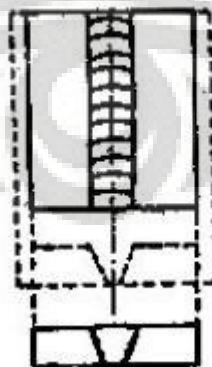
Ada 3 tipe utama distorsi:

- a. Distorsi longitudinal terjadi ketika kontraksi terjadi di sepanjang daerah pengelasan yang menyebabkan kontraksi longitudinal distorsi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8.



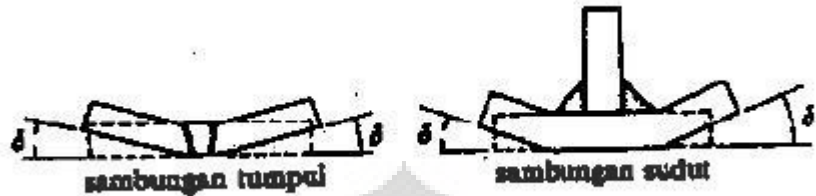
Gambar 2.8 Distorsi longitudinal^[17]

- b. Distorsi transversal atau penyusutan tegak lurus (melintang) dengan bidang pengelasan dan hal tersebut dapat menimbulkan tegangan sisa yang tinggi yang dapat menyebabkan retak. Ilustrasi penyusutan melintang dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Distorsi melintang^[16]

- c. Distorsi angular yang disebabkan oleh tegangan tekuk yang dihasilkan dari pemanasan dan pendinginan yang tidak merata di sepanjang bidang material yang disambung seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10.

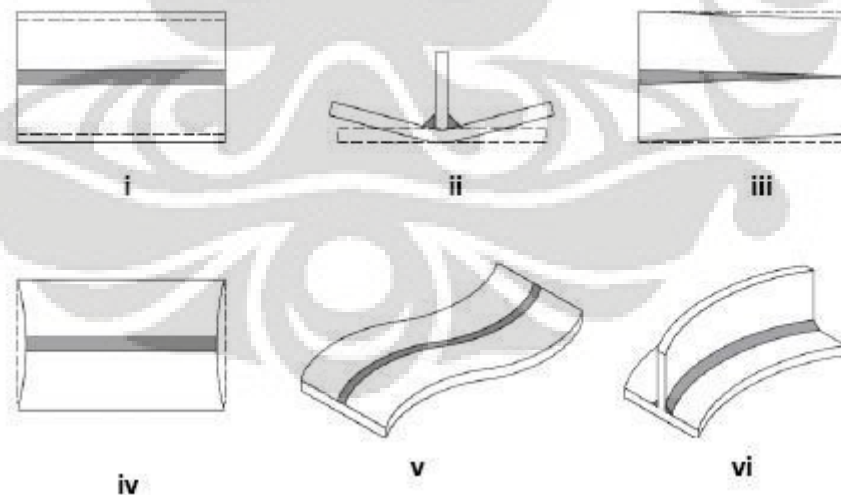


Gambar 2.10 Distorsi angular ^[16]

Masubuchi membagi tipe distorsi menjadi enam kategori: ^[1]

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

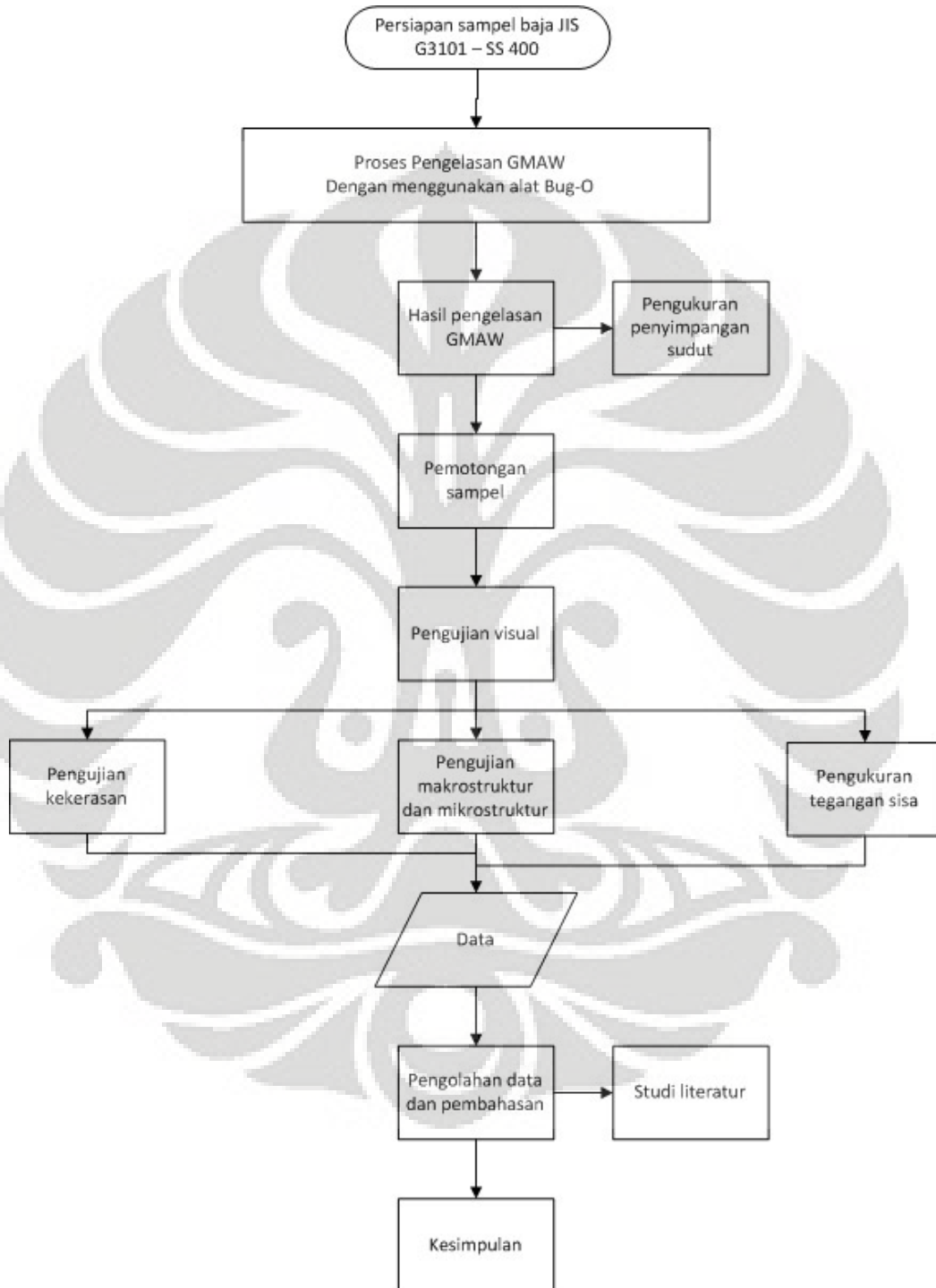
Adapun ilustrasi dari jenis-jenis distorsi yang disebutkan diatas dapat dilihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Jenis-jenis distorsi ^[1]

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Penelitian



Gambar 3.1 Metodologi Penelitian

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat

1. Satu set mesin las GMA
2. Satu set *mechanized tracking system* (Bug-O)
3. *Dial gauge*
4. Tang potong
5. Sikat
6. Alat pelindung keselamatan standar
7. Gergaji
8. Penggaris

3.2.2 Bahan

Bahan yang digunakan adalah Pelat baja JIS G 3101 SS 400 dengan dimensi 150mm x 250mm dan ketebalan 10, 16, dan 20 mm.

3.3 Prosedur pengelasan

3.3.1 Persiapan sampel

Material yang digunakan sebagai logam induk pada penelitian ini adalah baja JIS G 3101 SS400 dengan dimensi 150 mm x 250 mm. kemudian pada salah satu sisi pelat dibuat alur dengan kemiringan 30° sesuai dengan AWS A5.1-81. Sehingga setelah digabungkan terbentuk alur model V *groove* dengan sudut alur 60°.

3.3.2 Proses Pengelasan

1. Material logam induk yang digunakan adalah pelat baja (*steel plate*) spesifikasi JIS G3101- SS 400 dengan ketebalan : 9 mm, 16 mm dan 20mm.
2. Proses GMAW: AWS A.518 ER 70S-6, diameter 1,2 mm. Jenis elektroda ini mengandung Silikon dan Mangan yang tinggi sehingga cocok untuk pengelasan material JIS 3101-SS400. Elektroda ini dapat diaplikasikan pada *single pass* dan *multipass*.

3. Parameter pengelasan
 - Arus : 150 - 220 A
 - Voltase : 20 - 25 V
 - *Travel speed* : 12-38 mm/menit
4. Gas pelindung yang digunakan sebagai pelindung adalah CO₂, dengan kecepatan 18 Liter/menit dan komposisi ≥ 90 %.

3.3 Pengukuran distorsi

Pengukuran distorsi dilakukan dengan menggunakan *dial gauge* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2.^[16] Pada ujung pelat yang tidak dijepit diletakkan *dial gauge*. Setiap perubahan yang terbaca pada dial gauge akan dicatat yang kemudian akan dikonversi sebagai sudut dengan menggunakan aturan trigonometri sederhana. Pengukuran distorsi dilakukan pada setiap pass pengelasan seperti pada Gambar 3.3. Dengan cara seperti ini, diharapkan data yang didapat bisa digunakan untuk mengamati masukan panas per pass dan distorsi angular per pass.



Gambar 3.2 Dial Gauge



Gambar 3.3 Ilustrasi pengukuran distorsi angular

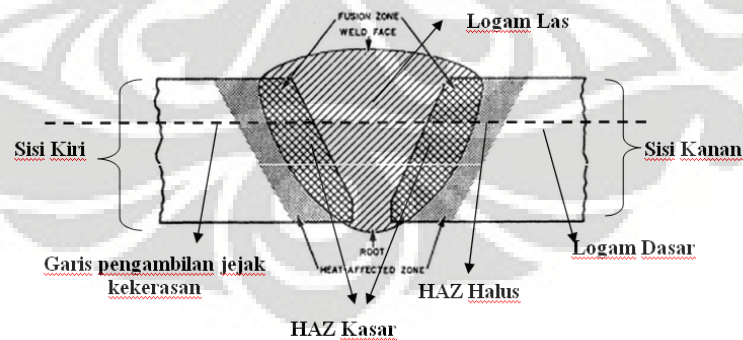
3.5 Uji Visual

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

3.6 Pengujian-Pengujian

3.6.1 Pengamatan Struktur Makro Dan Mikro

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



Gambar 3.4 Lokasi pengambilan Foto mikro dan uji kekerasan

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

Tujuan pengujian kekerasan adalah untuk mengetahui distribusi kekerasan pada logam las (*weld metal*), HAZ dan logam dasar. Pengujian dilakukan di laboratorium metalurgi fisik dengan menggunakan mesin *microhardnes testing* dengan beban yang digunakan yaitu 300 gf. Standar yang digunakan yaitu ASTM E 92. Tujuan pengujian kekerasan pada sampel uji adalah untuk mengetahui distribusi kekerasan pada daerah logam las, HAZ dan logam dasar. Kemudian hasil ini dihubungkan dengan tegangan sisa pada sampel uji. Lokasi pengambilan uji kekerasan pada Gambar 3.3.

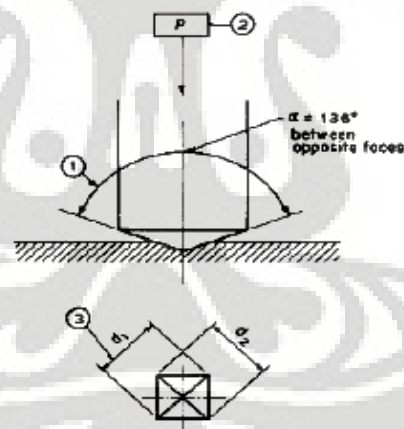
$$VHN = \frac{1852 \times P}{d^2} \quad (3.1)$$

Di mana :

k : 1852

P : beban (*gram force*)

d : diameter jejak (μm)



Gambar 3.5 Penampang indenter uji mikrohardness

3.6.3 Pengukuran Tegangan Sisa

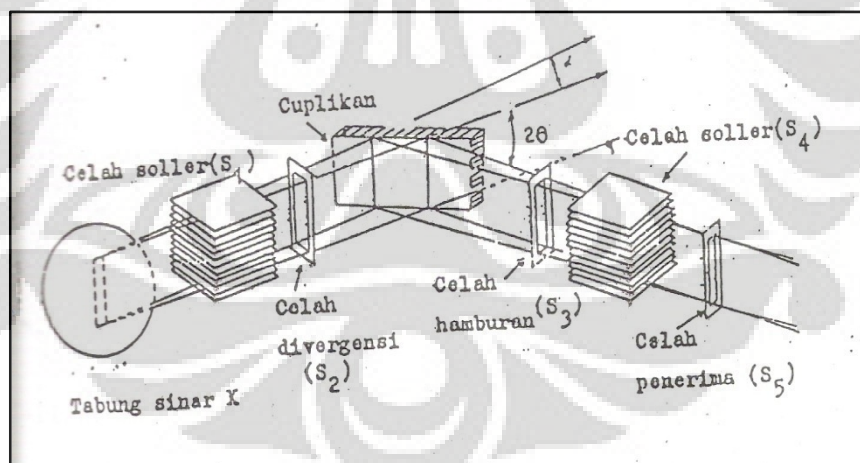
Salah satu cara untuk mengukur nilai tegangan sisa adalah dengan menggunakan difraktometer. Difraktometer merupakan suatu alat yang digunakan untuk mempelajari struktur dan mengamati pola difraksi yang dihasilkan oleh bahan tersebut. Dalam penelitian ini alat yang digunakan adalah *X-Ray Diffraction*

Shimadzu. Difraktometer ini menggunakan sumbu rotasi cuplikan pada arah vertical dan detektornya bergerak dengan arah horizontal.

Prinsip kerja dari difraktometer sinar X adalah sebagai berikut. Berkas sinar X dilewatkan melalui celah soler (S_1) maupun celah divergensi (S_2) dan selanjutnya jatuh pada cuplikan. Apabila sinar ini mengenai cuplikan dengan orientasi tertentu, maka terjadi hamburan sinar X. Berkas sinar X yang terhambur ini dikumpulkan oleh celah penerima receiver (S_5) setelah melalui celah hamburan (S_3) maupun celah soler (S_4).

Selanjutnya berkas sinar X ini masuk melalui detektor dan diubah menjadi pulsa listrik, kemudian diperkuat oleh penguat awal dan masuk ke dalam PHA meter. Selanjutnya pulsa ini diteruskan ke alat penghitung waktu maupun alat perekam. Dari recorder, diperoleh bentuk pola difraksi cuplikan yang diamati. Dari penghitung waktu, pulsa ini diteruskan ke alat pencetak.

Pengukuran pola difraksi dapat dilakukan secara kontinu atau langkah demi langkah. Pada pengukuran langkah demi langkah, detektor hanya mencacah waktu lengan berhenti dan pencacahan dilakukan berdasarkan cacahan tetap (*preset count*) maupun waktu tetap (*preset time*).



Gambar 3.6 Sistem celah pada goniometer difraktometer sinar-X^[18]

Kemudian dengan menggunakan persamaan Bragg nilai (jarak) kisi d ditentukan dengan menggunakan d reference yaitu d_0 yang tidak mengalami deformasi. Dimana nilai d hkl diperoleh dari persamaan Bragg's^[12]

$$n \lambda = d \sin \phi \quad (3.2)$$

Untuk menghitung tegangan pada arah longitudinal. Dapat digunakan hukum Hooke^[13]

$$\sigma = \frac{E}{\varepsilon} \quad (3.3)$$

Dimana nilai strain (ε) diperoleh dari pengukuran nilai d yang diperoleh sebelumnya :

$$\varepsilon = \frac{d-d_0}{d_0} \quad (3.4)$$

Kemudian nilai strain ini digunakan untuk menghitung nilai tegangan sisa (*residual stress*).

$$\sigma = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} (\varepsilon) \quad (3.5)$$

Pada perhitungan tegangan sisa yang dilakukan, nilai modulus elastisitas E adalah 207 GPa. Sedangkan untuk poisons rasio (ν) adalah 0,3.

BAB 4 DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Data dan analisa ketebalan pelat terhadap nilai distorsi angular

Tabel 4.1 Parameter Pengelasan GMAW pada Pelat 10 mm

| Pass ke | Volt (V) | I (A) | Gas (L/menit) | Travel Speed (mm/menit) | Heat Input (kJ/mm) | Perubahan Sudut (⁰) |
|---------|----------|-------|---------------|-------------------------|--------------------|----------------------------------|
| 1 | 28 | 180 | 18 | 31.25 | 15.12 | 0 |
| 2 | 30 | 200 | 18 | 23.81 | 15.12 | 0.27 |
| 3 | 30 | 200 | 18 | 21.74 | 15.12 | 0.91 |
| 4 | 30 | 200 | 18 | 21.74 | 15.12 | 1.23 |
| 5 | 30 | 200 | 18 | 22 | 15.12 | 1.37 |
| 6 | 30 | 200 | 18 | 28.30 | 16.56 | 0.98 |

Tabel 4.1 menunjukkan parameter yang digunakan pada pengelasan pelat 10 mm beserta hasil distorsinya. Arus, voltase, dan kecepatan (travel speed) yang digunakan diatur sedemikian hingga ukuran kampuh las yang dihasilkan cocok dengan ukuran groove pada pelat. Gas pelindung yang digunakan adalah CO₂ dengan debit tetap pada setiap pass yaitu 18 L/menit. Perbedaan kecepatan (travel speed) yang digunakan menghasilkan nilai masukan panas yang berbeda sehingga menghasilkan distorsi yang berbeda.

Tabel 4.2 Parameter Pengelasan GMAW pada Pelat 16 mm

| Pass ke | Volt (V) | I (A) | Gas (L/menit) | Travel Speed (mm/menit) | Heat Input (KJ/mm) | Perubahan Sudut (⁰) |
|---------|----------|-------|---------------|-------------------------|--------------------|----------------------------------|
| 1 | 30 | 200 | 20 | 23.81 | 9.60 | 0.75 |
| 2 | 30 | 200 | 20 | 23.81 | 15.20 | 1.16 |
| 3 | 30 | 200 | 20 | 23.81 | 16.56 | 1.25 |
| 4 | 30 | 200 | 20 | 23.81 | 16.56 | 1.08 |
| 5 | 30 | 200 | 20 | 23.81 | 16.36 | 0.31 |
| 6 | 30 | 200 | 18 | 21.74 | 12.72 | 1.85 |

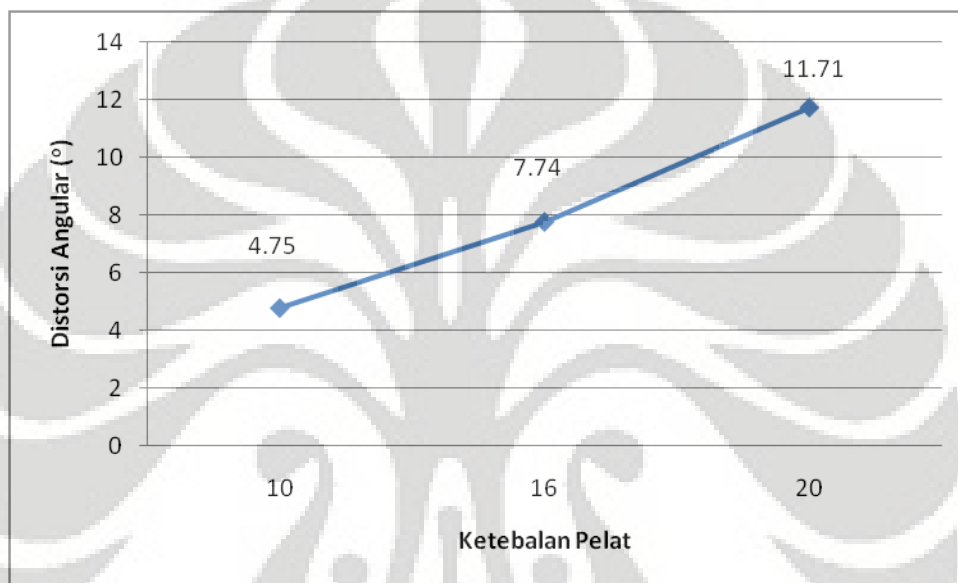
Tabel 4.2 menunjukkan parameter proses las yang digunakan pada pengelasan pelat 16 mm. Besar arus dan voltase yang digunakan sama dengan yang digunakan pada pengelasan pelat 10 mm, hanya saja kecepatan las yang digunakan sedikit lebih lambat, yaitu 23,81 mm/menit. Kecepatan yang lebih lambat ini digunakan agar menghasilkan kampuh las yang lebih besar sehingga bisa mengisi groove pada pelat 16 mm. Pada pass keenam, kecepatan las dibuat menjadi lebih lambat lagi yaitu 21,74 mm/menit agar bisa mengisi groove yang paling atas atau biasa disebut dengan istilah *capping*.

Tabel 4.3 Parameter Pengelasan GMAW pada Pelat 20 mm

| Pass ke | Volt (V) | I (A) | Gas (L/menit) | Travel Speed (mm/menit) | Heat Input (KJ/mm) | Perubahan Sudut (°) |
|---------|----------|-------|---------------|-------------------------|--------------------|---------------------|
| 1 | 30 | 200 | 20 | 38.46 | 9.36 | 0.06 |
| 2 | 30 | 200 | 20 | 36.58 | 9.84 | 0.75 |
| 3 | 30 | 200 | 20 | 34.89 | 10.32 | 1.45 |
| 4 | 30 | 200 | 20 | 31.25 | 11.52 | 1.51 |
| 5 | 30 | 200 | 20 | 28.30 | 12.72 | 1.5 |
| 6 | 30 | 200 | 20 | 28 | 12.86 | 1.36 |
| 7 | 30 | 200 | 20 | 21.74 | 16.50 | 1.48 |
| 8 | 30 | 200 | 20 | 16.67 | 21.60 | 1.35 |
| 9 | 30 | 200 | 20 | 15 | 24 | 0.82 |
| 10 | 30 | 200 | 20 | 12 | 30 | 1.46 |

Tabel 4.3 menunjukkan parameter pengelasan yang digunakan pada pengelasan pelat 20 mm. Pass yang digunakan pada pengelasan pelat 20 mm lebih banyak dari pada pelat 16 mm dan pelat 10 mm karena ketebalan yang lebih tinggi membutuhkan lebih banyak kampuh las yang harus dibuat. Kecepatan las yang digunakan juga lebih lambat dari yang digunakan pada pengelasan pelat 16 mm dan 10 mm, seperti yang ditunjukkan Tabel 4.1 dan 4.2. Kecepatan yang lebih lambat ini digunakan agar menghasilkan kampuh las yang lebih besar sehingga memungkinkan pengelasan pelat yang lebih tebal.

Dari Tabel 4.1, 4.2, dan 4.3 dibuat grafik pada Gambar 4.1 untuk menunjukkan perbedaan distorsi angular pada pengelasan pelat dengan berbeda ketebalan. Hasil penelitian ini menunjukkan nilai distorsi angular yang semakin meningkat dengan bertambahnya ketebalan pelat. Gambar 4.1 memperlihatkan grafik nilai distorsi angular yang dihasilkan dari pengelasan pelat 10 mm adalah $4,75^\circ$. Pada pengelasan pelat 16 mm nilai yang dihasilkan adalah $7,74^\circ$. Pada pengelasan pelat 20 mm menghasilkan nilai yang paling besar yaitu $11,71^\circ$.

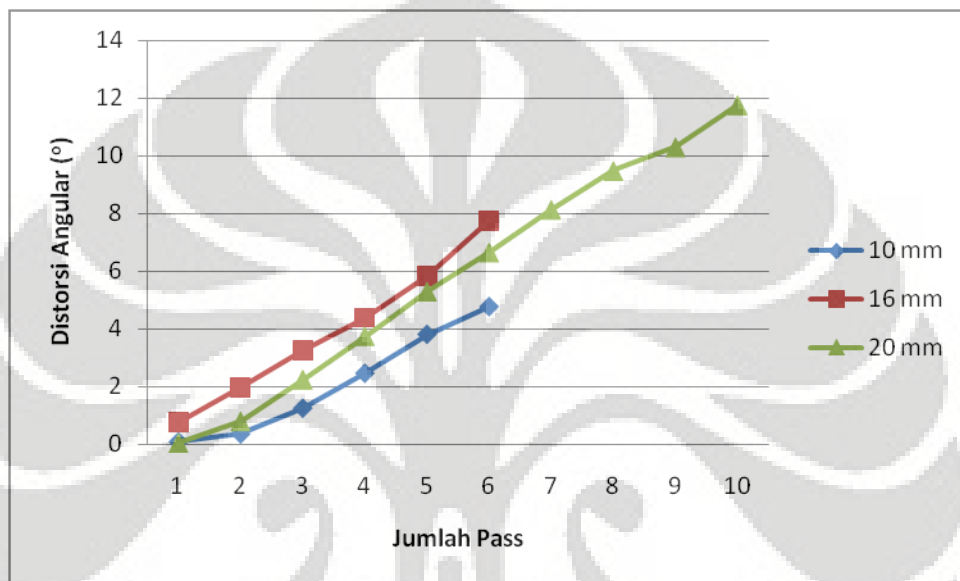


Gambar 4.1 Hubungan antara ketebalan pelat terhadap nilai distorsi angular

Pada Gambar 4.1 terlihat besaran distorsi angular yang berbeda-beda antara pelat dengan ketebalan yang berbeda pada pengelasan GMA. Nilai distorsi per pass yang terjadi berada pada kisaran 0.2° sampai 1.8° . Grafik di atas menunjukkan nilai distorsi yang semakin besar dengan meningkatnya ketebalan pelat yang dilas.

Distorsi angular terjadi karena gaya pemuaian dan penyusutan yang bekerja antara lasan terhadap logam dasar. Ketika logam las membeku dan bercampur dengan logam lasan, maka logam dalam keadaan memuai maksimum. Pada pendinginan logam berusaha untuk menyusut ke volume yang bisa dicapai pada temperature terendah, tapi hal ini ditahan oleh logam dasar yang berdekatan.^[8]

Distorsi angular pada pelat 10 mm memiliki nilai paling kecil dibanding pelat 16 mm dan 20 mm karena beberapa hal. Pertama, karena pelat 10 mm hanya membutuhkan enam pass untuk memenuhi groove yang ada pada lasan. Pelat 16 mm membutuhkan pass yang lebih banyak pada lasan, maka semakin besar nilai distorsi angular. Hal ini terjadi karena volume logam las yang membeku pada pelat 10 mm semakin sedikit, sehingga gaya pemuaihan dan penyusutan yang bekerja pada logam dasar semakin kecil.^[8]



Gambar 4.2 Hubungan jumlah pass dengan distorsi angular pada berbagai macam ketebalan

Kedua, karena pelat 10 mm mendapatkan masukan panas (*Heat Input*) yang lebih kecil dibanding dengan pelat yang lebih tebal. Menurut Sindo Kou, semakin besar nilai heat input yang diterima oleh logam lasan maka nilai distorsi angular semakin besar.^[2] Hal ini terjadi karena semakin besar nilai heat input yang diterima logam lasan maka daerah yang mengalami pemuaihan semakin besar sehingga gaya pemuaihan yang terjadi antara logam lasan dan logam dasar semakin besar. Waktu juga mempengaruhi nilai distorsi karena semakin lama waktu pengelasan maka transmisi panas yang dapat mempengaruhi logam sekitar dan memuaiakannya semakin besar sehingga gaya pemuaihan yang terjadi antara logam lasan dan logam dasar semakin besar dan distorsi angular yang terjadi juga semakin besar.^[8]

Masukan panas yang diterima pelat 10 mm tiap pass adalah 15,12 kJ/mm. pelat 16 mm menerima masukan panas hingga 16,3 kJ/mm. pelat 20 mm

mendapatkan masukan panas hingga 30kJ/mm pada pass yang terakhir. Pelat yang lebih tebal membutuhkan kecepatan lasan (*travel speed*) yang lebih lambat agar kampuh las yang dihasilkan lebih besar. *Travel speed* yang lebih lambat ini menghasilkan nilai masukan panas yang lebih besar. Pada pelat 20 mm, masukan panas yang diterima paling besar. Dengan pass yang lebih banyak dan masukan panas yang lebih besar mengakibatkan pelat 20 mm memiliki distorsi angular yang makin besar.

Jenis sambungan juga mempengaruhi nilai distorsi. Pada jenis sambungan *butt* dengan tipe *groove V* akan menghasilkan nilai distorsi yang besar.^[1] Jenis sambungan ini memiliki volume logam las yang cukup besar sehingga memungkinkan gaya penyusutan yang bekerja pada logam dasar semakin besar. Berdasarkan dari ukuran dari elektroda yang digunakan maka ukuran elektroda yang paling besar menghasilkan nilai distorsi yang besar pula.

4.2 Data dan analisa nilai kekerasan dan struktur mikro

4.2.1 Data dan analisa nilai kekerasan logam las, HAZ, dan logam dasar

Tabel 4.4 Nilai kekerasan pelat 10 mm

| Posisi | Nilai kekerasan (VHN) | | | | | | | | | | |
|--------|-----------------------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------------|-----|
| | Logam dasar | | HAZ | | Logam las | | | HAZ | | Logam dasar | |
| | I | II | I | II | I | II | III | I | II | I | II |
| A | 166 | 164.9 | 186.2 | 185.1 | 182.5 | 184.7 | 187.7 | 170.6 | 170.4 | 164.6 | 163 |

Tabel 4.4 menunjukkan nilai kekerasan pada pelat 10 mm. kekerasan tertinggi adalah pada logam las yaitu 187,7 VHN. Kekerasan terendah ada pada logam dasar, yaitu 163 VHN. Daerah HAZ dengan kekerasan yang lebih tinggi (186,2 dan 185,1 VHN) adalah bagian pelat yang dijepit. Sedangkan HAZ dengan nilai kekerasan yang lebih rendah adalah bagian pelat yang dibiarkan atau tidak dijepit sehingga distorsi terjadi secara bebas.

Tabel 4.5 Nilai kekerasan pelat 16 mm

| Posisi | Nilai kekerasan (VHN) | | | | | | | | | | |
|--------|-----------------------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------------|-------|
| | Logam dasar | | HAZ | | Logam las | | | HAZ | | Logam dasar | |
| | I | II | I | II | I | II | III | I | II | I | II |
| A | 152.9 | 153.4 | 186.8 | 196.2 | 190,0 | 184 | 173.1 | 175.6 | 176.2 | 153.6 | 153.6 |
| B | 156.9 | 156.5 | 172.2 | 171.3 | 160.3 | 162.3 | 162.6 | 176.6 | 173.3 | 166.3 | 159.8 |

Tabel 4.5 menunjukkan nilai kekerasan yang diambil pada beberapa titik. Dari table 4.5 tersebut kita bisa melihat nilai kekerasan yang paling tinggi ada di daerah HAZ yaitu sebesar 196,2 VHN. Sedangkan HAZ pada bagian yang tidak dijepit memiliki nilai kekerasan yang lebih rendah yaitu 173,3 VHN. Nilai kekerasan logam dasar pada seluruh bagian yang diambil cukup sama yaitu sekitar 154 VHN.

Tabel 4.6 Nilai kekerasan pelat 20 mm

| Posisi | Nilai kekerasan (VHN) | | | | | | | | | | |
|--------|-----------------------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------------|-------|
| | Logam dasar | | HAZ | | Logam las | | | HAZ | | Logam dasar | |
| | I | II | I | II | I | II | III | I | II | I | II |
| A | 143.5 | 143.5 | 180.1 | 175.1 | 190,0 | 175.5 | 180.5 | 177.9 | 166.2 | 135 | 130.4 |
| B | 146.5 | 146.9 | 188.7 | 189.2 | 196.9 | 198.8 | 195,0 | 177.4 | 176.2 | 156.2 | 153.7 |

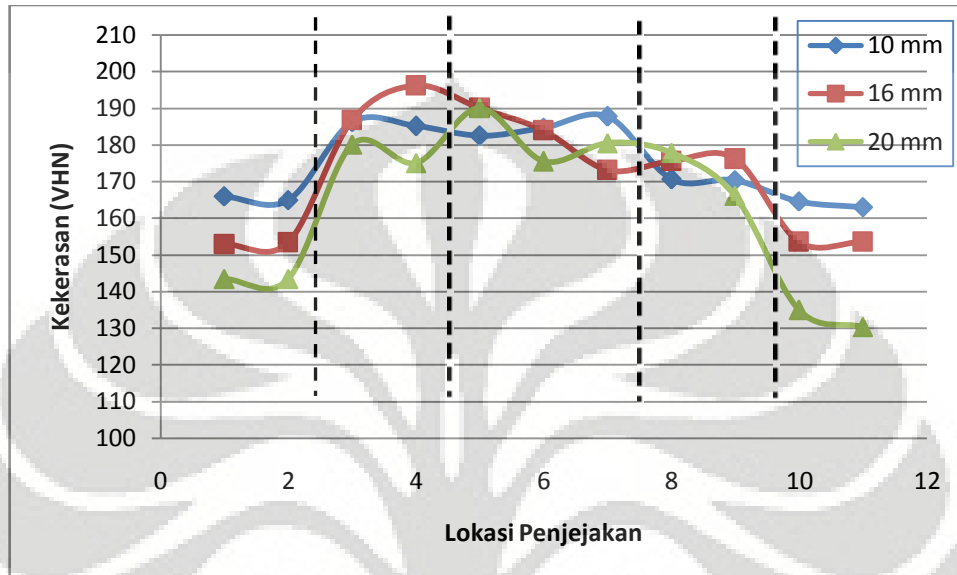
Setelah dilakukan pengujian kekerasan pada logam las, HAZ, dan logam dasar pada bagian atas dan bawah lasan, maka didapat data yang diwakili oleh grafik dibawah ini. Gambar 4.3 memperlihatkan nilai kekerasan dari ketiga pelat dengan ketebalan yang berbeda.

Logam dasar yang seharusnya memiliki nilai kekerasan yang sama untuk setiap ketebalan. Data yang didapatkan menunjukkan kekerasan base metal pelat 10 mm lebih tinggi yaitu sebesar 166 VHN, sedangkan pelat 16 mm dan 20 mm memiliki nilai kekerasan 152,9 VHN dan 146,5 VHN. Hal ini bisa saja dipengaruhi oleh kesalahan pada saat penjejukan, seperti peletakan spesimen yang tidak sejajar dengan alas spesimen, karena ketebalan spesimen yang tidak merata. Meskipun demikian, setelah dilakukan penjejukan di titik yang berbeda (titik 10 dan 11) pada logam dasar tetap menghasilkan kekerasan yang tidak sama.

Kekerasan daerah logam las mulai dari yang terbesar ke yang terkecil berturut-turut adalah 20 mm, 10mm, dan 16 mm. Pelat 20 mm memiliki nilai

kekerasan tertinggi dengan nilai 198,8 VHN. Sedangkan logam las pelat 16 memiliki nilai kekerasan sebesar 162,3 VHN.

Nilai kekerasan HAZ bagian yang dijepit lebih keras dibanding bagian yang tidak dijepit. Nilai kekerasan HAZ pelat 20 mm paling tinggi, yaitu sebesar 188,7 VHN



Gambar 4.3 Nilai kekerasan di berbagai daerah pada pelat yang berbeda

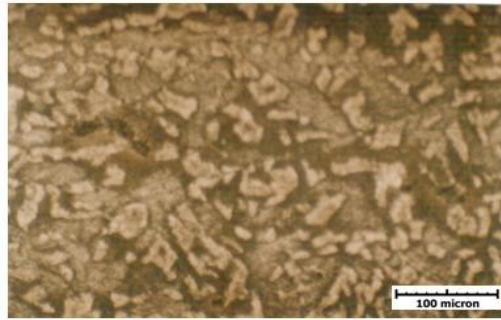
4.2.2 Data dan analisa struktur mikro

Struktur mikro logam dasar terdiri dari ferrite dan pearlite. Setiap ketebalan pelat yang berbeda memiliki penampakan ferrite dan pearlite yang berbeda ukuran, seperti yang ditunjukkan Gambar 4.4. Pelat 20 mm memiliki bentuk ferrite yang lebih bulat dibanding dengan ferrite pelat 16 mm dan 10 mm. Ini menunjukkan bahwa pelat yang dilas adalah pelat hasil canai.



(a)

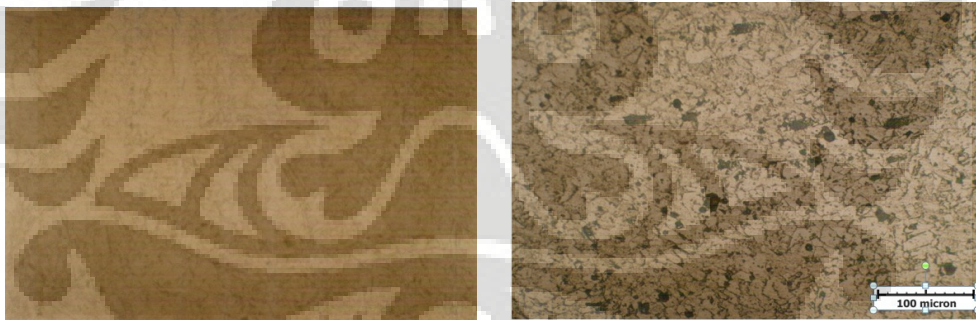
(b)



(C)

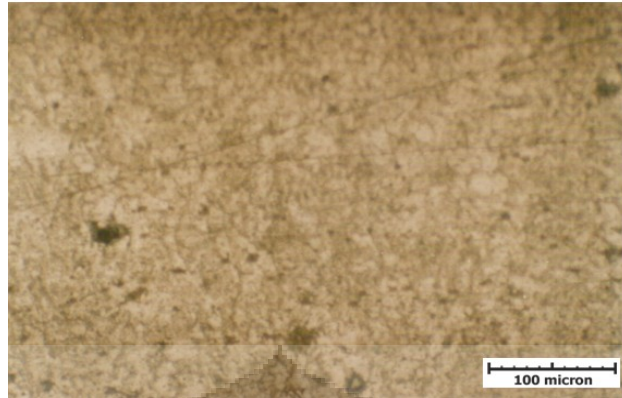
Gambar 4.4 logam dasar (a) pelat 10 mm, (b) pelat 16 mm, dan (c) pelat 20 mm, etsa nital 2% perbesaran 200x

Pada kampuh las (*weldpool*) merupakan hasil pembekuan dari elektroda dimana elektroda yang digunakan merupakan jenis baja karbon rendah dengan komposisi C 0.09% Wt. Secara keseluruhan pada setiap ketebalan pelat pada kampuh las yang diamati pada Foto mikrostruktur terdiri atas *acicular ferrite* dan fasa *ferrite-pearlite* dengan struktur *widmanstatten* yang sedikit. Pada Gambar 4.5 (a), (b), dan (c) kampuh las dapat diamati mikrostruktur dari kampuh las dengan struktur *ferrite-pearlite*.



(a)

(b)



(c)

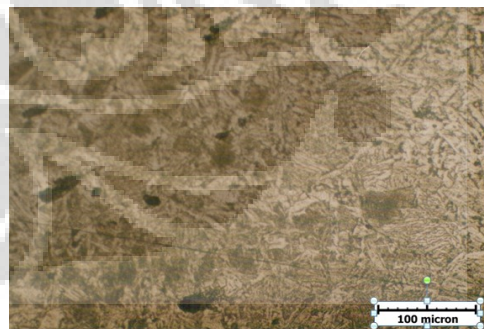
Gambar 4.5 logam las (a) pelat 10 mm, (b) pelat 16 mm, (c) pelat 20 mm, etsa nila 2% perbesaran 200x

Adapun HAZ terbagi menjadi dua bagian; HAZ berbutir halus dan HAZ berbutir kasar.

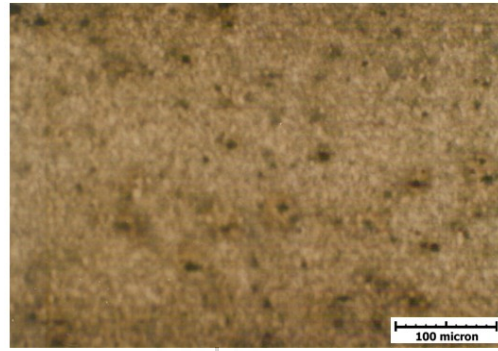
HAZ berbutir kasar terletak bersebelahan langsung dengan logam las. Ukuran butir yang berbeda pada HAZ dihasilkan oleh suhu pemanasan yang berbeda. HAZ kasar menerima pemanasan yang lebih tinggi dibandingkan dengan HAZ halus. HAZ kasar mengalami pemanasan hingga suhu jauh di atas AC_3 atau sekitar 1300°C , sehingga memungkinkan austenite untuk tumbuh dan terjadi pengkasaran butir. Laju pendinginan yang cepat menyebabkan transformasi dari austenite menjadi ferrite dan pearlite tidak sempurna.. Seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.6 (a), (b), dan (c).



(a)



(b)



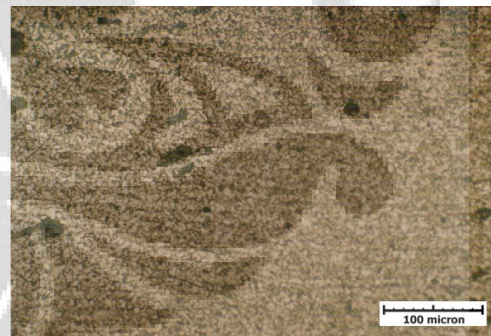
(c)

Gambar 4.6 HAZ kasar (a) pelat 10 mm, (b) pelat 16 mm, (c) pelat 20 mm, etsa nital 2% perbesaran 200x

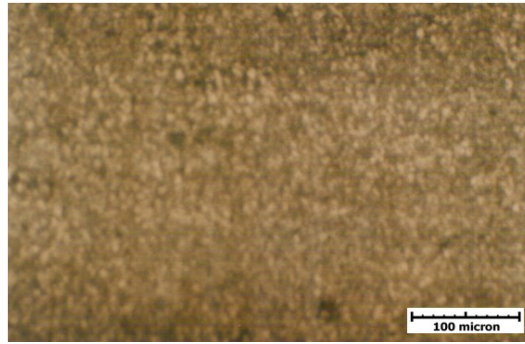
Bagian HAZ berbutir halus mengalami pemanasan sampai di atas temperature kritis A_{c3} , sehingga memungkinkan butir austenite bernukleasi. Butir austenite ini berubah menjadi pearlite kecil dan butir ferrite selama pendinginan. Distribusi pearlite dan ferrite tidak seragam sepenuhnya karena waktu difusi untuk karbon terbatas di bawah laju pemanasan yang tinggi selama pengelasan dan austenite akhir tidak homogen. HAZ halus ditunjukkan pada Gambar 4.6 (a), (b) dan (c).



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.7 HAZ halus (a) pelat 10 mm, (b) pelat 16 mm, (c) pelat 20 mm, etsa natal 2% perbesaran 200x

4.2.3 Data dan analisa Foto makro

Gambar 4.8, 4.9, dan 4.10 menunjukkan foto makro pelat 10 mm, 16 mm, dan 20 mm. Pada Gambar tersebut terlihat penetrasi lasan yang bagus, bebas *undercutting*, bebas porositas dan kedalaman HAZ yang cukup seragam.

Karena pelat yang dilas cukup tebal, maka untuk dapat mengelas pelat 10, 16, dan 20 mm diperlukan pengelasan multipass. Foto makro pada Gambar 4.7 memperlihatkan hasil pengelasan multipass. Pelat 10 mm membutuhkan enam pass. Pelat 16 mm yang juga dilas dengan enam pass menunjukkan Gambar makro yang cukup sama dengan Gambar makro pelat 10mm, seperti yang ditunjukkan Gambar 4.8. Adapun pelat 20 mm memiliki Gambar makro yang cukup berbeda karena pengelasannya membutuhkan sepuluh pass, seperti pada Gambar 4.9.



Gambar 4.8 Foto makro pelat 10 mm, perbesaran 7 x

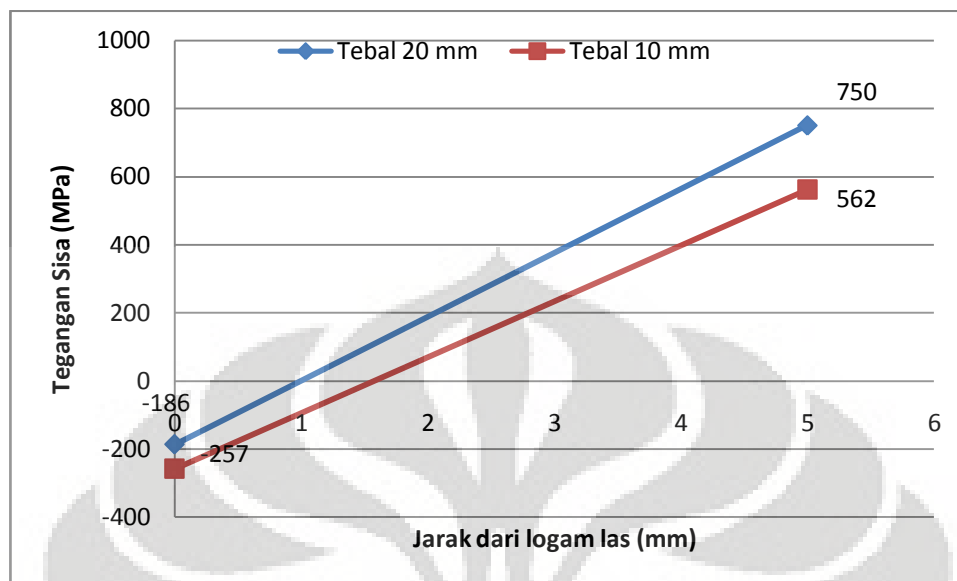


Gambar 4.9 Foto makro pelat 16 mm, perbesaran 9 x



Gambar 4.10 Foto makro pelat 20 mm, perbesaran 8 x

4.3 Data dan analisa tegangan sisa



Gambar 4.11 Nilai tegangan sisa pada beberapa posisi

Grafik pada Gambar 4.11 di atas menunjukkan nilai tegangan sisa pada kedua pelat yang dilas GMAW dengan ketebalan berbeda. Daerah yang ditembak sinar X adalah daerah HAZ dan daerah kampuh las. Daerah kampuh las yang diuji tegangan sisa adalah bagian atas kampuh, karena daerah bawah kampuh las telah mengalami temper berulang yang disebabkan pengelasan multipass.

Grafik pada gambar 4.11 juga menunjukkan bahwa tegangan yang terjadi pada jarak 5 mm dari kampuh las memiliki nilai positif, yaitu tegangan tarik (tensile stress). Ini membuktikan tegangan sisa di daerah ini dipengaruhi oleh penyusutan yang terhambat selama pendinginan berlangsung ketika logam las membeku.

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

Di samping itu, transformasi fasa dan perubahan volume selama pengelasan juga mempengaruhi besar tegangan sisa. Meskipun mikrostruktur yang

didapat dari penelitian ini tidak menunjukkan adanya fasa martensit, perubahan fasa selama pendinginan berlangsung bisa mengakibatkan tegangan sisa.



BAB 5 PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian ini diperoleh beberapa kesimpulan, yaitu :

1. Nilai distorsi angular pengelasan GMA pada baja JIS G 3101 SS 400 semakin meningkat dengan meningkatnya ketebalan pelat yang dilas. Nilai distorsi angular pelat 10 mm, 16 mm, dan 20 mm berturut-turut adalah $4,75^\circ$, $7,74^\circ$, dan $11,71^\circ$.
2. Semakin besar masukan panas, distorsi angular akan semakin besar.
3. Semakin banyak pass pada pengelasan, distorsi angular akan semakin besar.
4. Nilai kekerasan bagian pelat yang dijepit lebih tinggi dibanding dengan yang tidak dijepit.
5. Tegangan sisa tarik pada pelat 20 mm lebih besar dari pada pelat 10 mm. Pelat 20 mm memiliki tegangan sisa sebesar 750 MPa pada jarak 5mm dari pusat las sedangkan pelat 10 mm memiliki tegangan sisa sebesar 562 Mpa untuk posisi yang sama. Sedangkan pada logam las, tegangan sisa yang muncul berupa tegangan sisa tekan pelat 20 mm sebesar sebesar 186 MPa, dan pada pelat 10 mm sebesar 257 Mpa.

5.2 Saran

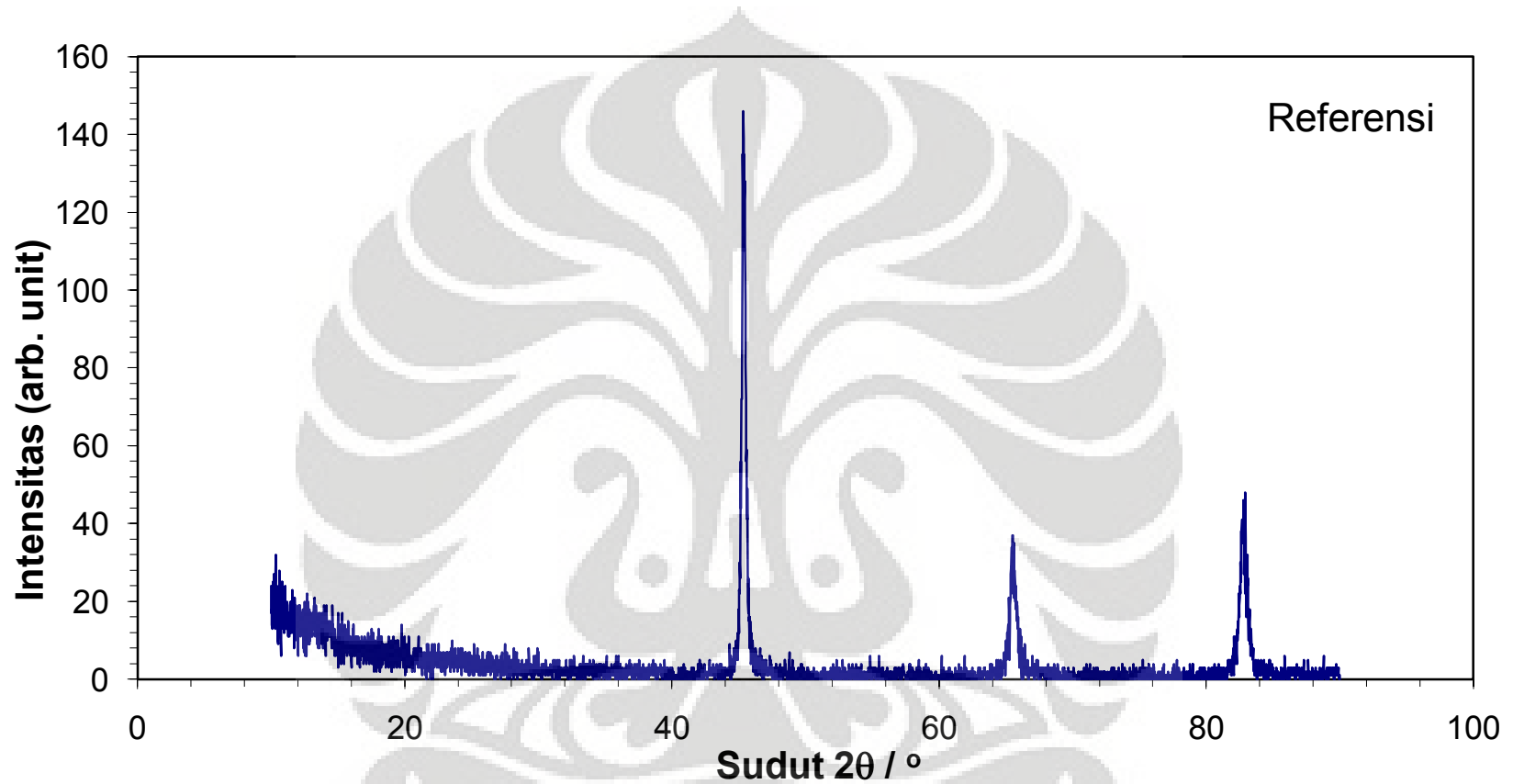
Untuk penelitian lebih lanjut seharusnya dilakukan pengukuran masukan panas aktual selama proses pengelasan. Untuk tegangan sisa, sebaiknya dilakukan pengujian tegangan sisa pada tiap pass sampel lasan. Disamping itu, diperlukan pengujian struktur mikro lebih lanjut untuk mengetahui hubungan transformasi fasa terhadap besar tegangan sisa.

REFERENSI

- [1]. Masubuchi, K, 1980. Analysis of Welded Structure, First Ed.Pergamon Press Ltd. Oxford, England.
- [2]. Welding Handbook Volume 1, eight Ed, American Welding Society Miami, Florida, USA
- [3] Metals Handbook, (2001), Vol. 1 –High-Strength Structural and High-Streng,. American Society For Metals International,
- [4]. Metals Handbook, (2001), Vol. 6 – Welding, Brazing and Soldering, American Society For Metals International,
- [5]. Metals Handbook, (2001), Vol. 8 – Mechanical testing, American Society For Metals International,
- [6]. Zhili Feng, 2005. Processes and mechanisms of welding residual stress and distortion Woodhead Publishing and Maney Publishing on behalf of The Institute of Materials, Minerals & Mining
- [7]. Sindo Kou, 2002. Welding metallurgy 2nd ed. “A Wiley-Interscience publication
- [8]. <http://www.lincolnelectric.com/knowledge/articles/list.asp> diakses tanggal 21 Mei 2010 pukul 2.10 pm
- [9]. Gas Metal Arc Welding Carbon, Low Alloy, and Stainless Steels and Aluminum Lincoln elektrik
- [10]. Hira dan Nakamura. research on *angular* change in fillet welds, Ishikawajina Review, pp29-68)) on 1 analisis of welded structure.
- [11]. Analysis of Residual Stress by Diffraction using Neutron and Synchrotron Radiation, 2003. Taylor & Francis 11 New Fetter Lane, London EC4P 4EE

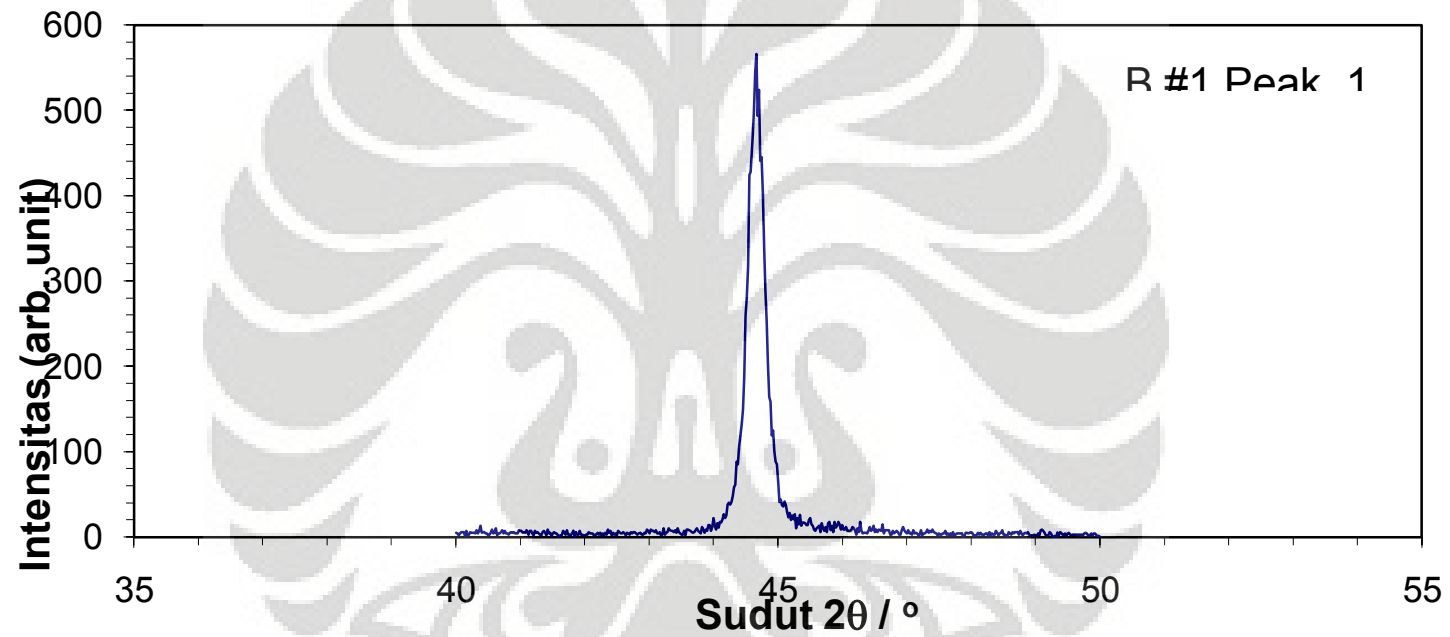
- [12]. Metals Handbook, (2001), Vol. 10 – Materials Characterization, American Society For Metals International,
- [13]. Callister, William D J. 2004. Materials Science and Engineering an Introduction. Singapore ; John Wiley & Sons
- [14]. SLV Duisburg GmbH, *Welding Engineer's Current Knowledge*, edition 2000,1999
- [15]. Farid Moch. Zamil. 2003. ”*Manual Distorsi/Deformasi (Perubahan Bentuk)*”. Diakses 21 Januari 2010, dari migas online.
<http://www.migas-indonesia.com/index.php?module=article&sub=article&act=view&id=164>
- [16] Juliana Anggono, Roche Alimin. “*Pengaruh Besar Input Panas Pengelasan SMAW Terhadap Distorsi Angular Sambungan T Baja Lunak SS 400*”. Diakses 10 Mei 2009. dari Universitas Kristen Petra.
<http://puslit2.petra.ac.id/ejournal/index.php/mes/article/viewFile/15895/15>
- [17] Ir. Edy S Siradj M.Eng, 1993. Pengukuran Tegangan Sisa Aluminium Paduan 5852-H13 Hasil Pengelasan GTA dengan Metode Difraksi Sinar-X. Jurusan Metalurgi Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- [18] J. Caron, C. Heinze, C. Schwenk, M. Rethmeier, S.S Babu, J. Lippold. Effect of Continuous Cooling Transformation Variations on Numerical Calculation of Welding-Induced Residual Stresses.
- [19] <http://www.bugo.com/brochures.html> diakses tanggal 6 juli 2010.
- [20] <http://www.welding-robots.com/> diakses tanggal 6 juli 2010.
- [21] Metals Handbook, (2002), Residual Stress and Deformation of Steel. Materials Park. USA.

Lampiran 1. Hasil Pengujian XRD untuk material referensi



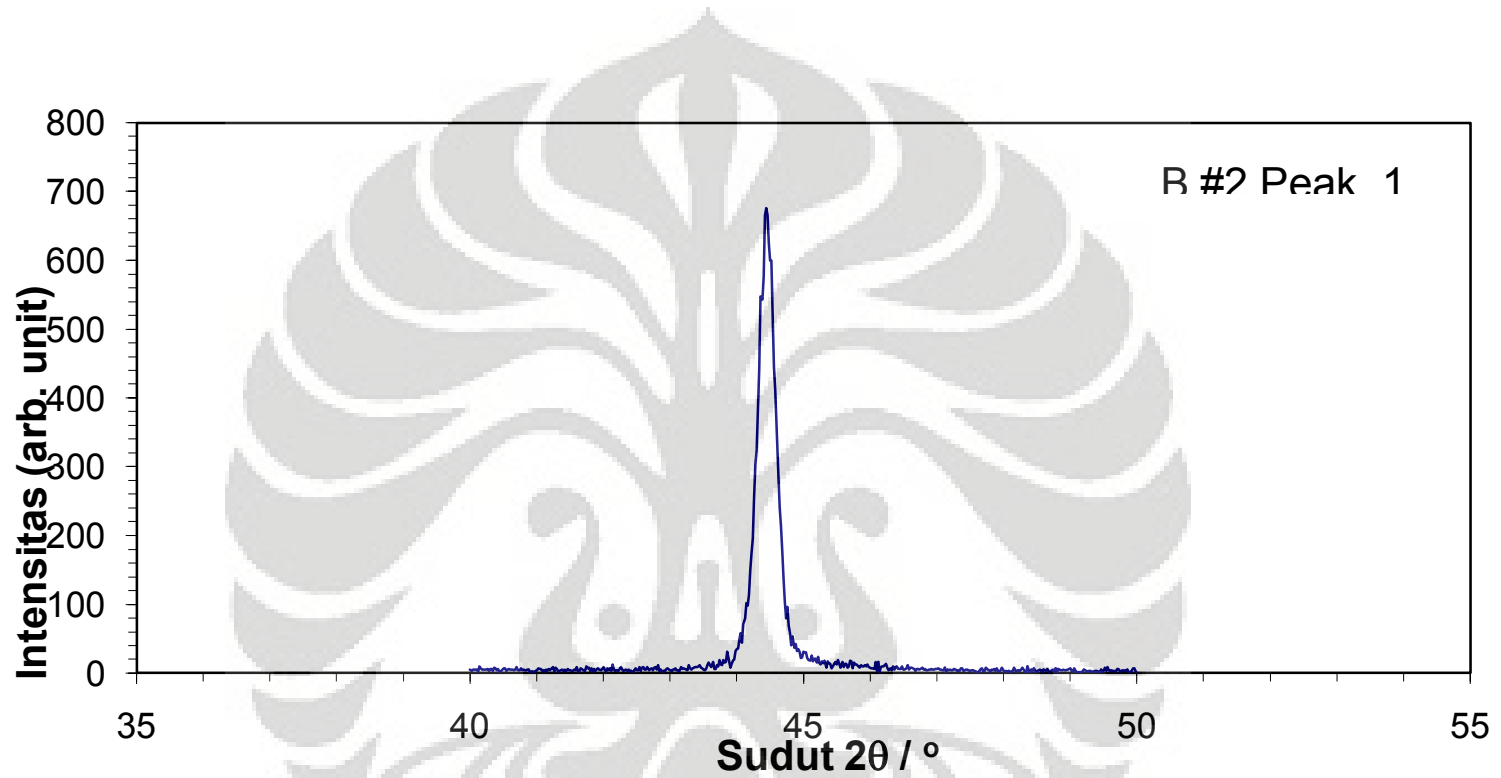
| No. | Pos. [°2Th.] | FWHM [°2Th.] | Area [cts*°2Th.] | Backgr.[cts] | d-spacing [Å] | Height [cts] | Rel. Int. [%] |
|-----|--------------|--------------|------------------|--------------|---------------|--------------|---------------|
| 1 | 45.3899 | 0.3149 | 41.85 | 1 | 1.99815 | 134.73 | 100 |
|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

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



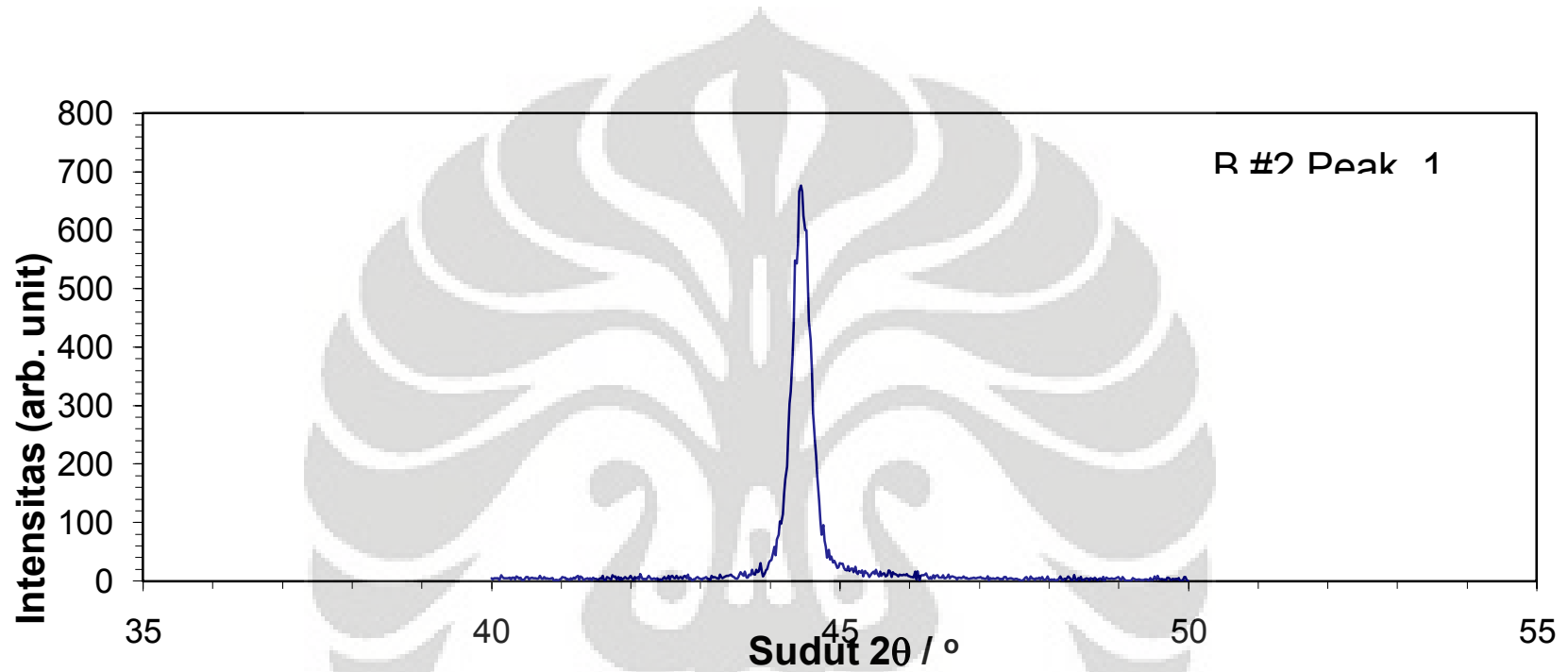
| No. | Pos. [°2Th.] | FWHM [°2Th.] | Area [cts*°2Th.] | Backgr.[cts] | d-spacing [Å] | Height [cts] | Rel. Int. [%] |
|-----|--------------|--------------|------------------|--------------|---------------|--------------|---------------|
| 1 | 44.6687 | 0.216 | 162.1 | 5 | 2.02705 | 562.84 | 100 |

Lampiran 3. Hasil Pengujian XRD untuk material hasil lasan GMAW tebal 10 (jarak 0 mm dari weld center)



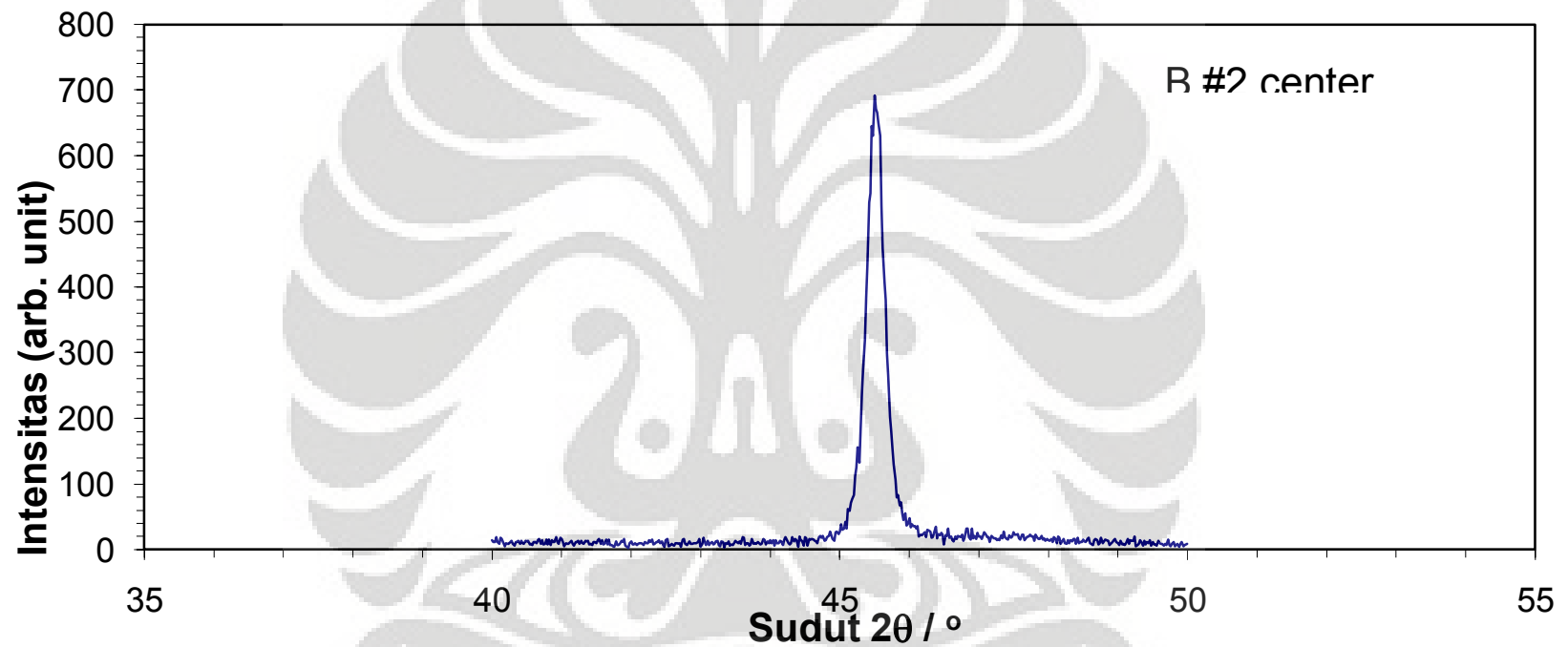
| No. | Pos. [°2Th.] | FWHM [°2Th.] | Area [cts*°2Th.] | Backgr.[cts] | d-spacing [Å] | Height [cts] | Rel. Int. [%] |
|-----|--------------|--------------|------------------|--------------|---------------|--------------|---------------|
| 1 | 44.6621 | 0.2755 | 181.6 | 15 | 2.02901 | 668.16 | 100 |

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



| No. | Pos. [°2Th.] | FWHM [°2Th.] | Area [cts*°2Th.] | Backgr.[cts] | d-spacing [Å] | Height [cts] | Rel. Int. [%] |
|-----|--------------|--------------|------------------|--------------|---------------|--------------|---------------|
| 1 | 44.4517 | 0.168 | 150.24 | 5 | 2.03644 | 670.73 | 100 |

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



| No. | Pos. [°2Th.] | FWHM [°2Th.] | Area [cts*°2Th.] | Backgr.[cts] | d-spacing [Å] | Height [cts] | Rel. Int. [%] |
|-----|--------------|--------------|------------------|--------------|---------------|--------------|---------------|
| 1 | 44.6621 | 0.2755 | 181.6 | 15 | 2.02901 | 668.16 | 100 |

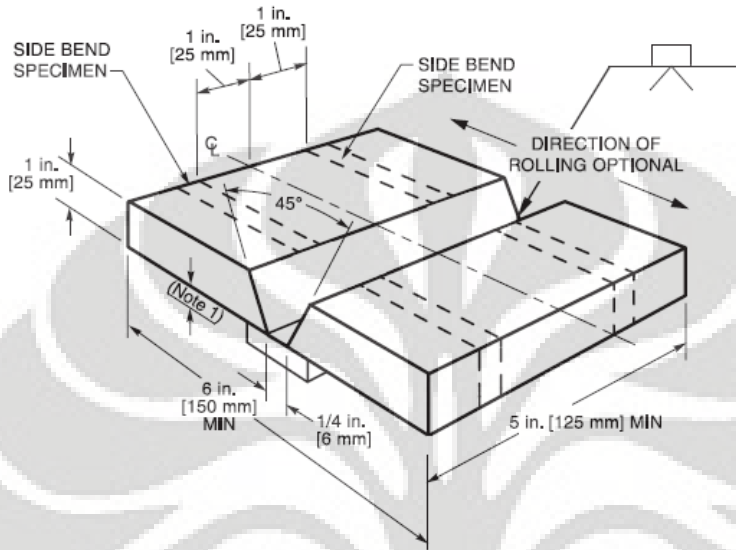
Lampiran 6. Hasil Perhitungan Tegangan sisa

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

Lampiran 7. Test Piece Standard

AWS D1.1/D1.1M:2004

SECTION 4. QUALIFICATION

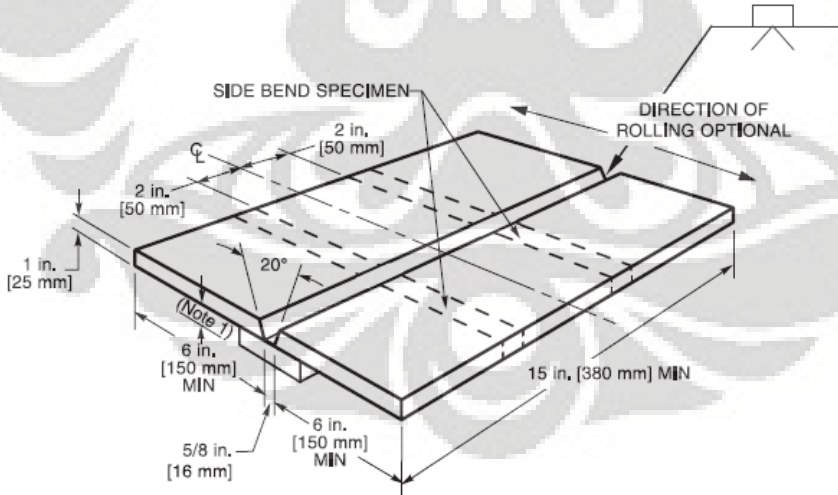


General Note: When RT is used, no tack welds shall be in test area.

Note:

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

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



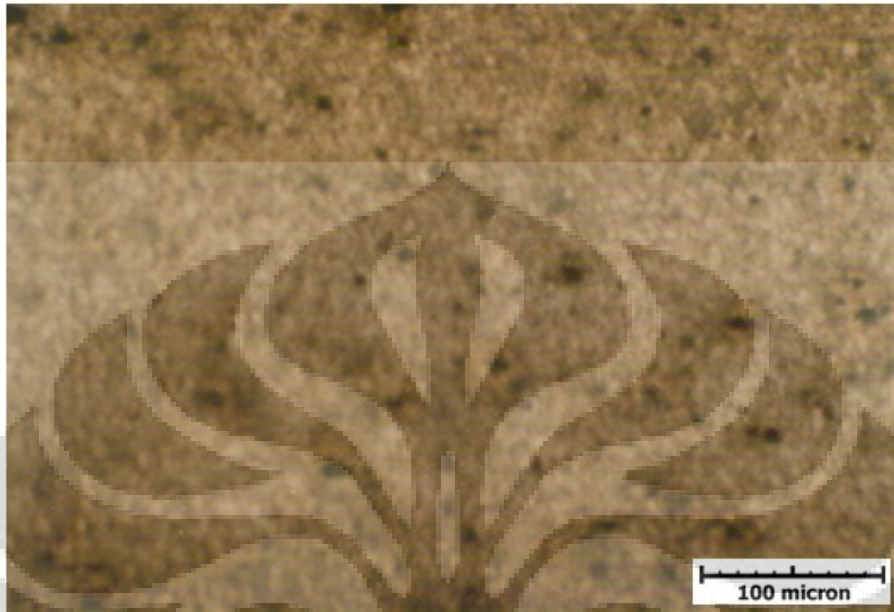
General Notes:

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

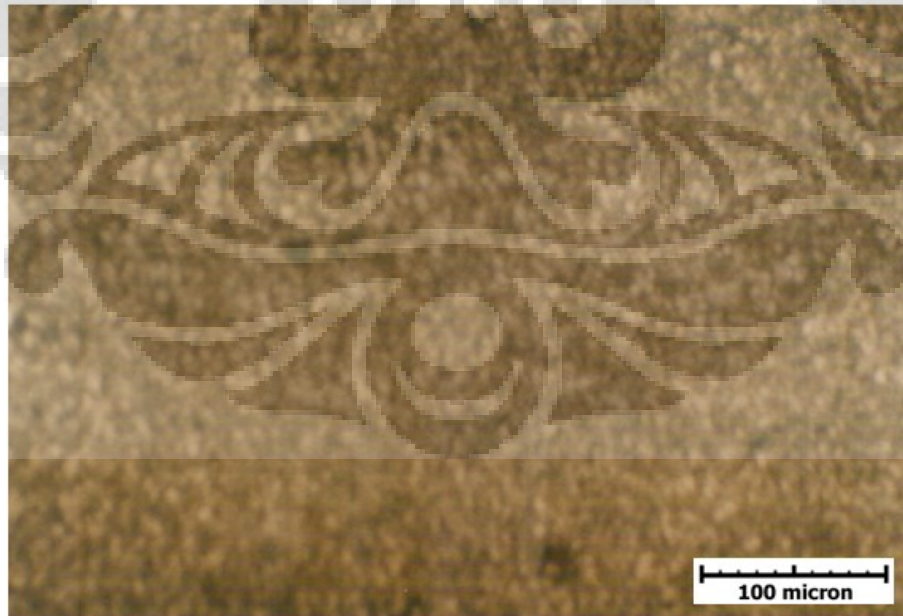
Note:

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

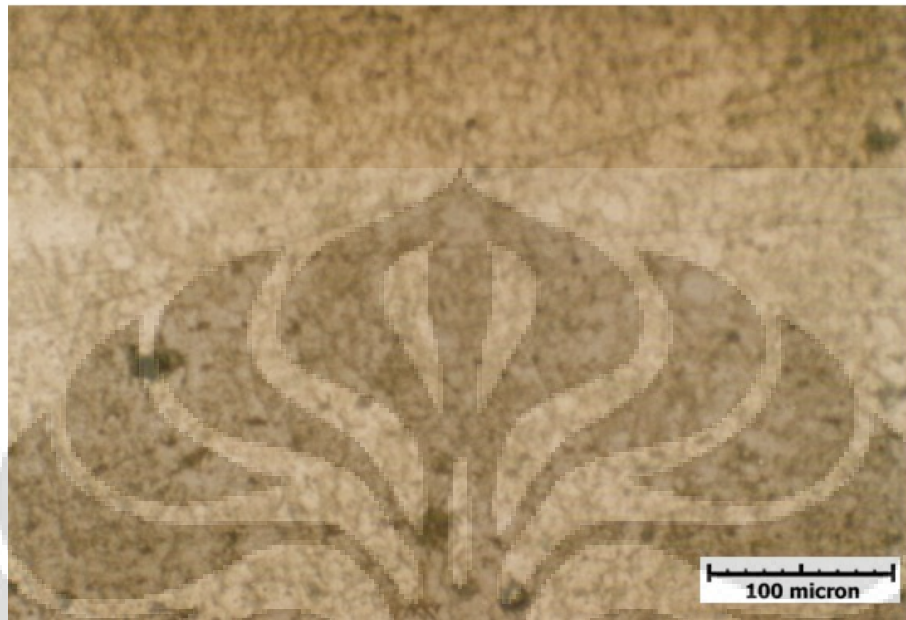
Figure 4.22—Test Plate for Unlimited Thickness—Welding Operator Qualification (see 4.23.2)



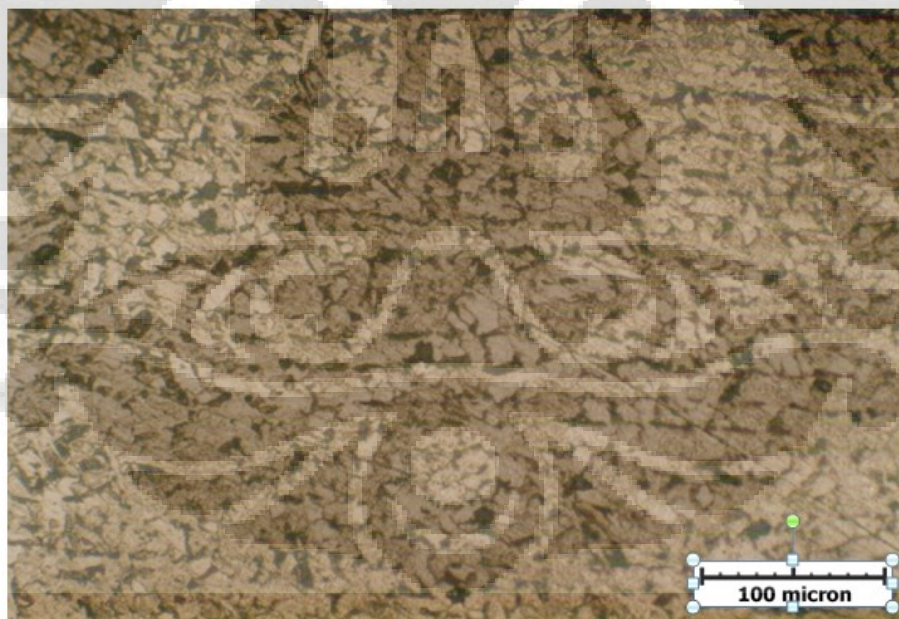
HAZ kasar 20 mm



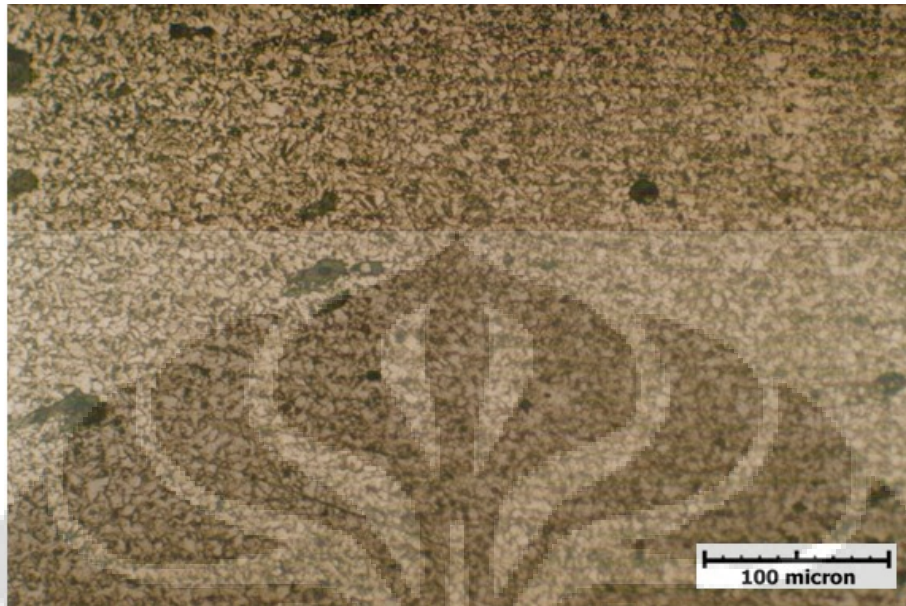
HAZ Halus 20 mm



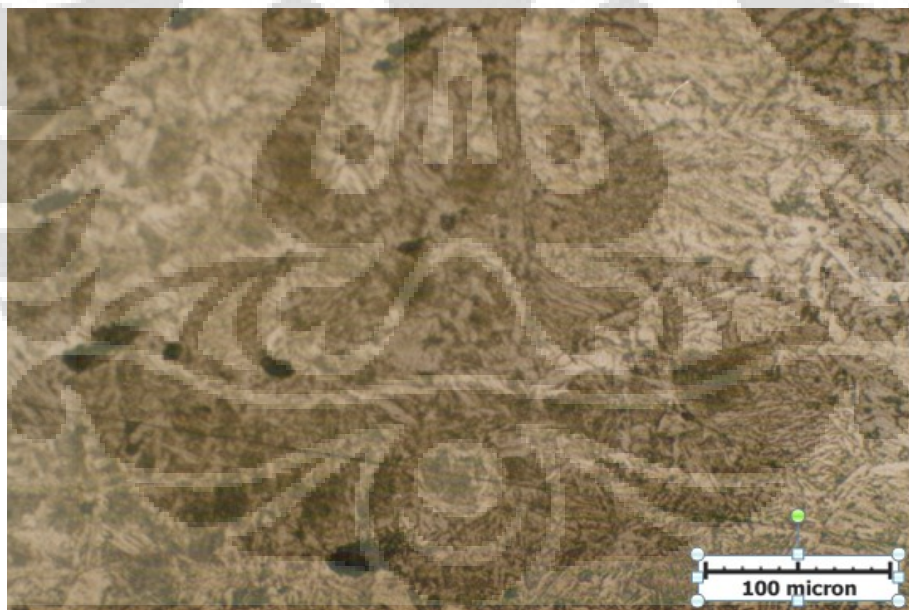
Fusion line 20mm



Base metal 16 mm



haz halus 16 mm



HAZ kasar 16

Lanjutan

