



TUGAS AKHIR - TM 141585

PENGARUH HEAT INPUT PADA PENGELASAN *DISSIMILAR METAL* SS304H DAN T22 DENGAN PROSES GTAW TERHADAP DISTRIBUSI KEKERASAN DAN KANDUNGAN *DELTA FERRITE*

THE STUDY OF HEAT INPUT ON DISSIMILAR METAL WELDING BETWEEN SS304H AND T22 WITH GAS TUNGSTEN ARC WELDING (GTAW) ABOUT HARDNESS DISTRIBUTION AND DELTA FERRITE CONTENT

**FITRIYANI ADITIYA MANTIKA
NRP 2113 100 047**

**Dosen Pembimbing:
SUWARNO, S.T., M.Sc., Ph.D**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2018**



TUGAS AKHIR - TM 141585

**PENGARUH *HEAT INPUT* PADA PENGELASAN
DISSIMILAR METAL SS304H DAN T22 DENGAN PROSES
GTAW TERHADAP DISTRIBUSI KEKERASAN DAN
KANDUNGAN *DELTA FERRITE***

FITRIYANI ADITIYA MANTIKA
NRP 2113 100 047

Dosen Pembimbing
SUWARNO, S.T., M.Sc., Ph.D

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2018



FINAL PROJECT - TM 141585

THE STUDY OF HEAT INPUT ON DISSIMILAR METAL WELDING BETWEEN SS304H AND T22 WITH GAS TUNGSTEN ARC WELDING (GTAW) ABOUT HARDNESS DISTRIBUTION AND DELTA FERRITE CONTENT

FITRIYANI ADITIYA MANTIKA
NRP 2113 100 047

Dosen Pembimbing
SUWARNO, S.T., M.Sc., PhD

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL ENGINEERING
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA 2018

**PENGARUH *HEAT INPUT* PADA PENGELASAN
DISSIMILAR METAL SS304H DAN *T22* DENGAN
PROSES GTAW TERHADAP DISTRIBUSI
KEKERASAN DAN KANDUNGAN *DELTA*
*FERRITE***

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

FITRIYANI ADITIYA MANTIKA

NRP. 2113 100 047

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Suwarno, ST., M.Sc., PhD
NIP. 198005202005011003 (Pembimbing)
2. Prof. Dr. Ir. Wajan Berantas, DlsA
NIP. 195012111985021008 (Penguji I)
3. Ir. Hari Subianto, MSc
NIP. 196006231988081002 (Penguji II)
4. Indra Sidharta, ST., M.Sc
NIP. 198006192006041004 (Penguji III)

SURABAYA
JANUARI, 2018

**PENGARUH *HEAT INPUT* PADA PENGELASAN
DISSIMILAR METAL SS304H DAN *T22* DENGAN
PROSES *GTAW* TERHADAP DISTRIBUSI
KEKERASAN DAN KANDUNGAN *DELTA FERRITE***

Nama Mahasiswa : Fitriyani Aditiya Mantika
NRP : 2113 100 047
Jurusan : Teknik Mesin FTI ITS
Dosen Pembimbing : Suwarno, ST., M.Sc., PhD

ABSTRAK

Pengelasan tidak sejenis merupakan salah satu metode untuk penyambungan logam berbeda contohnya antara stainless steel dengan low alloy steel, sambungan ini digunakan pada pembangkit listrik bagian tube di boiler, dikarenakan tube di boiler bekerja di suhu dan tekanan berbeda sehingga akan mempengaruhi jenis material yang digunakan. Akan tetapi terdapat beberapa kekurangan, yaitu akibat perbedaan komposisi kimia antara kedua material yang di sambungkan sepanjang garis fusi, membuat perbedaan struktur mikro sehingga sifat mekanik juga berbeda. Perbedaan ini membuat sambungan akan rentan terhadap kegagalan. Selain itu perbedaan koefisien thermal masing-masing material juga membuat degradasi di struktur mikro pada zona fusi, sehingga membuat munculnya tegangan yang mengakibatkan rentannya terjadi kelelahan komponen maupun retak.

Dalam penelitian ini dilakukan pengelasan tidak sejenis antara SS304H dan T22 dengan variasi heat input, dimana variasi heat input yang digunakan adalah 3.6KJ/mm, 3.1KJ/mm dan 2.9 KJ/mm. Ketiga variasi pengelasan ini menggunakan metode gas tungsten arc welding (GTAW) dengan filler ER309. Setelah dilakukan proses pengelasan dilakukan pengujian kekerasan dengan microvickers untuk mengetahui distribusi kekerasan pada sambungan las, metallography serta pengujian nilai delta ferrite.

Dari penelitian ini didapatkan hasil bahwa distribusi kekerasan berbanding terbalik terhadap heat input karena semakin tinggi nilai heat input nilai kekerasan semakin menurun hal ini dikarenakan jika nilai heat input tinggi pendinginan semakin lamban dan menyebabkan nilai kekerasan menurun. Nilai heat input berbanding lurus pada kandungan FN dimana semakin tinggi heat input nilai FN semakin tinggi, dimana nilai FN mewakili kandungan delta ferrite pada material. Pada struktur mikro material di daerah HAZ SS304H ditemukan presipitasi karbida pada batas butir yang menurunkan kadar kromium disekitarnya yang membuat daerah tersebut akan rawan terkena korosi batas butir dan menyebabkan kekerasan material tidak merata.

Kata kunci: pengelasan beda jenis, heat input, GTAW, FN, kekerasan

**THE STUDY OF HEAT INPUT ON DISSIMILAR
METAL WELDING BETWEEN SS304H AND T22 WITH
GAS TUNGSTEN ARC WELDING (GTAW) ABOUT
HARDNESS DISTRIBUTION AND DELTA FERRITE
CONTENT**

Name : Fitriyani Aditiya Mantika
NRP : 5213 100 047
Department : Teknik Mesin FTI ITS
Supervisor : Suwarno, ST., MSc., PhD

ABSTRACT

Dissimilar metal welding (DMW) is one method for connecting different metals such as stainless steel with low alloy steel, this connection is used in the tube power plant in the boiler, because the tube in the boiler works at different temperatures and pressures that will affect the type of material used. However, there are some drawbacks, namely due to differences in chemical composition between the two materials that are connected along the fusion line, making the differences in micro structure so that the mechanical properties also different. This difference makes the connection vulnerable to failure. In addition, differences in thermal coefficients of each material also create degradation in the microstructure of the fusion zone, resulting in the emergence of stresses that cause vulnerability to component fatigue and cracking.

In this research, DMW between SS304H and T22 with variation of heat input, where the heat input are 3632.18 J/mm, 3184.91 J/mm and 2938.81 J/mm. These three welding variations use gas tungsten arc welding (GTAW) with ER309 as filler. After the welding process is done the material were tested mechanical testing, examine the microstructure of the weldment and measure delta ferrite content.

From this research the result shows that the hardness distribution is inversely related to heat input because the higher the value of heat input hardness value decrease this is because

if the value of heat input high cooling more slowly and cause hardness value decrease. The heat input value is directly proportional to the FN content where the higher heat input the higher FN value, where the FN value represents the delta ferrite content in material. On the microstructure of HAZ SS304H area, carbide precipitation is found carbide precipitation at the grain boundary where it make the chromium levels lowers which make area vulnerable to grain boundary corrosion.

Key words: dissimilar, heat input, GTAW, FN, welding, hardness

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Rabbil'alamin. Segala puji kepada Allah SWT, atas limpahan rahmat karunia dari-Nya berupa kesehatan dan kesempatan sehingga penulis dapat merampungkan penyusunan tugas akhir yang berjudul "Pengaruh Heat Input Pada Pengelasan Dissimilar Metal Antara SS304H Dan T22 Dengan Proses GTAW Terhadap Distribusi Kekerasan Dan Kandungan Delta Ferrite" dengan baik.

Tugas akhir merupakan salah satu mata kuliah yang wajib ditempuh oleh mahasiswa/i di Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya sebagai salah satu syarat kelulusan. Banyak pihak yang telah membantu dan memberikan dukungan dalam penyusunan tugas akhir ini. Untuk itu, dengan segala kerendahan hati penulis menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan sebesar-besarnya kepada:

1. Papa saya Mahmud Abdullah Aks.,M.Si, Mama saya yang tercinta Dr. Maemunah S.Pd., M.H, serta adik-adik saya, Aldika Zihatul Mutmainah dan Zaskia Muazatun Mahmud yang selalu memberikan do'a, dukungan, dan segala kebutuhan untuk penulis, terima kasih banyak atas apa yang sudah diberikan selama ini sehingga tugas akhir ini terselesaikan.
2. Bapak Suwarno, ST., MSc., PhD selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah mencurahkan waktunya untung memimbing penulis, baik dari segi ilmu maupun saran demi kesempurnaan tugas akhir ini.
3. Bapak Prof. Dr. Ir Wajan Berata, DEA, Bapak Ir. Hari Subianto, MSc, dan Bapak Indra Sidharta, ST., M.Sc. selaku tim penguji yang telah meluangkan waktunya untuk menguji sidang tugas akhir dan memberikan masukan untuk kesempurnaan tugas akhir ini.
4. Bapak Ir. Bambang Pramujati, M.Eng.Sc., Ph.D., selaku Kepala Jurusan Teknik Mesin FTI ITS dan Dosen Wali

penulis Bapak Alif Wikarta ST., M.Sc. Eng., PhD yang turut membimbing selama proses perkuliahan penulis.

5. Pak Mantri, Pak Endang, Pak Budi, Pak Gatot, Mas Agus, Cak Bud, Pak Agus, Mbak Sri, Mas Reza, Pak Pambudi, dan Pak Denny terima kasih banyak atas bantuannya baik tenaga maupun moril selama pengerjaan tugas akhir ini.
6. PT. PAL Indonesia Pak Ikhwan Koharudin, Pak Munif, dan segenap karyawan bagian General Engineer yang telah membantu proses pengelasan material.
7. Yza, Agung, Tiffany, Galih, Vemba, Egin, seluruh sepupu keluarga besar Abdullah Ismail, Bella, Danar, Anggun, Tifa, Dita, Cici, Adit, Prima, Unsa, Aldita, Aji, Elok, Risma, Novi, Oza, syot, syob, dan inescotunela. Terima kasih saudara-saudaraku untuk dukungan di sepanjang perkuliahan ini. Makasi udah menemani selalu dan mendengarkan keluh kesahku yang lebih sering tidak jelas.
8. Mas Hilmi, Meme, Ajo, Luthfan, Atsa, Dias, Lia, Ayzam, Ayu, Intan Kum, Alvi, Ita, Bima, Toto, Fariz Anggi, BW, Rexa dan semua yang sidang semester ini. Alhamdulillah akhirnya kita bisa menyelesaikan semuanya dengan baik, semoga ini menjadi awal untuk masa depan yang gemilang.
9. Untuk Ananta, Rizqu, Joko, Afif, Wira, Fitri, Bernard, Edwin, Fikro, Yola, Arif, Yudis, Andri dan Aldi semoga segala urusan tugas akhir segera dimudahkan
10. Rekan-rekan Laboratorium Metalurgi, Angkatanku M-56 Teknik Mesin ITS. Terima kasih banyak saudara-saudaraku atas semua kenangan yang telah kita ukir bersama-sama selama ini.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dari tugas akhir ini. Oleh karena itu, kritik dan saran sangat penulis harapkan demi kesempurnaan tugas akhir ini. Semoga penyusunan laporan ini memberikan manfaat bagi dunia akademis dan kita semua.

Surabaya, 10 Januari 2018

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	vi
ABSTRACT	viii
KATA PENGANTAR.....	x
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
DAFTAR TABEL	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
1.6 Sistematika Laporan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Terdahulu	5
2.2 Baja Tahan Karat <i>Stainless Steels</i>	8
2.2.1 Autenitic Stainless Steels	9
2.3 Klasifikasi Baja Karbon	11
2.3.1 Pengelasan Baja Paduan Rendah	11
2.4 GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)	12
2.4.1 Heat Input.....	16
2.4.2 Arus Listrik	17
2.4.3 Tegangan.....	17
2.4.4 Kecepatan Pengelasan.....	17
2.5 <i>Filler Metal</i>	17
2.6 Metalurgi Las	18
2.7 Dilusi	27
2.8 Diagram Konstitusi	29
2.9 Schaeffler Diagram	29
2.10 DeLong Diagram	30

2.11	Prediksi Struktur Mikro Pengelasan Dissimilar Metal	31
2.12	Retak Las.....	33
2.12.1	Hot Crack.....	33
BAB III METODOLOGI.....		35
3.1	Diagram Proses Penelitian.....	35
3.2	Bahan dan Peralatan Penelitian.....	36
3.2.1	Bahan Penelitian.....	36
3.2.2	Peralatan.....	37
3.3	Langkah-langkah pengelasan.....	40
3.3.1	Persiapan Spesimen.....	40
3.3.2	Proses Pengelasan.....	41
3.3.3	Parameter Pengelasan.....	41
3.4	Proses Pengujian.....	42
3.4.1	Pengujian Kekerasan <i>Micro Vickers</i>	43
3.4.2	Pengujian Metalografi.....	44
3.4.3	Pengujian Kandungan <i>Delta Ferrite</i>	44
BAB IV DATA DAN ANALISA HASIL PENELITIAN.....		46
4.1	Komposisi Kimia Material.....	47
4.2	Dilusi Pada Logam Las.....	48
4.3	Observasi Makroskopis.....	49
4.4	Observasi Struktur Mikro.....	50
4.4.1	Daerah Base Metal.....	50
4.4.2	HAZ dan Base Metal.....	51
4.4.3	<i>Fusion Line</i> dan HAZ (T22 dan SS304H).....	54
4.5	Pengujian Kekerasan.....	55
4.5.1	Distribusi Kekerasan 3.6 KJ/mm.....	56
4.5.2	Distribusi Kekerasan 3.1 KJ/mm.....	57
4.5.3	Distribusi Kekerasan 2.9 KJ/mm.....	58
4.5.4	Analisa Hasil Pengujian Kekerasan.....	59
4.6	Pengujian Kandungan Ferrite.....	60
4.6.1	Kandungan Ferrite Number Pada Weld Metal ..	61
4.6.2	Analisa FN Pada Weld Metal.....	62
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		63
5.1	Kesimpulan.....	63

5.2 Saran.....	64
DAFTAR PUSTAKA.....	65
LAMPIRAN	67
BIODATA PENULIS.....	71

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.4.1 <i>Gas-tungsten arc welding</i> : (a) <i>overall process</i> ; (b) <i>welding area enlarged</i> ^[1]	12
Gambar 2.4.2 Tiga jenis arus listrik GTAW; (a) <i>DCSP</i> (b) <i>DCRP</i>	13
Gambar 2.4.3 Pengaruh gas pelindung <i>helium</i> dan <i>argon</i> terhadap busur dan kampuh las ^[18]	16
Gambar 2.6.1 Siklus thermal GTAW	19
Gambar 2.6.2 Siklus Thermal Las AISI 304 [1].....	20
Gambar 2.6.3 Perbandingan <i>heat input</i> dengan waktu pendinginan	21
Gambar 2.6.4 Kurva transformasi dengan beberapa kurva pendinginan	22
Gambar 2.6.5 Struktur mikro saat pemanasan dan pendinginan pada proses pengelasan baja <i>hypoeutectoid</i>	23
Gambar 2.6.6 Pengaruh preheating dan panas pengelasan multi layer ^[22]	25
Gambar 2.6.7 Batas HAZ yang dihasilkan oleh pendepositan layer terakhir [22].....	26
Gambar 2.6.8 Sub daerah yang terbentuk pada pengelasan multi layer; (a) letak sub daerah relatif terhadap logam induk dan logam las; (b) siklus thermal relatif terhadap AC_3 dan AC_1 ; (c) struktur mikro dari masing-masing sub daerah [1].....	27
Gambar 2.7.1 Jenis dilusi	28
Gambar 2.7.2 Dilusi pada pengelasan dissimilar metal ^[14]	28
Gambar 2.9.1 Diagram Schaeffler.....	30
Gambar 2.10.1 DeLong Diagram	31
Gambar 2.11.1 Diagram Schaeffler untuk prediksi struktur mikro	33
Gambar 3.1.1 Diagram Alir Penelitian.....	35
Gambar 3.2.1 (a) Mesin Las GTAW (b) Gas Argon	38
Gambar 3.2.2 Mesin Micro Hardness.....	39
Gambar 3.2.3 Peralatan pengujian metalografi (a) mesin <i>grinding</i> dan <i>polishing</i> ; (b) mikroskop optik; (c) cairan etsa	39

Gambar 3.2.4 <i>Ferrite scope</i> (a) Layar; (b) <i>Block</i> kalibrasi <i>probe</i>	40
Gambar 3.3.1 Desain sambungan <i>groove</i>	41
Gambar 3.3.2 Proses pengelasan (a) Pembuatan <i>tack weld</i> ;(b) Pemasangan selang gas pelindung; (c) proses pengelasan	41
Gambar 3.4.1 Titik-titik indentasi pada pengujian kekerasan	43
Gambar 4.3.1 Foto makroskopis material las (a) 3.6 KJ/mm; (b) 3.1 KJ/mm; (c) 2.9 KJ/mm.....	49
Gambar 4.4.1 Struktur mikro <i>base metal</i> T22 perbesaran 100x dan 500x (a) 3.6 KJ/mm; (b) 3.1 KJ/mm; (c) 2.9 KJ/mm (etsa kalling's reagent).....	50
Gambar 4.4.2 Struktur mikro <i>base metal SS304H</i> perbesaran 100x dan 500x (a) (d) 3.6 KJ/mm; (b) (e) 3.1 KJ/mm; (c) (f) 2.9 KJ/mm (etsa kalling's reagent)	50
Gambar 4.4.3 Struktur mikro HAZ dan BM SS304 hasil lasan GTAW perbesaran 100x heat input 2.9 KJ/mm (etsa kalling's reagent).....	51
Gambar 4.4.4 Struktur Mikro HAZ T22 perbesaran 100x (a) 3.6 KJ/mm; (b) 3.1 KJ/mm; (c) 2.9 KJ/mm (etsa kalling's reagent)	51
Gambar 4.4.5 Struktur Mikro SS304H perbesaran 100x dan 500x (a) 3.6 KJ/mm; (b) 3.1 KJ/mm; (c) 2.9 KJ/mm (etsa elektrolisis).....	52
Gambar 4.4.6 Struktur mikro logam las hasil lasan GTAW pada daerah WM, FL dan HAZ SS304H dan T22 perbesaran 100x; (a) (b) 3.6 KJ/mm; (c) (d) 3.1 KJ/mm; (e) (f) 2.9 KJ/mm (etsa kalling's reagent).....	54
Gambar 4.4.7 Struktur mikro <i>weld metal</i> perbesaran 100x dan 500x (a) 3.6 KJ/mm; (b) 3.1 KJ/mm; (c) 2.9 KJ/mm	55
Gambar 4.5.1 Indentasi Pada Material Las	56
Gambar 4.5.2 Grafik Kekerasan 3.6 KJ/mm	57
Gambar 4.5.3 Grafik Kekerasan 3.1 KJ/mm	58
Gambar 4.5.4 Grafik Kekerasan 2.9 KJ/mm	59
Gambar 4.6.1 Grafik Nilai Pengujian FN	61
Gambar 4.6.2 Standar FN fabrikasi ER309.....	62

DAFTAR TABEL

Tabel 2.2.1 Komposisi standar <i>authentic stainless steel</i> ^[4]	9
Tabel 2.4.1 <i>Properties</i> gas pelindung ^[1]	15
Tabel 2.5.1 Klasifikasi Filler Stainless steel [7]	18
Tabel 2.11.1 Komposisi kimia SS 304H dan T22	32
Tabel 2.11.2 Komposisi kimia elektroda ER 309	32
Tabel 2.11.3 Perhitungan Cr dan Ni Equivalent	32
Tabel 3.2.1 Komposisi Kimia Spesimen SS 304H dan T22	36
Tabel 3.2.2 Sifat Mekanik SS 304H dan T22	36
Tabel 3.2.3 Sifat Termal Antara SS 304H dengan T22	36
Tabel 3.2.4 Komposisi Kimia	37
Tabel 3.2.5 Sifat Mekanik Elektroda	37
Tabel 3.3.1 Parameter Proses Pengelasan	42
Tabel 4.1.1 Perbandingan Hasil Uji Komposisi Kimia Dengan Komposisi Kimia <i>Standard Material</i> T22	47
Tabel 4.1.2 Perbandingan Hasil Uji Komposisi Kimia Dengan Komposisi Kimia <i>Standard Material</i> SS304H	47
Tabel 4.2.1 Dimensi Logam Las	48
Tabel 4.2.2 Kecepatan Pengelasan dan Heat Input	48
Tabel 4.2.3 Besar Dilusi	49
Tabel 4.6.1 Nilai FN Pada <i>Weld Metal</i>	61

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sebuah produk atau peralatan dapat terdiri dari satu bagian utuh ataupun beberapa bagian atau komponen yang digabungkan. Peralatan industri termasuk produk yang terdiri dari potongan-potongan *part* yang digabungkan melalui proses *assembly* (penyambungan/perakitan). Proses *assembly* dapat dibuat *permanent* ataupun *detachable* (penyambungan yang dapat dibuka). Penyambungan *detachable* seperti paku keling (*rivet*), baut atau mur sedangkan penyambungan *permanent* terdiri dari *soldering*, *branzing*, dan pengelasan (*welding*). Pengelasan adalah ikatan metalurgi pada sambungan logam dan logam paduan yang dilaksanakan dalam keadaan lumer atau cair (*Deutche Industries Normen*). Pengelasan berdasarkan jenis material yang disambungkan terdiri dari dua metode yaitu pengelasan *similar* dan *dissimilar metal welding* (DMW). DMW merupakan salah satu metode pengelasan untuk menyambungkan logam berbeda jenis komposisi, contohnya seperti penyambungan baja tahan karat (*stainless steel*) dengan baja paduan rendah (*low alloy steel*). Sambungan kedua jenis logam tersebut umumnya digunakan pada *tube boiler* yang bekerja pada temperatur dan tekanan tinggi.

Dimana pada bagian suhu tinggi terbuat dari *austenitic stainless steel* yang memiliki sifat tahan karat yang sangat baik pada suhu dan tekanan tinggi. Pada bagian dengan suhu lebih rendah digunakan baja paduan rendah yang memiliki nilai ekonomis. Namun pengelasan DMW memiliki kekurangan, dimana perbedaan komposisi antara material pada sepanjang garis fusi mengakibatkan sifat mekanik dari struktur mikro berbeda, hal ini membuat sambungan rentan terhadap kegagalan. Kegagalan tersebut antara lain menyebabkan sifat mekanik seperti kekerasan dan kekuatan sambungan menjadi menurun. Selain itu perbedaan koefisien *thermal* antar

material juga membuat degradasi sifat mekanik zona fusi yang mengakibatkan munculnya tegangan sisa. Tegangan ini mengakibatkan sambungan mengalami kelelahan ataupun terjadi retak. Permasalahan pada pengelasan DMW juga disebabkan karena kurang detailnya operator mengikuti *welding procedure specification* (WPS) dan tidak dilakukannya evaluasi sambungan.

Maka dari itu terdapat beberapa langkah dalam mengurangi permasalahan pada DMW yaitu dengan memprediksi kandungan komposisi kimia pada *weld metal*, melakukan pelapisan (*buttering*) pada *base metal* yang memiliki keefisien *thermal* berbeda, mengontrol *heat input*, dan memperkecil tegangan sisa pada pengelasan dengan melakukan perlakuan panas. Oleh karenanya dilakukan penelitian mengenai “Pengaruh *heat input* pada pengelasan *dissimilar* antara SS304H dan T22 dengan proses GTAW terhadap distribusi kekerasan dan kandungan *delta ferrite*”.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dituliskan, maka permasalahan dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi *heat input* terhadap distribusi kekerasan pada sambungan las SS 304H dengan T22?
2. Bagaimana pengaruh pengelasan SS304H dengan T22 terhadap struktur mikro dan kandungan *delta ferrite* (δ -*ferrite*)?

1.3 Tujuan Penelitian

Sesuai dengan rumusan masalah yang tertera, maka tujuan penelitian yaitu:

1. Untuk mengetahui pengaruh *heat input* terhadap distribusi kekerasan pada pengelasan SS 304H dengan T22.

2. Untuk mengetahui pengaruh *heat input* pada pengelasan SS304H dengan T22 terhadap struktur mikro dan kandungan *delta ferrite*.

1.4 Batasan Masalah

Untuk membuat penelitian ini dapat berjalan secara fokus dan terarah serta dapat mencapai tujuan yang diinginkan, maka diberikan batasan masalah sebagai berikut:

1. Saat proses pengelasan daerah disekitar las dalam keadaan kering.
2. Komposisi material dianggap homogen.
3. Pengaruh variasi kondisi lingkungan diabaikan.
4. Pengaruh preparasi spesimen dalam proses pemotongan, penggindingan dan pemolesan terhadap struktur mikro diabaikan.
5. Spesifikasi prosedur pengelasan dianggap sama terhadap ketiga jenis sesimen.
6. Berfokus pada pembahasan distribusi kekerasan dan *delta ferrite*.

1.5 Manfaat Penelitian

Dari penelitian ini diharapkan mampu memberikan manfaat untuk penelitian selanjutnya dan bagi dunia industri, manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Menambah pengetahuan pembaca dan sebagai refrensi penulisan mengenai pengelasan DMW antara SS304H dan T22.
2. Dapat digunakan sebagai alternatif pengelasan logam yang berbeda sehingga dapat dipakai di industri.
3. Dapat menjadi acuan dalam penelitian selanjutnya mengenai DWM.
4. Dapat dijadikan acuan untuk aplikasi DMW.

1.6 Sistematika Laporan

Laporan penelitian Tugas Akhir ini ditulis berdasarkan sistematika penulisan sebagai berikut:

- BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang dilakukannya penelitian, perumusan masalah, tujuan penelitian, dan sistematika penulisan laporan hasil penelitian.

- **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Bab ini berisi teori-teori dasar berkaitan dengan penelitian sehingga dapat diperoleh pengertian dan pengetahuan yang menunjang untuk analisis pembahasan masalah pada penelitian.

- **BAB III METODELOGI PENELITIAN**

Bab ini berisi rencana penelitian, prosedur pelaksanaan, bahan, peralatan, pengujian dan dimensi spesimen.

- **BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN**

Bab ini berisi data – data hasil penelitian dan pembahasan mengenai data – data tersebut serta permasalahan yang terjadi.

- **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

Bab ini berisi kesimpulan dari penelitian ini dan saran yang mungkin berguna untuk penelitian selanjutnya.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu merupakan salah satu acuan dalam melakukan penelitian sehingga dapat digunakan sebagai referensi.

- Guohong Chen, Qi Zhang, Junjian Liu, Jiaqing Wang, Xinhai Yu, Jian Hua, Xiaolong Bai, Tao Zhang, Jianhua Zhang, Wenming Tang. '*Microstructure and mechanical properties of T92/Super 304H dissimilar steel weld joints after high-temperature ageing*'. Pengelasan logam dissimilar T92/Super 304 H, dilas menggunakan teknik *gas tungsten arc welding* (GTAW) dengan menggunakan kawat ERNiCrMo-3 pada *base metal* Ni, yang di *aged* pada temperatur 650°C selama 3000 jam. Struktur mikro, *fractographs*, dan sifat mekanik pada sambungan diteliti. Hasil menunjukkan bahwa ketika waktu *aging* meningkat pada bagian T92 *area* panas yang terpengaruh *heat affected zone* (HAZ) dan logam dasar *base metal* (BM) pada agregat partikel fasa kedua pengasaran sepanjang batas butir butir *austenite*. Pada area sisi HAZ dan BM di super logam 304H, pertumbuhan butir *austenite* dan partikel fasa kedua sangat sedikit. Posisi pecahan pada sambungan *aged* selalu berada pada logam dasar T92. Di awal-awal kekuatan *tensile* dan nilai kekerasan sambungan turun naik dan cenderung menjadi lebih stabil di akhir. Efek dari sambungan nilai kekerasan akan turun menjadi permanen bersama dengan waktu *ageing*.^[8]
- N. Arivazhagan, Surendra Singh, Satya Prakash, G.M. Reddy, '*Investigation on AISI 304 austenitic stainless steel to AISI 4140 low alloy steel dissimilar joint by gas tungsten arc, electron beam and friction welding*'. Penelitian ini menyajikan pengamatan tentang

mikrostruktur dan sifat mekanik dari AISI 304 baja tahan karat dan AISI 4140 low alloy steel dengan pengelasan Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), Electron Beam Welding (EBW) dan Friction Welding (FRW). Untuk setiap hasil lasan, analisa lengkap mengenai komposisi fasa, karakteristik mikrostruktur dan sifat mekanik. Hasil dari Analisa menunjukkan bahwa sambungan dengan EBW memiliki kekuatan tensile tertinggi (681 MPa) dari pada sambungan GTAW (635 MPa) dan FRW (494 MPa). Dari fraktografi, dapat diamati bahwa elastisitas EBW dan GTA masing-masing 32% dan 25% lebih elastis dibandingkan dengan pengelasan friction. Selain itu kekuatan impact lasan GTAW lebih besar dibandingkan dengan EBW dan FRW.^[9]

- A.K. Bhadauri, S. Venkadesan, P. Rodriguez. “*Transition metal joints for steam generator- an overview*”. Sambungan transisi antara logam (TMJ) *autenitic stainless steel* dan *chromium molybdenum (Cr-Mo) ferritic steel* banyak digunakan dalam generator uap pada pembangkit listrik dimana memiliki permasalahan yang berhubungan dengan kegagalan yang *premature* pada *service*. *The direct (bimetallic)* TMJ saat ini umumnya didesign dengan umur 200.000 jam sebelum dilakukan perawatan tapi beberapa TMH dengan logam las besi gagal sebelum masa perawatan yaitu 1/3 dari umur seharusnya beroperasi, sedangkan bagian logam las sisi lainnya yang merupakan nikel mengalami kegagalan 1/2 dari umur seharusnya. Penyebab dari kegagalan TMJ sebelum mencapai umur yang dirancang ini akan didiskusikan secara detail, untuk meningkatkan TMJ. Salah satu cara untuk meningkatkan TMJ dengan konfigurasi *trimetallic* antara *autenitic stainless steel/Alloy 800/Cr-Mo ferritic steel* dibahas secara detail, membungkus pertumbuhannya, mengelompokkan dan mengevaluasinya. Mempercepat tes performa pada laboratorium mengindikasikan empat lipatan perbaikan pada waktu operasi dari TMJ dengan konfigurasi *trimetallic* dibandingkan dengan konfigurasi

bimetallic. Pembahasan detail mengenai bahan juga dibahas pada tulisan ini. ^[10]

- Dinesh W. Rathod, Sunil Pandey, P.K Singh, Rajesh Prasad, ‘*Experimental Analysis of Dissimilar Metal Weld Joint: Ferritic to Austenitic Stainless steel*’. Pengelasan logam *dissimilar* antara SA508Gr.3Cl.1 baja feritik dengan SS304LN menggunakan *filler Inconel 82/182* yang digunakan dalam pembangkit tenaga nuklir. Sambungan tersebut membutuhkan evaluasi sifat mekanik dan struktur metalurgi pada daerah pengelasan. Pada sambungan dilakukan 100% pengetesan radiografi dan *bending* dan *tensile transverse*. Persyaratan pengelasan dan pengetesan berdasarkan ASME bagian IX dan kriteria yang diterima ASME bagian 2. *Pengetesan transverse tensile* menghasilkan evaluasi bahwa kegagalan logam las terjadi meskipun memenuhi persyaratan kekuatan dari ASME, oleh karena itu pengelasan *dissimilar* harus dievaluasi secara detail. Teknik deposisi ketegakkan cairan, *fine slag inclusion, less reliable radiograph technique, plastic instability stress, yield strength ratio* dan *metallurgical deteriorations* telah menyumbang terjadinya kegagalan pada sambungan *dissimilar metal* pada daerah sambungan. Pada penelitian sebelumnya faktor yang berkontribusi dalam patah dari logam lasan telah dievaluasi dan dianalisa. ^[11]
- Syahrizal Budi Purnomo, “Pengaruh *buttering* terhadap kandungan δ – *ferrite* dan sifat mekanik pada pengelasan *dissimilar metal* antara *stainless steel 304* dengan *karbon steel A 283 Grade A* pada proses SMAW”. Berdasarkan data hasil penelitian diketahui bahwa pada metode *buttering* dan *non-buttering* tidak terjadi *hot cracking*, sehingga pada pengujian tarik lokasi patah terjadi pada daerah yang memiliki kekuatan terendah yaitu pada *base metal A 283 grade A*. Dengan dilakukannya metode *buttering* didapatkan struktur mikro *weld metal* berupa *dendritic austenitic* yang lebih halus, kecenderungan retak pada *fusion zone* lebih rendah, serta harga FN yang lebih

rendah pada *root weld metal*nya. Pada metode *buttering*, retak pada *fusion zone* sebesar 24 mm, kekerasan pada *weld metal* antara 234 – 276 HVN dan *ferrite number* pada *weld metal* sebesar 8,7 0 9,8 FN. Sedangkan pada metode *non-buttering* retak pada *fusion zone* sebesar 29 mm, kekerasan pada *weld metal* antara 239 – 298 HVN dan FN pada *root weld metal* sebesar 9,5 – 14,4 FN. ^[13]

Berdasarkan beberapa referensi diatas maka yang akan yang teriliti dalam penelitian ini adalah bagaimana pengaruh *heat input* pada pengelasan *dissimilar metal SS304H* dengan T22 pada proses pengelasan GTAW.

2.2 Baja Tahan Karat *Stainless Steels*

Stainless steels adalah kelompok baja dengan paduan tinggi berbasis sistem Fe- Cr, Fe- Cr – C, dan Fe – Cr -Ni. Kelompok baja ini memiliki keunggulan dalam hal ketahanan dari berbagai jenis korosi, tahan oksidasi dan memiliki kekuatan yang tinggi pada temperatur tinggi. ^[4]

Stainless steel adalah paduan yang mengandung besi dengan kadar *chromium* minimum 12% untuk ketahanan korosi (George J. Fischer; Robert J. Maciag). Ketahanan korosi diperoleh dari lapisan oksida (terutama *chromium*) yang melindungi logam terhadap reaksi dengan lingkungannya. *Chromium* adalah elemen reaktif sehingga begitu bersinggungan dengan udara sekitarnya, maka akan langsung bereaksi membentuk oksida *chromium* (Cr_2O_3) yang sangat padat, dan stabil sehingga *inert* menghalangi reaksi logam dibawahnya dengan udara sekitarnya. Begitu lapisan ini tergores, maka dengan cepat pula lapisan ini akan terbentuk kembali untuk membentuk lapisan kembali. Lapisan ini sangat tipis dan tidak bisa dilihat secara langsung oleh mata manusia. Efek perlindungan oksida *chromium* ini tidak efektif pada baja paduan dengan kadar *chromium* rendah, efek ini tampak nyata pada kadar *chromium* tidak kurang dari 11%.

Penggunaan *stainless steel* ini sangat luas aplikasinya, seperti pada industri pembangkit listrik, industri kimia, industri kertas, industri otomotif maupun perabotan rumah tangga.

Tidak seperti sistem pengklasifikasian material lainnya, dimana klasifikasi material didasarkan pada komposisi materialnya, pengklasifikasian *stainless steel* berdasarkan fasa dominan yang terbentuk. Terdapat tiga buah fasa yang terjadi yaitu *martensite*, *ferrite*, dan *austenite*.

American Iron and Steel Institute (AISI) mengklasifikasikan *stainless steel* menjadi lima jenis, sebagai berikut:

1. *Austenitic stainless steels*
2. *Ferritic stainless steels*
3. *Martensitic stainless steels*
4. *Duplex stainless steels*
5. *Precipitation hardening stainless steels*

2.2.1 Austenitic Stainless Steels

Oleh AISI, kelompok ini diklasifikasikan dalam seri 200 dan 300. Seri 200 kandungan unsur paduan terdiri atas tingginya *level* karbon, *manganese*, dan *nitrogen*. Paduan ini juga memiliki kandungan nikel lebih rendah bila dibandingkan dengan seri 300 hal ini dibuat dengan maksud mengimbangi kandungan karbon dan nitrogen yang tinggi.

Range komposisi kimia dari tipe *autenitic stainless steels* menurut standar AISI adalah: 16 – 25% Cr, 8 – 20% Ni, 1 N, 0 – 0,2% Ti dan Nb. Pada Tabel 2.2.1 berikut ditampilkan beberapa jenis *autenitic stainless steels* berdasarkan standar AISI, sebagai berikut:

Tabel 2.2.1 Komposisi standar *autenitic stainless steel* [4]

Type	UNS No.	Composition (wt%)*										
		C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N	Other	
201	S20100	0.15	5.5-7.5	0.06	0.03	1.0	16.0-18.0	3.5-5.5	—	0.25	—	—
302	S30200	0.15	2.0	0.045	0.03	1.0	17.0-19.0	8.0-10.0	—	—	—	—
304	S30400	0.08	2.0	0.045	0.03	1.0	18.0-20.0	8.0-10.5	—	—	—	—
304L	S30403	0.05	2.0	0.045	0.03	1.0	18.0-20.0	8.0-12.0	—	—	—	—
304H	S30409	0.04-0.1	2.0	0.045	0.03	1.0	18.0-20.0	8.0-10.5	—	—	—	—
308	S30800	0.08	2.0	0.045	0.03	1.0	19.0-21.0	10.0-12.0	—	—	—	—
309	S30900	0.20	2.0	0.045	0.03	1.0	22.0-24.0	12.0-15.0	—	—	—	—
310	S31000	0.25	2.0	0.045	0.03	1.0	24.0-26.0	19.0-22.0	—	—	—	—
316	S31600	0.08	2.0	0.045	0.03	1.0	16.0-18.0	10.0-14.0	2.0-3.0	—	—	—
316L	S31603	0.03	2.0	0.045	0.03	1.0	16.0-18.0	10.0-14.0	2.0-3.0	—	—	—
317	S31700	0.08	2.0	0.045	0.03	1.0	18.0-20.0	11.0-15.0	3.0-4.0	—	—	—
321	S32100	0.08	2.0	0.045	0.03	1.0	17.0-19.0	9.0-12.0	—	—	—	—
330	S33000	0.10	2.0	0.045	0.03	0.75-1.5	17.0-20.0	34.0-37.0	—	—	—	—
347	S34700	0.08	2.0	0.045	0.03	1.0	17.0-19.0	9.0-13.0	—	—	—	—

*A single value is a maximum.

Tipe *autenitic stainless steels* adalah kelompok *stainless steel* dimana paling banyak dan diaplikasikan daripada tipe *stainless steels* yang lain. Tipe ini memiliki ketahanan korosi

yang baik pada kebanyakan lingkungan. Tipe ini memiliki kekuatan luluh yang baik pada temperatur kamar berkisar 210 MPa (30 ksi) dan tidak dapat dikeraskan. Temperatur pemakaian dapat mencapai 760°C atau lebih tinggi, tetapi kekuatan dan ketahanan oksidasi perlu dibatasi pada temperatur yang tinggi. Secara umum kemampuan las dari tipe ini baik (*weldable*) dengan memperhatikan dengan seksama spesifikasi prosedur pengelasan.

Unsur pembentuk *austenite* ditunjukkan adanya nikel dimana unsur ini ditambahkan dalam paduan dalam jumlah yang besar (umumnya diatas 8%). Unsur pembentuk *austenite* lainnya adalah karbon, *nitrogen*, dan *copper*. Karbon ditambahkan untuk meningkatkan kekuatan pada temperatur tinggi. *Nitrogen* ditambahkan untuk meningkatkan kekuatan dan ketahanan pada temperatur *cryogenic* dua kali lebih besar daripada efek yang diberikan oleh karbon. Kehadiran *nitrogen* juga dapat meningkatkan ketahanan terhadap *pitting corrosion*.

Jenis *autenitic stainless steel* yang sering digunakan dan dijumpai adalah tipe 18 – 8, dimana tipe ini memiliki kandungan 18 % Cr dan 8% Ni contohnya seperti SS 304. Dengan kandungan *nickel* yang tinggi (8%), *austenite* akan turun dan akan stabil hingga temperatur kamar. Karena fasa *austenite* ini tidak bertransformasi bila dalam kondisi *equilibrium* maka jenis baja ini tidak dapat dikeraskan dengan proses *heat treatment*. Tipe ini adalah pondasi dari seri 300 *autenitic stainless steels*, dengan tambahan unsur lain tipe lain diciptakan dengan maksud meningkatkan sifat tertentu.

Tipe 316 dengan tambahan unsur *molybdenum* berkisar 2% ditambahkan dengan maksud meningkatkan ketahanan terhadap *pitting corrosion*. Grade penstabil, 321 dengan sedikit tambahan titanium, 347 dengan sedikit tambahan *niobium*, ditambahkan dengan maksud membentuk kombinasi karbida dengan *karbon* dan mengurangi kecenderungan presipitasi karbida *chromium* ($Cr_{23}C_6$) yang berakibat korosi pada batas butir. Akhiran seri dengan huruf L menunjukkan kandungan *karbon* yang rendah 0,03 % C, dengan kandungan *karbon* yang rendah ini paduan memiliki kemampuan tahan terhadap korosi

batas butir pada lingkungan korosif. Akhiran seri dengan huruf H menunjukkan tingginya level karbon berkisar 0,1 % C. Paduan seperti ini memiliki kekuatan lebih tinggi dan biasanya diaplikasikan pada temperatur yang lebih tinggi.^[4]

2.3 Klasifikasi Baja Karbon

Baja karbon adalah paduan antara besi atau *Ferrit* (Fe) dan karbon (C) sebagai unsur utamanya, oleh karena itu sifat baja terutama sangat dipengaruhi kadar karbon dalam paduannya. Maka berdasarkan kadar karbonnya baja dikelompokkan menjadi:

- 1) Baja paduan rendah karbon (< 0,30% C)
- 2) Baja karbon sedang (0,30% - 0,45% C)
- 3) Baja karbon tinggi (0,45 – 1,70% C)

Bila kadar karbon dalam baja bertambah banyak, maka kekuatan dan kekerasannya juga bertambah tinggi akan tetapi keuletannya menurun.

2.3.1 Pengelasan Baja Paduan Rendah

Baja paduan rendah karbon yang juga disebut baja lunak digunakan untuk konstruksi umum yang menggunakan sambungan las. Hal ini karena sifat mampu las baja paduan rendah karbon cukup baik, sehingga dapat dilas dengan berbagai cara pengelasan dengan hasil yang baik pula. Faktor-faktor yang perlu diperhatikan pada pengelasan Baja paduan rendah karbon adalah ketangguhan dan terjadinya retak las.

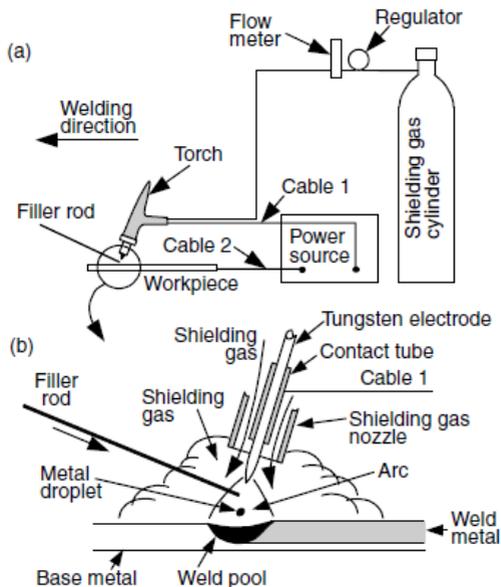
Menurunnya ketangguhan pada pengelasan baja paduan rendah karbon umumnya diakibatkan oleh terbentuknya butiran oksida pada logam lasnya. Hal ini akibat terjadinya reaksi oksidasi antara unsur-unsur dalam logam dengan gas-gas di udara terutama oksigen, pada saat logam mencair. Untuk mencegah terbentuknya butiran oksida tersebut dapat dilakukan dengan menambah unsur Mn yang berfungsi sebagai deoksidaser, yaitu pencegah terjadinya reaksi oksidasi. Sehingga akhirnya dapat meningkatkan hasil lasan khususnya pada logam lasnya.

Baja paduan rendah karbon mempunyai kepekaan retak las yang rendah dibandingkan dengan baja karbon lainnya. Tetapi

retak las pada baja ini dapat terjadi dengan mudah pada pengelasan pelat tebal. Hal ini karena laju pendinginan yang terlalu cepat sehingga diperoleh struktur mikro akhir *martensit* yang getas. Untuk menghindarinya biasanya cukup dilakukan dengan pemanasan mula (*preheat*) ataupun pemanasan akhir (*post heat*).

2.4 GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)

Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) atau sering disebut dengan *Tungsten Inert Gas* (TIG) merupakan salah satu dari bentuk las busur listrik (*Arc Welding*) yang menggunakan *inert gas* sebagai pelindung dengan *tungsten* atau *wolfram* sebagai elektroda. Skema GTAW dapat dilihat pada **Gambar 2.4.1**. Pengelasan ini dapat dikerjakan secara manual atau otomatis. ^[1]

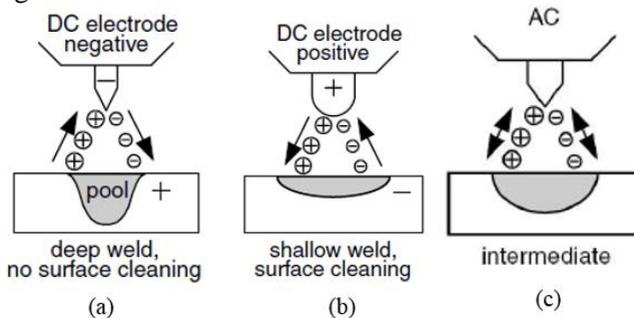


Gambar 2.4.1 Gas-tungsten arc welding: (a) overall process; (b) welding area enlarged ^[1]

Elektroda pada GTAW termasuk elektroda tidak terumpan (*non-consumable*) berfungsi sebagai tempat tumpuan terjadinya

busur listrik. GTAW mampu menghasilkan lasan berkualitas tinggi pada hampir semua jenis logam las mampu las.

Sumber listrik GTAW dapat menggunakan generator AC ataupun DC. Ciri khas generator jenis AC yaitu merupakan kombinasi antara *cleaning* dengan penetrasi *medium* dan mencegah elektroda *tungsten overheating*. Penggunaan arus DC dibedakan menjadi dua yaitu polaritas lurus (*Direct Current Straight Polarity*) dan polaritas balik (*Direct Current Reverse Polarity*). Gambar 2.4.2 berikut menunjukkan perbedaan penggunaan jenis arah aliran listrik yang digunakan dalam pengelasan. ^[1]



Gambar 2.4.2 Tiga jenis arus listrik GTAW; (a) DCSP (b) DCRP

(c) AC ^[1]

DCSP, dua pertiga konsentrasi panas pada benda kerja, sedangkan untuk DCRP, dua pertiga konsentrasi panas pada elektroda *tungsten*. Untuk AC, konsentrasi panas masing-masing setengah pada elektroda dan benda kerja. Konsentrasi panas ditimbulkan oleh adanya benturan elektron pada benda kerja dan elektroda *tungsten*. DCSP menghasilkan penetrasi yang lebih dalam dibandingkan dengan AC tetapi tidak mengalami *oxide cleaning*. DCRP mengalami *oxide cleaning*, tetapi penetrasi yang dihasilkan lebih dangkal daripada AC. ^[1]

GTAW menggunakan elektroda *tungsten*. Elektrode ini dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis, yaitu:

- 1) Tipe *thorium* (paduan *tungsten* dengan *thorium*).
- 2) Tipe *zirconium* (paduan *tungsten* dengan *zirconium*).
- 3) Tipe *tungsten* murni.

Cara pemilihan tipe elektrode dan jenis arus listrik yang dipakai (AC atau DC) disesuaikan dengan kebutuhan jenis elektrode memiliki titik lebur dan konduktivitas listrik yang berbeda. Elektrode tipe *tungsten* murni sering digunakan untuk pengelasan dengan sumber tenaga DCSP (*Direct Current Straight Polarity*). Titik leburnya cukup tinggi, $\pm 4000^{\circ}\text{C}$ (6170°C), sehingga sulit untuk meleleh. Jenis ini kurang baik karena masih memungkinkan terjadinya kontaminasi baik pada *base metal* maupun pada elektrode itu sendiri (*low resistance to contamination*). Elektrode tipe *zirconium* merupakan paduan *tungsten* dengan *zirconium*, dengan kandungan *zirconium* berkisar antara 0.3%-0.5%. Titik leburnya $\pm 3800^{\circ}\text{C}$ (6872°C). Elektrode tipe *thorium* merupakan paduan antara *tungsten* dengan *thorium*, dengan kandungan *thorium* 1%-2%. Titik leburnya bisa mencapai $\pm 4000^{\circ}\text{C}$. Sulit sekali kemungkinan terjadinya kontaminasi. ^[1]

Penambahan unsur *thorium* atau *zirconium* akan menaikkan titik leburnya, dan menaikkan konduktivitas listriknya, sehingga elektron yang dipancarkan lebih banyak, sehingga busur listrik yang ditimbulkan lebih stabil dan memudahkan permulaan (*starting arc*) penyalaan busur listrik. Selain itu kemungkinan terjadinya kontaminasi pada logam las akibat *tungsten* cair sangat kecil. Hal tersebut dapat memperpanjang umur pakai elektrode pada pengoperasian arus listrik tinggi. ^[7]

Fungsi utama dari gas pelindung adalah melindungi logam las dari kontaminasi udara luar, disamping ini juga sebagai *fluida* pendingin elektrode *tungsten*. Gas pelindung yang digunakan biasanya gas mulia yang sulit sekali bereaksi dengan udara luar. Tetapi kadang-kadang dipakai juga gas yang lain seperti *nitrogen* (N_2), *oksigen* (O_2), *hydrogen* (H_2) dan karbondioksida (CO_2). Tabel 2.4.1 berikut menunjukkan *properties* dari gas pelindung. ^[1]

Tabel 2.4.1 Properties gas pelindung ^[1]

Gas	Chemical Symbol	Molecular Weight (g/mol)	Specific Gravity with Respect to Air at 1 atm and 0°C	Density (g/L)	Ionization Potential (eV)
Argon	Ar	39.95	1.38	1.784	15.7
Carbon dioxide	CO ₂	44.01	1.53	1.978	14.4
Helium	He	4.00	0.1368	0.178	24.5
Hydrogen	H ₂	2.016	0.0695	0.090	13.5
Nitrogen	N ₂	28.01	0.967	1.25	14.5
Oxygen	O ₂	32.00	1.105	1.43	13.2

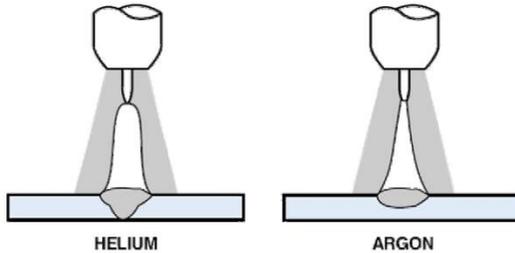
Source: Reprinted from Lyttle (6).

Gas pelindung yang biasanya digunakan pada GTAW adalah gas mulia *Argon (Ar)*, *Helium (He)*, atau campuran keduanya. Gas yang digunakan harus memiliki tingkat kemurnian 99.995%. Meskipun fungsi gas pelindung adalah untuk mencegah adanya kontaminasi dari luar, jenis gas berpengaruh pada busur dan kampuh las yang dihasilkan. Hal tersebut dipengaruhi oleh massa jenis (*density*) dari gas itu sendiri. *Argon* dengan berat atom, lebih berat $1\frac{1}{2}$ kali dari *Ar* udara dan hampir 10 kali lebih berat dari berat atom *helium (Ar helium = 4)*. Pemilihan gas pelindung didasarkan pada potensial ionisasi gas. Setiap gas memiliki potensial ionisasi yang berbeda. Potensial ionisasi memiliki pengaruh yang sangat besar pada busur dan kampuh las. Potensial ionisasi argon adalah 15.7 volt, sedangkan helium 24.5 volt. ^[1]

Argon adalah gas mulia yang stabil, sulit bereaksi dengan unsur lainnya. Potensial ionisasi *argon* lebih rendah daripada *helium*. *Argon* memiliki konduktivitas panas rendah mengakibatkan *density arc* yang terjadi lebih padat sehingga kampuh las yang dihasilkan lebih sempit. Penggunaan *argon* sebagai gas pelindung menghasilkan busur yang lebih stabil meskipun menggunakan arus rendah. ^[1]

Helium merupakan gas mulia yang tidak mudah bereaksi dengan unsur lainnya. Konduktivitas panas *Helium* lebih tinggi dari *Argon*. Dengan semakin tinggi konduktivitas panas gas, busur semakin lebar, *density arc* semakin turun. Meskipun *helium* lebih mudah terionisasi, *arc initiation* lebih mudah dan *voltage drop* lebih rendah jika menggunakan *argon* sebagai gas pelindung. Gambar 2.4.3 berikut menunjukkan perbandingan

busur dan kampuh las dengan menggunakan *argon* dan *helium* sebagai gas pelindung. ^[1]



Gambar 2.4.3 Pengaruh gas pelindung *helium* dan *argon* terhadap busur dan kampuh las ^[18]

Besar busur yang dihasilkan pada pengelasan GTAW menggunakan gas pelindung *helium* lebih besar daripada *argon*. Semakin besar busur, daerah yang terkena panas semakin besar. Penetrasi yang dihasilkan dengan penggunaan *helium* sebagai gas pelindung lebih dalam dibandingkan *argon*. Meskipun *argon* lebih berat daripada *helium*, *argon* lebih efektif sebagai pelindung karena memiliki ketahanan lebih baik terhadap kontaminasi dari luar. Dengan arus DCRP atau AC, *oxide cleaning* dengan *argon* sebagai gas pelindung lebih baik daripada *helium*. Selain itu harga *argon* yang lebih terjangkau menjadikan *argon* lebih banyak dipilih dalam pengelasan GTAW.

2.4.1 Heat Input

Heat Input (H_{net}) mempresentasikan energi nominal dari sumber panas pengelasan. Energi ini mempengaruhi distribusi panas pada proses pengelasan yang berdampak pada besarnya *peak temperature*, kecepatan pendinginan dan waktu solidifikasi. H_{net} dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$H_{net} = \frac{\eta \cdot E \cdot I}{V}$$

Dimana:

H_{net} : heat input (J/mm)

η : efisiensi perpindahan panas

E : tegangan (V)

- I : arus (A)
 V : kecepatan pengelasan (mm/s)

2.4.2 Arus Listrik

Arus listrik dalam pengelasan berpengaruh pada pancaran logam cair yang mengisi kampuh. Proses pemindahan logam las terjadi pada saat ujung elektroda mencair dan membentuk butiran-butiran yang kemudian mengisi *groove*. Sesuai dengan perumusan $H_{net} = \frac{\eta \cdot E \cdot I}{v}$ dimana arus (I) berbanding lurus dengan H_{net} , maka jika arus semakin tinggi, H_{net} yang dihasilkan juga semakin tinggi.

2.4.3 Tegangan

Tegangan dalam proses pengelasan berbanding lurus dengan H_{net} sebagaimana ditunjukkan oleh perumusan $H_{net} = \frac{\eta \cdot E \cdot I}{v}$. Sehingga dengan semakin besar tegangan yang digunakan maka H_{net} yang dihasilkan juga semakin besar.

2.4.4 Kecepatan Pengelasan

Perumusan $H_{net} = \frac{\eta \cdot E \cdot I}{v}$ menunjukkan bahwa kecepatan pengelasan yang tertinggi akan menghasilkan *heat input* yang rendah serta kedalaman penetrasi yang dangkal. Sebaliknya, dengan kecepatan pengelasan yang rendah, *heat input* yang dihasilkan tinggi sehingga penetrasi yang dihasilkan lebih dalam.

Kecepatan pengelasan berhubungan dengan tersedianya kesempatan bagi logam cair untuk mengisi kampuh las. Semakin tinggi kecepatan pengelasan, maka kesempatan logam cair untuk mengisi kampuh las semakin sedikit.

2.5 Filler Metal

Spesifikasi AWS yang digunakan untuk elektroda las adalah **A5.4 dan A5.9**. *Filler metal* untuk SS bare, cored dan elektroda stranded menggunakan **A5.4 dengan prefix E** dan untuk welding rods menggunakan **A5.9 dengan prefix ER** seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.4.1. Mengikuti *prefix* dari *American Iron and Steel Institute's* (AISI) dipakai tiga

angka *stainless steel*. Angka ini menyatakan tipe *stainless steel* pada *filler metal*. Pada bagian kanan ketiga angka tersebut AWS menambahkan *suffix number*. Angka 15 mengidekasikan terdapat *line base coating* dan penggunaan polaritas DCEP harus digunakan. Angka 16 mengidekasikan terdapat *coating titania* dan AC atau polaritas DCEP dapat digunakan. Contoh klasifikasi ini dapat dilihat pada elektroda E308-15 dan E308-16. [7]

Penambahan huruf L pada bagian kanan sebelum *dash* dan *suffix* mengindikasikan karbon rendah pada elektroda las *stainless steel*. Contohnya seperti ER308L dan ER316L. *Stainless steel* dapat distabilkan dengan menambahkan unsur *columbium (Cb)* sebagai pembentuk karbida. Cb ditambahkan setelah nomor AISI. Penstabilan *stainless steel Filler metal* untuk menjaga material dari *chromium-carbide precipitation*. [7]

Elektroda E309-15, E309-16, E309Cb-15, E309Cb-16, ER 309 dan ER309L digunakan untuk *stainless steels* 309 yang umumnya bekerja pada temperatur tinggi seperti ruang pembakaran dan *mufflers*. Seluruh E309 *Filler metal* dapat digunakan untuk menyambungkan *stainless steel* 309 atau untuk sambungan mild steel atau tipe *stainless steel* 18-8. [7]

Tabel 2.5.1 Klasifikasi Filler Stainless steel [7]

AISI TYPE NUMBER	442	430F	430	501	416	403	404	317	316L	316	314	310	309	304	308	303	201	Mild Steel
	446	430FSE	431	502	416SE	404	410	348	347	317	316L	316	314	310S	309S	L	E	
201-202-301	310	310	310	310	309	309	308	308	308	308	308	308	308	308	308	308	308	312
302-3028-304	312	312	312	312	310	310	310	310	310	310	310	310	310	310	310	310	310	310
305-308	309	309	309	309	312	312	312	312	312	312	312	312	312	312	312	312	312	309
303	310	310	310	310	309	309	308	308	308	308	308	308	308	308	308	308	308	312
303SE	309	309	309	309	310	310	310	310	310	310	310	310	310	310	310	310	310	310
	312	312	312	312	312	312	312	312	312	312	312	312	312	312	312	312	312	309
304L	310	310	310	310	309	309	308	308	308L	308	308	308	308	308	308	308	308	312
	309	309	309	309	310	310	310	310	310	310	310	310	310	310	310	310	310	310
	312	312	312	312	312	312	312	312	312	312	312	312	312	312	312	312	312	309
309	310	310	310	310	309	309	308	317	316	316	309	309	309	308	308	308	308	309
309S	309	309	309	309	310	310	310	316	316	316	309	309	309	308	308	308	308	310
	312	312	312	312	312	312	312	309	309	309	309	309	309	308	308	308	308	312

2.6 Metalurgi Las

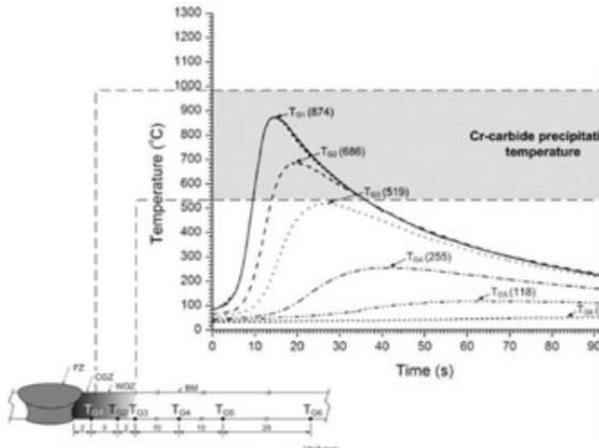
Definisi pengelasan menurut DIN (*Deutsche Industrie Normen*) adalah ikatan metalurgi pada sambungan logam atau logam paduan yang dilaksanakan dalam keadaan lumer atau cair. Dengan kata lain, las adalah sambungan setempat dengan

menggunakan energi panas disertai dengan atau tanpa tekanan dan material tambahan (*filler material*).^[20]

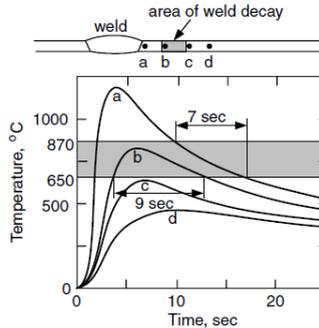
Struktur mikro logam mempengaruhi sifat mekanisnya. Struktur mikro sangat dipengaruhi oleh proses pemanasan dan pendinginan. Penambahan logam pengisi yang berbeda dari logam induk pada proses pengelasan akan merubah struktur mikro yang terjadi sehingga akan berpengaruh pada sifat mekanisnya.

Sambungan las secara umum dapat dibagi menjadi 3 daerah yaitu logam las, HAZ (*Heat Affected Zone*) dan logam induk. Logam las adalah logam pengisi (*filler*) dan sebagian logam induk yang pada saat pengelasan mengalami pencairan kemudian membeku. HAZ adalah daerah yang terpengaruh panas dari sebuah proses pengelasan. Logam induk adalah logam dasar yang tidak mengalami perubahan struktur mikro.

Panas dalam proses pengelasan dapat diperoleh dari energi listrik, gas, atau *high beam*. Dengan pemberian panas ini, maka pada logam akan terjadi suatu siklus panas yang menunjukkan perubahan temperatur sebagai fungsi waktu. Siklus panas ini akan dialami oleh daerah lasan dan daerah sekitar lasan (HAZ). Siklus panas yang dialami oleh daerah-daerah ini berbeda-beda sesuai dengan jarak daerah terhadap sumber panas. Siklus panas ditunjukkan seperti **Gambar 2.6.1**.



Gambar 2.6.1 Siklus thermal GTAW

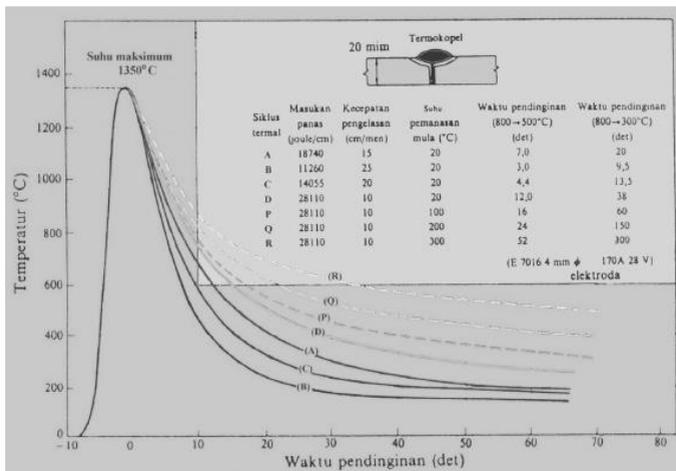


Gambar 2.6.2 Siklus Thermal Las AISI 304 [1]

Pada *stainless steel*, dikenal suatu *sensitization* temperatur dimana pada *range* temperatur ini terjadi suatu fenomena pengendapan karbida chromium ($Cr_{23}C_6$) pada batas butir yang dikenal dengan peristiwa korosi batas butir (*intergranular corrosion*). Pada gambar di atas *range temperature* sensitisnya adalah antara $650^{\circ}\text{C} - 870^{\circ}\text{C}$.

Pada posisi a dekat batas fusi (*fusion boundary*) temperatur puncaknya paling tinggi dan laju pendinginannya paling tinggi. Akibatnya presipitasi karbida tidak sempat terjadi hal ini dikarenakan temperatur puncaknya terlampaui tinggi melewati batas temperatur sensitis sedangkan pada waktu proses pendinginannya terlalu cepat, hanya berkisar 7 detik melewati temperatur ini sehingga tidak cukup waktu untuk membentuk karbida chromium ini. Pada posisi b daerah agak jauh dari batas fusi temperatur puncak dan laju pendinginannya lebih rendah bila dibanding posisi a. Pada proses pemanasan dan pendinginan pada posisi b masuk temperature sensitis dan cukup waktu sekitar 9 detik untuk terjadinya presipitasi karbida *chromium*. Sedangkan pada posisi c dan d, temperatur pemanasannya sudah tidak mencapai temperatur sensitis dan laju pendinginannya juga lebih rendah lagi. Sehingga pada posisi c dan d ini fenomena korosi batas butir tidak akan terjadi, Gambar 2.6.2 menunjukkan siklus *thermal* tempat yang rentan terhadap presipitasi karbida. ^[1]

Input panas berhubungan dengan temperatur puncak yang dicapai, serta kecepatan pemanasan dan pendinginan dari masing-masing daerah. Daerah dekat lapisan logam las akan mengalami temperatur yang tinggi dengan laju pemanasan dan pendinginan yang cepat. Daerah yang berada sedikit lebih jauh akan berada pada suatu temperatur puncak *medium* dengan laju pemanasan dan pendinginan yang relatif lebih lambat. Daerah yang jauh dari lapisan logam las akan mengalami temperatur puncak yang rendah dengan laju pemanasan dan pendinginan yang lebih lambat lagi. Semakin tinggi *input* panas, maka laju pendinginan akan semakin lambat. Hubungan antara *input* panas dengan waktu pendinginan ditunjukkan dengan **Gambar 2.6.3**.

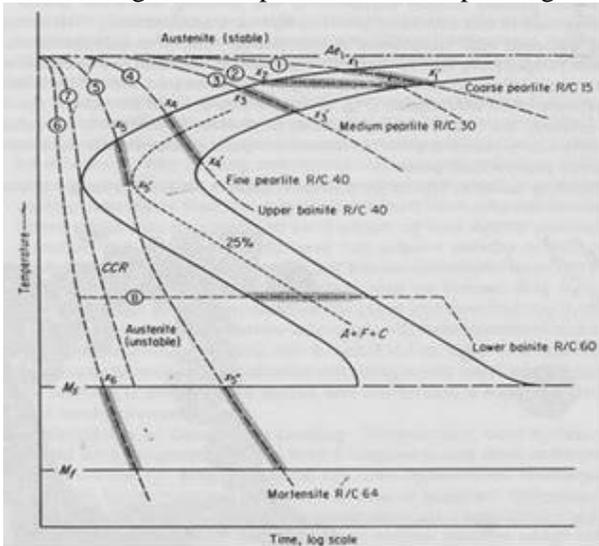


Gambar 2.6.3 Perbandingan *heat input* dengan waktu pendinginan

Dapat dilihat dari **Gambar 2.6.3** di atas, misalnya untuk siklus panas A dengan *input* 18740 J/cm memiliki waktu pendinginan 7 detik ($800^{\circ}\text{C} \rightarrow 500^{\circ}\text{C}$) sedangkan untuk siklus panas B dengan *input* panas 11260 J/cm memiliki waktu pendinginan 3 detik. Dari perbandingan tersebut dengan *heat input* A yang lebih tinggi daripada B, waktu pendinginan pada A lebih lama dibandingkan B.

Pada pengelasan terjadi proses pemanasan dan pendinginan sekaligus. Transformasi pada saat pendinginan

dapat digambarkan dengan diagram *Continuous Cooling Transformation (CCT)*. Dari diagram tersebut dapat diketahui perkiraan struktur mikro yang terjadi sesuai dengan cepat lambatnya laju pendinginan. Pada **Gambar 2.6.4** terlihat kurva transformasi dengan beberapa macam kurva pendinginan.

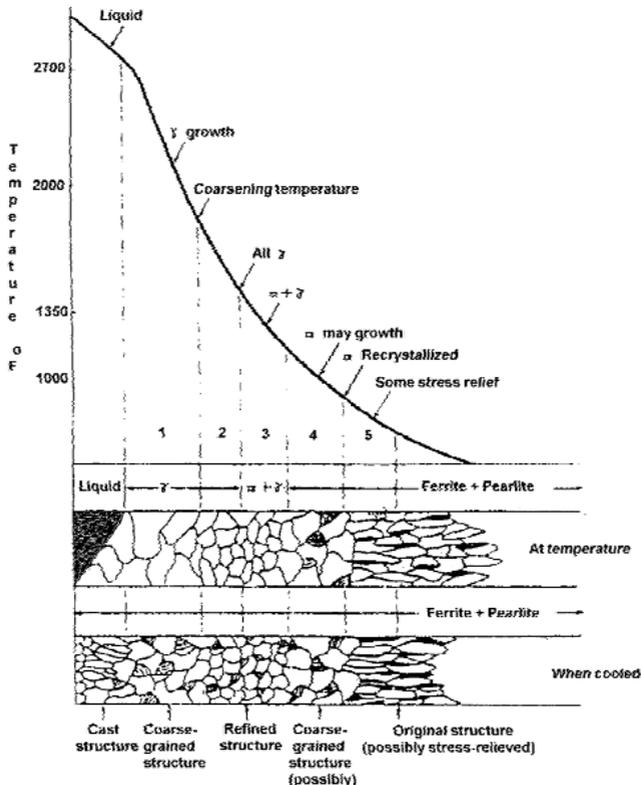


Gambar 2.6.4 Kurva transformasi dengan beberapa kurva pendinginan

Kurva pendinginan 1 menggambarkan pendinginan yang sangat lambat seperti yang dapat terjadi pada proses *annealing*. Kurva pendinginan 2, transformasi berlangsung pada temperatur *constant*, sehingga hasil transformasi lebih homogen. Kurva pendinginan 3 menggambarkan kurva pendinginan yang lebih cepat seperti yang terjadi pada *normalizing*. *Peralite* yang dihasilkan pada kurva pendinginan ini merupakan perpaduan antara *pearlite* kasar dan *medium*. Untuk kurva pendinginan 4 juga merupakan perpaduan antara *pearlite medium* dan halus. Pada kurva pendinginan 5 transformasi mula-mula menghasilkan *pearlite* halus. Namun sampai pada titik x' 's, transformasi berhenti dan mulai bertransformasi lagi saat mencapai M_s (x' 's). Pada M_s ini *austenite* yang belum bertransformasi menjadi *pearlite*,

berubah menjadi *martensite* (dengan asumsi tidak ada *retained austenite*). Kurva pendinginan 6 menggambarkan pendinginan yang sangat cepat sehingga tidak terjadi transformasi di daerah “hidung”. Transformasi baru terjadi bila temperatur mencapai M_s dan berakhir pada M_f . Hal tersebut juga terjadi pada kurva pendinginan 7. Namun pada kurva pendinginan 7, struktur akhir yang dihasilkan merupakan campuran antara *pearlite* dan *martensite*. Untuk mendapatkan struktur yang *bainitic*, maka kurva pendinginan digambarkan oleh nomor 8.

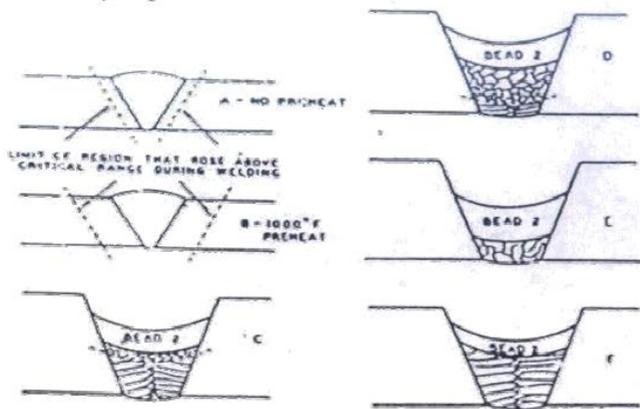
Pada pengelasan, pemanasan dan pendinginan terjadi sekaligus. Pada **Gambar 2.6.5** menunjukkan bahwa saat proses pengelasan dilakukan, terjadi proses pemanasan mencapai temperatur austenisasi.



Gambar 2.6.5 Struktur mikro saat pemanasan dan pendinginan pada proses pengelasan baja *hypoeutectoid*

Austenite yang terbentuk dekat logam las mempunyai ukuran butir yang besar. Semakin jauh dari logam las, maka ukuran butir *austenite* yang terjadi semakin halus. Daerah di dekat logam las mengalami pendinginan dengan waktu relatif lebih cepat dibandingkan daerah lainnya sehingga pada butiran *austenite* yang besar, sebagian bertransformasi menjadi *ferrite* dan sisanya menjadi *pearlite*. *Pearlite* yang dihasilkan di daerah ini mempunyai *lamellar* yang rapat (halus). Untuk daerah yang lebih jauh dari logam las, *austenite* yang dihasilkan lebih halus, sehingga saat pendinginan sebagian bertransformasi menjadi *ferrite* dan sebagian menjadi *pearlite*. *Pearlite* yang dihasilkan berada dalam butiran yang kecil dan memiliki *lamellar* yang jarang (kasar). Kualitas *pearlite*, berpengaruh pada sifat mekanik. *Pearlite* yang kasar mempunyai kekuatan tarik yang lebih rendah dibandingkan dengan *pearlite* yang halus. Begitu juga dengan kekerasannya. *Pearlite* yang kasar mempunyai kekerasan yang lebih rendah dibanding dengan *pearlite* yang halus.

Pada pengelasan *multi layer*, pendepositan *layer* kedua seakan-akan memberikan panas pada *layer* pertama sehingga *layer* tersebut seolah mengalami *postheat*. *Layer* ketiga mengalami *preheat* dari panas *layer* kedua dan fenomena tersebut akan berulang hingga *layer* terakhir. Panas yang dihasilkan akibat pengelasan *multi layer* berpengaruh terhadap struktur mikro logam las dan HAZ. Perubahan pada struktur mikro yang dimaksud dalam hal ini adalah perbaikan ukuran butiran (*grain refinement*) dimana ukuran butiran ini akan berpengaruh terhadap sifat mekanik di daerah tersebut. Dari **Gambar 2.6.6 (c)** *layer* kedua memberikan panas pada *layer* pertama yang bertemperatur kamar mencapai temperatur kritis sehingga memperbaiki ukuran butiran dari *layer* pertama.

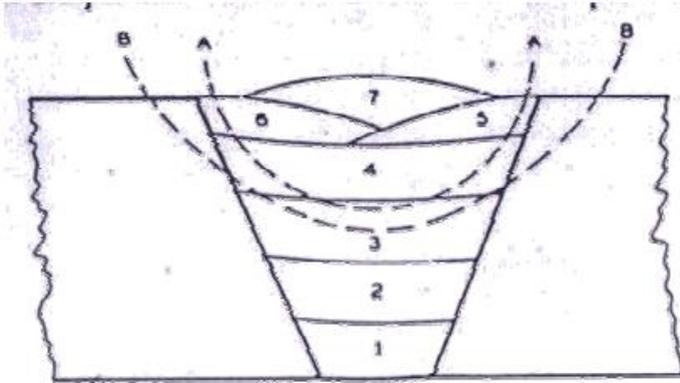


Gambar 2.6.6 Pengaruh preheating dan panas pengelasan multi layer
[22]

Jika pendepositan *layer* kedua dilakukan setelah *layer* pertama mencapai temperatur kritis maka perbaikan ukuran butiran pada *layer* pertama lebih banyak terjadi dibandingkan pada saat *layer* pertama bertemperatur kamar sesuai gambar yang ditunjukkan oleh **Gambar 2.6.6 (c) dan (d)**. Jika pendepositan *layer* kedua dilakukan segera setelah *layer* pertama maka tidak akan terjadi perbaikan ukuran butiran sesuai gambar yang ditunjukkan pada **Gambar 2.6.6 (f)**.

Temperature puncak yang dicapai daerah HAZ bisa lebih dari temperature A_3 (temperatur dimana *ferrite* bertransformasi menjadi *austenite* pada proses pemanasan) dengan laju pemanasan yang sangat besar dan pendinginan yang cepat dalam waktu singkat. Hal tersebut menyebabkan butiran *austenite* yang dihasilkan di daerah HAZ menjadi kasar. Daerah HAZ dengan butiran yang kasar ini disebut *grain coarsened zone* (GC HAZ). GC HAZ memiliki ketangguhan yang paling rendah dibandingkan daerah yang lainnya (*single-pass weld*). Panas pada pengelasan multi *layer* diharapkan dapat meminimalkan daerah HAZ yang berbutir kasar. Misalnya pada **Gambar 2.6.7** berikut, dimana pengelasan dilakukan beberapa *layer*. Setelah pendepositan *layer* 5 dan 6, maka struktur mikro berbutir kasar hanya berada di dekat *layer* 5 dan 6 (asumsi panas

dari *layer* sebelumnya mampu menaikkan temperatur menaikkan temperatur dari HAZ yang sudah dihasilkan).

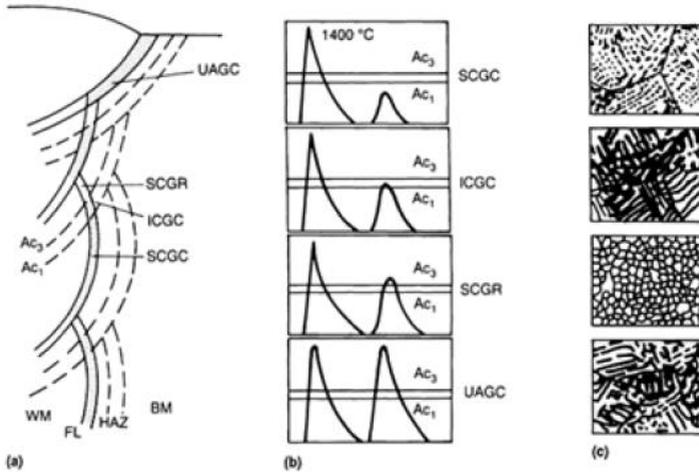


Gambar 2.6.7 Batas HAZ yang dihasilkan oleh pendepositan *layer* terakhir [22]

Jika panas dari pendepositan *layer* 7 dapat mencapai B-B, maka struktur mikro berbutir kasar hasil dari *layer* 5 dan 6 dapat diminimalkan. GC HAZ pada pengelasan multi *layer* berubah sesuai dengan temperatur pemanasan yang dialami dan dapat dikategorikan menjadi 4 daerah, yaitu:

1. *Subcritically reheated grain-coarsened zone* (SCGC). Daerah yang mengalami pemanasan di bawah temperature A_1 .
2. *Intercritically reheated grain-coarsened zone* (ICGC). Daerah yang mengalami pemanasan di antara A_1 dan A_3 .
3. *Supercritically reheated grain-refined zone* (SCGR). Daerah yang mengalami pemanasan diatas A_3 hingga sekitar 1200°C .
4. *Unaltered grain-coarsened zone* (UAGC). Daerah yang mengalami pemanasan lebih dari 1200°C .

Keempat daerah tersebut di atas ditunjukkan seperti pada **Gambar 2.6.8**.



Gambar 2.6.8 Sub daerah yang terbentuk pada pengelasan multi layer; (a) letak sub daerah relatif terhadap logam induk dan logam las; (b) siklus thermal relatif terhadap AC_3 dan AC_1 ; (c) struktur mikro dari masing-masing sub daerah [1]

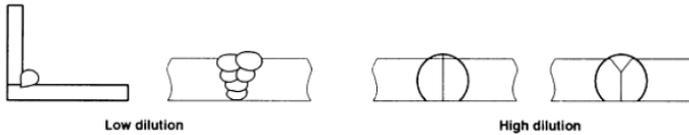
GC HAZ jika mengalami pemanasan dibawah A_1 akan berubah menjadi SCGC, dimana butirannya masih kasar tetapi ketangguhannya bertambah. Bila pemanasan terjadi diantara A_3 dan A_1 , maka GC HAZ akan berubah menjadi ICGC yang memiliki ketangguhan paling rendah dibandingkan ketiga daerah lainnya. GC HAZ akan berubah menjadi SCGR yang berbutir halus bila mengalami pemanasan kembali diatas A_3 sampai 1200°C . UAGC memiliki butirannya yang masih kasar karena mengalami pemanasan kembali lebih dari 1200°C .

2.7 Dilusi

Proses dilusi adalah proses perubahan komposisi kimia dari pengelasan dengan filler metal karena bercampurnya base metal atau dengan weld metal sebelumnya pada weld bead (AWS A3.0, 2001).

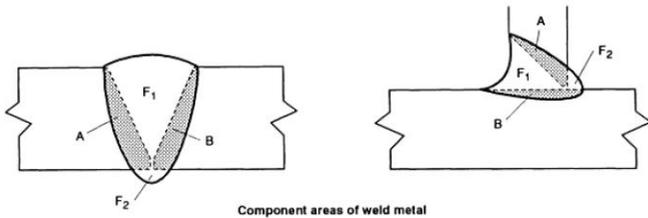
Pada pengelasan dissimilar metal, komponen weld metal terdiri dari sebagian kedua logam induk yang mencair dan logam pengisi. Bagian logam induk yang mencair tergantung dari jenis groove, jenis sambungan, tebal plat dan *heat input*.

Disebut dilusi rendah jika luas bagian logam induk yang mencair lebih kecil dibanding luas logam las yang berasal dari filler metal. Disebut dilusi tinggi jika luas bagian logam induk yang mencair lebih besar dibanding luas bagian logam las yang berasal dari *filler metal*. [14]



Gambar 2.7.1 Jenis dilusi

Pada Gambar 2.7.2 berikut akan diilustrasikan penentuan dilusi dari dua *base metal*, A dan B, ketika dilas dengan *filler metal* F [13].



Component areas of weld metal

$$\text{Dilution by metal A, \%} = \frac{A}{A + B (F_1 + F_2)} \times 100$$

$$\text{Total dilution, \%} = \frac{A + B}{A + B (F_1 + F_2)} \times 100$$

$$\text{Dilution by metal B, \%} = \frac{A}{A + B (F_1 + F_2)} \times 100$$

Gambar 2.7.2 Dilusi pada pengelasan dissimilar metal [14]

Selain itu prosentase rata – rata dari spesifik unsur paduan pada daerah dilusi *weld metal* dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$X_W = (D_A(X_A) + (D_B)(X_B) + (1 - D_T)(X_F) \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana

X_W : prosentase rata – rata unsur X dalam weld metal

X_A : prosentase unsur X dalam base metal A

X_B : prosentase unsur X dalam base metal B

X_F : prosentase unsur X dalam base metal F

D_A : prosentase dilusi base metal A

D_B : prosentase dilusi base metal B

D_T : prosentase total dilusi base metal A dan B

2.8 Diagram Konstitusi

Stainless steels mengandung banyak paduan (selain *chromium, karbon, dan nickel*) dimana dimaksudkan untuk meningkatkan sifat mekanik, ketahanan korosi atau untuk mengontrol struktur mikronya. Adanya banyak unsur paduan ini dikembangkan menjadi beberapa diagram konstitusi untuk memprediksi struktur mikro berdasarkan komposisi kimianya.

[4]

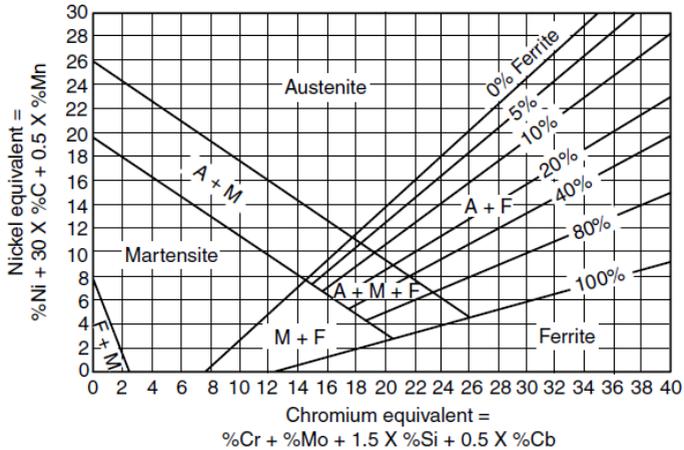
2.9 Schaeffler Diagram

Anton Schaeffler adalah orang pertama yang merekomendasikan suatu diagram untuk prediksi komposisi dan kandungan *ferrite* pada *weld metal*. Diagram ini dikenal pada tahun 1949. *Chromium equivalent* berisi perumusan kandungan unsur pembentuk *ferrite* yaitu: Cr, Mo, Si, dan Nb, sedangkan *nickel equivalent* berisi perumusan kandungan unsur pembentuk *austenite* yaitu: Ni, Mn, dan C.^[1]

$$\text{Ni eq} = \text{Ni} + 0.5 \text{ Mn} + 30 \text{ C} \dots\dots (2.2)$$

$$\text{Cr eq} = \text{Cr} + \text{Mo} + 1.5 \text{ Si} + 0.5 \text{ Cb} \dots\dots (2.3)$$

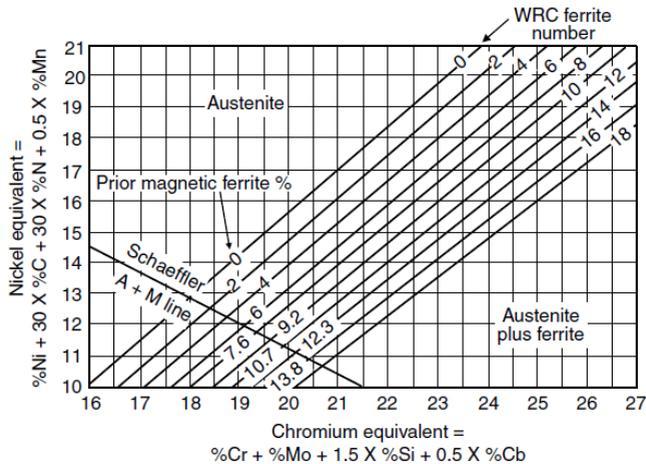
Asumsi awal dari pembuatan diagram ini adalah dengan menggunakan elektroda terbungkus tipe *autentic stainless steels* dengan melakukan pengelasan satu kali jalan (*single pass*) tanpa teknik ayunan (*nonweave beads*). Diagram ini dibuat dengan kondisi pendinginan normal udara sehingga bukan merupakan diagram dalam kondisi kesetimbangan. Diagram ini banyak digunakan untuk memprediksi struktur *weld metal* untuk kebanyakan seri 300 *stainless steels* pada proses las busur listrik (*arc welding processes*). Berikut ini ditampilkan suatu diagram Schaeffler:



Gambar 2.9.1 Diagram Schaeffler

2.10 DeLong Diagram

Pada tahun 1956, *DeLong* menyempurnakan diagram Schaeffler ini dengan mengikutsertakan unsur *nitrogen* sebagai pembentuk *austenite* yang kuat dan menambahkannya dalam perumusan *nickel equivalent*. Dan juga kandungan *ferrite* dinyatakan dalam *ferrite number* (FN) dimana lebih produktif daripada prosentase *ferrite* dan dapat ditentukan oleh pengujian *magnetic*, salah satu pengujian tidak merusak. Mengingat struktur kristal *ferrite* adalah FCC sehingga bersifat *magnetic* dan dapat dideteksi oleh suatu alat *feritscope*. Pada Gambar 2.10.1 ditampilkan diagram DeLong.^[1]



Gambar 2.10.1 DeLong Diagram

Pada DeLong diagram dicantumkan garis batas adanya kemungkinan terjadinya struktur martensit, dimana garis ini sudah tercantum sebelumnya pada diagram Schaeffler. Dan dari diagram ini kandungan δ -ferrite dari diagram Schaeffler dikonversi ke dalam satuan FN. Satuan FN ini didapatkan dari pengujian magnetik melalui deteksi struktur FCC δ -ferrite dengan alat feritscope.

2.11 Prediksi Struktur Mikro Pengelasan Dissimilar Metal

Pada proses pengelasan *dissimilar* metal faktor pemilihan elektroda mempengaruhi kualitas lasan sehingga cacat pengelasan dapat diminimalisir dengan mengetahui struktur metalurgisnya. Untuk merencanakan pemilihan elektroda agar sesuai dengan struktur yang tepat digunakan diagram *Schaeffler*. Struktur yang tepat disini adalah struktur *weld metal* dengan kandungan *ferrite* antara 4 – 10%.

Kandungan *ferrite* yang terlalu rendah menyebabkan struktur lasan didominasi oleh struktur *autenitic* dimana hal ini menyebabkan rentannya terhadap retak pada waktu proses pembekuan (*hot crack*). Kandungan *ferrite* yang terlalu tinggi juga dapat menurunkan ketahanannya terhadap korosi dimana akan memunculkan fasa baru yaitu fasa sigma dimana fasa ini

bersifat getas, menurunkan sifat mekanik dan juga ketahanan korosinya.

Perencanaan pengelasan *dissimilar metal* pada kasus ini adalah antara *stainless steel* 304H dengan *low alloy karbon steel* T22 dengan *Filler metal* ER 309 pada pengelasan GTAW.

Langkah pertama dengan memasukkan tiap komposisi *base metal* dan *Filler metal* dalam perumusan Ni dan Cr *equivalent*.

Tabel 2.11.1 Komposisi kimia SS 304H dan T22

AISI Number	Chemical Composition (%)						
	C	Cr	Ni	Mn	Si	P	S
SS 304H	0.06776	18.376	7.6225	1.1350	0.41448	0.03138	0.00185
T22	0.11040	2.0220	0.04043	0.43211	0.20217	0.01051	0.00448

Tabel 2.11.2 Komposisi kimia elektroda ER 309

Electroda	Chemical Composition (%)								
	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu
E309	0,15	22,0-25,0	12,0-14,0	0,75	0,5-2,5	1,0	0,04	0,03	0,75

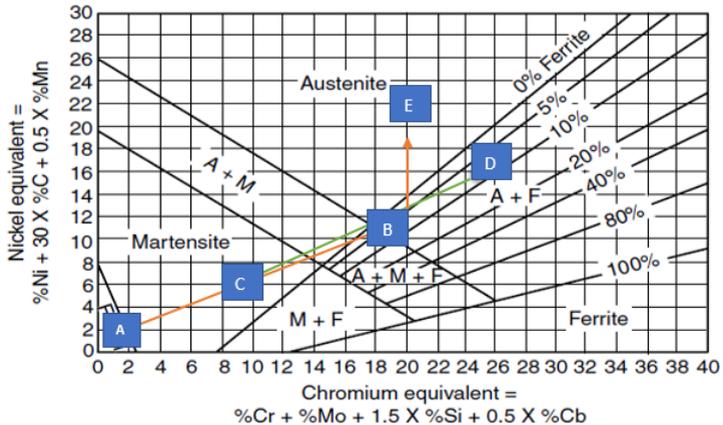
Tabel 2.11.3 Perhitungan Cr dan Ni Equivalent

AISI Number	Cr Eq (%)	Ni Eq (%)
304H	19.44	10.23
T22	3.23	3.57
ER 309	25.6	14.95

Langkah kedua, nilai Cr dan Ni eq kedua *base metal* diplot pada diagram Schaeffler. Titik A menunjukkan *plotting* T22, titik B menunjukkan *plotting base metal* SS304H. Kedua titik A dan B dihubungkan. Dilusi diasumsikan seimbang yaitu sama-sama 50%, sehingga didapatkan titik C pada tengah-tengah garis AB.

Langkah ketiga, *plotting* titik D sebagai *Filler metal* ER309L. Titik D dan titik C dihubungkan. Diasumsikan untuk proses GTAW dilusi dari *base metal* adalah 20% dan 80% dari *filler metalnya*. Oleh karenanya diambil suatu titik E untuk prediksi struktur *weld metal* dengan menganut hukum *tie line*. Dimana Panjang ED besarnya 30% Panjang CD dari titik E. Prediksi struktur dari titik E ini pada *weld metal* terdapat *ferrite* sekitar 7-8.5% *ferrite*. Dengan adanya kandungan *ferrite* dalam

batas aman, maka dapat diprediksi dengan penggunaan *filler metal* ER309 sudah sesuai dan kemungkinan permasalahan terjadinya *hot crack* tidak akan terjadi.



Gambar 2.11.1 Diagram Schaeffler untuk prediksi struktur mikro

2.12 Retak Las

Retak las merupakan salah satu permasalahan yang dihadapi pada *pengelasan dissimilar metal*. Keretakan disebabkan karena faktor *welder* kurang memperhatikan WPS, penggunaan *filler metal* yang tidak cocok, kurang tepatnya pelaksanaan atau tidak dilaksanakannya *heat treatment*. Secara garis besar retak las dibagi dua yaitu retak panas (*hot crack*) dan retak dingin (*cold crack*).

2.12.1 Hot Crack

Retak panas (*hot crack*) disebut juga dengan retak pembekuan (*solidification crack*) terjadi pada deposit las pada saat lasan mendingin atau dalam proses pembekuan. Retak ini terjadi pada suhu antara 200 – 300 °C dibawah titik leburnya. Kepekaan suatu metal terhadap retak solidifikasi tergantung dari faktor – faktor sebagai berikut: tingkat kekasaran struktur mikro dari solidifikasi, jumlah dan jenis segregasi, geometri sambungan.

Retak panas biasanya terjadi pada waktu logam las mendingin setelah pembekuan selesai. Retak ini terjadi karena

tegangan yang timbul disebabkan oleh penyusutan dan sifat baja yang ketangguhannya turun pada suhu sedikit dibawah suhu pembekuan. Dengan demikian retak ini akan terjadi pada batas butir karena tempat tersebut biasanya terbentuk senyawa dengan titik cair rendah. Karena itu unsur seperti Si, Ni, S, dan P akan mempertinggi kepekaan baja terhadap retak jenis ini.^[5]

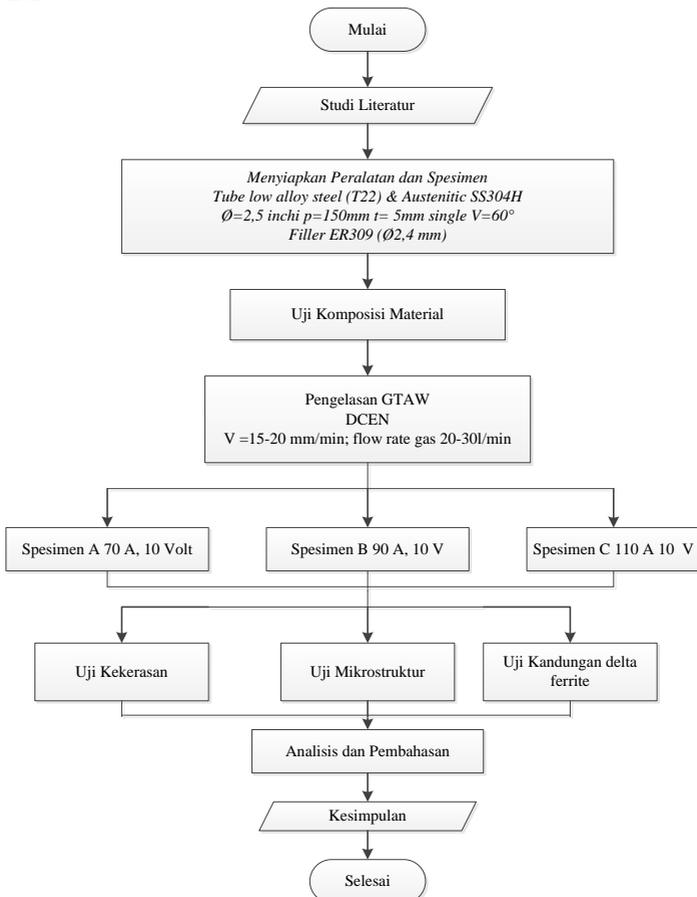
Struktur mikro baja *autenitic* lebih peka terhadap retak panas ini. Kotoran seperti P dan S kurang dapat larut dalam kisi *autenitic* daripada kisi *ferritic*, sehingga tertinggal di batas butir dan menghasilkan selapis film yang bertitik lebur rendah.

Unsur ikutan (*impurities*) berpisah dari elemen pepadu pada batas butir *columnar* dan menyebabkan terjadinya segregasi. Bagian – bagian yang bersegregasi membentuk fase titik lebur rendah dengan metal dan menghasilkan film yang bersifat sangat basah (*highly wetting*) dan mampu menyebar pada batas butir. Film tersebut memperlemah struktur sedemikian rupa sehingga terjadilah retakan pada batas butir tersebut karena regangan sisa pembekuan. ^[5]

BAB III METODOLOGI

3.1 Diagram Proses Penelitian

Untuk membantu mempermudah sistematisnya pelaksanaan penelitian ini, maka perencanaan urutan penelitian dibuat dalam diagram alir, yang ditunjukkan pada **Gambar 3.1.1**:



Gambar 3.1.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Bahan dan Peralatan Penelitian

3.2.1 Bahan Penelitian

Pada penelitian ini material yang digunakan adalah sebagai berikut:

- Tube austenitic SS 304H dan T22

Pada penelitian ini material yang digunakan adalah baja tahan karat (*stainless steel*) dengan tipe 304H dengan baja paduan rendah T22 (2 ¼ Cr-1Mo *steel*). Dua buah pipa ini memiliki panjang masing- masing 150 mm dan tebal 5 mm. Diameter luar dan dalam *stainless steel* adalah 63.5 mm dan 58.5 mm, sedangkan untuk baja paduan diameter luar dan dalam adalah 63 mm dan 58.5 mm. Komposisi kimia dan sifat mekanik dari kedua spesimen tersebut, ditunjukkan pada Tabel 3.2.1 dan Tabel 3.2.2. Tabel 3.2.3 menunjukkan sifat thermal dari SS304H dan T22.

Tabel 3.2.1 Komposisi Kimia Spesimen SS 304H dan T22

AISI Numb er	Chemical Composition (%)							
	C	Cr	Ni	Mn	Si	P	S	Mo
SS 304H	0.067	18.3	7.622	1.135	0.414	0.031	0.001	0.445
	76	76	5	0	48	38	85	83
T22	0.110	2.02	0.040	0.432	0.202	0.010	0.004	0.899
	40	20	43	11	17	51	48	25

Tabel 3.2.2 Sifat Mekanik SS 304H dan T22

Materials	Mechanical Properties			
	Tensile Strength	Yield Strength	Elongation	Rockwell Hardness
SS 304H	75 ksi (515 MPa)	30 ksi (205 MPa)	35%	90 HRB
T22	60 ksi (415 MPa)	30 ksi (220 MPa)	30%	85 HRB

Tabel 3.2.3 Sifat Termal Antara SS 304H dengan T22

Thermal Properties	SS 304H	T22
Thermal Conductivity	16,2 $W/m.K$	33 $W/m.K$
Coefficient of Thermal Expansion	$17,2 \times 10^{-6} / ^\circ C$	$12,9 \times 10^{-6} / ^\circ C$

- Filler ER309

Filler yang digunakan adalah ER 309, berupa stick dengan panjang 1000 mm, diameter 2,4mm. Komposisi kimia filler dan sifat mekanik ditunjukkan pada **Tabel 3.2.4** dan

Tabel 3.2.5.

Tabel 3.2.4 Komposisi Kimia

<i>Filler</i>	<i>Chemical Composition (%)</i>								
	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu
ER309	0,15	22,0- 25,0	12,0- 14,0	0,75	0,5- 2,5	1,0	0,04	0,03	0,75

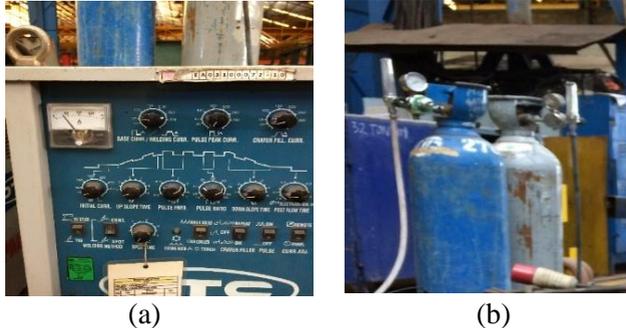
Tabel 3.2.5 Sifat Mekanik Elektroda

<i>Filler</i>	<i>Mechanical Properties</i>		
	<i>Tensile Strength</i>	<i>Yield Strength</i>	<i>Elongation</i>
ER309	88,5 ksi	59,5 ksi	34%

3.2.2 Peralatan

1 Peralatan Las dan Pendukung

- a. Mesin Las GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*)
- b. Gas *Argon* 99.9%
Gas *argon* digunakan sebagai pelindung logam dari oksidasi saat proses pengelasan
- c. Peralatan keselamatan kerja
Untuk melindungi *welder* saat melakukan pengelasan dari bahaya panas, percikan dan sinar radiasi las. Alat keselamatan kerja yang digunakan antara lain helm las, kaca mata pelindung, baju *safety*, sarung tangan, *masker*, sepatu dan alat pelindung lainnya.
- d. Alat-alat pengukuran
Alat-alat pengukuran digunakan selama penelitian adalah penggaris, jangka sorong, *bevel protractor*, *tang ampere*, *infrared thermometer*, dan *stopwatch*.



Gambar 3.2.1 (a) Mesin Las GTAW (b) Gas Argon

2 Peralatan Potong

Peralatan potong yang digunakan untuk pembentukan spesimen uji antara lain adalah mesin bubut, *jigsaw*, dan *circular saw*. Semua peralatan dan mesin uji yang digunakan adalah milik Laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS Surabaya

3 Peralatan Pengujian

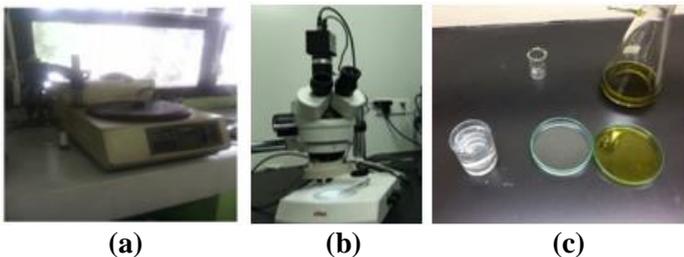
a. Uji *Microhardness*

Pengujian kekerasan ini dilakukan untuk mengetahui distribusi dan tingkat kekerasan material pada daerah lasan. Pengujian indntasi ukuran mikro pada spesimen dapat diamati pada mikroskop hingga perbesaran 400x, sehingga mesin *micro Vickers* (**Gambar 3.2.2**) ini lebih teliti untuk menguji kekerasan fasa tertentu dimana perbedaan fasa tidak tampak secara jelas bila pengujian dengan mesin *vickers*.



Gambar 3.2.2 Mesin Micro Hardness

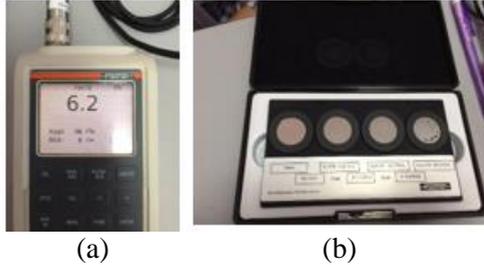
- b. Pengamatan Struktur Makro dan Mikro
 Pengamatan struktur makro dan mikro menggunakan peralatan sebagai berikut:
- Mesin *grinder* dan *polisher*
 - Kertas gosok 60,120, 320, 500, 800, 1000, 1500, dan 2000
 - Kain bludru dan bubuk alumina
 - Etsa menggunakan larutan etsa *micro kalling's reagent* (2 gr CuCl_2 ; 40 ml HCl ; 40-80 ml ethanol (95%) atau methanol (95%); 40 ml water) *macro Keller's reagent* (2 ml HF , 3 ml HCl , 5 ml HNO_3 , 190 ml H_2O). [21]
 - Mikroskop *optic* perbesaran 100x dan 500x.



Gambar 3.2.3 Peralatan pengujian metalografi (a) mesin *grinding* dan *polishing*; (b) mikroskop optik; (c) cairan etsa

- c. Uji Ferrite Number

Ferrite scope (**Gambar 3.2.4**) digunakan untuk melakukan pengujian kandungan δ -*ferrite* dimana prosentase kandungan tertera secara otomatis pada layar *ferriscope* dengan satuan FN (*Ferrite Number*).

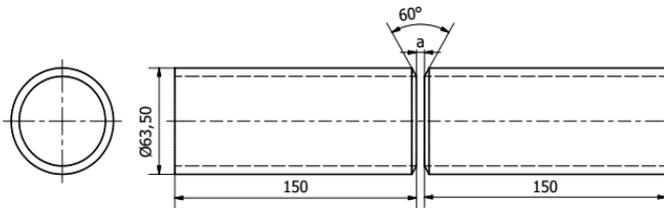


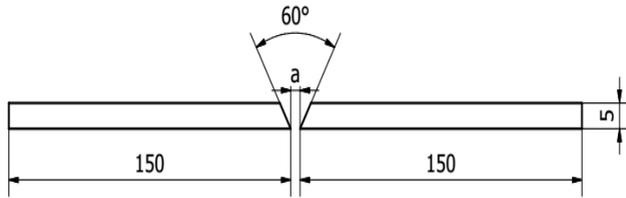
Gambar 3.2.4 *Ferrite scope* (a) Layar; (b) *Block* kalibrasi *probe*

3.3 Langkah-langkah pengelasan

3.3.1 Persiapan Spesimen

Pada penelitian ini spesimen dilas dengan proses GTAW. Sebelum dilakukan pengelasan spesimen disusun dengan bantuan *tack weld* agar pada saat pengelasan benda kerja tidak bergeser dari susunan semula. Sambungan spesimen dibuat dengan metode *groove single V* dengan celah *root* ($a=2-2,5$ mm), tipe sambungan *butt joint* dan pengisian *weld metal* secara *multi-layer*. Pada bagian *root* dan *weld metal* digunakan *filler type* ER 309 dengan diameter 2,4 mm. *Design* sambungan pengelasan dibuat berdasarkan **Gambar 3.3.1**.

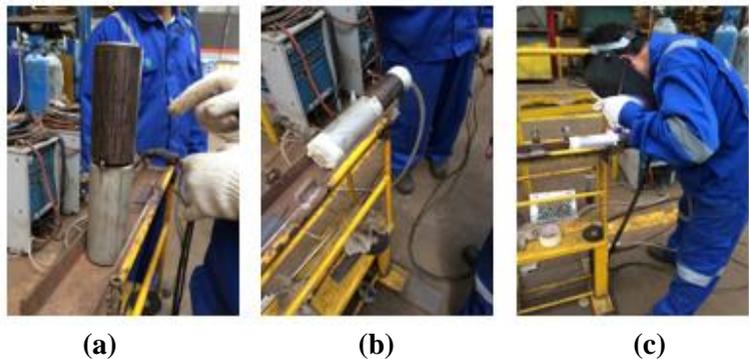




Gambar 3.3.1 Desain sambungan *groove*

3.3.2 Proses Pengelasan

Proses pengelasan material *dissimilar metal* antara *SS304H* dan *T22* menggunakan proses pengelasan GTAW untuk *root pass* dan pengisian *weld metal* dengan menggunakan *filler* tipe AWS 5.9 ER 309. Sebelum melakukan proses pengelasan material diharuskan bersih dari kotoran maupun debu. Pengelasan kedua spesimen dilakukan dari arah kiri ke kanan, dengan *multipass* dan dua buah *layer*. Proses pengelasan material ditunjukkan pada Gambar 3.2.2.



Gambar 3.3.2 Proses pengelasan (a) Pembuatan *tack weld*; (b) Pemasangan selang gas pelindung; (c) proses pengelasan

3.3.3 Parameter Pengelasan

Parameter pengelasan sangat berpengaruh terhadap baik buruknya kualitas suatu hasil pengelasan. Parameter pengelasan harus direncanakan secara baik pada saat pembuatan WPS, dimulai dari besar arus, *volt*, *travel speed*, posisi

pengelasan, tipe sambungan, sudut *groove*, desain sambungan. WPS nantinya akan menjadi pedoman seorang *welder* dalam proses pengelasan. Parameter pengelasan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 3.3.1.

Tabel 3.3.1 Parameter Proses Pengelasan

SPESIFIKASI BASE METAL	
Dari tipe	T22
Ke tipe	SS304H
Panjang	150 mm
Diameter	63.5 mm
Tebal	5 mm
DESAIN SAMBUNGAN	
Desain	Single V
Tipe sambungan	Butt
Sudut <i>groove</i>	60°
Jumlah pass	Multiple
FILLER METAL	
AWS no	ER309
diameter	2,4 mm
POSISI PENGELASAN	
Posisi	1G/2G
KARAKTERISTIK LAS	
Polaritas	DCEN
Arus	70A; 90A; 110A
Tegangan	10 V
KECEPATAN PENGELASAN	
<i>Range</i>	54 mm/menit
TREATMENT	
<i>Pre-heat</i>	Tidak dilakukan
<i>Post weld heat treatment</i>	Tidak dilakukan

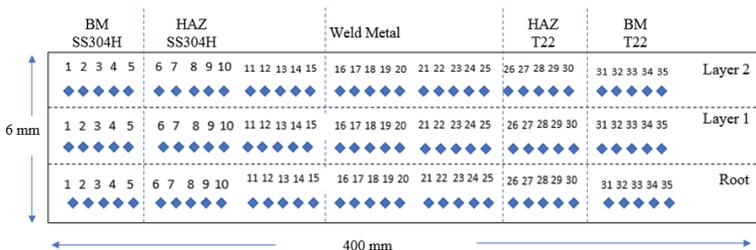
3.4 Proses Pengujian

Untuk mendapatkan data-data dari hasil penelitian ini, mengenai sifat mekanik dari struktur mikro dan kekerasannya maka dilakukan tiga jenis pengujian yaitu pengujian kekerasan dengan *micro vickers*, mikrostruktur dan komposisi δ -*ferrite*.

3.4.1 Pengujian Kekerasan *Micro Vickers*

Distribusi kekerasan dilakukan pada bagian *root*, *layer 1* dan *layer 2* dibagi dari lebar spesimen uji. Indentasi pada tiap daerah lasan untuk *base metal* dan *HAZ T22* dilakukan sebanyak 5x kali pada pada *weld metal* dan *HAZ SS304H* indentasi dilakukan 10x masing-masing spesimen. Untuk pengujian pada setiap spesimen baik dari bagian *root*, *layer 1* dan *layer 2* dari lebar spesimen uji seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4.1. *Standard* pengujian ini mengacu pada ASTM E 384, *Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*. Indentasi dilakukan dengan pembebanan 0.5 kgf dengan *holding* waktu pembebanan 15 detik. Angka kekerasan HV didapatkan dan dapat dibaca secara otomatis pada mesin. Langkah-langkah pengamatan pengujian kekerasan adalah sebagai berikut:

- 1) Spesimen dibentuk dengan menggunakan *jigsaw* dengan ukuran diameter panjang 4 cm.
- 2) Permukaan spesimen dihaluskan dengan menggunakan kertas gosok dengan grid 80-2000 pada mesin *grinding* dan *polishing*.
- 3) Spesimen di etsa.
- 4) Spesimen diindentasi dengan titik indentasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4.1 dan hasilnya diamati.
- 5) Letak indentasi, jarak antar indentasi dan nilai kekerasan diukur.



Gambar 3.4.1 Titik-titik indentasi pada pengujian kekerasan

3.4.2 Pengujian Metalografi

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui struktur mikro dari daerah lasan setelah proses pengelasan dengan menggunakan mikroskop *optic* (Gambar 3.2.3). Pengujian ini dilakukan pada daerah logam induk, batas antara logam induk dan HAZ, daerah HAZ, daerah batas antara HAZ dan daerah las, serta daerah las dan berdasarkan standar ASTM E 3, *Standard Guide for Preparation of Metallographic Spesimen*. Langkah-langkah pengamatan metalografi menggunakan mikroskop optik adalah sebagai berikut:

- 1) Spesimen dibentuk dengan menggunakan *jigsaw* dengan ukuran panjang 4 cm, lebar 2 cm dan tebal 5 mm.
- 2) Permukaan spesimen dihaluskan dengan kertas gosok grid 80-2000 pada mesin *grinding* dan *polishing*.
- 3) Permukaan spesimen di *polish* dengan menggunakan kain yang diberi serbuk alumina hingga diperoleh spesimen tanpa goresan.
- 4) Spesimen dietsa menggunakan larutan *kalling's reagent*, untuk bagian *stainless steel* dilakukan pengetsaan 10 detik lebih awal sedangkan untuk *low alloy steel* proses pengetsaan hanya 5 detik. Jadi total waktu mengetsaan sekitar 10-15 detik. Setelah dietsa material harus segera dicuci dengan menggunakan alkohol dan *aquades* yang bertujuan untuk mengekstraksikan struktur mikro yang terbentuk.
- 5) Spesimen diamati struktur mikro dan fase yang terjadi dengan mikroskop optik dengan perbesaran 100x dan 500x.

3.4.3 Pengujian Kandungan Delta Ferrite

Pengukuran ini dilakukan untuk mengetahui kandungan δ -*ferrite* pada titik yang dituju pada daerah lasan dengan suatu alat yaitu *ferrite scope*. Pengukuran ini didasarkan pada sifat magnetik yang dipunyai daerah tersebut. Struktur BCC (*body center cubic*) dari *ferrite* mempunyai sifat magnetik, sedangkan struktur FCC (*face center cubic*) dari *austenitic* mempunyai

sifat *non-magnetic*. Kandungan *ferrite* yang terbaca pada *feritescope* ini dinyatakan dalam satuan *ferrite number* (FN). Pengukuran dengan *probe* pada *feritescope* ini mendeteksi kemagnitan dari *ferrite*, hasil didapat dan dibaca pada layar secara digital. Pengujian dilakukan tiga kali pada titik uji. Titik uji yang dilakukan pengujian δ -*ferrite* yaitu titik uji pada *weld metal*. Kalibrasi kemagnitan dilakukan dengan *block* kalibrasi untuk menunjang keakuratan dari *feritescope* ini.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV DATA DAN ANALISA HASIL PENELITIAN

Material uji yang digunakan yaitu SS304H dan T22 dengan variasi *heat input*. Pengelasan yang digunakan yaitu GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*).

4.1 Komposisi Kimia Material

Pengujian komposisi kimia dilakukan pada *material tube* T22 dan SS304H sebagai sampel uji untuk pengelasan *dissimilar metal welding*. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan *Spectrometer Thermo ARL*. Hasil pengujian dibandingkan dengan komposisi kimia standar. Hasil perbandingan tersebut dapat dilihat pada **Tabel 4.1.1** dan **Tabel 4.1.2**.

Tabel 4.1.1 Perbandingan Hasil Uji Komposisi Kimia Dengan Komposisi Kimia Standard Material T22

Komposisi	%	
	Hasil Uji Spektrometer	Standar Pabrik
C	0.11040	0.06-0.16
Cr	2.0220	1.9-2.6
Ni	0.04043	-
Mn	0.43211	0.30-0.60
Si	0.20217	≤ 0.6
P	0.01051	≤ 0.026
S	0.00185	≤ 0.026
Mo	0.89925	-

Tabel 4.1.2 Perbandingan Hasil Uji Komposisi Kimia Dengan Komposisi Kimia Standard Material SS304H

Komposisi	%	
	Hasil Uji Spektrometer	Standar Pabrik
C	0.6776	0.04-0.1
Cr	18.376	18-20
Ni	7.6225	8-10.5
Mn	1.1350	Max 2

Si	0.41448	Max 0.75
P	0.03138	Max 0.045
S	0.00185	Max 0.030
Mo	0.44583	0.90-1.10

Setelah dilakukan perbandingan dengan komposisi kimia standar, *tube* memiliki komposisi kimia yang sesuai dengan *material* T22 dan SS304H. Hasil analisa dari spektrometer tidak sepenuhnya sama dengan standar yang ada. Namun sebagian besar masih dalam *range* standar yang sesuai.

4.2 Dilusi Pada Logam Las

Tabel 4.2.1 Dimensi Logam Las

	70 A	90 A	110 A
π	3.14		
d (mm)	63.5		
keliling(mm)	199.39		
t (second)	1478	1008	761
w (mm)	5		
η GTAW	0.7		

Tabel 4.2.2 Kecepatan Pengelasan dan Heat Input

E (volt)	I (Ampere)	P (Watt)	V (mm/s)	H_{net} (J/mm)
10	70	700	0.13490527	3.6
	90	900	0.19780754	3.1
	110	1100	0.262010512	2.9

Dari **Tabel 4.2.2** diketahui bahwa pada arus 70A kecepatan pengelasan adalah 0.13490527 dengan nilai 3.6 KJ/mm adalah 3.6 KJ/mm. Untuk arus 90 A kecepatan pengelasan adalah 0.19780754 dengan heat input 3.1 KJ/mm. Pada arus 110A kecepatan pengelasan adalah 0.262010512 dengan heat input 2.9 KJ/mm. Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi arus, heat input semakin menurun hal ini disebabkan karena kecepatan pengelasan juga berbanding terbalik dengan arus. Kecepatan pengelasan ini berhubungan dengan keliling material las dibagi waktu pengelasan. Dimana waktu pengelasan akan cepat jika arus yang digunakan semakin tinggi,

hal ini berhubungan dengan penetrasi filler metal pada logam las.

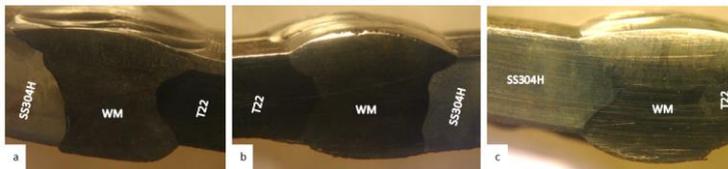
Tabel 4.2.3 Besar Dilusi

<i>Heat Input</i>	<i>Dilution</i> (%)	
	<i>T22</i>	<i>SS304H</i>
3.6 KJ/mm	25%	30 %
3.1 KJ/mm	30%	40 %
2.9 KJ/mm	35%	50 %

Hasil perhitungan dilusi yang terjadi pada *fusion line* dapat disimpulkan bahwa nilai dilusi dari *SS304H* maupun *T22* masih masuk *range* literatur dilusi pengelasan GTAW yaitu 20-80%. Nilai dilusi pada *SS304H* lebih besar dari pada *T22* dimana lebar dari *unmixed zone* *T22* lebih kecil. Dapat dilihat bahwa semakin kecil *heat input*nya maka dilusi yang terjadi semakin besar. Hal ini sesuai juga dengan teori bahwa semakin rendah kecepatan pengelasan maka jumlah *base metal* yang mencair semakin menurun dan jumlah *filler metal* yang mencair semakin tinggi artinya dilusi semakin kecil. Saat heat input kecil berdasarkan table 4.4 nilai amperenya tinggi hal tersebut menyebabkan dilusi semakin tinggi sehingga membuat busur lebih kaku dan lebih panas.^[7]

4.3 Observasi Makroskopis

Pengamatan secara makro dilakukan untuk membedakan daerah hasil lasan yang terdiri dari *weld metal*, HAZ dan *base metal*. Hasil makrografi material dapat dilihat pada **Gambar 4.3.1**.

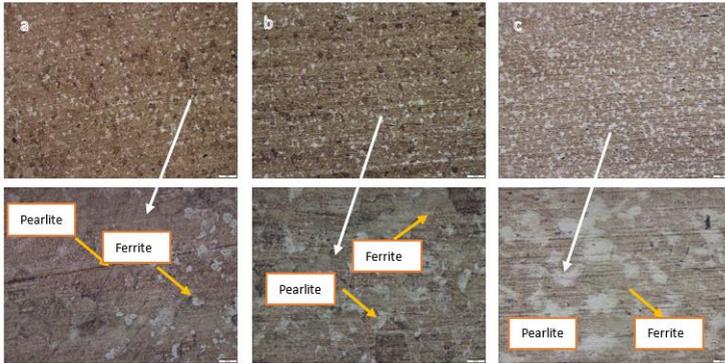


Gambar 4.3.1 Foto makroskopis material las (a) 3.6 KJ/mm; (b) 3.1 KJ/mm; (c) 2.9 KJ/mm

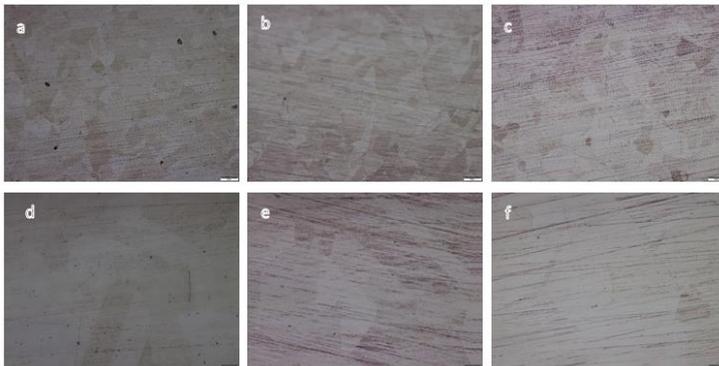
4.4 Observasi Struktur Mikro

Observasi struktur mikro bertujuan untuk mengetahui perubahan sifat mekanik pada material yang diakibatkan oleh proses pengelasan. Observasi dilakukan pada permukaan logam las. Dimana pengamatan struktur mikro ini dilakukan pada daerah *weld metal*, HAZ dan *base metal*, sehingga dapat diamati fenomena yang terjadi pada ketiga daerah tersebut. Perbesaran yang digunakan pada observasi ini adalah 100X dan 500X.

4.4.1 Daerah Base Metal



Gambar 4.4.1 Struktur mikro *base metal* T22 perbesaran 100x dan 500x (a) 3.6 KJ/mm; (b) 3.1 KJ/mm; (c) 2.9 KJ/mm (etsa kalling's reagent)



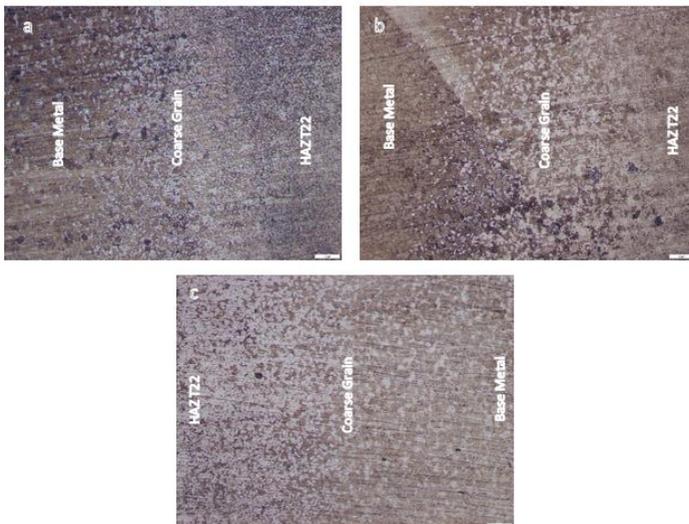
Gambar 4.4.2 Struktur mikro *base metal* SS304H perbesaran 100x dan 500x (a) (d) 3.6 KJ/mm; (b) (e) 3.1 KJ/mm; (c) (f) 2.9 KJ/mm (etsa kalling's reagent)

Struktur mikro *base metal* tidak berubah karena tidak terpengaruh efek pemanasan dari proses pengelasan. Berdasarkan Gambar 4.4.1 struktur mikro *base metal* T22 adalah *ferrite* dan *pearlite* untuk semua *heat input*. Gambar 4.4.2, dapat dilihat struktur mikro pada *base metal* SS304H terdiri dari *austenite* dimana daerah yang ditunjukkan pada gambar tersebut tidak terpengaruh panas sehingga strukturnya tidak berubah (tetap).

4.4.2 HAZ dan Base Metal

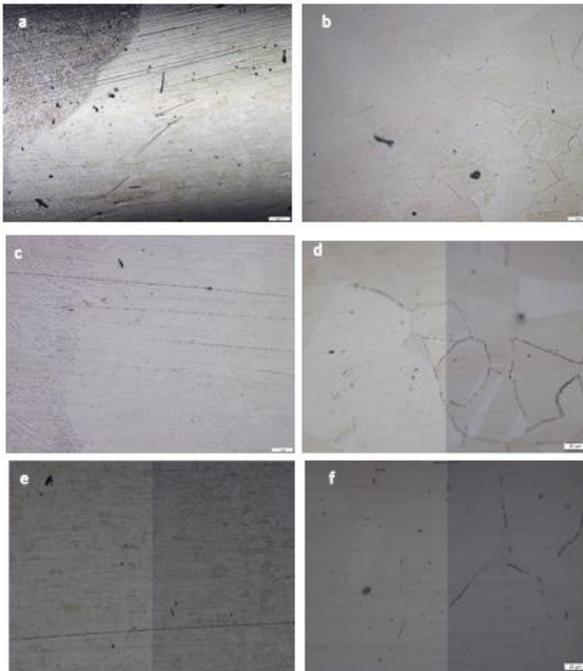


Gambar 4.4.3 Struktur mikro HAZ dan BM SS304 hasil lasan GTAW perbesaran 100x heat input 2.9 KJ/mm (etsa kalling's reagent)



Gambar 4.4.4 Struktur Mikro HAZ T22 perbesaran 100x (a) 3.6 KJ/mm; (b) 3.1 KJ/mm; (c) 2.9 KJ/mm (etsa kalling's reagent)

HAZ (*Heat Affected Zone*) adalah daerah terpengaruh panas saat proses pengelasan. Pada daerah ini terdapat butiran kasar dan halus. Butiran akan bertambah besar (kasar) seiring dengan naiknya temperatur yang dicapai saat proses pemanasan. Semakin jauh dari logam las, maka butiran yang terjadi akan semakin kecil (halus). Berdasarkan **Gambar 4.4.3** dan **Gambar 4.4.4**, struktur mikro HAZ T22 berbeda dengan *base metal*, perbedaan ini disebabkan oleh pemanasan saat proses pengelasan. Saat pendinginan perubahan struktur di daerah sekitar *fusion line* menjadi struktur seperti logam cor daerah setelah itu struktur material berubah struktur menjadi struktur berbutir kasar, lalu menjadi struktur halus, kemudian menjadi struktur *base metal*. Perbedaan butir struktur dipengaruhi oleh pengelasan *muti layer* yang dilakukan karena kehalusan butir terbentuk khususnya pada *layer I*, hal ini disebabkan pada layer I terjadi *pre heat* dan *post heat* sekaligus.



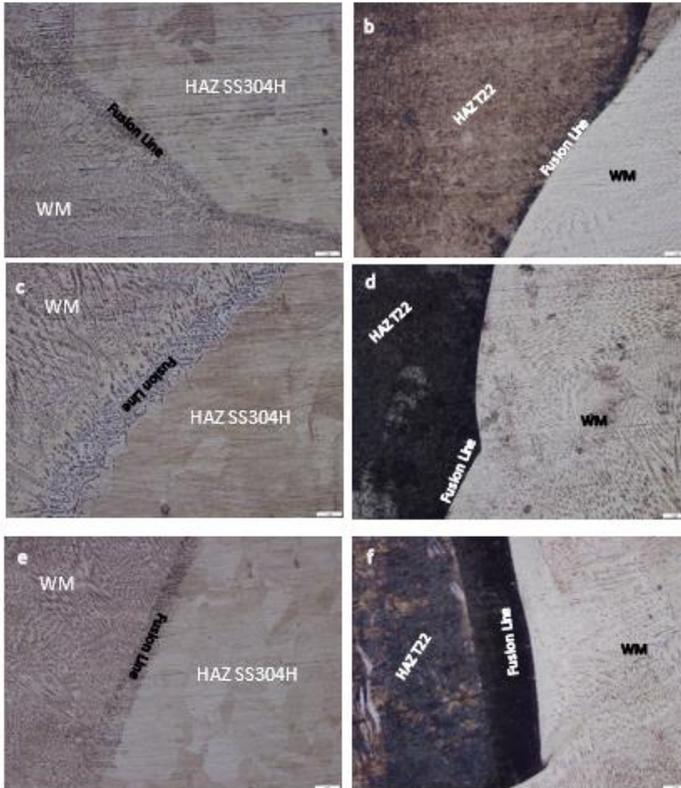
Gambar 4.4.5 Struktur Mikro SS304H perbesaran 100x dan 500x (a) 3.6 KJ/mm; (b) 3.1 KJ/mm; (c) 2.9 KJ/mm (etsa elektrolisis)

Gambar 4.4.3 menunjukkan struktur mikro lasan SS304H yang terbentuk setelah pendinginan dimana daerah transisi ditandai dengan perubahan ukuran butir austenite, dimana di daerah terpanas butir austenite lebih besar dan semakin ke daerah tersebut tidak terpengaruh panas ukuran butir semakin kecil atau kembali ke ukuran struktur base metal.

HAZ (*Heat Affected Zone*) adalah daerah terpengaruh panas saat proses pengelasan. Pada daerah ini terdapat butiran kasar dan halus. Butiran akan bertambah besar (kasar) seiring dengan naiknya temperatur yang dicapai saat proses pemanasan. Semakin jauh dari logam las, maka butiran yang terjadi akan semakin kecil (halus). Berdasarkan **Gambar 4.4.4** setelah proses pendinginan, struktur mikro yang terjadi pada HAZ berbeda dengan *base metal*. Pendinginan akibat proses pengelasan mengakibatkan terjadinya perubahan struktur mikro pada daerah HAZ T22. Pada proses pendinginan ini dapat diperhatikan lebar daerah coarse grain dengan heat input 3.6 KJ/mm lebih lebar dibandingkan dengan heat input 2.9 KJ/mm.

Pada daerah HAZ SS304H ditemukan presipitasi seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4.4.5** dimana presipitasi karbida tersebut terjadi pada daerah agak jauh dari batas fusi. Presipitasi tersebut tidak terjadi di daerah fusi karena pada daerah tersebut temperturnya paling tinggi dan laju pendinginannya paling tinggi, hal ini menyebabkan presipitasi karbida tidak sempat terjadi karena temperatur pada batas fusi terlampaui tinggi melewati batas temperatur sensitis ($650^{\circ}\text{C} - 870^{\circ}\text{C}$). Presipitasi karbida terjadi di daerah setelah daerah fusi karena pada daerah ini temperatur berada pada temperatur sensitis dan pendinginan yang terjadi cukup untuk membentuk presipitasi sehingga pada daerah ini terjadi presipitasi karbida. Lebar daerah presipitasi 3.6 KJ/mm lebih lebar dari pada lebar presipitasi di heat input 2.9 KJ/mm.

4.4.3 Fusion Line dan HAZ (T22 dan SS304H)

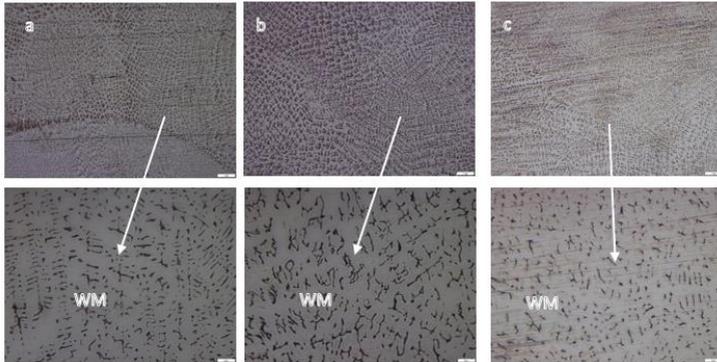


Gambar 4.4.6 Struktur mikro logam las hasil lasan GTAW pada daerah WM, FL dan HAZ SS304H dan T22 perbesaran 100x; (a) (b) 3.6 KJ/mm; (c) (d) 3.1 KJ/mm; (e) (f) 2.9 KJ/mm (etsa kalling's reagent)

Logam las memiliki struktur mikro seperti hasil coran. Hal ini karena temperatur puncak yang dicapai pada daerah tersebut mencapai *melting point* material tersebut. Pada Gambar 4.4.6 dapat dilihat gambar struktur mikro pada daerah logam las, *fusion line* dan HAZ untuk masing-masing variasi *heat input* untuk material SS304H dan T22. Berdasarkan gambar tersebut dapat dilihat struktur mikro untuk T22 berupa *ferrite* dan *pearlite* dengan bentuk dendritik yang menyerupai hasil coran. Struktur mikro untuk SS304H tidak terbentuk presipitasi karbida dengan matriks *austenite*, didaerah dekat fusion line

tidak terbentuk presipitasi karena pendinginan dan pemanasan didaerah tersebut tidak cukup untuk membentuk presipitasi karbida.

Weld Metal



Gambar 4.4.7 Struktur mikro *weld metal* perbesaran 100x dan 500x (a) 3.6 KJ/mm; (b) 3.1 KJ/mm; (c) 2.9 KJ/mm

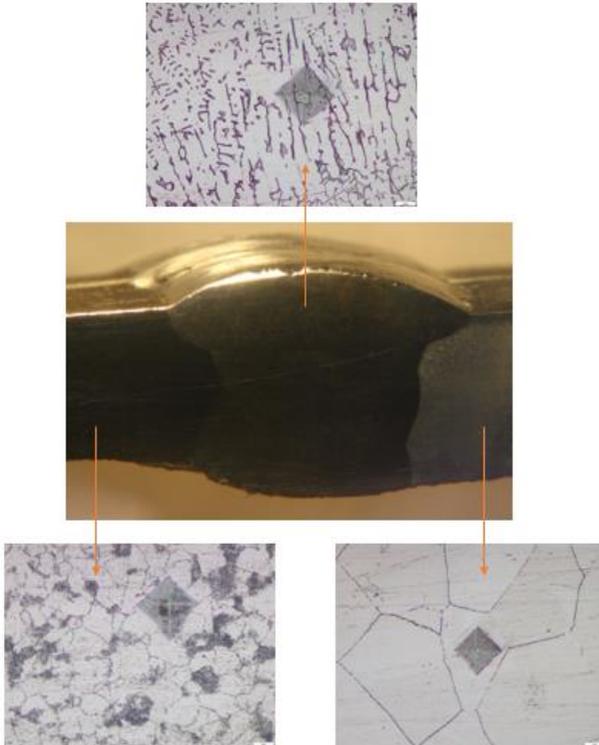
Pada Gambar 4.4.7 struktur mikro untuk *heat input* 3.6 KJ/mm, 3.1 KJ/mm dan 2.9 KJ/mm struktur yang terbentuk adalah pulau *ferrite* pada matriks *austenite*, pulau *ferrite* terdiri dari konsentrasi partikel karbida. *Heat input* 3.1 KJ/mm memiliki *ferrite* yang paling besar di matriks *austenite* dibandingkan dengan *heat input* 3.6 KJ/mm dan 2.9 KJ/mm. Keseragaman *ferrite* yang terbentuk pada *heat input* 3.1 KJ/mm lebih baik dibandingkan dengan *heat input* 3.6 KJ/mm dan 2.9 KJ/mm.

4.5 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui distribusi kekerasan pada daerah lasan. Setiap daerah las memiliki nilai kekerasan yang berbeda-beda, hal ini disebabkan oleh adanya siklus *thermal* pada daerah lasan, dimana tiap daerah las memiliki temperatur puncak dan kecepatan pendinginan yang berbeda-beda.

Pengelasan *multi-layer*, kecepatan pendinginan pada tiap *layer* akan berbeda-beda, mengingat *layer* kedua seolah olah akan mendapat *preheat* dari *layer* pertama, sedangkan *layer* kedua seolah-olah mendapat *post weld heat treatment* dari *layer*

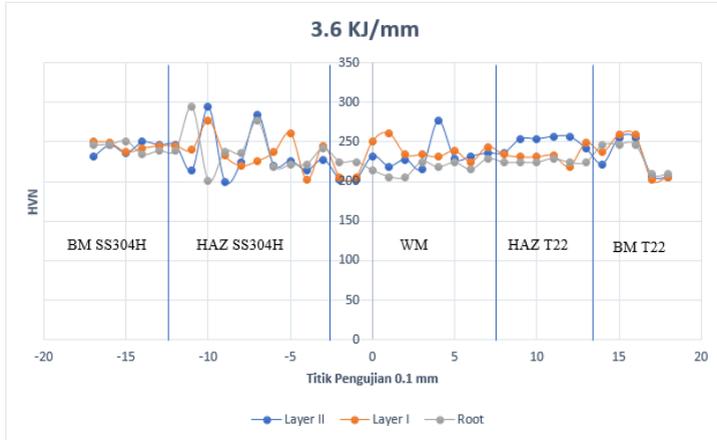
ketiga. Oleh karenanya kemungkinan ketidakseragaman harga kekerasan karena faktor *input* panas bisa saja terjadi, oleh karenanya perlu dilakukan indentasi kekerasan pada bagian *layer II*, *layer I* dan *root* sesuai dengan titik pengujian pada **Gambar 3.4.1**, baik itu *base metal*, HAZ, dan *weld metal*. Indentasi pada proses pengelasan ditunjukkan pada **Gambar 4.5.1**.



Gambar 4.5.1 Indentasi Pada Material Las

4.5.1 Distribusi Kekerasan 3.6 KJ/mm

Data hasil uji kekerasan *micro Vickers* bagian atas yang diperoleh dapat dilihat pada bagian lampiran. Hasil *plotting* data tersebut dalam bentuk grafik ditunjukkan pada **Gambar 4.5.2**.

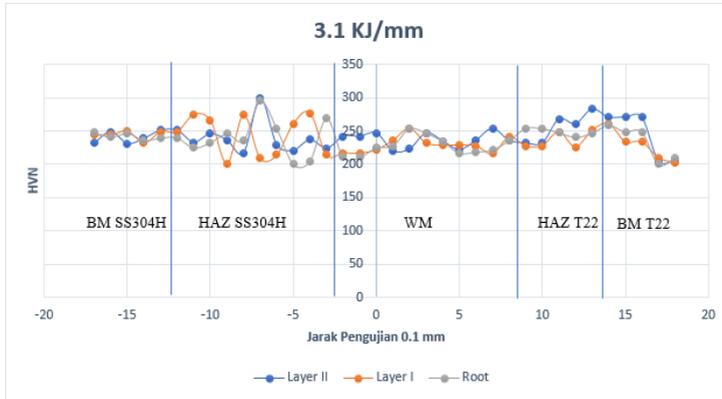


Gambar 4.5.2 Grafik Kekerasan 3.6 KJ/mm

Dari grafik distribusi kekerasan untuk heat input 3.6 KJ/mm nilai kekerasan tertinggi berada pada daerah HAZ SS304H hal ini dikarenakan pada daerah tersebut terjadi presipitasi karbida yang membuat nilai kekerasannya naik drastis, namun kekerasan pada daerah HAZ SS304H tidak naik secara konstan namun fluktuatif dikarenakan jika pengujian tepat pada batas butir tempat terjadinya presipitasi karbida nilai kekerasannya tinggi, tetapi saat titik pengujian didalam butir nilai kekerasan menurun drastis hal ini dikarenakan kromium bermigrasi ke daerah batas butir. Nilai kekerasan antara daerah *layer II*, *layer I* ataupun *root* perbedaannya tidak terlalu signifikan karena pada beberapa titik nilai kekerasannya sama, namun beberapa titik memperlihatkan bahwa nilai kekerasan tertinggi didominasi daerah *layer II* dan *root*. Dimana pada daerah ini kecepatan pendinginan lebih cepat sehingga kekerasan material menjadi cukup tinggi.

4.5.2 Distribusi Kekerasan 3.1 KJ/mm

Data hasil uji kekerasan *micro Vickers* bagian tengah yang diperoleh dapat dilihat pada bagian lampiran. Hasil *plotting data* tersebut dalam bentuk grafik ditunjukkan pada **Gambar 4.5.3**.

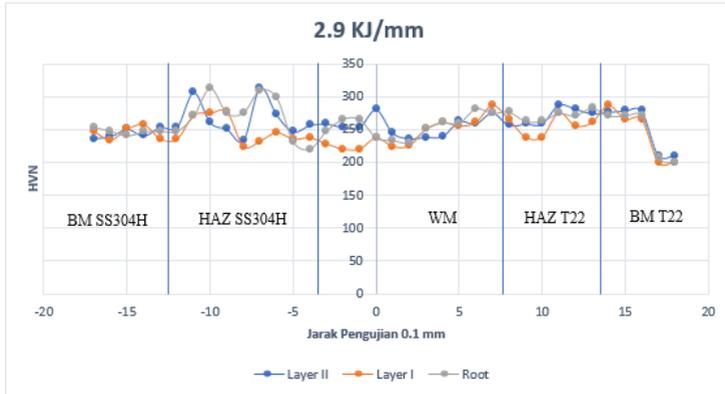


Gambar 4.5.3 Grafik Kekerasan 3.1 KJ/mm

Dari grafik distribusi kekerasan untuk heat input 3.1 KJ/mm nilai kekerasan tertinggi berada pada daerah HAZ SS304H dimana pada daerah tersebut terdapat presipitasi karbida. Nilai kekerasan pada daerah *layer II*, *layer I* atau *root* memiliki nilai yang stabil atau rata hampir disemua daerah kecuali pada titik 9, 10, 11, 12 dimana pada titik tersebut nilai kekerasan fluktuatif dikarenakan pada titik tersebut indentasi dilakukan sepanjang daerah HAZ SS304H yang mengalami presipitasi karbida. Nilai kekerasan maksimal pada material dengan heat input 3.1 KJ/mm adalah 300 HVN.

4.5.3 Distribusi Kekerasan 2.9 KJ/mm

Data hasil uji kekerasan *micro Vickers* bagian bawah yang diperoleh dapat dilihat pada bagian lampiran. Hasil *plotting data* tersebut dalam bentuk grafik, ditunjukkan pada **Gambar 4.5.4**.



Gambar 4.5.4 Grafik Kekerasan 2.9 KJ/mm

Nilai kekerasan material untuk heat input 2.9 KJ/mm, memiliki nilai kekerasan tertinggi pada daerah HAZ SS304H dimana pada daerah tersebut terjadi presipitasi karbida nilai kekerasan pada daerah tersebut relatif stabil satu sama lain dimana presipitasi yang terjadi

4.5.4 Analisa Hasil Pengujian Kekerasan

Sesuai perumusan $H_{net} = \frac{\eta \cdot E \cdot I}{V}$, dengan E konstan dan nilai V yang berubah dengan semakin besarnya nilai I dikarenakan waktu pengelasan untuk arus kecil lebih lama, maka c yang dihasilkan oleh arus yang lebih kecil akan semakin besar dan laju pendinginan akan semakin turun. Dari gambar grafik 4.10 terlihat bahwa kekerasan hasil lasan GTAW dengan arus 2.9 KJ/mm memiliki nilai kekerasan yang paling tinggi dibandingkan dengan *heat input* lain (3.6 KJ/mm dan 3.1 KJ/mm). Hal ini dikarenakan semakin rendahnya H_{net} maka laju pendinginan akan semakin cepat sehingga kekerasan yang dihasilkan akan meningkat. Hal ini sesuai dengan perumusan H_{net} dengan E konstan, dimana apabila nilai I semakin besar maka nilai H_{net} seharusnya akan meningkat namun pada penelitian ini menurun dikarenakan nilai H_{net} dipengaruhi oleh nilai V yang tidak konstan tetapi berbanding terbalik dengan arus. Hal ini disebabkan semakin besar arus, waktu untuk pengelasan logam semakin cepat sehingga nilai V berbanding

terbalik terhadap I dan berbanding lurus dengan H_{net} . Maka semakin besar H_{net} maka laju pendinginannya akan semakin lambat. Laju pendinginan lambat ini menghasilkan nilai kekerasan yang rendah. Sedangkan nilai H_{net} kecil menghasilkan nilai kekerasan yang tinggi dikarenakan laju pendinginan semakin cepat. Maka dari itu nilai heat input semakin besar pada 3.6 KJ/mm di grafik menunjukkan nilai kekerasannya semakin rendah sedangkan heat input pengelasan yang besar membuat nilai kekerasannya semakin tinggi.

HAZ merupakan daerah yang terpengaruh panas saat proses pengelasan. Semakin tinggi *peak temperature* di lokasi HAZ, ukuran butir semakin besar dan pada saat pemanasan sehingga pada saat pendinginan akan menghasilkan struktur yang lebih keras dikarenakan laju pendinginannya semakin cepat. Pendinginan yang lebih cepat (dengan asumsi tidak terbentuk *martensite*) akan menghasilkan struktur mikro berupa *ferrite* dan *pearlite* dimana *pearlite* mempunyai *lamellar* yang halus (rapat). Dengan *lamellar* dari *pearlite* yang rapat kekerasan juga akan naik untuk material T22.

Untuk material SS304H terlihat pada daerah sekitar daerah fusi belum mengalami kenaikan kekerasan namun pada daerah agak jauh dari garis fusi kenaikan meningkat drastis. Hal ini dikarenakan pada daerah tersebut terjadi presipitasi karbida dimana daerah tersebut terpengaruh panas kemudian pendinginannya tidak cepat sehingga melewati temperatur sensititas dalam waktu yang cukup untuk pembentukan karbida pada batas butir. Namun kekerasan pada material SS304H terlihat naik turun kekerasan yang cukup ekstrim hal ini dikarenakan saat pengujian beberapa titik indentasi tepat di presipitasi karbida dan titik tanpa adanya presipitasi dimana pada daerah itu kekerasannya menurun karena *chromium carbide* berpindah ke batas butir membentuk presipitasi karbida.

4.6 Pengujian Kandungan Ferrite

Pengujian ini dilakukan untuk mendeteksi kandungan *ferrite* yang terdeteksi oleh alat *feritscope* karena struktur dari

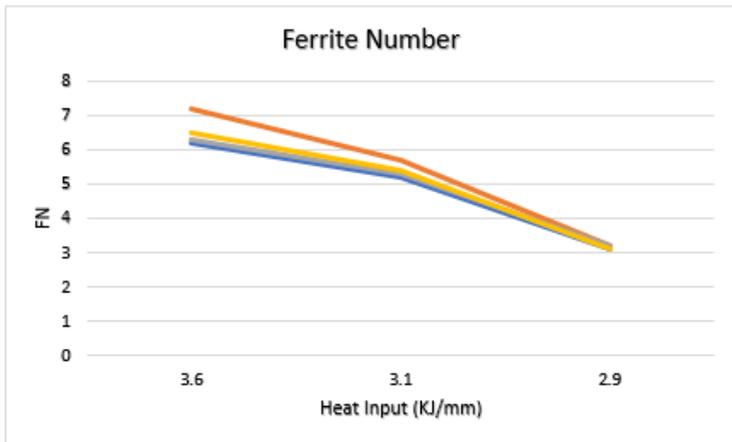
ferrite ini bersifat magnetik. Satuan dari nilai yang didapat selama proses pengujian dari alat ini berupa *ferrite number*.

4.6.1 Kandungan Ferrite Number Pada Weld Metal

Data hasil pengujian kandungan *ferrite* yang diperoleh dapat dilihat pada pada **Tabel 4.6.1**. Untuk hasil *plotting data* dapat dilihat pada **Gambar 4.6.1**.

Tabel 4.6.1 Nilai FN Pada *Weld Metal*

Pengujian	3.6 KJ/mm	3.1 KJ/mm	2.9 KJ/mm
1	6.2	5.2	3.1
2	7.2	5.7	3.2
3	6.3	5.3	3.2
Rata-rata	6.5	5.4	3.1



Gambar 4.6.1 Grafik Nilai Pengujian FN

4.6.2 Analisa FN Pada Weld Metal

MECHANICAL PROPERTIES⁽¹⁾ – As Required per AWS A5.9

	Yield Strength ⁽²⁾ MPa (ksi)	Tensile Strength MPa (ksi)	Elongation %	Ferrite Number
Test Results ^(3, 4) – As-Welded	400 (58)	575 (83)	35	8

⁽¹⁾Typical all weld metal. ⁽²⁾Measured with 0.2% offset. ⁽³⁾See test results disclaimer. ⁽⁴⁾AWS Requirement for ER309 is 0.08% max. carbon.
⁽⁵⁾Results shown correspond with the recommended Lincolnweld® fluxes listed above, but not required per AWS A5.9-12.

Gambar 4.6.2 Standar FN fabrikasi ER309

Dari hasil pengujian FN pada *weld metal* di Gambar 4.6.1 didapat nilai 6,2-7,2 FN untuk heat input 3.6 KJ/mm, untuk heat input 3.1 KJ/mm didapat nilai berkisar antara 5,2 – 5,7 FN, dan untuk heat input 2.9 KJ/mm didapat nilai berkisar antara 3.1 – 3.2 FN. Berdasarkan nilai FN yang ditunjukkan pada Tabel 4.6.1 terlihat semakin tinggi heat input nilai FN juga naik. Dari literature nilai ferrite semakin rendah maka ketahanan korosi stainless steel semakin baik. Untuk ER309 berdasarkan spesifikasi filler nilai FN yang tahan terhadap *hot crack* dan tidak mengurangi ketahanan terhadap korosi material dengan nilai maksimal 8 FN (ditunjukkan oleh gambar 4.14). Jadi dengan pengujian menggunakan feritscope dinyatakan bahwa keberadaan δ – ferrite pada *weld metal* di spesimen dengan heat input 3.6 KJ/mm, 3.1 KJ/mm dan 2.9 KJ/mm masuk batas aman, dimana terjadinya *hot crack* pada spesimen uji akan sukar terjadi. Untuk ketahanan korosi yang paling baik berdasarkan nilai FN terdapat pada material dengan heat input 2.9 KJ/mm diikuti material 3.1 KJ/mm dan dan 2.9 KJ/mm. Kenaikan nilai FN berbanding lurus dengan besarnya *heat input*.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan Analisis hasil, data dan pembahasan pada penelitian ini, maka dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil pengujian kekerasan diantara bagian *layer II*, *layer I* dan *root* nilai kekerasan tertinggi rata-rata ditemukan dibagian *layer II* dan *root* hal ini dikarenakan oleh pengelasan *multi layer* sehingga pada daerah *layer I* mengalami *post heat* dan *pre heat* sekaligus sedangkan pada *root* dan *layer II* hanya mengalami salah satu *treatment*.
2. Kekerasan tertinggi pada semua *heat input* didapatkan didaerah HAZ SS304H, kemudian HAZ T22, logam las, BM SS304H dan BM T22. Daerah dengan kekerasan tertinggi terdapat pada HAZ SS304H dimana pada daerah ini terdapat presipitasi kromium karbida. sehingga kekerasannya cukup tinggi dimana pada *heat input* 2.9 KJ/mm dengan nilai kekerasan 310 HVN. Dari hasil pengamatan distribusi kekerasan pada ketiga *heat input* nilai kekerasan tertinggi berada pada *heat input* 2.9 KJ/mm, lalu *heat input* 3.1KJ/mm dan 3.6 KJ/mm. Jadi semakin besar *heat input* kekerasan material semakin menurun hal ini dikarenakan pendinginan material tersebut semakin lamban begitu pula sebaliknya.
3. Dari hasil pengujian nilai FN pada *weld metal* dengan *heat input* 3.9 KJ/mm memiliki nilai FN yang paling rendah dengan rata-rata 3.1 FN, kemudian nilai rata-rata FN *heat input* 3.1 KJ/mm adalah 5.4 FN dan nilai rata-rata FN *heat input* 3.6 KJ/mm adalah 6.5 FN. Jadi nilai FN berbanding lurus terhadap *heat input*. Dari literatur direkomendasikan *weld metal* yang tahan terhadap *hot crack* serta tanpa mengurangi ketahanan terhadap korosi adalah dengan nilai maksimal 8 FN.

Jadi dengan kedua metode ini, dinyatakan dalam batas aman keberadaan δ -ferrite pada *weld metal*, sehingga kemungkinan terjadinya hot crack sangat kecil.

5.2 Saran

Adapun saran untuk pengembangan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Sebaiknya dilakukan *treatment* panas setelah pengelasan untuk menghindari terbentuknya presipitasi karbida.
2. Perlu dilakukan pengujian lebih lanjut seperti pengujian SEM untuk melihat distribusi *thermal*.
3. Sebaiknya untuk penelitian selanjutnya perlu dilakukan pengujian laju korosi.
4. Dalam pengujian kekerasan dibuat grid agar titik pengujian jelas dan nilai lebih valid.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kou, Sindo, *Welding Metallurgy*, John Wiley and Sons, 2003
- [2] S H Avmer, *Introduction To Physical Metallurgy*, Second Edition McGraw-Hill International Book Company 1982
- [3] William D, Callister, *Fundamental of Materials Science and Engineering*. John Wiley and Sons, 2001
- [4] Lippold, John, & Damian, Kotecki, *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*, John Wiley and Sons, 2005
- [5] Wiryosumarto, Harsono, & Okumura Toshie, *Teknologi Pengelasan Logam*, PT. Pradya Paramita, 2000
- [6] Ceepls, Kay, *Metallography and materialographic specimen preparation, light microscopy image analysis and hardness testing*, ASTM International 2012
- [7] Jeffus, Larry, *Welding Principles and Application*, Delmar Cengage Learning, USA, 2012
- [8] Guohong Chem, Qi Zhang, Junjian Liu, Jiaqing Wang, Xinhai Yu, Jian Hua, et al, 2012 ‘*Microstructure and mechanical properties of T92/Super 304H dissimilar steel weld joints after high-temperature ageing*’, School of Materials Science and Engineering Hafei University of Technology, Hefei 230009, China.
- [9] N. Arivazhagan, Surendra Singh, Satya Prakash, G.M. Reddy, 2010 ‘*Investigation on AISI 304 austenitic stainless steel to AISI 4140 low alloy steel dissimilar joint by gas tungsten arc, electron beam and friction welding*’, School of Mechanical and Building Science, VIT University Vellore 632014, India.
- [10] A. K. Bhaduri, S. Venkadesan, P. Rodriguez, 1993 ‘*Transition metal joint for generators-An overview*’, Metallurgy and Materials Group, India Gandhi Center for Atomic Research, Kalpakkan-603102, India.
- [11] Dinesh W. Rathod, Sunil Pandley, PK. Singh, Rajesh Prasad, 2015 ‘*Experimental Analysis of Dissimilar Metal*

- Weld Joint: Ferritic to Austenitic Stainless Steel*, Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Delhi, New Delhi 110016, India.
- [12] M.K. Samal, M. Seidenfuss, E. Roos, K. Balani, 2010 *'Investigation of failure behavior of ferritic-austenitic type of dissimilar steel welded joints'*, Reactor Safety Division, Bhabha Atomic Research Center Mumbai 400 085, India. Institut für Material Prüfung Werkstoffkunde und Festigkeitslehre, Universität Stuttgart D-70569, Germany. Department of Materials Science and Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur Kanpur 208 016, India.
- [13] Syahrizal Budi Purnomo, 2011, *Pengaruh buttering terhadap kandungan delta ferrite dan sifat mekanik pada pengelasan dissimilar metal antara stainless steel 304 dengan carbon steel A 283 Grade A pada proses SMAW*. Teknik Material Metalurgi ITS.
- [14] ASM Handook vol. 6, *Welding, Brazing, and Soldering*. ASM International 1993
- [15] ASM Handbook, vol. 9. *Metallography and Microstructures*, Vol. 9, ASM International 2004.
- [16] AWS D1.1. *Structural Welding Code – Steel*, AWS International 2003.
- [17] ASTM E 384. *Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*, ASTM International 2002.
- [18] Miller Electric Mfg. Co. *TIG Handbook*. www.MillerWelds.com. 2008
- [19] Farid, Zamil. *Teknologi Pengelasan Pipa Untuk Proses SMAW dan GTAW*. Materi disajikan In House Training. PT. Crossfield IND. Pasuruan, Jawa Timur. November 2013. 1999.
- [20] Lincolnd Electric Company. *Excalibur 7018 and 7018-1*. www.lincolnelectric.com. 2008
- [21] AWS. Vol. 7, ed. 8. *Atlas of Microstructure of Industrial Alloy*. 1972
- [22] Linnert, George. *Welding Metallurgy Carbon And Alloy Steels*. 1996.

LAMPIRAN

Lampiran I

Distribusi Kekerasan Heat Input 2938.81 J/mm

		2938.81 J/mm																					
		SS 304H				HAZ SS304H				VM				HAZ T22				T22					
		HV	L1	L2	HRC	HV	L1	L2	HRC	HV	L1	L2	HRC	HV	L1	L2	HRC	HV	L1	L2	HRC		
LAYER II	1	237	57.88	67.18		251	61.11	60.55	22.5	281	55.72	59.25	27.2	288	57.88	55.57	28.2	211	66.22	66.22	13.5		
	2	240	57.73	66.6		261	65.56	65.56	14.6	245	61.66	61.29	21.4	282	58.45	56.27	27.4	211	66.22	66.22	13.5		
	3	251	57.53	63.96		234	62.98	62.96	19	237	61.29	63.75	19.7	275	58.03	58.03	26.4	201	67.85	67.85	11.2		
	4	241	62	62	20.6	234	62.96	62.96	19	239	62.71	61.91	20.2	277	57.86	57.86	26.7	209	66.61	66.61	13.1		
	5	254	60.16	60.43	23	278	56.63	58.8	26.8	240	61.54	62.64	20.4	279	57.8	57.8	27	209	66.61	66.61	13.1		
	6					273	54.71	61.74	26.1	263	59.38	59.38	24.5										
	7					247	60.93	61.49	21.8	259	59.38	60.17	23.8										
	8					257	60.16	59.87	23.5	276	57.54	58.31	26.5										
	9					259	59.87	59.87	23.8	257	60.16	59.87	23.5										
	10					254	60.16	60.43	23	259	59.87	59.87	23.8										
LAYER I	1	247	60.93	61.49	21.8	272	58.37	58.37	26	238	62.38	62.38	20	276	57.95	57.95	26.5	201	67.84	67.84	11.2		
	2	235	62.76	62.76	19.2	275	58.03	58.03	26.4	225	64.12	64.12	16.7	256	58.63	61.81	23.3	201	67.93	67.93	11.2		
	3	251	56.8	64.81	22.5	277	57.86	57.86	26.7	226	64.09	64.09	17	261	59.64	59.64	24.1	205	67.25	67.25	12.2		
	4	258	59.94	59.94	23.6	225	66.2	62.29	16.7	251	61.11	60.55	22.5	287	56.85	56.85	28.1	207	66.94	66.94	12.6		
	5	236	61.3	64.11	19.5	233	63.1	63.1	18.7	261	65.56	65.56	14.6	266	58.99	58.99	25	201	67.97	67.97	11.2		
	6					246	61.4	61.4	21.6	256	58.63	61.81	23.3										
	7					236	62.62	62.62	19.5	261	59.64	59.64	24.1										
	8					238	61.94	62.76	20	287	56.85	56.85	28.1										
	9					229	62.76	64.45	17.7	266	58.99	58.99	25										
	10					221	63.51	65.94	15.7	239	62.71	61.91	20.2										
ROOT	1	254	60.02	60.7	23	271	59.06	57.92	25.8	238	62.38	62.38	20	275	58.03	58.03	26.4	208	64.01	69.56	12.8		
	2	248	61.16	61.16	22	276	57.54	58.31	26.5	236	62.96	62.96	19	271	58.53	58.53	25.8	200	68.13	68.13	11		
	3	241	61.96	61.96	20.6	275	58.11	58.11	26.4	231	63.41	63.41	18.2	283	57.21	57.21	27.5	201	67.57	68.13	11.2		
	4	247	61.31	61.31	21.8	276	57.92	57.92	26.5	251	61.11	60.55	22.5	271	58.5	58.5	25.8	206	67.05	67.05	12.4		
	5	248	61.1	61.1	22	236	61.3	64.11	19.5	261	65.56	65.56	14.6	271	58.5	58.5	25.8	205	67.3	67.3	12.2		
	6					299	51.18	60.25		260	59.69	59.69	24										
	7					232	63.23	63.23	18.5	282	58.45	56.27	27.4										
	8					221	63.51	65.94	15.7	275	58.03	58.03	26.4										
	9					248	60.57	61.82	22	277	57.86	57.86	26.7										
	10					266	53.91	64.25	25	263	59.38	59.38	24.5										

Lampiran II

Distribusi Kekerasan Heat Input 3184.91 J/mm

		3184.91 J/mm																				
		SS304H				HAZ SS304H				WM				HAZ T22				T22				
		HV	L1	L2	HRC	HV	L1	L2	HRC	HV	L1	L2	HRC	HV	L1	L2	HRC	HV	L1	L2	HRC	
LAYER II	1	232	63.23	63.23	18.5	233	63.1	63.1	18.7	247	57.28	65.19	21.8	268	58.76	58.76	25.3	205	67.24	67.24	12.2	
	2	249	60.97	60.97	22.1	246	61.4	61.4	21.6	220	63.53	66.41	15.5	261	59.59	59.59	24.1	205	67.24	67.24	12.2	
	3	231	63.41	63.41	18.2	236	62.62	62.62	19.5	223	63.10	65.95	16.2	283	57.21	57.21	27.5	207	67.43	66.41	12.6	
	4	239	62.71	61.91	20.2	217	63.6	67.05	14.8	247	60.93	61.49	21.8	271	58.5	58.5	25.8	200	68.13	68.13	11	
	5	251	61.11	60.55	22.5	299	51.18	60.25	29.6	235	62.76	62.76	19.2	271	58.5	58.5	25.8	201	67.57	68.13	11.2	
	6					229	62.76	64.45	17.7	222	63.78	65.49	16						207	67.43	66.41	12.6
	7					221	63.51	65.94	15.7	236	61.3	64.11	19.5						200	68.13	68.13	11
	8					237	57.86	67.18		254	60.02	60.7	23						201	67.57	68.13	11.2
	9					224	64.39	64.39	16.5	236	62.71	62.71	19.5						197	68.88	68.29	10.2
	10					242	61.04	62.77	20	232	63.27	63.27	18.5									
LAYER I	1	244	61.67	61.67	21.2	275	58.03	58.03	26.4	222	63.78	65.49	16	249	60.97	60.97	22.1	210	66.42	66.42	13.3	
	2	244	61.67	61.67	21.2	266	58.99	58.99	25	236	61.3	64.11	19.5	226	64.09	64.09	17	203	66.61	68.56	11.7	
	3	250	60.84	60.84	22.3	201	67.85	67.85	11.2	254	60.02	60.7	23	251	61.11	60.55	22.5	205	66.42	68.01	12.2	
	4	232	63.23	63.23	18.5	295	56.04	56.04	29.1	232	63.27	63.27	18.5	261	65.56	65.56	14.6	209	66.54	66.54	13.1	
	5	249	60.97	60.97	22.1	209	66.61	66.61	13.1	229	63.68	63.68	17.7	234	62.96	62.96	19	207	65.37	68.55	12.6	
	6					214	64.22	67.45	14.2	229	63.68	63.68	17.7									
	7					261	59.59	59.59	24.1	228	63.74	63.74	17.5									
	8					217	65.35	65.35	14.8	216	65.56	65.56	14.6									
	9					279	57.64	57.64	27	241	62	62	20.6									
	10					277	57.81	57.81	26.7	228	63.81	63.81	17.5									
ROOT	1	248	61.16	61.16	22	225	66.2	62.29	16.7	225	63.81	64.69	16.7	248	61.16	61.16	22	200	68.07	68.07	11	
	2	241	61.96	61.96	20.6	233	63.1	63.1	18.7	228	61.9	65.6	17.5	241	61.96	61.96	20.6	210	66.44	66.44	13.3	
	3	247	61.31	61.31	21.8	246	61.4	61.4	21.6	254	60.16	60.43	23	247	61.31	61.31	21.8	209	66.54	66.54	13.1	
	4	236	62.63	62.63	19.5	236	62.62	62.62	19.5	247	60.93	61.49	21.8	259	59.78	59.78	23.8	207	66.94	66.94	12.6	
	5	240	62.14	62.14	20.4	200	68.13	68.13	11	235	62.76	62.76	19.2	249	60.97	60.97	22.1	201	64.22	64.22	11.2	
	6					254	58.39	62.32	23	217	65.35	65.35	14.8									
	7					288	56.75	56.75	28.2	219	63.89	66.17	15.3									
	8					205	67.3	67.3	12.2	222	63.78	65.49	16									
	9					269	58.33	59.06	25.5	236	61.3	64.11	19.5									
	10					211	66.22	66.22	13.5	254	60.02	60.7	23									

Lampiran III

Distribusi Kekerasan Heat Input 3632.18 J/mm

		3632.18 J/mm																				
		SS304H				HAZ SS304H				VM				HAZ T22				T22				
		HV	L1	L2	HRC	HV	L1	L2	HRC	HV	L1	L2	HRC	HV	L1	L2	HRC	HV	L1	L2	HRC	
LAYER II	1	231	63.39	63.39	18.2	214	64.22	67.45	14.2	232	63.17	63.17	18.5	257	60.03	60.03	23.5	207	66.94	66.94	12.6	
	2	246	61.36	61.36	21.6	294	50.39	61.83	29	219	65.12	65.12	15.3	257	60.03	60.03	23.5	205	67.24	67.24	12.2	
	3	236	62.63	62.63	19.5	200	69.78	66.28	11	228	63.74	63.74	17.5	242	61.89	61.89	20.8	210	66.44	66.44	13.3	
	4	250	60.94	60.94	22.3	225	64.22	64.22	16.7	216	65.56	65.56	14.6	222	64.59	64.59	16	201	67.85	67.85	11.2	
	5	246	61.36	61.36	21.6	214	64.22	67.45	14.2	277	57.82	57.82	26.7	255	60.25	60.25	23.1	209	66.61	66.61	13.1	
	6					220	47.77	79.72		229	63.62	63.62	17.7									
	7					226	46.12	71.86		232	63.27	63.27	18.5									
	8					285	53.5	60.47		236	62.71	62.71	19.5									
	9					196	60.44	76.97	10	236	61.3	64.11	19.5									
	10					203	61.65	73.4	11.7	254	60.02	60.7	23									
LAYER I	1	250	55.54	66.35	22.3	240	57.73	66.6	20.4	251	61.11	60.55	22.5	233	63.02	63.02	18.7	202	62.38	73.07		
	2	249	60.99	60.99	22.1	251	57.53	63.96	22.5	261	65.56	65.56	14.6	219	65.01	65.01	15.3	206	67.09	67.09		
	3	237	62.57	62.57	19.7	233	57.63	68.41	18.7	234	62.96	62.96	19	249	60.99	60.99	22.1	211	61.51	71.04		
	4	242	61.89	61.89	20.8	220	47.77	79.72		234	62.96	62.96	19	237	62.57	62.57	19.7	207	63.59	70.35		
	5	245	57.03	65.96	21.4	226	46.12	71.86		231	63.41	63.41	18.2	259	59.79	59.79	23.8	200	64.25	71.94		
	6					237	57.86	67.18	19.7	239	62.71	61.91	20.2									
	7					277	51.04	64.67	26.7	225	64.14	64.14	16.7									
	8					202	62.38	73.07		244	61.68	61.68	21.2									
	9					294	54.75	57.47	29	234	62.94	62.94	19									
	10					206	67.09	67.09		231	63.4	63.4	18.2									
ROOT	1	246	61.33	61.33	21.6	294	50.39	61.83	29	214	65.83	65.83	14.2	229	63.59	63.59	17.7	209	51.12	82.03		
	2	247	61.22	61.22	21.8	201	62.16	73.66	11.2	206	67.01	67.01	12.4	224	64.32	64.32	16.5	209	51.06	82.1		
	3	251	61.11	60.55	22.5	238	51.11	73.58	20	205	67.24	67.24	12.2	224	64.32	64.32	16.5	205	57.62	76.81	12.2	
	4	234	62.96	62.96	19	236	53	72.23	19.5	225	64.22	64.22	16.7	246	61.33	61.33	21.6	205	67.25	67.25	12.2	
	5	239	62.71	61.91	20.2	221	51.08	78.35	15.7	218	65.25	65.25	15.1	247	61.22	61.22	21.8	196	65.53	72.02		
	6					219	53.01	77	15.3	224	64.27	64.27	16.5									
	7					277	51.04	64.67	26.7	215	65.72	65.72	14.4									
	8					222	64.67	64.67	16	229	63.59	63.59	17.7									
	9					242	61.83	61.83	20.8	224	64.32	64.32	16.5									
	10					225	61.93	66.45	16.7	224	64.32	64.32	16.5									

Lampiran IV

Komposisi Kimia Hasil Pengujian Spektrometer

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Ti	Pb	Al	Co	W	V	Nb	N	B	Fe
SS3 04H	0.6 77 6	0.4 144 8	1.1 35 0	0.0 313 8	0.0 018 5	7.6 22 5	18. 37 6	0.4 458 3	0.2 204 6	0.1 83 9	0.01 15R 6	0.0 154 6	0.3 484 2	0.0 293 3	0.0 268 7	0.0 108 5	0.40 781 R	0.0 006 9	3.6 26 6

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Ti	Pb	Al	Co	W	V	Nb	N	Sn	B	Fe	As	SB
T22	0.1 140 4	0.2 021 7	0.4 321 1	0.1 05 1	0.0 044 8	0.0 404 3	2.0 22 0	0.8 992 5	0.0 487 4	0.0 015 8	-	0.0 013 6	0.0 003 0	-	-	-	0.40 781 R	-	-	3.6 26 6	0.0 020 7	0.0 187 9

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di kota Mataram pada tanggal 20 Desember 1995. Penulis merupakan anak pertama dari pasangan Mahmud Abdullah dan Maemunah Ishaq. Pendidikan formal yang ditempuh penulis diawali bersekolah di TK Al-Falaq Mataram, kemudian melanjutkan di SDN 16 Mataram. Penulis melanjutkan jenjang sekolahnya di SMP Negeri 2 Mataram dan SMA Negeri 1 Mataram. Penulis masuk ke perguruan tinggi Institut Teknologi Sepuluh November Surabaya pada tahun 2013 di jurusan Teknik Mesin FTI-ITS. Untuk fokus bidang studi, penulis memutuskan mengambil bidang studi Metalurgi.

Selama kuliah di jurusan Teknik Mesin, penulis aktif dalam berbagai kepanitiaan dan organisasi. Penulis pernah menjadi staff SOSMAS BEM FTI ITS dan pernah menjadi Dewan Presidium jurusan Teknik Mesin ITS sebagai komisi eksekutif. Selain itu penulis juga aktif menjadi panitia acara BEM ITS, BEM FTI dan HMM seperti Interval, Gerigi, ITS Green Campaign, Tendaku, KWU Fair, LKMM, Mechanical Skill, dan Mechanical City. Dari semua kegiatan tersebut penulis banyak belajar mengenai kemampuan soft skill dan hard skill. Penulis memiliki hobi membaca buku, berwisata kuliner, menjelajah hutan dan pantai. Saat SMA penulis aktif menjadi anggota PALASMA (Pecinta Alam SMAN 1 Mataram). Penulis sangat terbuka dengan siapa pun yang ingin berdiskusi tentang Tugas Akhir ini penulis dapat dihubungi via email fitri.aditiya28@gmail.com.