



UNIVERSITAS INDONESIA

**PERBEDAAN KARAKTERISTIK HASIL PENGELASAN
METODE GTAW DAN SMAW TERHADAP BAJA TAHAN
KARAT 316L**

SKRIPSI

ARIF FISCA SUNANDAR

0806455616

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL

DEPOK

JULI 2012



UNIVERSITAS INDONESIA

**PERBEDAAN KARAKTERISTIK HASIL PENGELASAN
METODE GTAW DAN SMAW TERHADAP BAJA TAHAN
KARAT 316L**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana teknik

ARIF FISCA SUNANDAR

0806455616

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL

DEPOK

JULI 2012

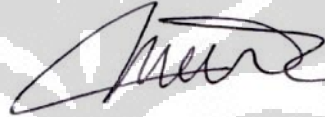
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Arif Fisca Sunandar

NPM : 0806455616

Tanda Tangan :



Tanggal : 9 Juli 2012



HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh ,

Nama : Arif Fisca Sunandar
NPM : 0806455616
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Perbedaan Karakteristik Hasil Pengelasan
Metode GTAW dan SMAW Terhadap Baja
Tahan Karat 316L

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. Muhammad Anis M.Met.



Penguji 1 : Prof. Dr. Ir. Dedi Priadi, DEA



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



Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 9 Juli 2012

KATA PENGANTAR

Puji syukur Saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena berkat dan Rahmat-Nya, Penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan baik tanpa adanya hambatan yang cukup berarti dalam pengujian sampai akhirnya dapat menyelesaikan Skripsi ini tepat pada waktunya. Penulisan Skripsi ini dilakukan dalam rangka untuk memenuhi salah satu syarat untuk menggapai gelar Sarjana Teknik (ST) Program Studi Teknik Metalurgi dan Material pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Penulis menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, sangatlah sulit bagi Penulis untuk menyelesaikan masa perkuliahan dan skripsi ini. Oleh karena itu Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Ir. Muhammad Anis M.Met, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu dan pikiran untuk mengarahkan Penulis dalam penyusunan Skripsi ini.
2. Prof. Dr-Ing. Ir. Bambang Suharno, selaku Kepala Departemen Metalurgi dan Material FTUI.
3. Dr. Ir. Donanta Dhaneswara M.Si, selaku Pembimbing Akademis Penulis selama menempuh studi di Teknik Metalurgi dan Material.
4. Ir. Rini Riastuti M.Sc, selaku dosen pembimbing di awal pemilihan tema skripsi sehingga didapatkan tema dan judul yang baik.
5. Semua dosen beserta karyawan yang ada di Departemen Metalurgi dan Material FTUI, yang telah memberikan bimbingan selama masa perkuliahan.
6. Orang tua Penulis : Sunarjo dan Fajarwati, beserta adik-adik penulis : Sendi dan Gatot yang telah memberikan bantuan dukungan moral dan materil serta semangat hingga Penulis dapat menyelesaikan Skripsi ini.
7. Teman-teman seperjuangan : Fadli, Heri, Brian, Abdul, Hutri dan lain lain yang sangat membantu selama proses pengerjaan Skripsi ini.
8. Teman-Teman dari S-2 : Bapak Nyoman dan Bapak Ary yang telah memberikan ilmu-ilmu tambahan dan juga membantu selama penelitian.
9. Bapak Roziq, Bapak Ani Rahmat di BATAN yang telah membantu Penulis selama melakukan penelitian di BATAN.

10. Bapak Sopani, selaku welder yang telah membantu proses pengelasan di cilegon.
11. Bapak Tria, yang telah membantu proses pengujian Radiografi.
12. Seluruh asisten dan teknisi laboratorium Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI atas kesediaannya membantu Penulis dalam pemakaian alat pengujian.
13. Teman-teman Metalurgi angkatan 2008 yang telah memberikan pengalaman indah selama masa perkuliahan. Solid, Tangguh, dan Tanggung Jawab.
14. Seluruh Senior dan Junior Metalurgi yang banyak membantu selama perkuliahan.
15. Seluruh Pihak yang membantu dalam proses pengerjaan Skripsi ini.

Akhir kata, Penulis ingin mengucapkan ucapan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh pihak, baik yang telah disebut maupun tidak. Harapannya dengan adanya Skripsi ini dapat memicu semangat baik untuk diri penulis maupun untuk semua pihak dalam pengembangan ilmu pengetahuan.

Depok, Juli 2012

Penulis

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

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

Nama : Arif Fisca Sunandar
NPM : 0806455616
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 Non-eksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah Saya yang berjudul :


**“PERBEDAAN KARAKTERISTIK HASIL PENGELASAN METODE
GTAW DAN SMAW TERHADAP BAJA TAHAN KARAT 316L”**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Nonekklusif ini, Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia atau 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 : 9 Juli 2012

Yang menyatakan


(Arif Fisca Sunandar)

ABSTRAK

Nama : Arif Fisca Sunandar
NPM : 0806455616
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : **Perbedaan Karakteristik Hasil Pengelasan Metode GTAW dan SMAW Terhadap Baja Tahan Karat 316L**

Jenis baja tahan karat austenitik 316L banyak dipergunakan dalam dunia industri modern baik dalam gas dan perminyakan maupun dalam manufaktur. Hal ini dikarenakan baja tahan karat 316L yang memiliki sifat ketahanan korosi dan sifat mekanis yang baik. Selain itu, baja tahan karat 316L juga lebih banyak diminati mengingat harganya yang jauh lebih murah dibandingkan baja tahan karat duplek atau hiper duplek. Selain beberapa sifat di atas, baja tahan karat juga memiliki suatu sifat mampu las (*weldability*) yang baik, karena tidak dapat dipungkiri bahwa pengelasan merupakan sesuatu yang sangat penting dalam proses manufaktur maupun dalam perbaikan peralatan yang rusak. Pada Penelitian ini digunakan dua metode pengelasan yang berbeda yaitu GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) dan SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*), sehingga didapatkan suatu karakteristik antara pengelasan GTAW dan SMAW yang dapat digunakan untuk perbandingan kualitas hasil pengelasan. Pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini antara lain, pengujian radiografi, metalografi, penentuan *ferrite number (FN)*, dan pengujian kekerasan. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa lasan hasil GTAW memiliki kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan dengan SMAW, dan kekerasan tertinggi terdapat pada daerah logam lasan pada setiap jenis pengelasan. Hasil penentuan FN menunjukkan bahwa logam lasan hasil GTAW memiliki jumlah fasa ferit yang lebih banyak dengan kadar rata-rata di atas 5% dibandingkan dengan logam lasan hasil SMAW dengan kadar rata-rata 3,2% - 3,3%.

Kata kunci : Baja tahan karat austenitik 316L, GTAW, SMAW, Karakteristik, Pengelasan, Ferrite Number

ABSTRACT

Name : Arif Fisca Sunandar
NPM : 0806455616
Major : Metallurgy and Material Engineering
Title : **Characteristic Different of SS 316L Weldment
Produced by GTAW and SMAW**

Austenitic stainless steel 316L is widely used in modern industries such as manufacture and oil and gas due to its both good corrosion resistance and good mechanical properties. Its also due to its price which is cheaper than duplex or hyperduplex stainless steels. Stainless steels also have good weldability since welding always takes an important role in manufacturing for services or maintenance applications. Two different methods of welding were used to weld austenitic stainless steel 316L in this research that are GTAW and SMAW for comparisson purpose. Experimental methods used are radiography, metalography, ferrite number determination and hardness test. The result shows that weldment produced by GTAW has higher hardness than those SMAW one. Its acknowledge that for all methods of welding the hardest region is in weld metal. The weld metal ferrite number (FN) produced by GTAW has ferrite content with average above 5% of ferrite whereas the one produced by SMAW has 3,2% - 3,3% ferrite.

Keywords: Austenitic stainless steel 316L, GTAW, SMAW, Characteristic of weldment, Ferrite Number.

DAFTAR ISI

| | |
|---|----------|
| HALAMAN JUDUL..... | i |
| HALAMAN PERNYATAAN ORISINILITAS | ii |
| HALAMAN PENGESAHAN..... | iii |
| KATA PENGANTAR | iv |
| HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI..... | vi |
| ABSTRAK | vii |
| <i>ABSTRACT</i> | viii |
| DAFTAR ISI..... | ix |
| DAFTAR TABEL..... | xi |
| DAFTAR GAMBAR | xii |
| BAB I PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Perumusan Masalah..... | 3 |
| 1.3 Tujuan Penelitian..... | 3 |
| 1.4 Ruang Lingkup Penelitian | 4 |
| 1.5 Sistematika Penulisan..... | 5 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA..... | 6 |
| 2.1 Karakteristik Baja Tahan Karat Austenitik 316L..... | 6 |
| 2.1.1 Pengaruh Unsur-Unsur Paduan | 6 |
| 2.1.2. Diagram Fasa Sistem Fe-Cr-Ni | 10 |
| 2.2 Pengelasan | 11 |
| 2.2.1 Pengelasan Busur Listrik..... | 11 |
| 2.2.2 <i>Shielded Metal Arc Welding (SMAW)</i> | 12 |
| 2.2.3 <i>Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)</i> | 13 |
| 2.2.4 Kawat Las (<i>Filler Metal</i>)..... | 17 |
| 2.2.5 Elektroda SMAW..... | 18 |
| 2.3 Metalurgi Pengelasan..... | 21 |

| | |
|--|-----------|
| 2.3.1 Evolusi Struktur Mikro Zona Fusi dan Morfologi Ferit.... | 23 |
| 2.3.2 Reaksi Solidifikasi..... | 23 |
| 2.3.3 Presipitat | 25 |
| BAB III METODOLOGI PENELITIAN | 28 |
| 3.1 Diagram Alir Penelitian..... | 28 |
| 3.2 Persiapan Bahan | 29 |
| 3.3 Proses Pengelasan..... | 29 |
| 3.4 Pengujian Setelah Pengelasan | 29 |
| 3.4.1 Pengamatan Radiografi | 29 |
| 3.4.2 Pengujian <i>Ferrite Number</i> | 30 |
| 3.4.3 Pengujian Metalografi | 30 |
| 3.4.4 Pengujian Kekerasan | 31 |
| BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN..... | 32 |
| 4.1 Hasil Pengujian Komposisi Sampel | 32 |
| 4.2 Analisa Hasil Parameter Pengelasan | 33 |
| 4.3 Analisa Hasil Pengujian Radiografi | 34 |
| 4.4.1 Perbandingan Hasil Foto Makro..... | 36 |
| 4.4.2 Perbandingan Hasil Foto Mikro Daerah HAZ..... | 37 |
| 4.4.3. Perbandingan Hasil Foto Mikro Daerah logam lasan..... | 38 |
| 4.4. Analisa Hasil Pengujian <i>Ferrite Number</i> | 40 |
| 4.7. Analisa Hasil Pengujian Kekerasan | 42 |
| BAB V KESIMPULAN | 46 |
| DAFTAR PUSTAKA | 47 |

DAFTAR TABEL

| | | |
|-----------|--|----|
| Tabel 1.1 | Komposisi baja tahan karat 316 dan 316L..... | 1 |
| Tabel 1.2 | Sifat baja tahan karat 316L | 2 |
| Tabel 2.1 | Tipe solidifikasi, reaksi dan struktur mikro yang terbentuk | 24 |
| Tabel 2.2 | Jenis presipitat pada baja tahan karat austenitik | 25 |
| Tabel 3.1 | Komposisi kawat las dan elektroda | 29 |
| Tabel 3.2 | Parameter pengelasan | 29 |
| Tabel 4.1 | Hasil uji komposisi sampel baja tahan karat austenitik 316L..... | 32 |
| Tabel 4.2 | Perbandingan hasil foto radiografi GTAW dan SMAW | 34 |
| Tabel 4.3 | Perbandingan foto makro pengelasan GTAW dan SMAW perbesaran 50x pada daerah logam induk, HAZ dan logam lasan | 36 |
| Tabel 4.4 | Perbandingan foto mikro pengelasan GTAW dan SMAW perbesaran 200x pada daerah HAZ | 37 |
| Tabel 4.5 | Perbandingan foto mikro pengelasan GTAW dan SMAW perbesaran 200x pada daerah logam lasan | 38 |
| Tabel 4.6 | <i>Ferrite Number</i> pada setiap sample hasil pengelasan..... | 40 |
| Tabel 4.7 | Hasil pengujian kekerasan mikro..... | 42 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|---|----|
| Gambar 2.1 Pengaruh unsur paduan pada logam | 8 |
| Gambar 2.2 Diagram fasa terner Fe-Cr-Ni | 10 |
| Gambar 2.3 Bentuk rangkaian proses SMAW | 12 |
| Gambar 2.4 Bentuk rangkaian proses GTAW | 14 |
| Gambar 2.5 Diagram WRC-1992 | 22 |
| Gambar 2.6 Potongan vertikal diagram terner Fe-Cr-Ni | 23 |
| Gambar 2.7 Skematik solodifikasi dan transformasi di lasan | 24 |
| Gambar 2.8 Hubungan tipe solidifikasi dengan diagram fasa pseudobiner ... | 24 |
| Gambar 2.9 Presipitasi $M_{23}C_6$ pada baja tahan karat..... | 27 |
| Gambar 3.1 Diagram alir penelitian penelitian | 28 |
| Gambar 3.2 Peralatan radiografi yang dipergunakan..... | 30 |
| Gambar 3.3 <i>Ferritescope</i> | 30 |
| Gambar 3.4 Mesin amplas (kiri) dan mesin poles (kanan) | 31 |
| Gambar 3.5 Mesin kekerasan mikro vickers..... | 31 |
| Gambar 4.1 Grafik pengaruh arus terhadap masukan panas..... | 33 |
| Gambar 4.2 Grafik pengaruh HI terhadap FN yang terbentuk pada logam lasan, akar lasan dan capping hasil GTAW | 41 |
| Gambar 4.3 Grafik pengaruh HI terhadap FN yang terbentuk pada logam lasan, akar lasan dan capping hasil SMAW..... | 41 |
| Gambar 4.4 Grafik distribusi kekerasan pada setiap daerah lasan..... | 42 |
| Gambar 4.5 Grafik pengaruh masukan panas terhadap kekerasan hasil SMAW..... | 43 |
| Gambar 4.6 Grafik pengaruh masukan panas terhadap kekerasan hasil GTAW..... | 44 |
| Gambar 4.7 Grafik pengaruh FN terhadap kekerasan pada logam lasan dan HAZ hasil GTAW..... | 44 |
| Gambar 4.8 Grafik pengaruh FN terhadap kekerasan pada logam lasan dan HAZ hasil SMAW..... | 45 |

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Baja tahan karat 316L merupakan kelompok baja paduan tinggi berdasarkan pada sistem Fe-Cr, Fe-Cr-C, dan Fe-Cr-Ni dengan unsur paduan utama krom (Cr) dan nikel (Ni) dengan sedikit unsur paduan lain seperti molibdenum (Mo), tembaga (Cu) dan mangan (Mn). Baja tahan karat 316L tergolong dalam baja tahan karat austenitik yang memiliki fasa tunggal, *face centered cubic (fcc)*. Elemen yang mendukung pembentukan austenit paling dominan adalah nikel, yang ditambahkan ke dalam baja umumnya lebih dari 8% wt. Elemen pendukung lainnya adalah C, N dan Cu. Baja tahan karat 316L memiliki kandungan karbon maksimal yang lebih sedikit (maksimal 0.03%) dibandingkan baja tahan karat 316 dengan kandungan karbon (maksimal 0.08%). Untuk sifat dan komposisi baja tahan karat 316 dan 316L dapat dilihat pada tabel 1.1 dan tabel 1.2

Jenis baja tahan karat 316L ini banyak dipergunakan dalam dunia industri modern baik dalam industri gas dan perminyakan maupun dalam manufaktur. Hal ini dikarenakan baja tahan karat 316L memiliki sifat ketahanan korosi dan sifat mekanis yang baik. Selain itu, baja tahan karat 316L juga lebih banyak diminati karena harganya yang jauh lebih murah dibandingkan baja tahan karat duplek atau hiperduplek. Selain beberapa sifat di atas, baja tahan karat juga harus memiliki suatu sifat mampu las yang baik, karena pengelasan merupakan metode sangat penting dalam proses manufaktur maupun dalam perbaikan perbaikan peralatan yang rusak.

Tabel 1.1 Komposisi baja tahan karat austenitik 316 dan 316L^[1]

| Tipe AISI | Komposisi %wt | | | | | |
|--------------|---------------|--------|--------|-----------|-----------|---------|
| | C Max | Mn Max | Si Max | Cr | Ni | Mo |
| 316 | 0.08 | 2.0 | 1.0 | 16.0-18.0 | 10.0-14.0 | 2.0-3.0 |
| 316L | 0.03 | 2.0 | 1.0 | 16.0-18.0 | 10.0-14.0 | 2.0-3.0 |

Tabel 1.2 Sifat baja tahan karat austenitik 316 dan 316L^[2]

| Sifat | Jenis 316 | Jenis 316L |
|--|-----------|------------|
| Modulus elastik x 10 ⁶ (psi) | 28 | 28 |
| Kuat tarik x 10 ³ (psi) | 75 | 75 |
| Kekuatan luluh 0.2% offset x 10 ³ (psi) | 30 | 30 |
| Elongation in 2 in. (%) | 50 | 50 |
| Kekerasan rockwell | B-80 | B-80 |
| Massa jenis (lb/in. ³) | 0.286 | 0.286 |
| Gravitasi spesifik | 7.95 | 7.95 |
| Panas spesifik at 32-212 F (btu/lb °F) | 0.12 | 0.12 |
| Konduktivitas termal (Btu/hr ft ² °F) | | |
| Pada 70 °F | 9.3 | 9.3 |
| Pada 1500 °F | 12.4 | 12.4 |
| Koefisien ekspansi termal pada 32 – 212 °F x 10 ⁻⁸ (in./in. °F) | 8.9 | 8.9 |
| Izod impact (ft-lb) | 110 | 110 |

Baja tahan karat umumnya mengalami beberapa masalah metalurgi ketika mengalami perlakuan pada temperatur yang tinggi. Pada saat proses pengelasan, siklus panas dapat mempengaruhi *heat affected zone* (HAZ) dari baja tahan karat sampai pada temperatur kritisnya yang mana dapat mengakibatkan terbentuknya fasa intermetalik seperti fasa sigma (σ), fasa chi (χ) dan juga presipitat yang tidak diinginkan ($M_{23}C_6$)^[3,4,5]. Seringkali pemilihan metode dan parameter pengelasan mempengaruhi umur dari material baja tahan karat ini. Sebagai contoh dimana parameter pengelasan akan mempengaruhi ketahanan korosi telah dibahas dalam suatu jurnal yang dipublikasikan oleh Silva et al^[6], menyatakan bahwa masukan panas yang diterima oleh material baja tahan karat saat pengelasan akan sangat mempengaruhi ketahanan korosi dari material tersebut. Pada saat pengelasan akan terbentuk delta ferit pada logam lasan yang akan menurunkan kekuatan material tersebut. Namun demikian, delta ferit dapat mencegah terjadinya retak panas pada proses pengelasan^[7]. Secara struktur mikro daerah lasan dapat di kelompokkan menjadi tiga bagian yaitu, logam lasan (*weld metal*, WM), daerah yang terkena panas (*heat affected zone*, HAZ) dan logam induk (*base metal*, BM).

Pada daerah WM, struktur mikro yang terjadi adalah struktur mikro akibat dari proses pengecoran, hasil peleburan antara kawat las yang digunakan dengan logam induk yang terjadi pada temperatur leburnya. Retak panas dapat dihindari apabila pada daerah WM ini memiliki komposisi delta ferit berkisar antara 2-10% didalam matrik austenit^[7].

Pada penelitian ini akan diterapkan metode GTAW dan SMAW untuk mengelas baja tahan karat 316L dengan variabel masukan arus yang berbeda dengan metode GTAW dan juga dengan metode SMAW sehingga akan didapatkan perbandingan karakterisasi dari hasil pengelasan baja tahan karat 316L dengan metode pengelasan yang berbeda.

1.2 Perumusan Masalah

Salah satu masalah dalam pengelasan terdapat pada adanya kemungkinan terbentuknya cacat akibat struktur mikro yang terbentuk dari hasil pengelasan. Terbentuknya fasa intermetalik seperti fasa sigma (σ), fasa chi (χ) dan juga presipitat yang tidak diinginkan ($M_{23}C_6$) akan membuat material mengalami kegagalan lebih awal dari waktu yang seharusnya. Selain itu, pembentukan delta ferit pada logam lasan juga akan menurunkan kekuatan dari baja tahan karat, oleh karena itu diperlukan suatu kontrol masukan panas pada proses pengelasan dan juga pemilihan metode pengelasan yang paling tepat misalnya GTAW atau SMAW.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melihat sejauh mana perbedaan karakteristik dan pengaruhnya terhadap hasil pengelasan baja tahan karat 316L dengan metode GTAW dan SMAW. Secara lebih lanjut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi :

- a. Karakteristik struktur mikro yang terbentuk setelah pengelasan pada daerah logam lasan, HAZ dan logam induk pada hasil pengelasan metode GTAW dan SMAW.
- b. Karakteristik dari delta ferit yang terbentuk pada logam lasan dengan menentukan FN.
- c. Karakteristik dari kekerasan tiap-tiap spesimen pada daerah logam lasan, HAZ dan logam induk pada hasil pengelasan metode GTAW dan SMAW.
- d. Mendapatkan parameter dan metode pengelasan yang optimum pada pengelasan baja tahan karat 316L baik untuk metode GTAW maupun SMAW.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Untuk dapat memenuhi tujuan penelitian yang baik maka perlu dilakukan suatu batasan ruang lingkup penelitian sehingga penelitian menjadi lebih terfokus dan tidak berubah dari tujuan awal. Adapun batasan ruang lingkungnya adalah :

- a. Proses pengelasan menggunakan metode SMAW dengan spesifikasi elektroda sesuai AWS A5.4 E-316L-16 dan pengelasan dengan metode GTAW dengan kawat las sesuai dengan AWS A5.9 ER 316L
- b. Proses pengelasan mengikuti prosedur AWS dan dianggap tidak ada cacat pada proses pengelasan.
- c. Untuk bagian akar lasan digunakan tiga arus yang berbeda pada metode GTAW yaitu 80A, 90A dan 100A, serta dua arus yang berbeda pada metode SMAW yaitu 80A dan 100 A.
- d. Untuk bagian *hot pass* dan *capping* arus dinaikan sebesar 10A dari arus semula yang digunakan pada bagian akar lasan.

1.5 Sistematika Penulisan

Dalam penulisan ini, sistematika penulisan disusun agar konsep dalam penulisan skripsi menjadi berurutan sehingga akan didapat kerangka alur pemikiran yang mudah dan praktis. Sistematika tersebut dapat diartikan dalam bentuk bab-bab yang saling berkaitan. Bab-bab tersebut diantaranya :

a) Bab 1 Pendahuluan

Membahas mengenai latar belakang penulisan, perumusan masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup penelitian, dan sistematika penulisan.

b) Bab 2 Landasan Teori

Membahas tentang karakteristik baja tahan karat 316L, pengelasan dan metalurgi pengelasan

c) Bab 3 Metodologi Penelitian

Membahas mengenai diagram alir penelitian, alat dan bahan yang diperlukan untuk penelitian, dan prosedur penelitian.

d) Bab 4 Hasil dan Pembahasan

Membahas mengenai pengolahan data yang didapat dari penelitian serta menganalisa hasil penelitian baik berupa angka, gambar, dan grafik, serta membandingkan dengan teori dan literatur.

e) Bab 5 Kesimpulan

Membahas mengenai kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan sesuai dengan tujuan dari penelitian.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Karakteristik Baja Tahan Karat 316L

Baja tahan karat merupakan baja paduan tinggi yang berdasarkan pada sistem Fe-Cr, dan Fe-Cr-Ni dengan unsur paduan utama minimal 10,5% krom (Cr) dan nikel (Ni) dengan sedikit unsur paduan lain seperti molibdenum (Mo), tembaga (Cu) dan mangan (Mn). Kadar kromium tersebut merupakan kadar minimum untuk pembentukan permukaan pasif oksida yang dapat mencegah korosi.

Salah satu kelompok baja tahan karat yang banyak digunakan adalah baja tahan karat austenitik. Baja tahan karat austenitik memiliki fasa tunggal, *face centered cubic* (fcc). Elemen yang mendukung pembentukan austenit, paling dominan adalah nikel, yang ditambahkan ke baja dalam jumlah yang sangat banyak (pada umumnya lebih dari 8% wt). Elemen pendukung lainnya adalah C, N dan Cu. Adapun range komposisi standar dari baja tahan karat jenis ini seperti yang telah ditunjukkan pada tabel 1.1

Dari tabel 1.2 terdapat dua jenis baja tahan karat austenitik 316 dan 316L. Perbedaan diantara dua jenis baja tahan karat ini hanya pada kandungan karbonnya saja. Pada baja tahan karat 316 kandungan karbonnya mencapai 0.08% sedangkan pada baja tahan karat 316L kandungan karbonnya hanya 0.03%. Penurunan kadar karbon ini bertujuan untuk mencegah terjadinya sensitasi akibat terbentuknya kromium karbida di batas butir.

2.1.1. Pengaruh unsur Paduan

Kekuatan dan kemampuan baja tahan karat tidak lepas dari pengaruh beberapa unsur paduan yang menyertainya, dimana unsur-unsur paduan tersebut dapat meningkatkan performa dari baja tahan karat itu sendiri. Dibawah ini

merupakan unsur paduan yang terdapat pada baja tahan karat 316L beserta pengaruhnya.

Karbon

Karbon merupakan elemen penting dalam baja tahan karat yang terlibat langsung terhadap sensitasi. Semakin banyak karbon maka kestabilan karbida juga akan meningkat dengan cepat. Selain itu karbon merupakan unsur penstabil austenit yang kuat.

Kromium

Kromium ditambahkan kedalam baja tahan karat untuk meningkatkan ketahanan korosinya. Dengan penambahan kromium stoikiometri oksida $(FeCr)_2O_3$ akan terbentuk pada permukaan baja. Kehadiran kromium akan meningkatkan kestabilan oksida karena tingginya afinitas terhadap oksigen dibandingkan dengan iron. Tingginya kadar kromium dibutuhkan untuk kestabilan oksida dalam lingkungan yang lebih agresif.

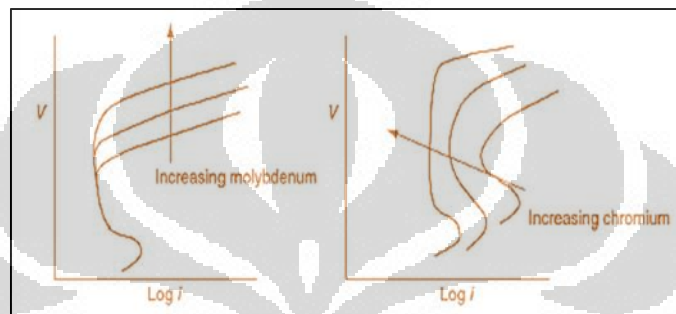
Selain karbon, kromium juga merupakan elemen yang paling penting yang terlibat dalam pengembangan sensitasi. Kromium merupakan pembentuk karbida yang kuat. Kromium dapat ditemukan dalam bentuk karbida $M_{23}C_6$, Cr_7C_3 , $M_{23}(C,N)_6$. Kromium juga merupakan kunci dalam pembentukan senyawa intermetalik. Senyawa yang paling umum adalah fasa sigma (σ), dimana dalam sistem Fe-Cr merupakan senyawa (Fe,Cr) yang terbentuk pada suhu di bawah 815 °C. Selain itu kromium juga hadir dalam fasa-fasa intermetalik chi (χ) dan laves.

Molibdenum

Molibdenum merupakan unsur pembentuk karbida yang dalam pemakaiannya akan meningkatkan kecenderungan pengendapan karbida pada batas butir, sehingga daerah yang berbatasan dengan batas butir menjadi kekurangan molibdenum, meskipun umumnya ada dalam konsentrasi yang lebih kecil dibandingkan krom (misalnya pada baja tahan karat 316).

Keberadaan unsur ini dalam baja tahan karat austenitik dapat mengurangi kepekaan baja tersebut terhadap sensitasi. Semakin tinggi kadar molibdenum maka daerah austenit () semakin sempit, sehingga dibutuhkan lebih banyak nikel untuk mempertahankan struktur austenit pada temperatur ruang.

Unsur molibdenum bersama kromium akan meningkatkan ketahanan korosi pada baja tahan karat. Lapisan pasif akan terbentuk dan akan meningkatkan ketahanan korosi pitting dan korosi celah.



Gambar 2.1 Pengaruh unsur paduan pada logam (a) pengaruh penambahan molibdenum (b) pengaruh penambahan kromium.^[3]

Mangan

Merupakan suatu unsur penstabil austenit terutama pada temperatur rendah karena dapat mencegah transformasi martensit. Mangan dapat berinteraksi dengan sulfur membentuk mangan sulfida, dimana morfologi dan komposisi dalam sulfida ini dapat memberikan efek yang baik pada ketahanan korosi.

Nikel

Fungsi utama nikel adalah untuk mempromosikan fasa austenit. Dengan menambahkan nikel, fasa austenit dapat secara luas terekspansi sehingga austenit dapat stabil pada dan dibawah temperatur ruang.

Nikel meningkatkan aktifitas karbon dalam baja tahan karat austenit. Nikel bukan merupakan pembentuk karbida yang kuat dan juga tidak mempromosikan pembentukan senyawa intermetalik.

Silikon

Silikon terdapat pada semua jenis baja tahan karat, yang biasanya ditambahkan untuk oksidasi selama proses pelelehan. Untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi, silikon ditambahkan 4-5% wt dan jika ditambahkan pada beberapa baja paduan tahan panas 1-3%wt dapat meningkatkan ketahanan terhadap *scalling* oksida pada temperatur tinggi. Keberadaan silikon di batas butir dapat merusak oksidasi lingkungan.

Dalam baja tahan karat austenitik, kadar silikon sampai 1% wt tidak memiliki pengaruh terhadap keseimbangan fasa, tetapi jika pada dalam kadar yang tinggi akan mempromosikan ferit. Silikon terdapat dalam senyawa *iron silicides* (FeSi , Fe_2Si , Fe_3Si , Fe_5S_3) dan senyawa intermetalik Cr_3Si . Silikon juga dapat membentuk fasa sigma jika berada pada komposisi senyawa yang berlebihan.

Elemen Pembentuk Karbida

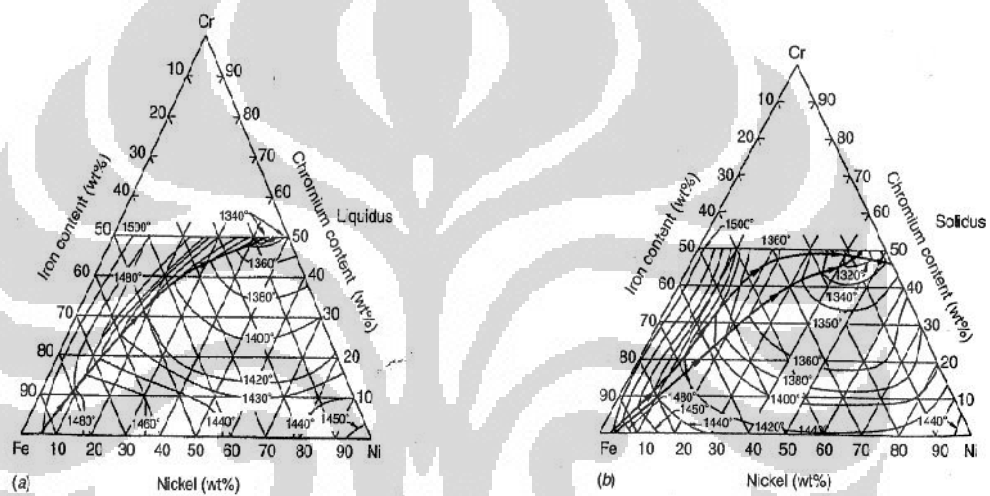
Elemen-elemen pembentuk karbida perlu ditambahkan untuk mencegah terjadinya presipitasi karbida krom dan pengurangan kadar krom dalam baja tahan karat austenitik. Penambahan beberapa elemen seperti niobium, titanium, tungsten tantalum dan vanadium kedalam Cr dan Mo akan mempromosikan pembentukan karbida.

Pada paduan dengan tambahan elemen ini, karbon tidak akan berpresipitasi pada batas butir selama proses pendinginan, karena telah berpresipitasi terlebih dahulu membentuk karbida dengan elemen-elemen pembentuk karbida seperti, karbida titanium, karbida niobium atau karbida tantalum pada temperatur yang lebih tinggi.

Hal ini disebabkan afinitas karbon terhadap unsur-unsur tersebut lebih besar dari unsur krom. Karbida-karbida ini tidak berakibat negatif, karena dengan terikatnya karbon, maka karbida krom tidak terbentuk. Selain itu, karbida ini tidak menimbulkan aksi galvanis pada batas butir.

2.1.2. Diagram Fasa Sistem Fe-Cr-Ni

Diagram fasa digunakan untuk menjelaskan transformasi fasa dan kestabilan fasa dalam baja tahan karat. Seperti yang telah kita ketahui, bahwa baja tahan karat austenitik mempunyai unsur paduan utama krom dan nikel. Penambahan nikel kepada sistem Fe-Cr akan meningkatkan daerah fasa austenit dan dapat menstabilkan austenit pada temperatur kamar. Untuk itu perlu kiranya disini diuraikan mengenai diagram fasa terner besi-krom-nikel (Fe-Cr-Ni) seperti pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Diagram terner sistem Fe-Cr-Ni (a) liquidus dan (b) solidus^[2]

Menurut penelitian yang dilakukan Farraro^[8], dinyatakan bahwa transformasi delta ferit menjadi karbida dan fasa sigma sangat bergantung pada awal segregasi kromium, molibdenum dan nikel dalam kondisi hasil las. Jika baja tahan karat austenitik tipe 316L dipanaskan pada temperatur 700°C untuk waktu lama serta komposisinya berada pada daerah delta ferit, austenit dan fasa sigma, maka transformasi akan berjalan sangat lambat dan kebanyakan delta ferit akan terurai menjadi austenit dan karbida, sedangkan sisanya tetap stabil sebagai delta ferit. Apabila komposisinya berada pada daerah delta ferit dan fasa sigma, maka transformasi akan berjalan cepat dan kebanyakan delta ferit akan terurai menjadi austenit dan fasa sigma. Pada pemanasan yang lebih lama lagi, karbon akan

terlarut dalam austenit, batas butir austenit bergerak masuk ke dalam ferit serta dengan adanya Mo yang terdifusi ke batas butir karbida akan mempercepat transformasi $M_{23}C_6$ menjadi M_3C . Oleh sebab itu pengaturan Cr, Mo dan C akan menyebabkan transformasi berjalan lambat pada temperatur kerja.

2.2. Pengelasan

Menurut DIN (Deutsche Industrie Normen)^[10] pengelasan adalah ikatan metalurgi pada sambungan logam atau logam paduan yang dilaksanakan dalam keadaan lumer atau cair. Dengan kata lain, las adalah sambungan setempat dari beberapa batang logam dengan menggunakan energi panas, dengan atau tanpa menggunakan tekanan, atau hanya tekanan, dengan atau tanpa menggunakan kawat las. Salah satu teknik pengelasan yang dikenal dalam penyambungan baja tahan karat adalah proses pengelasan busur listrik.

2.2.1. Pengelasan Busur Listrik

Las busur listrik adalah suatu proses pengelasan dimana panas dihasilkan oleh busur listrik diantara elektroda dengan benda kerja. Pada pengelasan dengan arus DC, benda kerja dihubungkan dengan kutub negatif dan elektroda dengan kutub positif, sedangkan pada pengelasan dengan polaritas lurus, benda kerja dihubungkan dengan kutub positif dan elektroda dengan kutub negatif. Proses-proses pengelasan tersebut antara lain:

1. *Shielded metal arc welding* (SMAW).
2. *Gas tungsten arc welding* (GTAW).
3. *Gas metal arc welding* (GMAW).
4. *Flux cored arc welding* (FCAW).
5. *Submerged arc welding* (SAW).
6. *Electroslag welding* (ESW) dan *electrogas welding* (EGW).
7. *Stud welding* (SW).

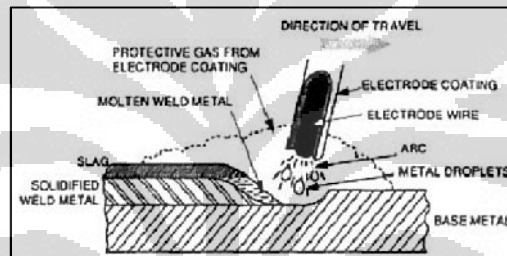
8. *Oxyfuel gas welding (OFW), braze welding dan brazing.*

9. *Cadwelding.*

Namun dalam penelitian ini hanya dipergunakan dua jenis proses pengelasan busur listrik yaitu GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) dan SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*),

2.2.2. *Shielded Metal Arc Welding*

SMAW adalah proses las busur manual dimana panas pengelasan dihasilkan oleh busur listrik antara elektroda terumpan berpelingdung flux dengan benda kerja. Gambar 2.3 memperlihatkan bentuk rangkaian proses SMAW.



Gambar 2.3 Bentuk rangkaian proses SMAW^[4]

Bagian ujung elektroda, busur, cairan logam las dan daerah-daerah yang berdekatan dengan benda kerja, dilindungi dari pengaruh atmosfer oleh gas pelindung yang terbentuk dari hasil pembakaran lapisan pembungkus elektroda. Perlindungan tambahan untuk cairan logam las diberikan oleh cairan flux atau slag yang terbentuk. Kawat las atau logam tambahan disuplai oleh inti kawat elektroda terumpan, atau pada elektroda-elektroda tertentu juga berasal dari serbuk besi yang dicampur dengan pelapis elektroda.

Keuntungan

SMAW adalah proses las busur listrik paling sederhana dan paling serba guna. Karena sederhana dan mudah dalam mengangkut peralatan dan perlengkapannya, membuat proses SMAW ini mempunyai aplikasi luas mulai dari

perbaiki perpipaan sampai jalur-jalur perpipaan, dan bahkan untuk pengelasan di bawah laut guna memperbaiki struktur anjungan lepas pantai. SMAW bisa dilakukan pada berbagai posisi atau lokasi yang bisa dijangkau dengan sebatang elektroda. Sambungan-sambungan pada daerah dimana pandangan mata terbatas masih bisa di las dengan cara membengkokkan elektroda.

Proses SMAW digunakan untuk mengelas berbagai macam logam ferrous dan non ferrous, termasuk baja karbon dan baja paduan rendah, baja tahan karat, paduan-paduan nikel, besi tuang dan beberapa paduan tembaga.

Kelemahan

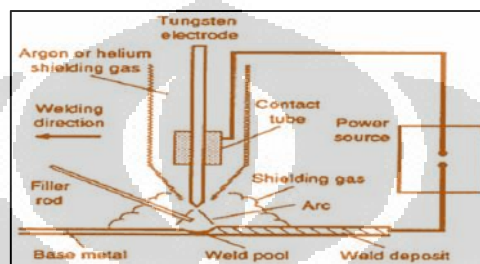
Meskipun SMAW adalah proses pengelasan dengan daya guna tinggi, proses ini mempunyai beberapa karakteristik dimana laju pengisiannya lebih rendah dibandingkan proses pengelasan semi-otomatis atau otomatis. Panjang elektroda tetap dan pengelasan harus dihentikan setelah sebatang elektroda terbakar habis. Puntung elektroda yang tersisa terbuang dan waktu juga terbuang untuk mengganti-ganti elektroda. Slag atau terak yang terbentuk harus dihilangkan dari lapisan las sebelum lapisan berikutnya didepositkan. Langkah-langkah ini mengurangi efisiensi pengelasan hingga sekitar 50 %.

Asap dan gas yang terbentuk merupakan masalah, sehingga diperlukan ventilasi memadai pada pengelasan di dalam ruang tertutup. Pandangan mata pada kawah las agak terhalang oleh slag pelindung dan asap yang menutupi deposit logam. Dibutuhkan juru las yang sangat terampil untuk dapat menghasilkan pengelasan berkualitas.

2.2.3. Gas Tungsten Arc Welding

Pada pengelasan dengan proses GTAW, panas dihasilkan dari busur listrik yang terbentuk dalam perlindungan gas inert diantara elektroda tungsten tidak terumpan dengan benda kerjanya. GTAW mencairkan daerah benda kerja di bawah busur tanpa elektroda tungsten itu sendiri ikut meleleh. Gambar 2.4 memperlihatkan peralatan untuk proses GTAW. Proses ini bisa dikerjakan secara

manual atau otomatis. Kawat las ditambahkan ke dalam daerah las dengan cara mengumpalkan sebatang kawat polos. Teknik pengelasan sama dengan yang dipakai pada *oxyfuel gas welding* atau OAW, tetapi busur dan kawah las GTAW dilindungi dari pengaruh atmosfer oleh selimut gas inert, biasanya argon, helium atau campuran keduanya. Gas inert disemburkan dari *torch* dan daerah-daerah disekitar elektroda tungsten. Hasil pengelasan dengan proses GTAW mempunyai permukaan halus, tanpa slag dan kandungan hidrogen rendah.



Gambar 2.4. Bentuk rangkaian proses GTAW^[4]

Jenis lain proses GTAW adalah GTAW berpulsa, dengan menggunakan sumber listrik yang membuat arus pengelasan pulsasi. Hal ini membuat arus rata-rata menjadi lebih tinggi untuk mendapatkan penetrasi dan kontrol kawah las yang lebih baik, terutama untuk pengelasan akar lasan. GTAW berpulsa bermanfaat untuk pengelasan pipa posisi-posisi sulit pada baja tahan karat dan material non ferrous seperti paduan nikel.

GTAW sudah diaplikasikan juga untuk pengelasan otomatis. Otomatisasi proses ini membutuhkan sumber listrik dan pengontrolan terprogram, sistem pengumpanan kawat dan mesin pemandu gerak. Proses ini sudah digunakan untuk membuat las sekat bermutu tinggi dan las tumpul pada pipa-pipa penukar panas. Lasan tumpul pada pipa tebal diameter besar pada pembangkit tenaga listrik, merupakan keberhasilan lain dari aplikasi GTAW otomatis. GTAW menggunakan pengumpanan kawat otomatis. Jenis lain dari pengelasan GTAW otomatis disebut TIG kawat panas, yang dikembangkan untuk menyaingi yang lain dengan laju deposit lebih tinggi. Pada TIG kawat panas, kawat las mendapat tahanan panas yang berasal dari arus AC voltase rendah untuk memperbesar laju pengisian.

Keuntungan

Proses GTAW menghasilkan pengelasan bermutu tinggi pada bahan-bahan ferrous dan non ferrous. Dengan teknik pengelasan yang tepat, semua pengotor yang berasal dari atmosfer dapat dihindari. Keuntungan utama dari proses ini yaitu, bisa digunakan untuk membuat akar lasan bermutu tinggi dari arah satu sisi pada berbagai jenis bahan. Oleh karena itu GTAW digunakan secara luas pada pengelasan pipa, dengan batasan arus mulai dari 5A hingga 300A, menghasilkan kemampuan lebih besar untuk mengatasi masalah pada posisi sambungan yang berubah-ubah seperti celah akar. Sebagai contoh, pada pipa tipis (dibawah 0,20 inci) dan logam-logam lembaran, arus bisa diatur cukup rendah sehingga pengendalian penetrasi dan pencegahan terjadinya terbakar tembus lebih mudah dari pada pengerjaan dengan proses menggunakan elektroda terlapis. Kecepatan gerak yang lebih rendah dibandingkan dengan SMAW akan memudahkan pengamatan sehingga lebih mudah dalam mengendalikan logam las selama pengisian dan penyatuan.

Kelemahan

Kelemahan utama proses las GTAW yaitu laju pengisian lebih rendah dibandingkan dengan proses las lain seperti SMAW. Disamping itu, GTAW butuh kontrol kelurusan sambungan yang lebih ketat, untuk menghasilkan pengelasan bermutu tinggi pada pengelasan dari arah satu sisi. GTAW juga butuh kebersihan sambungan yang lebih baik untuk menghilangkan minyak, karat, dan kotoran-kotoran lain agar terhindar dari porositas dan cacat-cacat las lain. GTAW harus dilindungi secara berhati-hati dari kecepatan udara di atas 5 mph untuk mempertahankan perlindungan gas inert di atas kawah las.

Aplikasi pada pekerjaan

GTAW mempunyai keunggulan pada pengelasan pipa-pipa tipis dan sistem perpipaan baja tahan karat diameter kecil, paduan nikel, paduan tembaga dan aluminium. Pada pengelasan pipa dinding tebal, GTAW sering kali dipakai pada akar lasan untuk pengelasan yang membutuhkan kualitas tinggi, seperti pada pipa-pipa tekanan tinggi dan temperatur tinggi dan pipa-pipa belokan pada dapur pemanas. Karena ada perlindungan gas inert terhadap pengelasan dan mudah dalam mengontrol proses las, membuat GTAW sering kali digunakan pada logam-logam reaktif seperti titanium dan magnesium.

Pada pipa-pipa tipis, 0,125 inci atau kurang, bisa digunakan sambungan berbentuk persegi dan rapat. pengelasan dikerjakan tanpa menambahkan kawat las (disebut dengan *autogenous weld*). Pada pipa-pipa tebal, bagian ujung sambungan mesti dibevel, diluruskan dan diberi celah (disebut dengan bukaan akar), kemudian ditambahkan kawat las selama pengelasan akar lasan. Sebagai pengganti kawat las, bisa juga disisipkan ring penahan ke dalam sambungan, yang nantinya bersatu dengan akar lasan (sebagai kawat las tambahan). Pengelasan dengan ring penahan membutuhkan kontrol kelurusan sambungan yang teliti.

Gas Pembersih (*Gas Purge*)

Gas pembersih digunakan pada bahan-bahan yang sensitif terhadap kontaminasi udara pada sambungan-sambungan las tunggal yang tidak di *backgouging*. Gas pembersih diperlukan pada baja-baja *chrome-moly* tertentu (3 % kromium), baja tahan karat, paduan-paduan nikel tinggi, paduan tembaga dan titanium. Gas pembersih tidak diperlukan pada pengelasan baja karbon atau baja paduan rendah apabila kandungan kromium kurang dari 3 %. Baik argon atau helium bisa digunakan sebagai gas pembersih. Pilihan lain bisa juga menggunakan nitrogen sebagai gas pembersih, untuk pengelasan baja tahan karat austenitik, tembaga dan paduan-paduan tembaga. Nitrogen tidak cocok pada bahan-bahan lain karena beraksi sebagai pengotor.

Hasil terbaik pada baja tahan karat akan diperoleh apabila baja ini di bersihkan dengan gas pembersih sehingga kandungan oksigen kurang dari 1 %. Pembersihan dengan empat hingga sepuluh kali volume yang diperlukan, dilakukan untuk mendapatkan secara relatif gas inert di udara. Apabila keberadaannya tidak tertentu berkaitan dengan kecukupan gas pembersih tersebut, bisa digunakan penganalisa oksigen untuk memeriksa kandungan oksigen pada gas pembersih yang dikeluarkan dari daerah pengelasan.

Gas pembersih pertama kali dilakukan dengan kecepatan aliran tinggi, misalnya 30 hingga 90 CFH untuk membilas sistem, kemudian diturunkan hingga 5 sampai 8 CFH pada proses pengelasan. Harus ada perhatian khusus untuk memastikan bahwa tekanan gas tidak berlebihan ketika mengelas akar lasan, bila tidak logam las akan meleleh atau terbentuk cekungan pada akar las. Pembuangan yang memadai penting sekali untuk menghindarkan terbentuknya tekanan berlebihan selama proses pengelasan. Daerah pembuangan pada gas pembersih, paling tidak harus sama dengan daerah terbuka yang dipakai untuk memuat gas pembersih ke sistem. Setelah selesai melakukan pengelasan pada akar lasan dan lapisan pengisi, gas pembersih bisa dihentikan. Jumlah lapisan pengisi yang dibutuhkan sebelum menghentikan gas pembersih tergantung dari tebal lapisan dan penetrasi.

2.2.4. Kawat Las (*Filler Metal*)

Kawat las yang dipilih harus memiliki komposisi dan sifat-sifat mekanis sama dengan logam induk. Namun demikian komposisi logam las bisa juga berbeda apabila:

- a. Mengelas bahan-bahan las tertentu yang sukar, misalnya pengelasan material 13 Cr digunakan elektroda austenitik atau elektroda Ni-Cr-Fe.
- b. Diinginkan sifat-sifat mekanis khusus, misalnya pemakaian baja karbon pada suhu rendah dengan mempergunakan elektroda yang mengandung Ni.
- c. Mengelas logam berbeda (*dissimilar metal*), misalnya penyambungan baja karbon dengan baja tahan karat digunakan elektroda Ni-Cr-Fe.

AWS memiliki 31 spesifikasi kawat las. Spesifikasi ini meliputi elektroda tungsten dan karbon, juga flux untuk *brazing* pada proses pengelasan SAW dan ESW. Spesifikasi ini secara teratur diperbaharui, dimana dua digit terakhir menunjukkan tahun keluaran yang dicantumkan pada nomor spesifikasi.

ASME juga menerbitkan spesifikasi kawat las, yaitu ASME Section II, Part C *Boiler and Pressure Vessel*. Spesifikasi ini mirip dengan AWS. Spesifikasi kawat las ASME ditandai dengan penambahan huruf SF pada nomor AWS, misalnya SFA 5.1. Sistem klasifikasi AWS pada kawat las memberikan informasi, baik mengenai bentuk hasil maupun proses penyambungan. Perhatikanlah sebuah elektroda las busur yang menghantar arus las. Elektroda ini bisa dibalut oleh flux, polos dan berinti komposit atau flux yang dipakai untuk proses las SMAW, GMAW, FCAW, GTAW dan SAW.

2.2.5. Elektroda SMAW

Elektroda terlapis pada proses las SMAW menyediakan bahan tambah dan gas pelindung. Elektroda terlapis ini memiliki berbagai macam komposisi pada inti kawat dan selaput pelapisnya. Inti kawat las berfungsi sebagai bahan tambah pada saat pengelasan berlangsung. Sedangkan pelapis berfungsi seperti di bawah berikut, tergantung dari jenis elektrodanya, yaitu:

- a. Memberikan gas pelindung untuk mencegah kontaminasi pada busur dan logam las dari pengaruh oksigen, nitrogen dan hidrogen yang terdapat di udara.
- b. Membentuk lapisan terak (slag) di atas kawah las dan endapan logam.
- c. Mengionisasi unsur untuk menghaluskan busur las.
- d. Menghasilkan zat deoksidizer dan pembersih untuk menghaluskan struktur butiran logam las.
- e. Menghasilkan unsur-unsur paduan seperti molibdenum, nikel dan kromium pada baja-baja paduan rendah.
- f. Memberikan serbuk besi untuk mempercepat laju pengisian.

Elektroda baja karbon, menggunakan sistem empat digit. berdasarkan AWS A5.1 yaitu elektroda baja karbon untuk proses las SMAW. Dua digit pertama memberikan informasi kuat tarik minimum logam las dalam ksi, misalnya E-60XX atau E-70XX. Digit ketiga memberikan informasi mengenai posisi pengelasan dan digit ke empat memberikan informasi mengenai jenis pelapis, jenis arus dan polaritas arus. Jenis pelapis akan menentukan posisi pengelasan, karakteristik pengelasan, dan jenis pembangkit listrik yang dibutuhkan. Misalnya elektroda E-6010 mempunyai kuat tarik minimum 62.000 psi dengan pelapis dari jenis selulosa. Elektroda ini bisa digunakan dengan semua posisi, penetrasi busur dalam dan kuat, dan menggunakan arus DC dengan polaritas terbalik. Elektroda E-7018 memiliki kuat tarik minimum 72.000 psi dengan pelapis jenis hidrogen rendah dan mengandung serbuk besi. Elektroda ini bisa digunakan dengan semua posisi, busur berbentuk halus dengan penetrasi sedang, dan mesti digunakan dengan arus DC polaritas terbalik.

Elektroda baja paduan rendah mengikuti spesifikasi AWS A5.5, dimana sistem klasifikasinya sama dengan elektroda baja karbon, tetapi ada penambahan huruf atau angka untuk memberikan informasi mengenai komposisi kimianya. Elektroda dengan kekuatan lebih tinggi, memiliki kuat tarik minimum 100.000 psi atau lebih, mempergunakan sistem lima digit, misalnya E-10018-D2. Tiga digit pertama adalah singkatan dari kuat tarik. Kuat tarik minimum bisa seperti hasil yang dilaskan atau hasil pengelasan yang telah diberi PWHT, tergantung dari klasifikasinya. Akhiran berbentuk huruf dan angka atau hanya huruf saja, memberikan informasi mengenai komposisi kimia yang harus dipenuhi. Misalnya elektroda E-8018-B2 adalah elektroda dengan pelapis jenis hidrogen rendah, mengandung serbuk besi dengan komposisi nominal 1-1/4 Cr-1/2 Mo, dan E-8010-G adalah elektroda selulosa dengan klasifikasi umum, yang hanya perlu melakukan jumlah minimum dari satu unsur yang dicantumkan (komposisi sebenarnya ditinggalkan pada pabrik pembuat elektroda).

Elektroda baja tahan karat dijelaskan oleh spesifikasi AWS A5.4 (komposisi 5 Cr atau lebih) dan diklasifikasikan menurut AISI untuk komposisi deposit logam las dan jenis pelapis (dua digit terakhir). Pelapis elektroda dari jenis kapur (-15)

atau titanium (-16). Kedua pelapisnya adalah jenis hidrogen rendah, tetapi karakteristik lasnya berbeda. Kondisi ini akan mempengaruhi posisi dan arus pengelasan yang digunakan. Elektroda-elektroda dasar atau berlapis kapur (-15) mempunyai cairan slag sedikit, umumnya tahan terhadap retak, cocok untuk pengelasan semua posisi.

Elektroda terlapis titanium (-16) menghasilkan deposit las lebih halus dengan muka las cenderung berbentuk cekung. Elektroda ini hanya cocok untuk posisi datar dan horizontal. Elektroda ini merupakan elektroda turunan yang memperlihatkan muka *bead* elektroda terlapis titanium, dan karakteristik pengelasan semua posisi dari elektroda-elektroda terlapis kapur. Elektroda turunan ini kadang-kadang disebut dengan elektroda DC titanium.

Contoh elektroda baja tahan karat terlapis adalah E-316-15. Elektroda ini mendepositkan logam las baja tahan karat jenis 316. Elektroda ini memiliki lapisan kapur, yang cocok untuk pengelasan semua posisi, dengan arus DC polaritas terbalik. Elektroda E-410-16 mendepositkan logam las baja tahan karat 12% Cr. Elektroda ini memiliki pelapis titanium yang pada umumnya tidak cocok untuk pengelasan semua posisi, tetapi dapat digunakan dengan arus AC atau DC polaritas terbalik.

Pelapis pada Elektroda SMAW

Elektroda hidrogen rendah memiliki pelapis yang akan menyerap kelembapan apabila berada di udara terbuka, sehingga elektroda ini harus dibeli dalam wadah tertutup rapat, dan disimpan dalam oven pemanas setelah dibuka untuk menghindari penyerapan uap air. Bagaimanapun juga elektroda tidak boleh lembab atau basah. Elektroda dengan pelapis tahan basah (*moisture resistant*) disingkat MR, sekarang banyak dibuat dan lebih diminati. Elektroda baru ini sangat tahan terhadap kelembapan sehingga bisa digunakan setiap saat.

Penyerapan uap lembap ke dalam elektroda hidrogen rendah dapat menimbulkan retak. Resiko retak ini semakin besar seiring dengan bertambahnya kuat tarik elektroda tersebut. Elektroda yang sudah terbuka di udara dalam waktu

lama, harus direkondisi di dalam oven untuk membuang kelembapan yang terserap oleh pelapis, atau elektroda tersebut dibuang sama sekali.

2.3. Metalurgi Pengelasan

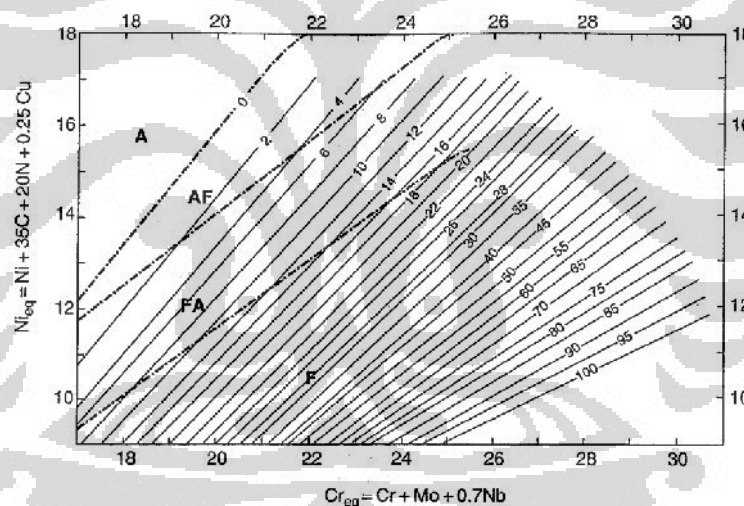
Selama proses pengelasan terjadi reaksi reaksi yang mempengaruhi pembentukan fasa pada deposit las dan pembentukan karbida didaerah pengaruh panas yang pada akhirnya akan mempengaruhi sifat sifat dari lasan khususnya sifat ketahanan korosi. Dua hal yang harus diperhatikan dalam pengelasan baja tahan karat adalah memberikan kondisi bebas retak pada lasan dan menjaga lasan pada daerah HAZ agar tetap memiliki sifat ketahanan korosi sama dengan logam induk. Pengontrolan material kawat las, masukan panas, permukaan lasan, dan menjaga kandungan delta ferit di struktur mikro lasan dapat meningkatkan ketahanan korosi. Deposit lasan austenitik sering digunakan untuk menggabungkan berbagai paduan besi. Deposit lasan austenitik memadat sebagai ferit primer, yang juga dikenal sebagai (δ) delta ferit .

Logam lasan baja tahan karat austenit tipe 300 umumnya mengandung 2 – 10 % fasa delta ferit agar terhindar dari masalah retak akibat pembekuan. Delta ferit merupakan bcc iron yang disisipi interstitial larutan padat atom karbon selama solidifikasi dan struktur bcc ditahan pada suhu ruangan. Delta ferit dikontrol oleh unsur krom, molibdenum, niobium, silikon, nikel, karbon, nitrogen, mangan dan tembaga. Semakin tinggi kandungan delta ferit, semakin mudah proses transformasi martensit terbentuk sehingga sifat keuletan rendah dan rentan retak. Struktur mikro memiliki bentuk dendrit kasar dengan ketidak-homogenan kimia yang menyebabkan logam lasan bersifat anodik dan logam induk bersifat katodik dilingkungan korosif. Keberadaan daerah anodik dan katodik memberikan kondisi korosi galvanik. Beberapa kemungkinan metalurgi yang terjadi selama pengelasan adalah sebagai berikut:

- Presipitasi intergranular, $M_{23}C_6$ yang kaya kromium, kromium karbida di dalam HAZ, yang dapat menyebabkan kerentanan terhadap korosi.
- Transformasi lasan dari ferit menjadi fasa sigma pada temperatur tinggi.

Untuk memprediksi struktur mikro digunakan diagram berdasarkan pada komposisi aktual atau perkiraan. Sebagai contoh diagram WRC-1992, untuk memprediksi kadar lasan ferit dalam baja tahan karat seperti pada Gambar 2.5. Gambar 2.5. dapat digunakan untuk memprediksi jenis ferit (primer atau eutektik) dan kadar ferit.

Diagram ini menunjukkan rentang komposisi untuk solidifikasi primer yang diinginkan. Karena tidak semua ferit adalah ferit primer (yakni, beberapa adalah komponen fase dari austenit-ferit eutektik), diagram ini dapat digunakan untuk memastikan bahwa ferit merupakan fasa padatan pertama (primer) yang terbentuk. Kondisi ini terjadi ketika deposit las memiliki komposisi pada rentang berlabel FA. Dengan demikian, pengetahuan tentang kadar ferit diperlukan untuk memprediksi perilaku korosi.



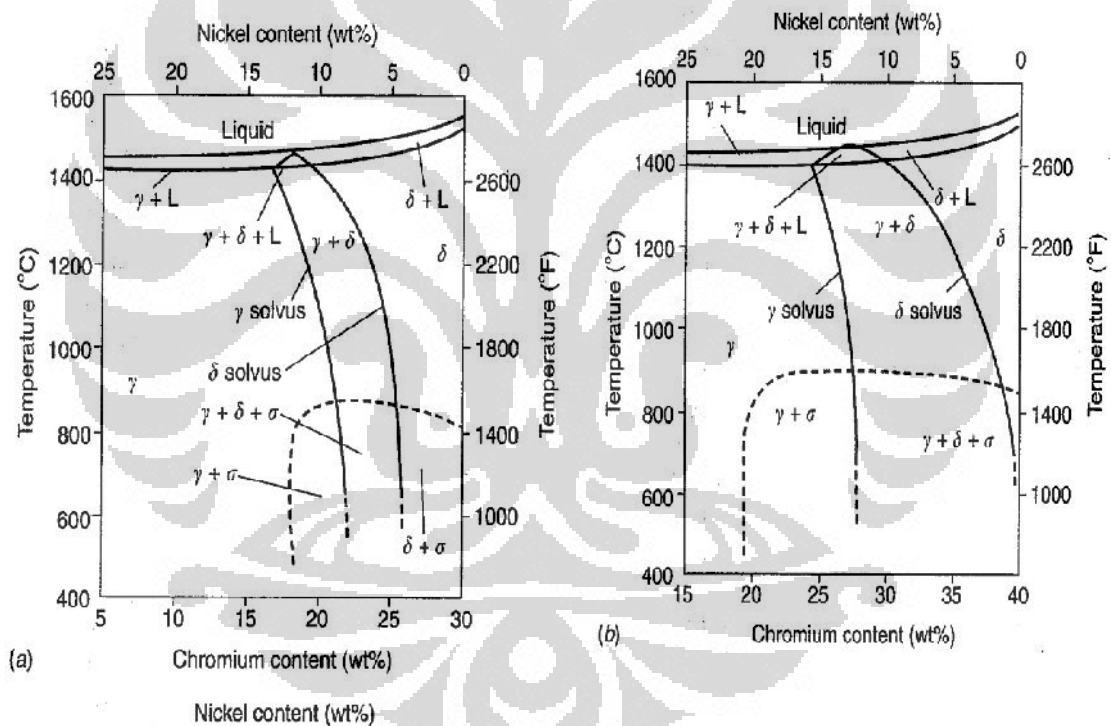
Gambar 2.5 Diagram WRC-1992^[2]

Kadar ferit dinyatakan oleh *ferrite number* (FN), dimana FN 100 adalah sekitar sampai 65% ferit. Batas yang menyatakan perubahan mode solidifikasi (A : Austenit Primer ; AF : Austenitik – Feritik ; FA : Feritik – Austenitik ; F : Ferit Primer) ditunjukkan oleh garis putus - putus. Konsep kromium ekuivalen (C_{req}) dan nikel ekuivalen (Ni_{eq}) digunakan untuk menormalkan efek berbagai penambahan paduan pada pembentukan ferit dan austenit. Rasio kromium nikel

yang tinggi mendorong pembentukan ferit primer, sedangkan rasio rendah mendorong austenit primer.

2.3.1 Evolusi Struktur Mikro Zona Fusi dan Morfologi Ferit

Struktur mikro logam las umumnya dipengaruhi oleh kadar karbon, unsur paduan, perlakuan panas yang diberikan, masukan panas dan laju pendinginannya. Baja tahan karat austenitik secara termomekanik memiliki struktur mikro austenit primer. Transformasi baja tahan karat austenitik dapat dijelaskan menggunakan diagram pseudobiner Fe-Cr-Ni pada kadar besi konstan 70% dan 60% seperti pada Gambar 2.6.

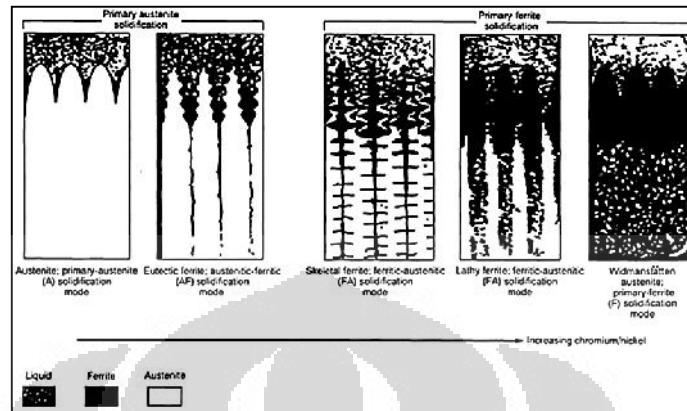


Gambar 2.6 Potongan vertikal diagram terner Fe-Cr-Ni, pada kadar Fe konstan (a) 70% Fe dan (b) 60% Fe.^[2]

2.3.2 Reaksi Solidifikasi

Struktur mikro akhir lasan di kontrol oleh perilaku solidifikasi dan transformasi keadaan padat, seperti pada Gambar 2.7. Terdapat empat

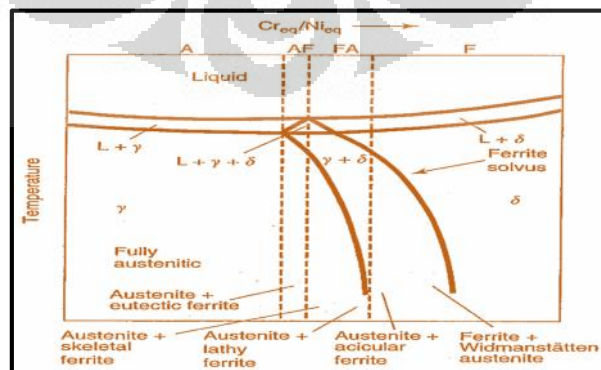
kemungkinan solidifikasi dan transformasi keadaan padat pada logam lasan baja tahan karat austenitik seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.1 dan Gambar 2.8.



Gambar 2.7 Skematik solidifikasi dan transformasi di lasan dengan peningkatan rasio Cr_{eq}/Ni_{eq}^[2]

Tabel 2.1 Tipe solidifikasi, reaksi dan struktur mikro yang terbentuk^[2]

| Jenis Solidifikasi | Reaksi | Struktur Mikro |
|--------------------|---|--|
| A | $L \rightarrow L + A \rightarrow A$ | Struktur <i>fully</i> austenitik, solidifikasi sangat baik |
| AF | $L \rightarrow L + A \rightarrow L + A + (A + F)_{eut} \rightarrow A + F_{eut}$ | Ferit pada sel dan batas dendrite |
| FA | $L \rightarrow L + F \rightarrow L + F + (F + A)_{per/eut} \rightarrow F + A$ | Ferit <i>skeletal</i> dan/atau <i>lathy</i> hasil dari transformasi ferit-austenit |
| F | $F \rightarrow L + F \rightarrow F \rightarrow F + A$ | Matriks ferit <i>accicular</i> atau ferit dengan batas butir austenit dan <i>Widmanstätten</i> |



Gambar 2.8 Hubungan tipe solidifikasi dengan diagram fasa pseudobiner^[2]

2.3.3 Presipitat

Pada keadaan setimbang, baja tahan karat austenitik tipe 316L sepenuhnya berbentuk austenit dalam proses pendinginan sampai temperatur kamar. Delta ferit dalam logam las mengalami pembentukan seperti dendrit sebelum proses pembekuan austenit pada temperatur peritektik 1450 °C dan bertahan selama proses pendinginan yang cepat. Ketika HAZ dipanaskan sampai temperatur mendekati temperatur solidus paduan, berbagai presipitat yang terdapat dalam logam induk terlarut. Hal tersebut akan mendorong kepada supersaturasi matrik austenit selama pendinginan. Karbida merupakan presipitat yang paling banyak terbentuk dalam HAZ pada baja tahan karat austenitik. Berbagai presipitat juga dapat hadir dalam baja tahan karat austenitik, bergantung pada komposisi dan perlakuan panas. Ditemukan hasil-hasil transformasi yang terdiri dari berbagai fasa intermetalik dan karbida $M_{23}C_6$. Fasa sigma, chi, eta, dan Laves juga terbentuk dalam baja tahan karat austenitik, khususnya dalam kondisi penambahan Mo, Nb, dan Ti. Fasa-fasa tersebut terbentuk pada waktu paparan yang sangat lama pada temperatur tinggi. Daftar jenis-jenis presipitat, struktur dan stoikiometrinya ditunjukkan dalam tabel 2.2.

Tabel 2.2 Jenis-jenis presipitat pada baja tahan karat austenitik^[2]

| Precipitate | Crystal Structure | Lattice Parameters (nm) | Stoichiometry |
|--------------------------------|-------------------|---------------------------------------|--|
| MC | FCC | $a = 0.424-0.447$ | TiC, NbC |
| M_6C | Diamond cubic | $a = 1.062-1.128$ | $(FeCr)_3Mo_3C$, Fe_3Nb_3C , Mo_5SiC |
| $M_{23}C_6$ | FCC | $a = 1.057-1.068$ | $(Cr,Fe)_{23}C_6$, $(Cr,Fe,Mo)_{23}C_6$ |
| NbN | FCC | $a = 0.440$ | NbN |
| Z phase | Tetragonal | $a = 0.307, c = 0.7391$ | CrNbN |
| Sigma phase | Tetragonal | $a = 0.880, c = 0.454$ | Fe-Ni-Cr-Mo |
| Laves phase (η) | Hexagonal | $a = 0.473, c = 0.772$ | Fe_2Mo , Fe_2Nb |
| Chi phase (χ) | BCC | $a = 0.8807-0.8878$ | $Fe_{36}Cr_{12}Mo_{10}$ |
| G phase | FCC | $a = 1.12$ | $Ni_{16}Nb_6Si_7$, $Ni_{16}Ti_6Si_7$ |
| R | Hexagonal | $a = 1.0903, c = 1.9342$ | Mo-Co-Cr |
| | Rhombohedral | $a = 0.9011, \alpha = 74^\circ 27.5'$ | Mo-Co-Cr |
| ϵ Nitride (Cr_2N) | Hexagonal | $a = 0.480, c = 0.447$ | Cr_2N |
| Ni_3Ti | Hexagonal | $a = 0.9654, c = 1.5683$ | Ni_3Ti |
| $Ni_3(Al,Ti)$ | FCC | $a = 0.681$ | Ni_3Al |

Karbida $M_{23}C_6$

Karbida terdapat dalam setiap baja tahan karat austenitik, karena kromium merupakan pembentuk kuat karbida. Penambahan beberapa pembentuk karbida, seperti Mo, Nb, Ti juga mendukung pembentukan karbida.

Presipitasi karbida $M_{23}C_6$ memiliki pengaruh terhadap ketahanan korosi. Presipitat karbida tumbuh cepat di sepanjang batas butir pada temperatur 700- 900 °C dan paling banyak terbentuk dalam HAZ pada baja tahan karat austenitik. Pada umumnya presipitat karbida tumbuh di sepanjang batas butir atau antarmuka ferit-austenit.

Karbida ini biasanya terdapat pada baja tahan karat yang diberi perlakuan panas dan biasanya terbentuk sebelum fasa intermetalik. Hal ini disebabkan sifat difusi yang cepat dari atom C. Karbida $M_{23}C_6$ membentuk inti dan tumbuh kedalam matriks ferit. Pada pemanasan 700°C pengendapan $M_{23}C_6$ dalam austenit terbatas. Hal ini menunjukkan bahwa larutan lewat jenuh karbon dalam ferit lebih kecil dari pada dalam austenit.

Fasa Sigma

Pada logam induk dan logam lasan baja tahan karat austenitik sangat rentan terhadap pembentukan fasa sigma. Fasa sigma dapat terbentuk dalam berbagai jenis baja tahan karat, tetapi paling umum cenderung terjadi dalam kadar Cr yang tinggi pada austenitik, feritik, dan paduan duplek.

Pembentukan fasa sigma bergeser ke kandungan Cr yang lebih rendah dan temperatur yang lebih tinggi. Nikel dapat meningkatkan interval temperatur pembentukan fasa sigma dari 815-926 °C, tetapi pengaruh nikel dalam meningkatkan pembentukan fasa sigma tidak seefektif Mn atau unsur-unsur kuat pembentuk ferit seperti Mo, S dan Al.

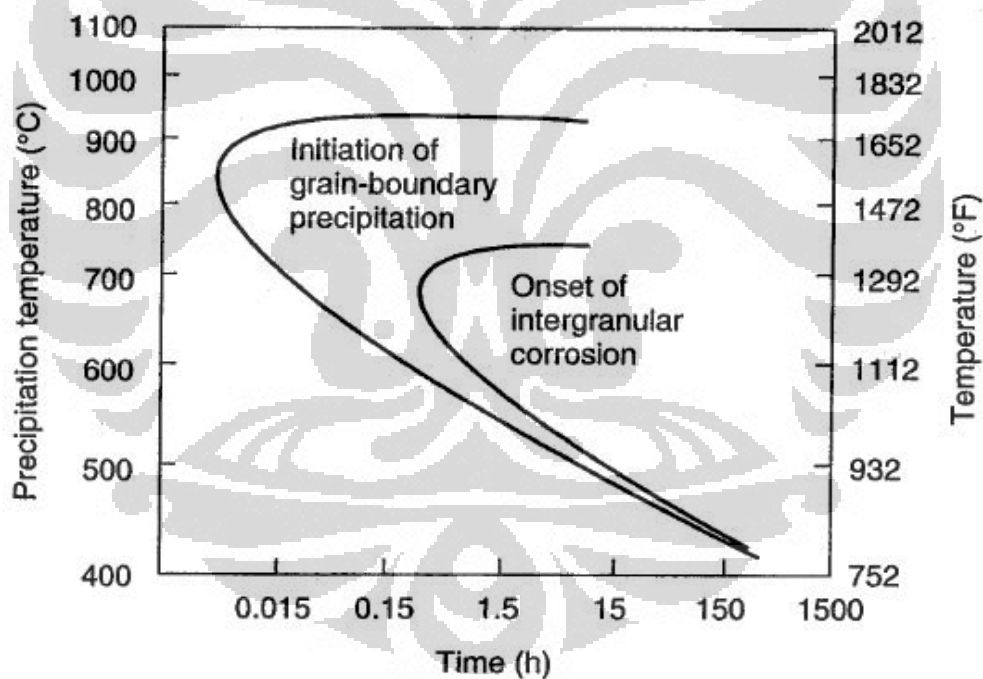
Fasa Chi

Fasa chi adalah suatu senyawa intermetalik stabil yang mengandung Fe, Cr dan Mo. Secara teoritis fasa chi dapat merupakan suatu senyawa pelarut

karbon dengan tipe $M_{18}C$. Komposisi fasa chi bervariasi dengan toleransi yang tinggi, sehingga sulit dibedakan dengan fasa sigma melalui metode EDX. Dengan penambahan karbon perbandingan unsur dalam fasa chi bergeser ke arah Mo, yang mana berarti bergeser ke arah pembentukan karbida kuat.

Fasa R

Fasa R mempunyai struktur heksagonal dengan jarak antar kisi yang cukup lebar. Fasa R adalah fasa intermetalik Fe, Cr dan Mo yang mirip dengan fasa sigma dan chi. Ditemukan bahwa hanya sedikit pergerakan atom kecil dan pergerakan kisi dibutuhkan untuk terbentuknya fasa R dari ferit. Secara teoritis transformasi delta ferit menjadi fasa R lebih mudah terjadi dibandingkan fasa sigma.



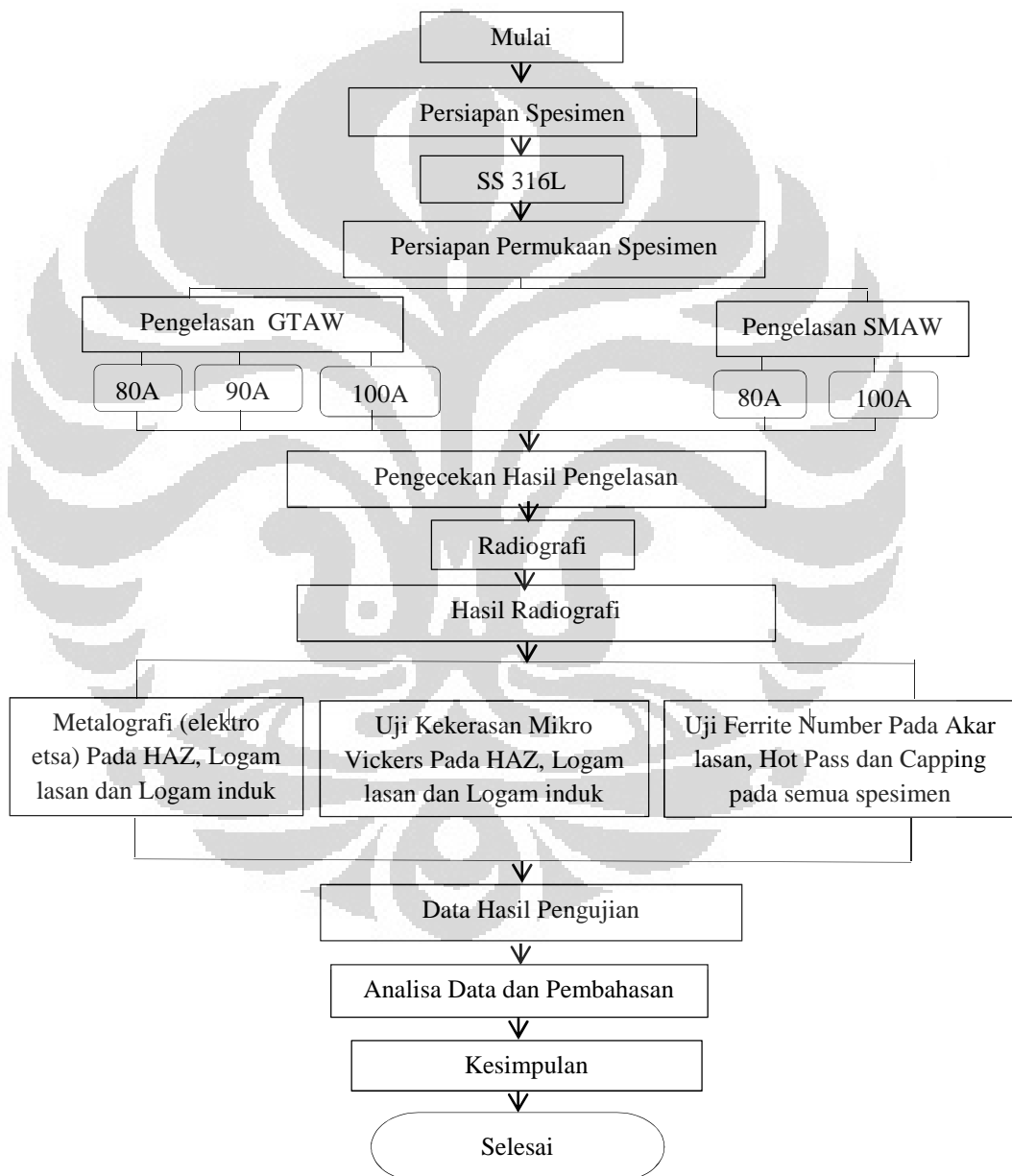
Gambar 2.9 Presipitasi $M_{23}C_6$ pada baja tahan karat 304 dengan kadar karbon 0.05 wt%^[2]

BAB III

Metodologi Penelitian

3.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir urutan pelaksanaan kegiatan penelitian dan urutan kegiatan pengujian yang dilakukan pada penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 Persiapan Bahan

1. Benda uji yang digunakan dalam penelitian adalah baja tahan karat SS316L berbentuk plat dengan dimensi 100mm X 50mm X 5mm.
2. Benda uji (sampel) dihaluskan dan diratakan permukaannya dengan menggunakan gerinda tangan.
3. Masing masing benda uji dibuat single bevel dengan sudut 45°.
4. Kawat las AWS A5.9 ER 316L (diameter 2.6)
5. Elektroda AWS A5.4 E316L-16 (diameter 2.6)

Tabel 3.1 Komposisi kawat las dan elektroda

| Tipe | C | Mn | Si | Cr | Ni | Mo |
|----------|----------|---------|-----------|-----------|-----------|---------|
| ER 316L | 0.03 max | 1.0-2.5 | 0.30-0.65 | 18.0-20.0 | 11.0-14.0 | 2.0-3.0 |
| E316L-16 | 0.03 max | 0.7-0.9 | 0.29-0.39 | 18.7-19.2 | 11.6-12.1 | 2.2-2.4 |

3.3. Proses Pengelasan

Dilakukan pengelasan sesuai WPS dan PQR yang sudah tersedia dengan menggunakan metode pengelasan GTAW dan SMAW.

Tabel 3.2 Parameter pengelasan

| Metode Pengelasan | Kode Sampel | Arus (A) | Volta se (Volt) | Travel Speed (mm/s) | Masukan panas (kJ/mm) | Gas pelindung | Gas Purge |
|-------------------|-------------|----------|-----------------|---------------------|-----------------------|---------------|-----------|
| GTAW | Ia | 80 | 27.5 | 1.11 | 6.70 | Argon 100% | Argon |
| | Ib | 90 | | 1.91 | 4.61 | | |
| | Ic | 100 | | 2.04 | 4.34 | | |
| SMAW | Iia | 80 | 28.0 | 2.82 | 2.67 | - | - |
| | IIB | 100 | | 3.61 | 2.35 | | |

3.4 Pengujian Setelah Pengelasan

3.4.1 Uji Radiografi

Pengujian Radiografi dilakukan untuk mengkarakterisasi retak yang mungkin muncul akibat proses pengelasan pada seluruh benda uji.



Gambar 3.2 Alat dan bahan radiografi yang dipergunakan

3.4.2 Uji *Ferrite Number*

1. Pengujian *Ferrite Number* dilakukan dengan menggunakan ferritescope pada permukaan logam lasan sehingga diperoleh suatu nilai FN pada masing-masing spesimen.

Jumlah spesimen : 5 buah spesimen, pada logam lasan, akar lasan dan capping



Gambar 3.3 *Ferritescope*

3.4.3 Uji Metalografi

1. Mounting : spesimen di mounting pada bagian yang paling representatif yang terdapat daerah logam induk, logam lasan dan HAZ
2. Pengamplasan : menggunakan kertas amplas kekerasan 600, 800, 1000, 1500
3. Pemolesan : menggunakan mesin poles dengan cairan alumina dan kain wool
4. Elektro Etsa : untuk baja tahan karat proses etsa dilakukan dengan elektro etsa dengan larutan etsa berupa asam oksalat 15 gram +100ml aquades, 6-8 volt dan waktu 90 detik pada suhu ruang

5. Foto Mikro : menggunakan mikroskop optik berkamera pada masing masing sampel

Standar pengujian metalografi : ASTM E3
 Jumlah spesimen : 5 buah spesimen di daerah yang memiliki logam lasan, HAZ dan logam induk



Gambar 3.4 Mesin amplas (kiri) dan mesin poles (kanan)

3.4.4 Uji Kekerasan

Metode : Kekerasan mikro vickers
 Standar Pengujian : ASTM E384
 Jumlah spesimen : 2 indentasi masing-masing pada logam lasan, logam induk dan HAZ



Gambar 3.5 Mesin kekerasan mikro vickers

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian Komposisi Sampel

Pengujian komposisi sampel baja tahan karat austenitik 316L yang digunakan pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *spectroscopy*. Tabel 4.1 dibawah menunjukkan hasil pengujian sampel tersebut.

Tabel 4.1 Komposisi sampel baja tahan karat austenitik 316L

| | | | | | | | |
|-------|--------|--------|-------|--------|--------|---------|--------|
| Fe(%) | C(%) | Si(%) | Mn(%) | Cr(%) | Al(%) | P(%) | Mo(%) |
| 66.4 | 0.0342 | 0.461 | 1.86 | 17.8 | 0.0031 | <0.0030 | 2.04 |
| Ni(%) | Co(%) | Ti(%) | Cu(%) | Nb(%) | V(%) | S(%) | W(%) |
| 10.5 | 0.249 | 0.0065 | 0.355 | 0.0214 | 0.0665 | 0.0337 | 0.0501 |

Apabila dibandingkan dengan standard baja tahan karat austenitik 316L yakni *Standard Specification for Annealed or Cold-Worked Austenitic Stainless Steel Sheet, Strip, Plate, and Flat Bar*, spesifikasi baja tahan karat 316L memiliki spesifikasi komposisi yakni sebagai berikut :

1. Kadar C max 0.03%,
2. Kadar Ni 10-14%,
3. Kadar Cr 17-18%,
4. Kadar Mo 2-3%

Berdasarkan perbandingan di atas dapat disimpulkan bahwa baja yang digunakan dalam penelitian ini dapat digolongkan dalam spesifikasi baja tahan karat austenitik 316L meskipun kadar karbon pada sampel sedikit melebihi yaitu 0.0342%

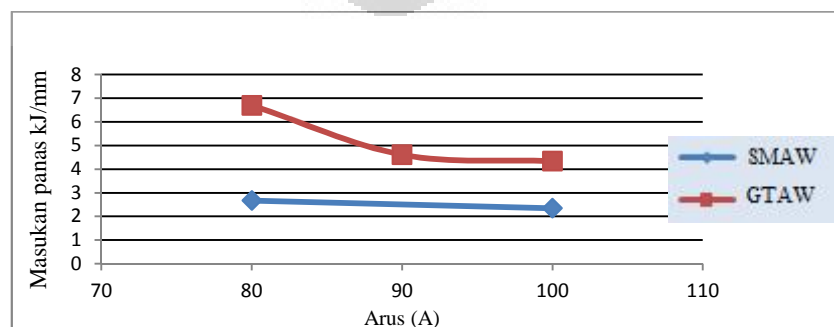
Baja tahan karat austenitik 316L ini sendiri termasuk sebagai baja karbon rendah, dimana kandungan karbonnya hanya 0.03% saja. Hal ini akan mengurangi kecenderungan untuk terjadinya sensitasi. Kadar molibdenum yang mencapai 2.04% juga akan meningkatkan ketahanan terhadap korosinya, dengan

meningkatnya molibdenum austenit juga akan menjadi lebih sempit, oleh karena itu diperlukan kadar nikel sampai 10% untuk tetap menjaga kestabilan austenit.

4.2. Analisa Parameter Pengelasan

Dari data pada tabel 3.2 terlihat bahwa masukan panas merupakan fungsi dari arus (A), voltase (volt) dan juga kecepatan pengelasan (mm/s). Dari proses pengelasan yang dipilih yaitu GTAW dan SMAW ternyata memiliki efisiensi masukan panas yang berbeda.

Pada proses pengelasan GTAW masukan panas tertinggi terdapat pada penggunaan arus 80A yaitu sebesar 6.70 kJ/mm, dan masukan panas semakin berkurang seiring penggunaan arus yang lebih besar, pada penggunaan arus 90A masukan panas sebesar 4.61 kJ/mm dan arus 100A memberikan masukan panas terendah pada proses pengelasan GTAW yang dilakukan pada penelitian ini. Masukan panas yang cukup besar ini merupakan hasil total dari tiga kali pass selama proses pengelasan. Karena penggunaan kawat las pada proses GTAW ini maka kecepatan pengelasan juga sedikit lambat, karena diperlukan waktu untuk membuat kawat las ikut bercampur dengan logam induk, namun dengan memberikan variasi arus sebesar 80A, 90A dan 100A maka waktu pengelasan juga akan lebih bervariasi. Semakin besar arus maka waktu pengelasan yang diperlukan juga akan semakin cepat. Penggunaan gas argon sebagai gas pembersih juga penting dalam pengelasan baja tahan karat austenitik 316L ini, karena jika tidak menggunakan gas pembersih ini maka hasil lasan akan menjadi tidak bagus dan tampak keriting pada akar lasan.



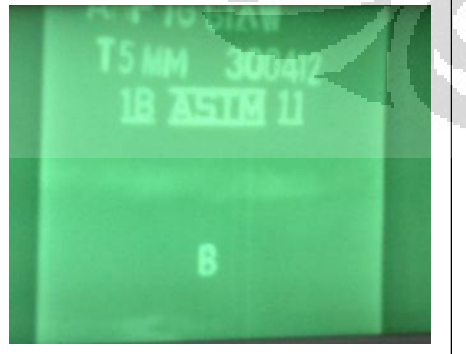
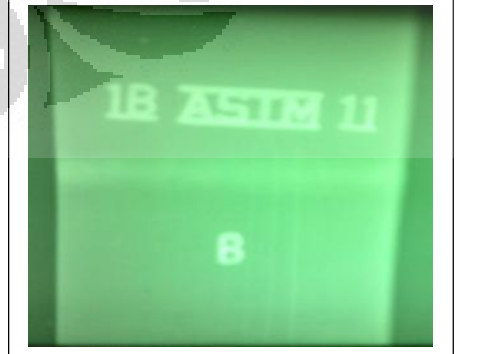


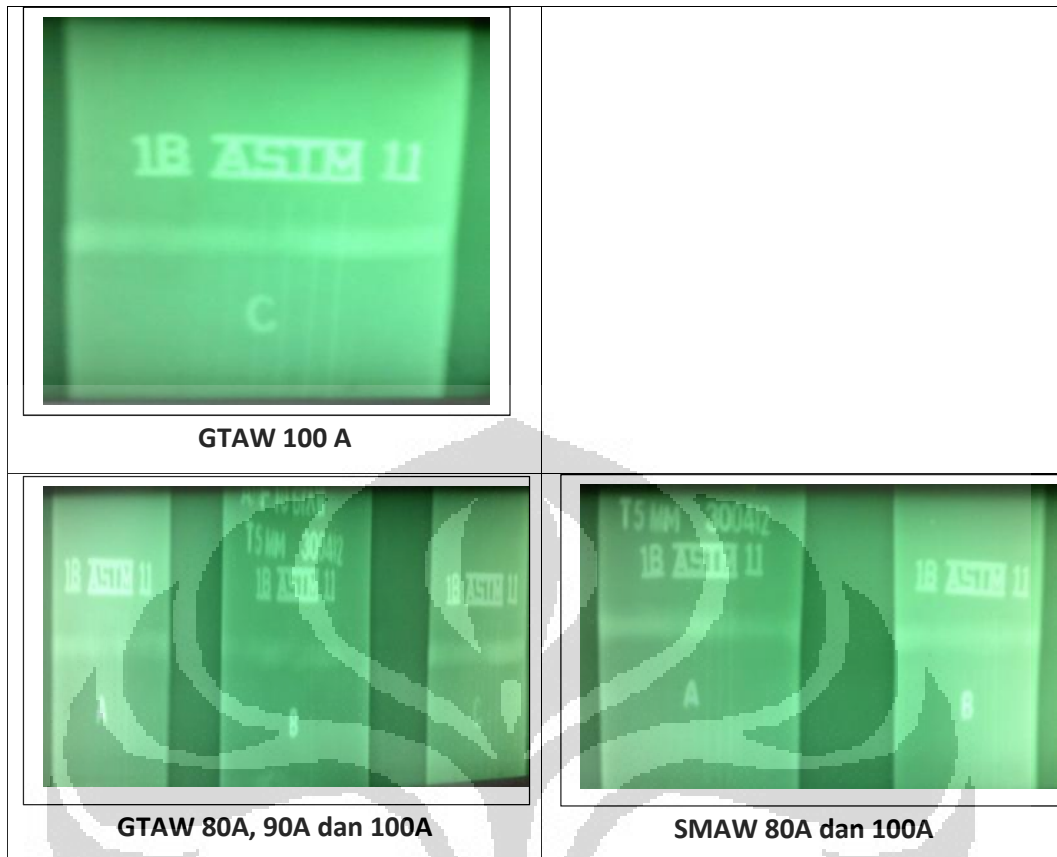
Gambar 4.1 Grafik pengaruh arus terhadap masukan panas

Pada proses pengelasan SMAW masukan panas tertinggi hanya sebesar 2.67 kJ/mm pada penggunaan arus 80A, dan masukan panas sebesar 2.35 kJ/mm pada penggunaan arus 100A. Masukan panas ini merupakan total untuk tiga kali pass pada proses pengelasan. Namun waktu pengelasan jauh lebih cepat di bandingkan dengan pengelasan GTAW. Hal ini dikarenakan efisiensi dari pengelasan SMAW yang jauh lebih besar dibandingkan dengan GTAW. Dengan elektroda terlapis SMAW mampu memberikan pengelasan dengan waktu yang lebih cepat dan juga masukan panas yang tidak begitu besar.

4.3. Analisa Hasil Pengujian Radiografi

Tabel 4.2 Perbandingan hasil foto radiografi GTAW dan SMAW

| GTAW | SMAW |
|---|--|
|  |  |
| GTAW 80 A | SMAW 80 A |
|  |  |
| GTAW 90 A | SMAW 100 A |




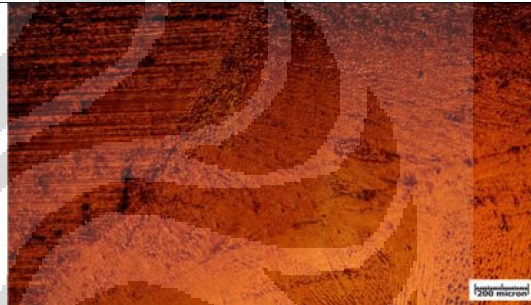


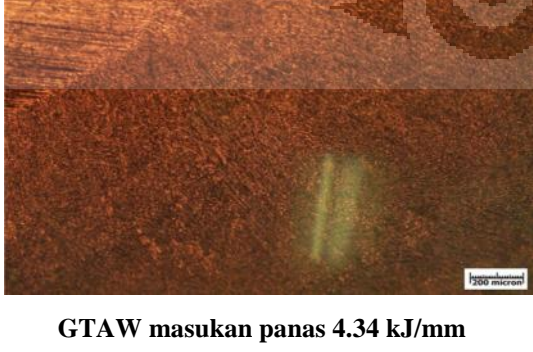
Pada tabel 4.2 terlihat urutan sampel dengan variasi pengelasan yang berbeda. Dengan pengujian radiografi diharapkan dapat melihat cacat yang tidak terlihat secara kasat mata seperti retak mikro dan porositas yang muncul pada saat pengelasan. Pengujian menunjukkan bahwa tidak terlihat adanya porositas dan retak. Yang teramati hanyalah perbedaan intensitas terang gelap di daerah pengelasan. Hal ini berarti adanya perbedaan ketebalan lapisan pengelasan yang disebabkan *multipass* kurang seragam. Sulitnya mencapai keseragaman lapisan pada saat pengelasan disebabkan spesifikasi dan prosedur pengelasan yang kurang baik seperti faktor juru las yang tidak mampu selalu konsisten dalam setiap lapisan, perbedaan kecepatan pengelasan setiap lapisan juga akan mempengaruhi penetrasi dalam setiap lapisan. Namun secara keseluruhan dapat disimpulkan bahwa hasil pengelasan tidak mengindikasikan cacat yang terlalu buruk seperti retak maupun porositas sehingga dapat dinilai hasil pengelasan sudah cukup baik.

4.4 Analisa Hasil Pengujian Metalografi

4.4.1 Perbandingan Hasil Foto Makro

Berikut merupakan perbandingan foto makro hasil pengelasan GTAW dan SMAW yang mencakup daerah logam induk, HAZ dan logam lasan dengan perbesaran 50x menggunakan elektro etsa dengan zat etsa berupa asam oksalat 10% dan waktu etsa selama ± 10 detik.

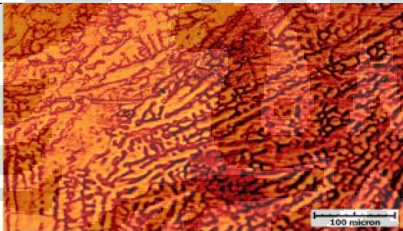

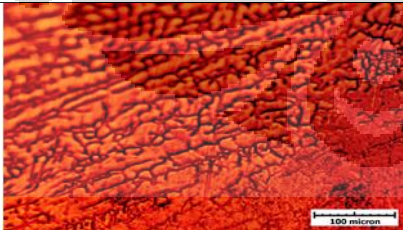

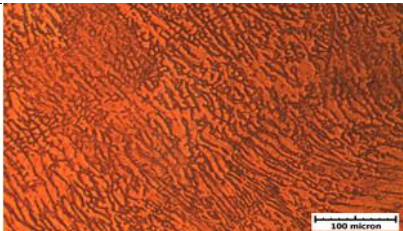
Tabel 4.3 Perbandingan foto makro pengelasan GTAW dan SMAW perbesaran 50x pada daerah logam induk, HAZ dan logam lasan

| GTAW | SMAW |
|---|--|
|  |  |
| GTAW masukan panas 6.70 kJ/mm | SMAW masukan panas 2.67 kJ/mm |
|  |  |
| GTAW masukan panas 4.61 kJ/mm | SMAW masukan panas 2.35 kJ/mm |
|  | |
| GTAW masukan panas 4.34 kJ/mm | |

Dari foto di atas dapat terlihat struktur butir secara makro dari material sampel yang dilas dengan metode *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) dan juga *Shielded Metal Arch Welding* (SMAW) dengan beberapa variabel masukan panas seperti ditunjukkan pada tabel 3.2. Dari hasil pengamatan metalografi secara makro, tampak bahwa hasil lasan telah menyatu. Hal ini menunjukkan bahwa prosedur dan parameter pengelasan yang diterapkan telah sesuai dengan logam induk. Selain itu terlihat juga lapisan hasil passing pada saat proses pengelasan, seperti ditunjukkan pada foto makro hasil pengelasan GTAW dengan masukan panas yang berbeda beda. Pada foto makro hasil pengelasan SMAW terlihat daerah HAZ yang cukup lebar dibandingkan GTAW. Daerah logam induk dengan struktur yang memanjang yang membuktikan bahwa spesimen pengujian ini merupakan hasil pengerolan.

4.4.2 Analisa Perbandingan Foto Mikro Daerah HAZ

Tabel 4.4 Perbandingan foto mikro pengelasan GTAW dan SMAW perbesaran 200x pada daerah HAZ

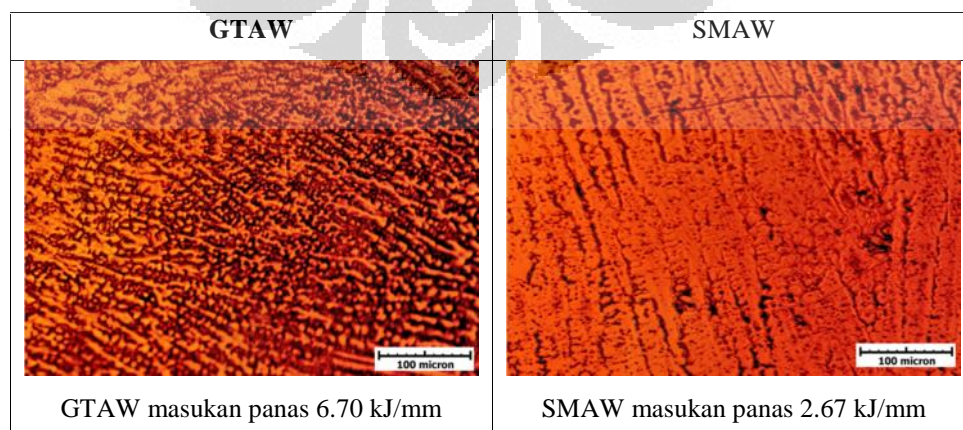
| GTAW | SMAW |
|--|---|
|  <p>GTAW masukan panas 6.70 kJ/mm</p> |  <p>SMAW masukan panas 2.67 kJ/mm</p> |
|  <p>GTAW masukan Panas 4.61 kJ/mm</p> |  <p>SMAW masukan Panas 2.35 kJ/mm</p> |
|  <p>GTAW masukan Panas 4.34 kJ/mm</p> | |

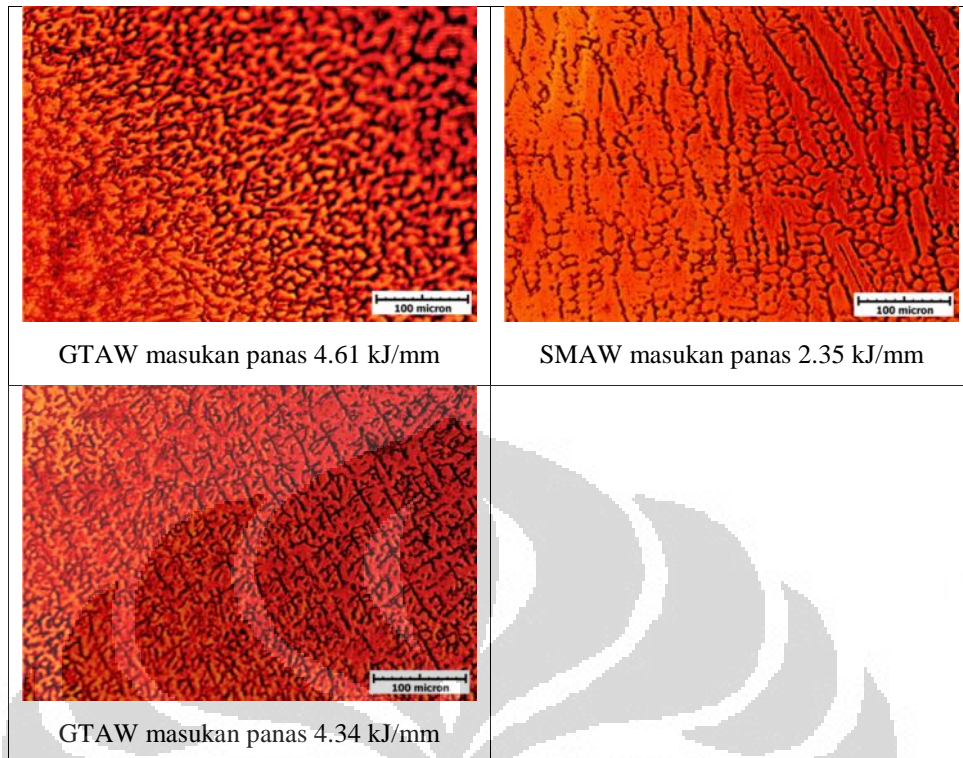
Hasil Foto mikro pada tabel 4.4 di atas terlihat suatu bentuk solidifikasi yang berbeda antara proses pengelasan GTAW dan SMAW. Pada hasil pengelasan SMAW austenit yang terbentuk lebih menyerupai bentuk *lath* austenit dan juga terdapat bentuk *skeletal* ferit, seperti foto struktur mikro pada masukan panas 2,35 kJ/mm proses pengelasan SMAW. Selain itu struktur mikro yang terbentuk masih berukuran besar. Proses solidifikasi pada proses pengelasan SMAW ini tergolong jenis FA (ferit-austenit). Pada masukan panas 2,67 kJ/mm pengelasan SMAW solidifikasi ferit primer terjadi dan austenit terbentuk melalui proses reaksi peritik-eutektik yang berada pada batas butir ferit pada saat akhir proses solidifikasi. Skema proses solidifikasi ditunjukkan pada Gambar 2.7.

Pada hasil pengelasan GTAW, daerah HAZ memiliki struktur mikro dendritik yang tersebar sampai batas fusion zone. Delta ferit yang terbentuk berada di sepanjang batas butir austenit. Ferit terbentuk pada saat akhir proses solidifikasi austenit primer melalui proses reaksi eutektik. Proses solidifikasi jenis ini tergolong bentuk solidifikasi AF (austenit-ferit). Hal ini terjadi apabila terdapat unsur-unsur yang dapat mempromosikan ferit seperti kromium dan molibdenum (Cr dan Mo).

4.4.3 Analisa Perbandingan Foto Mikro Daerah Logam lasan

Tabel 4.5 Perbandingan foto mikro pengelasan GTAW dan SMAW perbesaran 200x pada daerah logam lasan





Hasil Pengamatan struktur mikro pada daerah logam lasan antara hasil pengelasan SMAW dan GTAW terlihat seperti yang diberikan pada tabel 4.5. Struktur mikro yang lebih halus terlihat pada hasil pengelasan GTAW. Delta ferit yang berwarna hitam terlihat menyebar diantara *layer* austenit.

Delta ferit dengan bentuk *skeletal* masih terlihat pada proses pengelasan ini. Solidifikas FA (ferit-austenit) terlihat pada proses pengelasan GTAW dengan masukan panas 6,7 kJ/mm. Pada saat proses akhir solidifikasi ferit primer, austenit terbentuk akibat reaksi peritik – eutektik di sepanjang dendrit dan batas dendrit pada ferit. Reaksi ini terjadi seperti yang ditunjukkan oleh *three phase diagram* pada Gambar 2.8. Disebut reaksi peritik-eutektik karena merupakan hasil transisi dari reaksi peritektik dalam sistem Fe-Ni ke reaksi eutektik dalam sistem Fe-Cr-Ni. Pada struktur mikro hasil proses pengelasan SMAW struktur mikro lebih besar dibandingkan dengan GTAW. Austenit yang terbentuk berbentuk lebih memanjang dengan ferit di antara batas butir.

4.4 Analisa Hasil Pengujian Ferrite Number

Pada baja tahan karat austenitik keberadaan ferit sangat diperlukan untuk mencegah retak panas saat proses pengelasan. Dari pengujian yang telah dilakukan didapatkan data sebagai berikut :

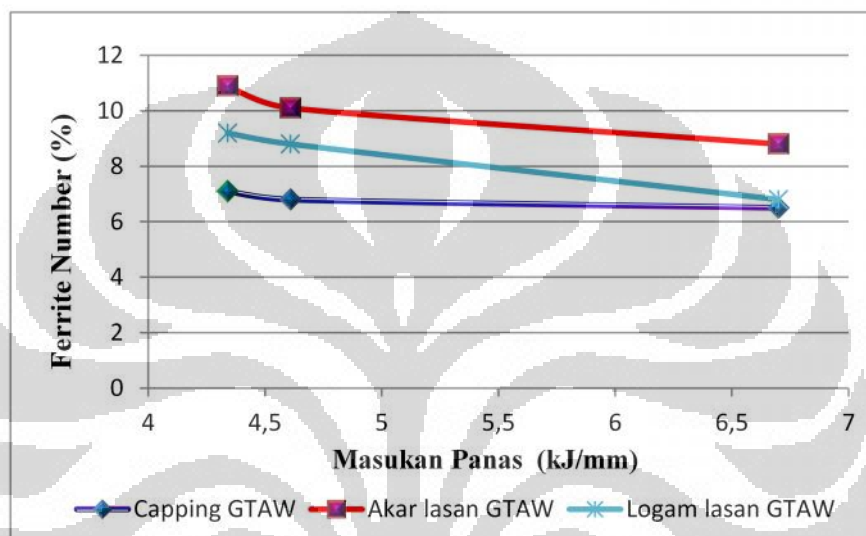
Tabel 4.6 *Ferrite Number* pada setiap sample hasil pengelasan

| Metode | Arus (A) | Masukan panas (kJ/mm) | <i>Ferrite Number (%)</i> | | | |
|--------|----------|-----------------------|---------------------------|----------------|------------|-------------|
| | | | Logam induk | <i>Capping</i> | Akar lasan | Logam lasan |
| GTAW | 80 | 6,7 | 0,25 | 6,5 | 8,8 | 6,8 |
| | 90 | 4,61 | 0,27 | 6,8 | 10,1 | 8,8 |
| | 100 | 4,34 | 0,29 | 7,1 | 10,9 | 9,2 |
| SMAW | 80 | 2,67 | 0,3 | 3,1 | 4,3 | 3,2 |
| | 100 | 2,35 | 0,31 | 3,6 | 4,6 | 3,3 |

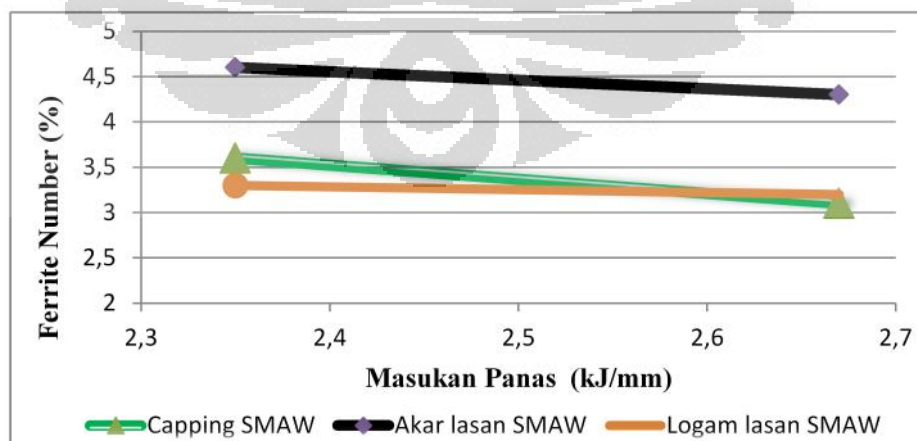
Dari tabel 4.6 di atas terlihat bahwa masukan panas memiliki pengaruh terhadap ferit yang terbentuk pada proses pengelasan. Semakin besar masukan panas maka ferit yang terbentuk akan semakin sedikit. Oleh karena itu diperlukan suatu kontrol masukan panas yang tepat. Pada pengelasan baja tahan karat austenitik dengan proses GTAW, semua kadar ferit berada di atas 5%, hal ini sudah sesuai dengan FN yang dianjurkan dalam proses pengelasan baja tahan karat austenitik. Pada proses pengelasan SMAW ferit yang dihasilkan tidak lebih besar dari proses GTAW, hal ini disebabkan karena meskipun menggunakan arus yang sama seperti proses GTAW yaitu sebesar 80A dan 100A pada proses pengelasan SMAW hanya memiliki masukan panas yang kecil sebesar 2,67 kJ/mm dan 2,35 kJ/mm. Masukan panas yang kecil ini disebabkan oleh kecepatan waktu pengelasan yang lebih cepat pada proses SMAW.

Terjadi perbedaan jumlah ferit (FN) pada bagian akar lasan dan *capping* pada hasil pengelasan GTAW dan SMAW. Bagian akar lasan pada kedua hasil pengelasan ternyata memiliki ferit yang lebih banyak dibandingkan jumlah ferit yang terdapat pada bagian *capping*. Hal ini mungkin dikarenakan dilusi yang terjadi pada saat pengelasan bagian akar lasan, pada saat proses pengelasan bagian akar lasan, arus yang digunakan sesuai dengan parameter pengelasan yaitu 80A,

90A dan 100A untuk proses pengelasan GTAW dan arus sebesar 80A dan 100A untuk proses pengelasan SMAW. Namun setelah bagian akar lasan, dilakukan passing kedua dan ketiga untuk bagian *capping*. Pada bagian *capping* semua variabel arus dinaikan sebesar 10A, sehingga masukan panas pada passing kedua dan ketiga juga akan meningkat, seiring peningkatan masukan panas maka jumlah ferit juga akan menurun seperti ditunjukkan pada Gambar 4.2 dan Gambar 4.3 dibawah ini.



Gambar 4.2 Pengaruh masukan panas terhadap FN yang terbentuk pada logam lasan, akar lasan, dan *capping* hasil GTAW.



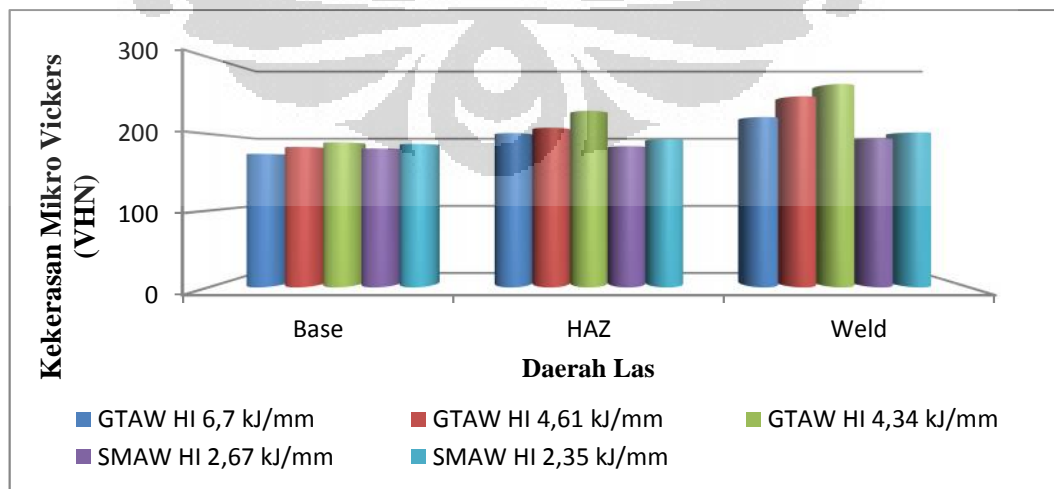
Gambar 4.3 Pengaruh masukan panas terhadap FN yang terbentuk pada logam lasan, akar lasan, dan *capping* hasil SMAW.

4.5 Analisa Hasil Pengujian Kekerasan

Hasil pengujian kekerasan dengan menggunakan alat kekerasan mikro vickers didapatkan setelah menghitung jumlah kekerasan rata-rata pada masing-masing daerah penjejukan, yang mana di setiap daerah di ambil dua titik penjejukan. Tabel 4.7 memberikan informasi tentang variabel-variabel yang berhubungan dan memiliki pengaruh terhadap kekerasan hasil proses pengelasan metode GTAW dan SMAW :

Tabel 4.7 Hasil pengujian kekerasan mikro vickers

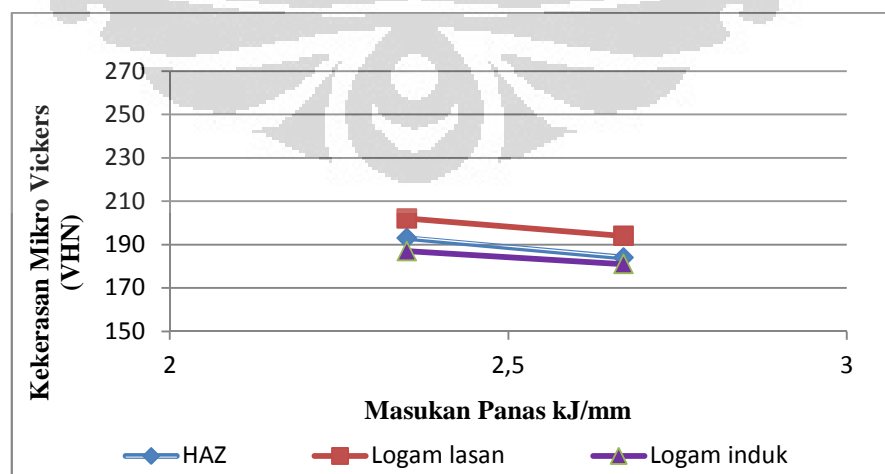
| Metode | Jejak Ke- | Arus (A) | Masukan panas (kJ/mm) | Kekerasan Mikro Vickers (VHN) | | | |
|--|--|----------|-----------------------|-------------------------------|------------|------------|------------|
| | | | | Base | HAZ | Weld | |
| GTAW | 1 | 80 | 6,7 | 155 | 198 | 182 | |
| | 2 | | | 193 | 205 | 262 | |
| | Nilai Kekerasan Mikro Vickers Rata-Rata | | | | 174 | 201 | 222 |
| | 1 | 90 | 4,61 | 163 | 202 | 258 | |
| | 2 | | | 203 | 214 | 240 | |
| | Nilai Kekerasan Mikro Vickers Rata-Rata | | | | 183 | 208 | 249 |
| | 1 | 100 | 4,34 | 201 | 253 | 216 | |
| | 2 | | | 176 | 208 | 313 | |
| | Nilai Kekerasan Mikro Vickers Rata-Rata | | | | 189 | 230 | 265 |
| SMAW | 1 | 80 | 2,67 | 191 | 187 | 190 | |
| | 2 | | | 170 | 181 | 198 | |
| | Nilai Kekerasan Mikro Vickers Rata-Rata | | | | 181 | 184 | 194 |
| | 1 | 100 | 2,35 | 194 | 189 | 198 | |
| | 2 | | | 181 | 197 | 206 | |
| Nilai Kekerasan Mikro Vickers Rata-Rata | | | | 187 | 193 | 202 | |



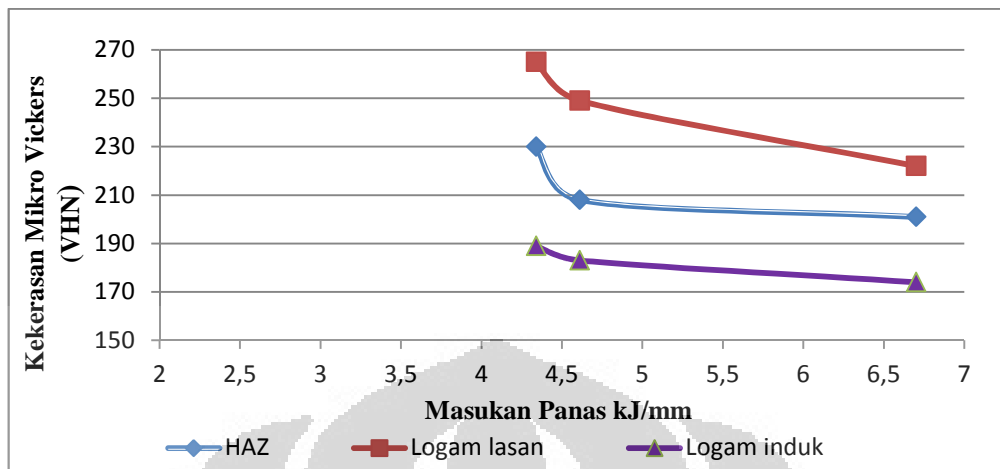
Gambar 4.4 Grafik distribusi kekerasan pada setiap daerah lasan

Dari data yang diperoleh seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.4 terlihat bahwa distribusi kekerasan pada setiap daerah pengelasan memiliki nilai kekerasan yang berbeda-beda. Nilai kekerasan daerah pengelasan tertinggi berada pada daerah logam las kemudian HAZ dan yang paling rendah yaitu logam induk. Nilai kekerasan logam induk rata-rata sebesar 183 VHN, kekerasan rata-rata HAZ 203 VHN sedangkan nilai kekerasan rata-rata daerah logam las mencapai 226 VHN. Kekerasan pada bagian logam las terjadi akibat proses peleburan yang dilanjutkan dengan proses pendinginan yang cepat. Hal ini akan mengakibatkan struktur mikro yang terbentuk pada bagian logam las akan lebih halus jika dibandingkan dengan bagian HAZ seperti yang telah ditunjukkan oleh gambar yang berada pada tabel 4.4 dan tabel 4.5 .

Perbedaan nilai kekerasan antara proses pengelasan GTAW dan SMAW terlihat pada Gambar 4.4 dimana kekerasan pada proses pengelasan SMAW bernilai lebih kecil baik pada daerah logam las maupun pada daerah HAZ. Hal ini dikarenakan akibat masukan panas pada proses pengelasan SMAW lebih kecil dibandingkan dengan masukan panas proses pengelasan GTAW. Pada masukan panas 2,67 kJ/mm proses pengelasan SMAW nilai kekerasan bernilai 194 VHN pada logam las dan 184 VHN pada daerah HAZ. Nilai kekerasan terlihat semakin meningkat pada penurunan masukan panas 2,35 kJ/mm kekerasan pada logam las naik menjadi sebesar 202 VHN dan kekerasan daerah HAZ naik menjadi 193 VHN.

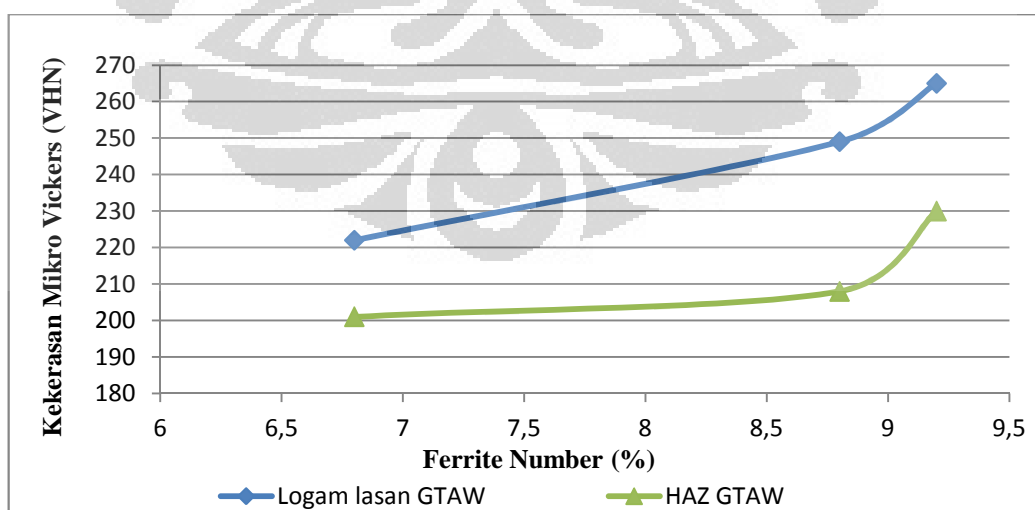


Gambar 4.5 Grafik pengaruh masukan panas terhadap kekerasan hasil SMAW

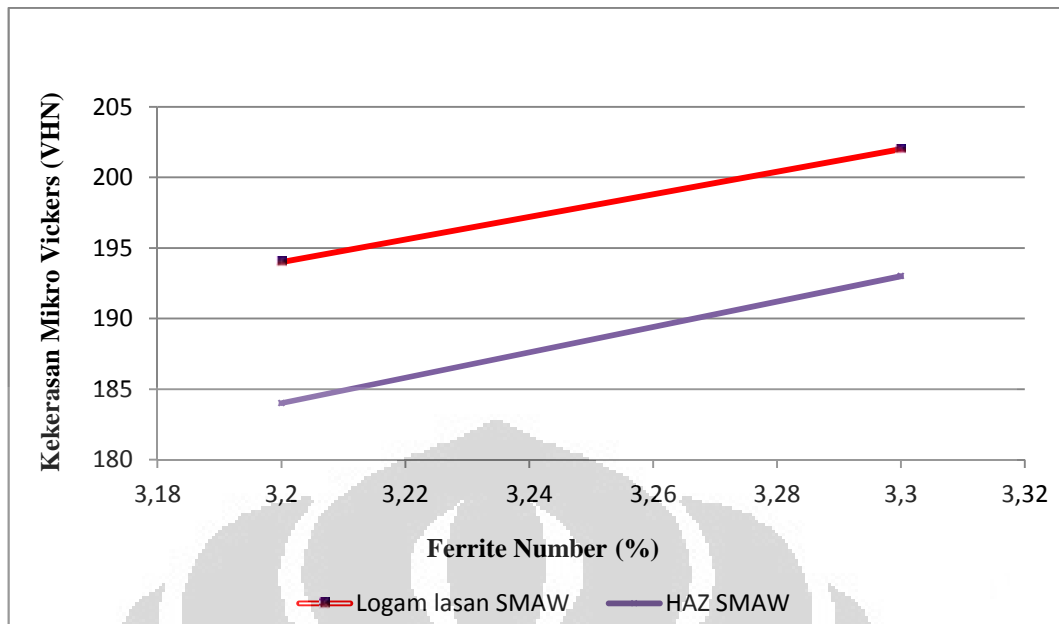


Gambar 4.6 Grafik pengaruh masukan panas terhadap kekerasan hasil GTAW

Pola kenaikan kekerasan dengan penurunan masukan panas juga terlihat pada proses pengelasan GTAW, terjadi kenaikan nilai kekerasan dengan menurunnya nilai masukan panas. Penurunan nilai kekerasan ini disebabkan oleh semakin lambatnya laju pendinginan yang terjadi. Dengan semakin cepatnya pendinginan akan mendorong butir ferit untuk terbentuk lebih banyak kemudian dengan waktu sisa yang ada barulah muncul fasa austenit. Korelasi komposisi ferit dan austenit relatif berhubungan terhadap nilai kekerasan di setiap daerah pengelasan



Gambar 4.7 Grafik pengaruh FN terhadap kekerasan pada HAZ dan logam lasan hasil GTAW



Gambar 4.8 Grafik pengaruh FN terhadap kekerasan pada hAZ dan logam lasan hasil SMAW

Pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8 ditunjukkan bahwa dengan semakin meningkatnya jumlah ferit, maka nilai kekerasan pada hasil pengelasannya pun juga akan meningkat. Hal tersebut jika ditinjau secara kristalografi bahwa nilai *Atomic Packing Factor* (APF) pada kristal ferit (BCC) mempunyai nilai yang lebih besar yaitu 0,74 yang artinya kepadatan kristalnya relatif lebih tinggi dibanding kristal austenit (FCC) yang hanya sebesar 0,6. Perbedaan hasil pengujian kekerasan pengelasan proses SMAW dan GTAW terlihat pada grafik di atas, dimana FN pada proses pengelasan SMAW lebih sedikit dibandingkan dengan proses pengelasan GTAW dengan FN sebesar 3,2% dan 3,3%. Sedangkan pada proses pengelasan GTAW nilai FN mencapai 6,8% ,8,8%, dan 9,2%. FN yang cukup tinggi pada pengelasan GTAW diperlukan untuk mencegah retak panas pada saat proses pengelasan. Dengan meningkatnya FN maka kekerasan juga akan meningkat, namun ketahanan terhadap korosi cenderung berkurang.

BAB V

KESIMPULAN

Berdasarkan pada penelitian, pengamatan, dan analisis terhadap data yang diperoleh dari pengujian yang dilakukan tentang perbedaan Karakteristik Hasil Pengelasan Metode GTAW dan SMAW Terhadap Baja Tahan Karat 316L, maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Morfologi ferit yang terbentuk pada lasan hasil GTAW berbeda dengan lasan hasil SMAW untuk masukan panas lasan GTAW senilai 6.70 kJ/mm, 4.61 kJ/mm dan 4.34 kJ/mm serta masukan panas senilai 2.67 kJ/mm dan 2.35 kJ/mm untuk lasan SMAW. Hal ini diakibatkan oleh proses solidifikasi yang berbeda antara lasan GTAW dan lasan SMAW.
2. FN pada daerah logam lasan hasil pengelasan GTAW bernilai 6.8%, 8.8% dan 9.2% nilai ini lebih besar dibandingkan dengan FN hasil pengelasan SMAW dengan nilai 3.2% dan 3.3% pada logam lasan.
3. Dapat disimpulkan bahwa nilai kekerasan mikro paling tinggi berada pada daerah logam lasan senilai 226 VHN, kemudian disusul oleh HAZ senilai 203 VHN dan terendah pada logam induk senilai 183 VHN.
4. Nilai kekerasan semakin meningkat seiring dengan menurunnya masukan panas.
5. Nilai kekerasan hasil proses pengelasan GTAW pada daerah logam lasan dengan nilai rata-rata 213 VHN, daerah HAZ dengan nilai rata-rata 212 VHN dan logam induk dengan nilai rata-rata 182 VHN lebih besar dibandingkan dengan proses SMAW dengan nilai kekerasan rata-rata 198 VHN, 188 VHN dan 184 VHN pada daerah yang sama secara berurutan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] ASM Metals Handbook, 8th Edition, Volume 9, p.1983.
- [2] Lippold, J. C., and Savage, W. E 1979. Solidification of austenitic stainless steel weldments, part 1: a proposed mechanism, *Welding Journal*, 58(12):362s-374s
- [3] Folkhard E. *Welding metallurgy of stainless steels*. New York: Springer Verlag;1988.
- [4] Kou S. *Welding metallurgy*. New York: John Wiley & Sons; 2003.
- [5] Weiss B, Stickler R. Phase instabilities at high temperature exposure of 316 austenitic stainless steel. *Metall Trans A* 1972;3:851–64.
- [6] Silva CC, Almeida Neto JC, de Sant’Ana HB, Farias JP. Mikrostructural changes in the AISI 410S stainless steel HAZ – effects on corrosion resistance. 2006;11:188–99 .
- [7] B.T. Lu, Z.K. Chen, J.L Luo, B.M. Patchett, and Z.H. Xu, "Pitting and stress corrosion cracking behaviour in welded austenitic stainless steel," vol. 50, page 1391-1403, 2005.
- [8] Farraro T, Stellina Jr RM. *Materials construction for refinery applications*. Corrosion 96 (paper 614). Denver, Colorado: NACE International; 1996.
- [9] Reny Indraswari. Tesis “Pengaruh hasil pengelasan SMAW dan GTAW terhadap perilaku korosi stainless steel 316L.”. Teknik Metalurgi dan Material UI.2010.
- [10] J. C. L. a. D. J. Kotecki, "Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels," *Wiley Interscience*, 2005.
- [11] Luz TS, Farias JP, Lima Neto P. Use of double loop electrochemical potentiokinetic reaction (DL-EPR) to evaluate the sensitization of austenitic stainless steels after welding. *Weld Int* 2006;20:959–64

[12] S.M. Tabatabaepour.F.Honarvar. A comparative evaluation of ultrasonic testing of AISI 316L welds made by shielded metal arc welding and gas tungsten arc welding processes.New York: Springer Verlag;1988.

[13] William.D.Callister,jr. Materials science and engineering an introduction ;2003

[14] Fuad Badrul Qamar,“Pengaruh variasi elektroda dan pendinginan terhadap hasil pengelasan GTAW”. Teknik Metalurgi dan Material ITS.2009

[15] ASM Metals Handbook, 8th Edition, Volume 8, p.424. 1983

