



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TL 184834

**PENGARUH HEAT INPUT DAN VARIASI
KOMPOSISI SHIELDING GAS TERHADAP
STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIK
SAMBUNGAN BAJA KARBON RENDAH JIS G3101
HASIL GAS METAL ARC WELDING (GMAW)
SEBAGAI APLIKASI ARM EXCAVATOR DI PT. X**

AJENG PRAMESWATI
NRP 0251154000021

Dosen Pembimbing
Wikan Jatimurti, ST., M.Sc.
Alvian Toto Wibisono, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



TUGAS AKHIR - TL 141584

PENGARUH HEAT INPUT DAN VARIASI KOMPOSISI SHIELDING GAS TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIK SAMBUNGAN BAJA KARBON RENDAH JIS G3101 HASIL GAS METAL ARC WELDING (GMAW) SEBAGAI APLIKASI ARM EXCAVATOR DI PT.X

**AJENG PRAMESWATI
NRP 0251154000021**

**Dosen Pembimbing
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc.
Alvian Toto Wibisono, S.T., M.T.**

**DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL184834

EFFECT OF HEAT INPUT AND VARIATION OF SHIELDING GAS COMPOSITION ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF LOW CARBON STEEL JIS G3101 JOINT ON GAS METAL ARC WELDING (GMAW) AS ARM EXCAVATOR AT PT.X

**AJENG PRAMESWATI
NRP 0251154000021**

**Advisors
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc.
Alvian Toto Wibisono, S.T., M.T.**

**DEPARTEMENT OF MATERIAL ENGINEERING
Faculty Of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute Of Technology
Surabaya 2019**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**PENGARUH HEAT INPUT DAN VARIASI
KOMPOSISI SHIELDING GAS TERHADAP
STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIK
SAMBUNGAN BAJA KARBON RENDAH JIS G3101
HASIL GAS METAL ARC WELDING (GMAW)
SEBAGAI APLIKASI ARM EXCAVATOR DI PT.X**

TUGAS AKHIR

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

Oleh:

AJENG PRAMESWATI
NRP 0251154000021

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc (Pembimbing I)
2. Alvian Toto Wibisono S.T., M.T. (Pembimbing II)



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**PENGARUH HEAT INPUT DAN VARIASI KOMPOSISI
SHIELDING GAS TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN
SIFAT MEKANIK SAMBUNGAN BAJA KARBON
RENDAH JIS G3101 HASIL GAS METAL ARC WELDING
(GMAW) SEBAGAI APLIKASI ARM EXCAVATOR DI
PT.X**

Nama : Ajeng Prameswati
NRP : 0251154000021
Departemen : Teknik Material
Pembimbing : Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc.
Co-Pembimbing : Alvian Toto Wibisono S.T., M.T.

Abstrak

JIS G3101 SS400 merupakan salah satu jenis baja struktural yang paling banyak digunakan dalam konstruksi. Pada proses pengelasan baja, Gas Metal Arc Welding (GMAW) merupakan teknik pengelasan paling banyak digunakan yang menggunakan CO₂ dan Argon sebagai gas sebagai pelindung dari oksidasi. Variasi nilai heat input pengelasan juga mempengaruhi hasil las. Material carbon steel mengalami perubahan struktur dan butir serta sifat mekanik karena efek dari pemanasan dan pendinginan akibat pengelasan. Mengacu pada uraian diatas, penulis mengkaji bagaimana pengaruh heat input dan komposisi shielding gas terhadap struktur mikro dan sifat mekanik sambungan las JIS G3101 SS400. heat input yang diteliti adalah 620, 720 dan 740 J/mm. Sementara untuk komposisi shielding gas yang digunakan adalah 100% CO₂, 80% CO₂ + 20% Ar. Dari hasil pengujian didapatkan bahwa untuk kekerasan dan kekuatan impact variasi shielding gas 80% CO₂ + 20% Ar memiliki hasil yang lebih bagus sedangkan untuk uji tarik hasil yang lebih baik didapatkan pada shielding gas 100% CO₂.

Kata Kunci: Gas Metal Arc Welding, JIS G30101 SS400, heat input, shielding gas

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**EFFECT OF HEAT INPUT AND VARIATION OF
SHIELDING GAS COMPOSITION ON
MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES
OF LOW CARBON STEEL JIS G3101 JOINT ON GAS
METAL ARC WELDING (GMAW) AS ARM EXCAVATOR
AT PT.X**

Name : Ajeng Prameswati
NRP : 0251154000021
Departement : Teknik Material
Advisor : Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc.
Co-Advisor : Alvian Toto Wibisono S.T., M.T.

Abstract

JIS G3101 SS400 is one of the most widely used structural steel in construction. In the process of steel welding, Gas Metal Arc Welding (GMAW) is the most widely used welding technique that uses CO₂ and Argon as a gas as a protector from oxidation. Variation in the value of welding heat input also affect the weld results. Carbon steel material will experience structural and grain changes and mechanical properties due to the effects of heating and cooling to welding. Referring to the description above, the author examines the influence of heat input and composition of shielding gas on the microstructure and mechanical properties of JIS G3101 SS400 welded joints. The heat inputs to be studied are 620, 720 and 740 J / mm. While the composition of shielding gas used is 100% CO₂, 80% CO₂ + 20% Ar. From the test results it was found that for the hardness and impact strength of shielding gas 80% CO₂ + 20% Ar had better results for the tensile than on shielding gas 100% CO₂.

Keywords: Gas Metal Arc Welding, JIS G30101 SS400, heat input, shielding gas.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT karena atas berkat dan karunia-Nya, penulis dapat melaksanakan tugas akhir dan menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul: **“Pengaruh Heat Input dan Variasi Komposisi Shielding Gas terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Sambungan Baja Karbon Rendah JIS G3101 Hasil Gas Metal Arc Welding (GMAW) Sebagai Aplikasi Arm Excavator di PT. X”**. Adapun pelaksanaan dan penyusunan laporan tugas akhir ini dilakukan untuk memenuhi salah satu syarat studi di Departemen Teknik Material, Fakultas Teknologi Industri (FTI), Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS).

Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu penulis dari awal pelaksanaan tugas akhir, penentuan topik laporan hingga selesainya penyusunan laporan tugas akhir ini, diantaranya:

1. Kedua Orang Tua, Nurhuda Dodik Hariyono dan Luluk Irawati yang selalu memberikan dukungan moril dan materil serta doa yang tidak henti untuk penulis.
2. Bapak Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng., selaku Ketua Departemen Teknik Material.
3. Bapak Dr. Sungging Pintowantoro, ST, MT selaku dosen wali yang telah membimbing, memberi saran dan arahan serta nasihat selama perkuliahan di Departemen Teknik Material.
4. Bapak Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc. selaku pembimbing I tugas akhir yang telah membimbing, memberi saran dan arahan serta nasihat dalam pelaksanaan tugas akhir dan penyusunan laporan tugas akhir ini.
5. Bapak Alvian Toto Wibisono S.T., M.T. selaku pembimbing II tugas akhir yang telah membimbing, memberi saran dan arahan serta nasihat dalam pelaksanaan tugas akhir dan penyusunan laporan tugas akhir ini.
6. Bapak Nadhif, Bapak Dodi, Ibu Liza, Bapak Agus, Bapak Makruf, Bapak Daryadi, Bapak Baji selaku pembimbing

perusahaan di PT. Komatsu Indonesia yang banyak memberi dukungan dan membantu kelancaran selama proses pembuatan spesimen dan pengujian untuk Tugas Akhir.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan laporan tugas akhir ini, oleh karena itu, saran dan kritik sangat diharapkan penulis sebagai evaluasi untuk penelitian selanjutnya. Penulis berharap laporan ini dapat memberikan manfaat untuk mahasiswa, perusahaan dan masyarakat luas.

Surabaya, Juli 2019

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xvii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 JIS G3101 SS400.....	5
2.2 Pengelasan	6
2.3 Pengelasan GMAW (<i>Gas Metal Arc Welding</i>).....	7
2.4 Elektroda ER70S-G KC26	21
2.5 Parameter Las	21
2.6 Masukan Panas (<i>Heat Input</i>)	29
2.7 Siklus Termal pada Pengelasan	32
2.8 <i>Interpass Temperature</i>	39
2.9 Mikrostruktur Material Las	41
2.10 <i>Cooling Rate</i>	43
2.11 Struktur Mikro	45
2.12 Penelitian Sebelumnya	50
BAB III METODOLOGI	
3.1 Diagram Alir.....	57
3.2 Rancangan Penelitian	59
3.3 Bahan Penelitian	60
3.4 Alat Penelitian	61
3.5 Variabel Penelitian	68
3.6 Prosedur Penelitian.....	69
3.7 Proses Pengujian.....	74

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengamatan Visual dan Ultrasonik Test Hasil Las.....79
4.2 Pengamatan Makroskopik 85
4.3 Pengamatan Mikroskopik 89

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan 113
5.1 Saran 114

DAFTAR PUSTAKA xviii

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Proses GMAW: (a) Proses Keseluruhan (b) Area Lasan yang Diperbesar (Sindo Kou, 2003) ...	8
Gambar 2.2 (a) Tahap Awal, (b) Deformasi dari Logam Cair karena Tekanan pada <i>Arc Root</i> , (c) Pemisahan Tetesan akibat Tegangan Permukaan, (d) Busur Bergerak Menuju Ujung Elektroda, (e) Pemisahan Tetesan Akibat Adanya Gaya Elektromagnetik. (Becken, 1936) .	10
Gambar 2.3 Proses Transfer <i>Short-Circuiting</i> (www.lincolnelectric.com)	11
Gambar 2.4 Pengaruh Arus dan Voltase pada Proses Trasfer Logam <i>Short-Circuiting</i> (www.lincolnelectric.com)	12
Gambar 2.5 Karakteristik <i>Globular Weld Metal Transfer</i> (www.lincolnelectric.com)	13
Gambar 2.7 Penggunaan Elektroda DCEN dan DCEP (Klas Weman, 2012).....	19
Gambar 2.8 Definisi dari Jarak Kontak dari Ujung ke Benda Kerja (1) dan Perpanjangan Kawat (2) (Klas Weman, 2012)	27
Gambar 2.9 Efek dari posisi elektroda dan teknik pengelasan (Klas Weman, 2012)	28
Gambar 2.10 Sudut dan posisi di seluruh arah pengelasan <i>fillet</i> (Klas Weman, 2012).....	28
Gambar 2.12 (a) Penempatan titik termokopel sepanjang jalur pergerakan sumber panas (b) Siklus termal yang diproduksi pada tiap titik terhadap semua respon (H. Granjon, 1991)	33
Gambar 2.13 Skema yang menunjukkan pembentukan <i>quasi-steady-state</i> (atau kuasi-stasioner) kondisi dalam lasan yang dibuat berdasarkan selang waktu setelah pemindahan sumber panas (H. Granjon, 1991).....	33

Gambar 2.14	Skema dari temperatur-waktu untuk tiga titik yang terletak sepanjang garis yang tegak lurus dengan lasan selama sumber panas bergerak. (H. Granjon, 1991).....	34
Gambar 2.25	Sistem koordinat (x, y, z) bergerak searah dengan sumber panas (Sindo Kou, 2012)	36
Gambar 2.16	Aliran panas dua dimensi selama proses pengelasan pada pelat tipis.....	37
Gambar 2.17	Fungsi model Bessel untuk orde dua dan nol (Sindo Kou, 2012).....	38
Gambar 2.18	properti termal untuk beberapa material (Sindo Kou, 2012).....	39
Gambar 2.19	Efek temeperatur <i>interpass</i> pada properti mekanik dari 490 MPa dengan pengelasan GMAW (Steel Construction Engineering, 2000).41	
Gambar 2.20	Skema diagram dari sub-zona dari HAZ yang dihubungkan dengan diagram fasa untuk paduan 0,15% C (Lee Alan Aucot, 2015)	42
Gambar 2.21	Diagram <i>Time Temperature Transformation</i> dan <i>Continous Cooling Transformation</i> (Rahul, 2014)	43
Gambar 2.22	Struktur Ferit (George F. Vander, 1999).....	46
Gambar 2.23	Struktur dari (a) Perlit Kasar (b) Perlit Halus (Calister, 2008)	47
Gambar 2.24	Struktur dari Bainit (Calister, 2008).....	48
Gambar 2.24	Struktur dari Martensit (Calister, 2008)	49
Gambar 2.25	Skema Percobaan	51
Gambar 2.26	Nilai kekerasan pada tiap-tiap daerahuntuk gas pelindung bervariasi.....	51
Gambar 2.27	Hasil uji struktur mikro baja SS400 daerah HAZ dengan perbesaran 500x: (a) argon murni, (b) argon 82%, dan (c) karbondioksida murni.	52
Gambar 2.28	Hasil uji struktur mikro baja SS400 daerah weld metal dengan pembesaran 500x: (a) argon	

Gambar 4.4	Foto Makroskopik Spesimen dengan <i>Shielding gas</i> CO ₂ 100% dengan Parameter <i>Heat Input</i> (a) 620 J/mm.....	85
Gambar 4.5	Foto Makroskopik Spesimen dengan <i>Shielding gas</i> CO ₂ 80% + 20% Ar dengan Parameter <i>Heat Input</i> (a) 620 J/mm.....	87
Gambar 4.6	Struktur Mikro <i>Shielding gas</i> 100% CO ₂ dan <i>Heat Input</i> 620 J/mm dengan (a) <i>Base Metal</i> (b) HAZ dan (c) <i>Weld Metal</i> perbesaran 500x	90
Gambar 4.7	Struktur Mikro <i>Shielding gas</i> 100% CO ₂ dan <i>Heat Input</i> 720 J/mm dengan (a) <i>Base Metal</i> (b) HAZ dan (c) <i>Weld Metal</i> perbesaran 500x	91
Gambar 4.8	Struktur Mikro <i>Shielding gas</i> 100% CO ₂ dan <i>Heat Input</i> 740 J/mm dengan (a) <i>Base Metal</i> (b) HAZ dan (c) <i>Weld Metal</i> perbesaran 500x	92
Gambar 4.9	Struktur Mikro <i>Shielding gas</i> 80% CO ₂ + 20% Ar dan <i>Heat Input</i> 620 J/mm dengan (a) <i>Base Metal</i> (b) HAZ dan (c) <i>Weld Metal</i> perbesaran 500x.....	94
Gambar 4.10	Struktur Mikro <i>Shielding gas</i> 80% CO ₂ + 20% Ar dan <i>Heat Input</i> 720 J/mm dengan (a) <i>Base Metal</i> (b) HAZ dan (c) <i>Weld Metal</i> perbesaran 500x.....	95
Gambar 4.11	Struktur Mikro <i>Shielding gas</i> 80% CO ₂ + 20% Ar dan <i>Heat Input</i> 740 J/mm dengan (a) <i>Base Metal</i> (b) HAZ dan (c) <i>Weld Metal</i> perbesaran 500x.....	96
Gambar 4.11	Grafik nilai distribusi kekerasan spesimen dengan <i>shielding gas</i> 100% CO ₂	101
Gambar 4.12	Grafik nilai distribusi kekerasan spesimen dengan <i>shielding gas</i> 80% CO ₂ + 20% Ar	102
Gambar 4.13	Grafik nilai distribusi kekuatan <i>impact</i> spesimen dengan <i>shielding gas</i>	105
Gambar 4.14	Grafik Nilai Distribusi UTS Spesimen dengan Komposisi <i>Shielding gas</i>	107

Gambar 4.15	Grafik Perbandingan Elongasi Spesimen dengan Komposisi <i>Shielding gas</i>	109
Gambar 4.16	(a) Kurva Perbandingan Gaya dan Pertambahan Panjang untuk <i>Shielding gas</i> 100% CO ₂ (b) untuk <i>Shielding gas</i> 80% CO ₂ + 20% Ar	110
Gambar 4.17	Patahan Tarik <i>Shielding gas</i> 100% CO ₂ (a) 620 J/mm (b) 720 J/mm (c) 740 J/mm; Untuk <i>Shielding gas</i> 80% CO ₂ + 20% Ar (d) 620 J/mm (e) 720 J/mm (f) 740 J/mm	111

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi Kimia Baja SS400 (PT. Komatsu).....	5
Tabel 2.2 Sifat Mekanik SS400 (PT. Komatsu)	6
Tabel 2.3 Spesifikasi elektroda ER70S-G KC26 (PT. Komatsu).....	21
Tabel 2.4 Arus Pengelasan (I) berdasarkan ketebalan material (Urguy Soy, 2011)	22
Tabel 2.5 Kecepatan pengelasan menurut ketebalan material (s), arus (I), dan diameter elektroda (Ugur Soy, 2011)	25
Tabel 3.1 Rencana Kegiatan Penelitian	59
Tabel 3.2 Rancangan Pengujian	60
Tabel 3.3 Komposisi Kimia SS400	60
Tabel 3.4 Komposisi Kimia ER70S-G KC26.....	60
Gambar 3.9 Kertas Abrasif	65
Gambar 3.10 Mikroskop Optik.....	66
Tabel 3.5 Variabel Penelitian	68
Tabel 3.6 Penggunaan Etsa (ASTM, 2012):	75
Tabel 4.1 Hasil Inspeksi Pengujian Ultrasonik.....	84
Tabel 4.2 Jumlah <i>Splatter</i> Berdasarkan Komposisi <i>Shielding gas</i>	84
Tabel 4.3 Hasil Pengukuran Lebar HAZ Terhadap <i>Heat Input</i>	88
Tabel 4.4 Tabel Komparasi Fasa	98
Tabel 4.5 Nilai Distribusi Kekerasan Masing-masing Spesimen	100
Tabel 4.6 Nilai Energi dan Kekuatan <i>Impact</i> Tiap Spesimen	104
Tabel 4.7 Hasil Pengujian Tarik	107
Tabel 4.8 Hasil Presentase Elongasi.....	108

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring perkembangan peradaban yang semakin maju, berbagai fasilitas terus dibangun untuk memenuhi kebutuhan manusia. Pada pembangunannya, baja merupakan komponen yang sangat penting bagi pembangunan. Hal ini dikarenakan baja merupakan baja yang memiliki kekuatan, ringan dan mudah untuk di fabrikasi. Baja struktural merupakan baja yang paling banyak digunakan dalam konstruksi. Baja struktural banyak digunakan karena memiliki sifat yang mudah di sambungkan dengan material lain baik menggunakan teknik *bolts* dan teknik las (Jack C. McCormac, 2011). SS400 merupakan salah satu jenis baja struktural yang paling banyak digunakan dalam konstruksi baik itu untuk digunakan pada kapal, bangunan, jembatan maupun pembuatan alat berat. Baja ini termasuk baja karbon paduan rendah yang memiliki kandungan karbon kurang dari 0,2%. SS400 memiliki sifat kemampuan yang kuat dan memiliki titik leleh yang rendah dari baja pada umumnya. Pada proses pengelasan, *proses finishing* sangat ingin untuk dikurangi karena besar dari biaya dan lamanya proses untuk menghasilkan suatu produk oleh sebab itu perusahaan akan mencari cara untuk mengurangi biaya *surface finishing* salah satunya yaitu dengan mengganti *shielding gas* ke gas yang lebih *inert*.

Pengelasan didefinisikan sebagai penyambungan dua logam atau paduan logam dengan memanaskan diatas batas cair atau dibawah batas cair logam disertai penetrasi maupun tanpa penetrasi, serta diberi logam pengisi atau tanpa logam pengisi disebut. Yang termasuk prosedur pengelasan adalah pemilihan parameter las seperti: tegangan busur las, besar arus las, penetrasi, kecepatan pengelasan dan beberapa kondisi standar pengelasan seperti:

bentuk alur las, tebal pelat, jenis elektroda, diameter inti elektroda, dimana parameter-parameter tersebut mempengaruhi sifat mekanik logam las. (Riswan Eko Wahyu Susanto, 2017)

Pada proses pengelasan baja, *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) merupakan teknik pengelasan yang menggunakan CO₂ dan Argon sebagai gas sebagai pelindung dari oksidasi. Metode pengelasan ini secara luas digunakan untuk meningkatkan kestabilan dari semburan busur, bentuk lasan serta kekuatan termal dari busur. Adanya perbedaan sifat termal dan karakteristik dari *shielding gas* tersebut, maka akan mempengaruhi busur yang dihasilkan dan metode dari transfer metal yang dihasilkan (Yong Zhao dkk, 2018). Penyetelan kuat arus pengelasan juga akan mempengaruhi hasil las. Bila kuat arus yang digunakan terlalu rendah akan menyebabkan sukarnya penyalaan busur listrik dan mengakibatkan busur listrik yang terbentuk menjadi tidak stabil (Trinova Budi Santoso, 2015).

Material terutama *carbon steel* akan mengalami perubahan struktur dan butir dan sifat mekanik karena efek dari pemanasan dan pendinginan akibat pengelasan. Struktur yang tidak homogen ini menyimpan banyak tegangan sisa yang membuat material tersebut memiliki sifat yang lebih keras namun keunggulannya lebih rendah. Mengacu pada uraian diatas, penulis akan mengkaji bagaimana analisa perbandingan kekuatan material SS400 dengan variasi komposisi dari *shielding gas* dan variasi *heat input*.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh komposisi *Shielding gas* pada hasil pengelasan JIS G30101 SS400 menggunakan metode pengelasan GMAW?
2. Bagaimana pengaruh variasi *heat input* terhadap hasil pengelasan JIS G30101 SS400 menggunakan metode pengelasan GMAW?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah atau variable yang diabaikan dalam penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Kondisi lingkungan tidak berubah pada saat pengujian.
2. Ketebalan pelat material benda kerja yang digunakan dianggap merata.
3. Kondisi mesin las, alat uji dan alat ukur dalam kondisi terkalibrasi
4. Luas benda kerja sebelum dilas tidak dilakukan variasi dan dianggap konstan pada semua spesimen benda kerja.

1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Menganalisa pengaruh komposisi *Shielding gas* pada hasil pengelasan JIS G30101 SS400.
2. Menganalisa pengaruh variasi *heat input* terhadap hasil pengelasan JIS G30101 SS400.

1.5 Manfaat Penelitian

Dari penelitian ini, diharapkan dapat memberi manfaat seperti berikut:

1. Mengetahui peningkatan sifat mekanis baja melalui variasi komposisi *Shielding gas* dan kuat arus menggunakan mesin las GMAW.
2. Dapat dijadikan referensi untuk pembuatan sambungan las menggunakan variasi *heat input*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 JIS G3101 SS400

SS400 adalah kelas material dan yang didefinisikan dalam standar JIS G3101. JIS G3101 adalah standar material Jepang untuk pelat baja, lembaran, strip untuk penggunaan struktural umum. Kualitas struktural baja canai panas SS400 lebih dapat diandalkan dalam kekuatan tariknya. Baja JIS G3101 SS400 merupakan baja karbon rendah dengan sedikit kandungan Si. Beberapa hasil penelitian menemukan bahwa kandungan Si antara 0,06 dan 0,037% di dalam baja dapat meningkatkan reaksi antara Fe dan Zn selama proses galvanisasi. Akibatnya, pertumbuhan lapisan intermetalik Fe-Zn pada baja yang mengandung Si relatif cepat. Pertumbuhan lapisan tertinggi terjadi pada kandungan Si sekitar 0,07%. Reaksi tersebut akan menurun dengan menurunnya kandungan Si hingga 0,2% dan akan meningkat kembali pada kandungan Si mendekati 0,37%. Berikut adalah Tabel komposisi kimia dari baja SS400 yang ditunjukkan pada Tabel 2.1 dan sifat mekanik SS400 yang ditunjukkan oleh Tabel 2.2.

Tabel 2.1 Komposisi Kimia Baja SS400 (PT. Komatsu)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	CE
SS400P	0.18	0.18	0.57	0.017	0.005	0.017	0.024	0.054	0.0082	0.307
	0.19	0.18	0.58	0.017	0.004	0.018	0.026	0.054	0.008z	0.312
	0.18	0.19	0.59	0.0141	0.005	0.023	0.024	0.054	0.0045	0.309
	0.18	0.19	0.58	0.0146	0.004	0.023	0.023	0.054	0.0046	0.304
									Ave	0.31

Tabel 2.2 Sifat Mekanik SS400 (PT. Komatsu)

Grade	Yield Strength min (Mpa)		Tensile Strength (Mpa)	Elongation min. %			Impact Resistance min (J)
	Thickness < 16 mm	Thickness > 16 mm		Thickness < 5 mm	Thickness 5-16 mm	Thickness >16 mm	
SS400	245	235	400-510	21	17	21	Tergantung

2.2 Pengelasan

Pengelasan adalah proses penyambungan beberapa batang logam dalam keadaan cair menggunakan energi panas (Wiryosumarti, 2000). Pengelasan juga dapat diartikan sebagai teknik penyambungan logam dengan cara mencairkan sebagian logam induk dan logam pengisi dengan menggunakan tekanan untuk mendapatkan sebuah sambungan yang kontinu. Beberapa keuntungan yang didapatkan dari proses pengelasan antara lain:

- Pengelasan menghasilkan sambungan permanen. Bagian yang disambungkan menjadi satu kesatuan
- Daerah pengelasan bisa lebih kuat dari daerah asal (*Parent materials*) jika filler yang digunakan memiliki sifat kekuatan yang jauh lebih baik ketimbang parent material dan ketepatan teknik pengelasan yang dipilih
- Ekonomis baik secara penggunaan material dan biaya fabrikasi
- Tidak terbatas pada lingkungan pabrik, pengelasan dapat dilakukan di mana saja

Terdapat lebih dari 50 jenis pengelasan yang dikategorikan oleh American Welding Society (AWS volume 1). Namun pada umumnya, pengelasan dapat dikategorikan menjadi dua kelompok besar: (1) *Fusion welding* dan (2) *solid-state welding/pressure*.

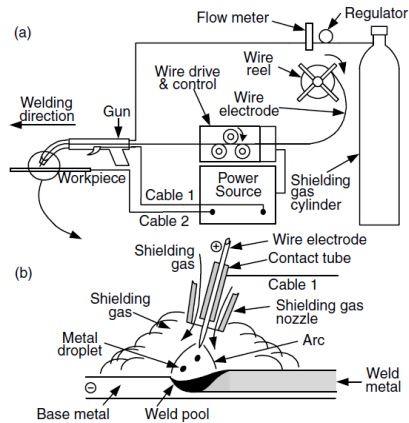
Fusion welding menggunakan sumber panas sebagai pembentuk busur listriknya dan sebagai energi untuk melelehkan *base metal*. Dalam pengerjaannya, *filler* ditambahkan ke dalam *molten pool* untuk memperbaiki sifat daerah penyambungan. Pelindung juga dibutuhkan sebagai pelindung untuk mencegah oksigen bereaksi dengan sambungan logam. Pelindung ini dapat berupa gas yang

tidak bereaksi dengan sambungan logam atau berupa fluks yang mencair bersama sambungan logam sehingga dapat melindungi sambungan logam cair dari oksidasi. Fusion welding dapat dibagi lagi dalam beberapa kategori: (1) *Arc Welding* (AW), (2) *Resistance welding* (RW), (3) *Oxyfuel welding* (OFW) dan *fusion welding* lainnya.

Sedangkan *solid-state welding* adalah proses pengelasan dibawah temperatur leleh benda uji yang menggunakan kombinasi antara panas dan tekanan. Pada kombinasi panas dan tekanan, temperatur panas yang dihasilkan masih dibawah temperatur leleh material yang dilas. Tidak ada filler metal yang digunakan pada proses ini. Adapun pengelompokannya adalah sebagai berikut: (1) *Diffusion Welding* (DFW), (2) *Friction Welding* (FW) dan (3) *Ultrasonic Welding* (USW) (Mikell P. Groover, 2010).

2.3 Pengelasan GMAW (*Gas Metal Arc Welding*)

Proses pengelasan *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) merupakan proses pengelasan yang pengaplikasiannya banyak digunakan di dunia industri. Hal ini disebabkan oleh fleksibilitasnya yang tinggi yang memungkinkan pengelasan berbagai macam material dengan ketebalan yang berbeda, dan mudah dalam hal otomasi dan pengoperasiannya. Energi untuk proses pengelasan ini diperoleh dari busur listrik. Busur listrik ini terbentuk diantara permukaan benda kerja dengan ujung kawat elektroda yang keluar dari *nozzle* bersama sama dengan gas pelindung. Proses GMAW yang ditunjukkan oleh Gambar 2.1 biasanya dioperasikan secara semi otomatis, sehingga dengan pesatnya perkembangan dunia konstruksi yang membutuhkan pengelasan yang cepat dengan kualitas tinggi, maka proses GMAW sudah dijadikan alternatif proses pengelasan yang banyak digunakan.



Gambar 2.1 Proses GMAW: (a) Proses Keseluruhan (b) Area Lasan yang Diperbesar (Sindo Kou, 2003)

Pengelasan GMAW disebut juga dengan *Metal Inert Gas* (MIG) atau *Metal Active Gas* (MAG). Singkatan MIG atau MAG ini tidak lagi menjelaskan proses las GMAW, karena tidak semua gas pelindung yang dipakai oleh proses ini adalah gas inert. Di dalam pengelasan GMAW, elektroda umumnya berbentuk solid dan semua gas pelindung berasal dari sumber luar.

Pada sejarahnya, pengelasan logam menggunakan pengelasan busur listrik pertama kali ditemukan pada akhir tahun 1940. Hobart dan Devers merupakan peneliti pertama untuk penggunaan pertama dari kawat aluminium sebagai elektroda las dengan memberikan gas Argon 100% sebagai pelindungnya. Transfer logam berbentuk *spray* adalah metode *transfer metal* pertama yang digunakan. Di awal tahun 1950-an, karya yubavshkii dan Novoshilov memulai pengembangan proses GMAW menggunakan elektroda dengan diameter besar dan menggunakan gas pelindung berupa gas reaktif CO_2 . Las GMAW memiliki dua tipe gas pelindung yaitu *Inert Gas* dan *Active Gas* yang kemudian dikenal dengan sebutan, yaitu:

1. *Metal Inert Gas* (MIG)

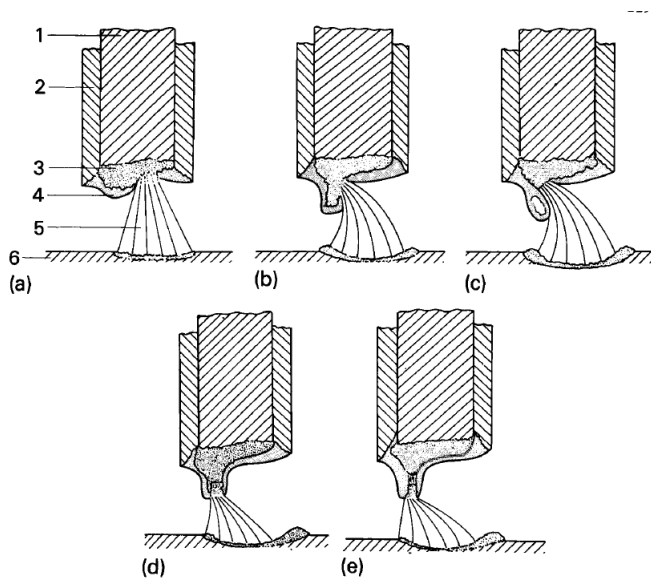
Proses pengelasan MIG, panas dari proses pengelasan ini dihasilkan oleh busur las yang terbentuk diantara elektroda kawat (wire electrode) dengan benda kerja sehingga melelehkan beda kerja dan terjadi penggabungan antara elektroda dan benda kerja. Selama proses pengelasan, elektroda akan meleleh kemudian menjadi deposit logam las dan membentuk butiran las (*weld beads*). Gas pelindung digunakan untuk mencegah terjadinya oksidasi dan melindungi hasil las selama masa pembekuan (*solidification*). Proses pengelasan MIG beroperasi menggunakan arus searah (DC), biasanya menggunakan elektroda kawat positif. Teknik ini dikenal sebagai polaritas terbalik (*reverse polarity*). Polaritas searah sangat jarang digunakan karena transfer logam yang kurang baik dari elektroda kawat ke benda kerja. Hal ini karena pada polaritas searah, panas terletak pada elektroda sehingga menyebabkan elektroda meleleh lebih banyak tetapi tidak diimbangi dengan pelelehan *base metal*. Proses pengelasan ini bisa dilakukan secara semi-otomatis maupun otomatis. Gas-gas *inert* sangat mahal penggunaannya sehingga dibatasi penggunaannya sehingga gas semi-*inert* seperti CO₂ digunakan.

2. *Metal Active Gas* (MAG)

Pengelasan MAG sebenarnya adalah pengembangan dari proses las MIG dimana gas CO₂ dicampur dengan gas Argon (Ar). Pada umumnya yang digunakan untuk proses pengelasan logam ferro adalah las *Metal Active Gas* (MAG). Terdapat persamaan yang mendasar pada elektroda ferro MAG, setiap elektroda memiliki unsur paduan. Untuk mengelas besi karbon menggunakan proses pengelasan MAG, fungsi utama penambahan unsur paduan pada elektrodanya adalah untuk mengatur deoksidasi genangan las (*weld puddle*) dan untuk membantu menentukan properti mekaniknya. Deoksidasi adalah kombinasi elemen dengan oksigen dari genangan las menghasilkan slag atau formasi kaca (*glass formation*) pada permukaan.

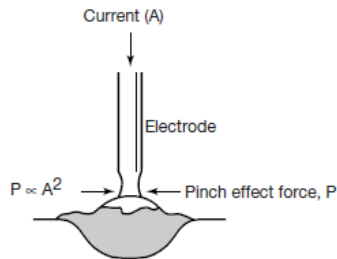
2.3.1 Metode Transfer Logam

Metode transfer logam ini dipengaruhi oleh tipe dari kawat *filler*, voltase, intensitas arus, polaritas elektroda dan *shielding gas*. Ada beberapa faktor penting penyebab transfer logam diantaranya adalah sifat elektromagnetik, tegangan permukaan, gaya gravitasi, tekanan pada katoda dan gaya yang disebabkan oleh aliran *shielding gas* dari batang elektroda (J. F. Lancaster, 1986). Transfer logam yang terjadi pada proses GMAW ditunjukkan pada Gambar 2.2.



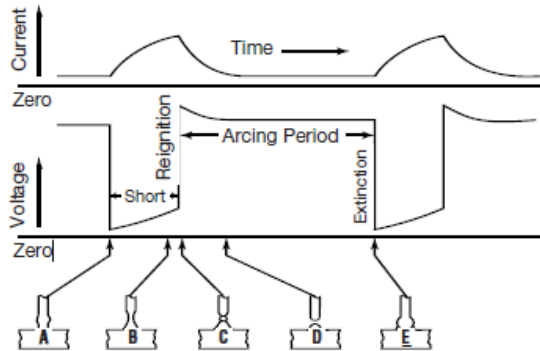
Gambar 2.2 (a) Tahap Awal, (b) Deformasi dari Logam Cair karena Tekanan pada *Arc Root*, (c) Pemisahan Tetesan akibat Tegangan Permukaan, (d) Busur Bergerak Menuju Ujung Elektroda, (e) Pemisahan Tetesan Akibat Adanya Gaya Elektromagnetik. (Becken, 1936)

A. *Short-Circuiting Transfer*



Gambar 2.3 Proses Transfer *Short-Circuiting*
(www.lincolnelectric.com)

Gambar 2.3 menunjukkan proses metal transfer yang terjadi pada metode *short-circuiting*. Pada metode ini, *molten metal* pada ujung elektroda akan ditransfer ke kawah las saat ujung elektroda tersebut menyentuh permukaan kawah logam tersebut, dan pada saat itu aliran singkat listrik terjadi. Hubungan listrik tersebut terjadi dalam frekuensi 20-200 kali per detik. *Short-Circuiting Transfer* merupakan metode transfer yang menghasilkan arus listrik yang paling rendah dan elektroda yang digunakan merupakan elektroda dengan diameter yang kecil (0,030; 0,035 dan 0,045). Metode ini menghasilkan penetrasi kedalaman kawah las yang kecil dan lebih dalam serta kecepatan pendinginan yang tinggi. Pengelasan ini digunakan untuk pelat yang tipis dan cocok untuk aplikasi pengelasan *root pass*. Kenaikan arus listrik mempengaruhi gaya magnetik yang terjadi di ujung elektroda yang mempengaruhi *pinch* dari elektroda. Hubungan antara pengaruh voltase dan arus pada metode transfer logam ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Pengaruh Arus dan Voltase pada Proses Trasfer Logam *Short-Circuiting* (www.lincolnelectric.com)

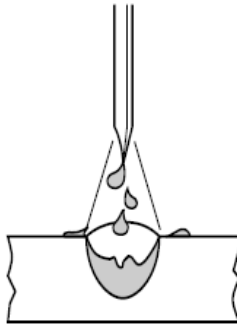
Berdasarkan Gambar 2.4 dapat dijelaskan bahwa proses dari *Short-Circuiting Metal Transfer* adalah sebagai berikut:

- Terjadi kontak fisik antara elektroda dengan lelehan logam. Voltase dari busur mendekati nol dan kekuatan arus meningkat. Tingkat dari kenaikan puncak kuat arus dipengaruhi oleh pengaplikasian induktansi.
- Pada titik ini terjadi efek elektromagnetik pada sekeliling elektroda. Voltase perlahan-lahan mulai meningkat hingga saat sebelum pelekatan, dan arus terus meningkat menuju puncaknya.
- Tetes metal mulai terdorong ke ujung elektroda. Arus mencapai titik maksimumnya. *Jet forces* mencegah lelehan logam bersatu kembali pada elektroda.
- Pada titik ini tetesan metal terbentuk dan menembel pada benda kerja.
- Elektroda kembali membuat kontak dengan metal dan mempersiapkan untuk kontak selanjutnya.

Frekuensi dari sirkuit ini bergantung pada jumlah induktansi dantipe dari *shielding gas*. Penambahan gas argon mempengaruhi frekuensi terjadinya kontak dan mengurangi ukuran dari tetesan logam yang terbentuk.

B. *Globular Transfer*

Pada metode ini tetesan logam yang melalui celah busur yang dipengaruhi oleh gravitasi mempunyai ukuran diskrit mendekati atau lebih besar dari diameter elektroda. Transfer logam pada metode ini sering tidak stabil dan menghasilkan tetesan yang kecil dalam jumlah yang banyak. Pada pengelasan *globular*, arus yang digunakan sulit untuk dikontrol dan sering menghasilkan percikan logam las yang dapat menjadi pengotor bagi lasan. Selama tahun 1960-an dan 1970-an metode ini sangat sering digunakan untuk produksi lembaran logam fabrikasi. Metode transfer ini biasanya menggunakan 100% CO₂. Karakteristik *globular weld metal transfer* ditunjukkan pada Gambar 2.5



Gambar 2.5 Karakteristik *Globular Weld Metal Transfer*
(www.lincolnelectric.com)

Keuntungan dari *Globular Transfer*:

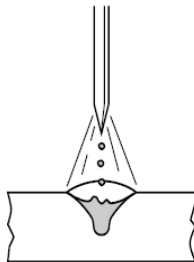
1. Menggunakan gas pelindung yang tergolong murah yaitu CO₂, tetapi juga dapat dikombinasikan dengan gas argon.
2. Memungkinkan untuk pengerjaan las dengan *travel speed* yang tinggi.
3. Elektroda dan peralatan yang digunakan tergolong terjangkau.

Keterbatasan dari *Globular Transfer*:

1. Banyak terbentuknya *spatter* atau percikan logam las pada hasil lasan menyebabkan harus diterapkan pembersihan pada permukaan lasannya.
2. Mudah terjadinya *incomplete fusion defect* pada lasan.
3. Bentuk lasan menjadi cembung akibat adanya penumpukan lelehan elektroda.
4. Percikan yang tinggi mengurangi efisiensi elektroda hingga 87-93%.

C. *Spray Transfer*

Dengan terus menaikkan tegangan dan arus, transfer logam akan menjadi busur las (*spray arc*). Lelehan yang jatuh dari kawat elektroda sangat kecil sehingga menghasilkan busur las dengan kestabilan yang baik. Transfer logam ini dapat menghasilkan deposit logam yang tinggi. Teknik pengelasan ini secara umum digunakan untuk menyambung logam dengan ketebalan 2,4 mm atau lebih. Kecuali saat menyambung aluminium dan tembaga, busur las *spray* biasanya terbatas hanya pada posisi datar (*flat position*). Pada baja karbon, *Spray Transfer* diaplikasikan pada pelat yang tebal dengan komposisi gas pelindung yang lebih banyak argon berujuan untuk membuat penetrasi lasan yang lebih dalam. Gambar 2.6 menunjukkan karakteristik *spray weld metal transfer* pada baja.



Gambar 2.6 Karakteristik *Spray Weld Metal Transfer*
(www.lincolnelectric.com)

Keuntungan dari *Spray Transfer*:

1. Memiliki nilai efisiensi pengelasan yang tinggi.
2. Dapat digunakan pada semua posisi pengelasan.
3. Tidak ada slag/ terak yang dihasilkan.
4. Jumlah deposit metal yang dihasilkan lebih banyak.
5. Cocok untuk pengerjaan konstruksi.
6. Sedikit pembersihan pengelasan yang dibutuhkan

Kerugian dari *Spray Transfer*:

- a. *Wire-feeder* memerlukan pengontrolan yang kontinu.
- b. Dapat menyebabkan *burnback* serta porositas pada lasan
- c. *Set up* pengelasan yang sulit.

2.3.2 *Shielding Gas*

Argon, helium dan campurannya digunakan untuk pengelasan logam *non-ferrous* seperti *stainless steel* dan baja paduan. Energi busur yang dihasilkan oleh Ar (argon) lebih terpusat dibandingkan dengan He (helium) sebab Ar memiliki konduktivitas termal yang lebih rendah dibandingkan He. Dengan begitu, busur pada Ar memiliki energi inti yang sangat tinggi sehingga menghasilkan busur listrik yang stabil. Sedangkan untuk logam *ferrous*, terutama baja karbon sering menggunakan gas CO₂ sebagai gas pelindungnya.

Konduktivitas termal atau kemampuan gas dalam mentransfer termal energi adalah faktor terpenting dalam pemilihan gas pelindung. Semakin tinggi konduktivitas termal suatu material maka semakin besar energi termal yang dibutuhkan untuk mentransfer termal antar logam. Konduktivitas termal juga berpengaruh terhadap bentuk busur listrik yang dihasilkan dan distribusi temperatur di daerah sekitarnya. Berikut adalah penjelasan mengenai karakteristik masing-masing gas pelindung pada GMAW:

A. *Inert Shielding Gas*

1. Argon

Argon adalah gas inert yang paling umum digunakan. Dibandingkan dengan helium konduktivitas termalnya

terbilang lebih rendah. Energi yang dibutuhkan untuk mentransfer elektron, energi ionisasi juga rendah. Hal ini menghasilkan profil penetrasi yang dalam pada *base metal*. Argon menghasilkan logam transfer berbentuk *spray*. Nikel, tembaga, aluminium, titanium, dan bahan dasar campuran magnesium menggunakan 100% argon. Karena energi ionisasi yang lebih rendah, membantu pembentukan awal busur listrik lebih mudah. Argon adalah gas komponen utama yang digunakan dalam campuran gas biner (dua bagian) atau terner (tiga bagian) pada pengelasan GMAW. Gas ini juga meningkatkan laju transfer tetesan logam cair.

2. Helium

Helium membutuhkan masukan panas (*heat input*) yang tinggi dan tidak memantapkan busur seperti argon. Konduktivitas panas helium lebih tinggi daripada argon sehingga kolom busur listrik yang dihasilkan melebar. Helium sesuai untuk pengelasan aluminium, tembaga dan magnesium.

B. *Reactive Shielding Gas*

1. Karbon Dioksida (CO₂)

Karbon Dioksida (CO₂) bersifat *inert* pada temperatur kamar, namun pada busur dan genangan lasan cair maka CO₂ akan bersifat reaktif. Dalam energi tinggi maka molekul CO₂ pecah dalam proses yang dikenal sebagai proses disosiasi. Di dalam proses tersebut, terjadi pelepasan karbon bebas, karbon monoksida, dan oksigen dari molekul CO₂. Ini terjadi di wilayah anoda dari busur. Sedangkan di daerah katoda yang merupakan benda kerja, unsur-unsur molekul CO₂ mengalami proses rekombinasi. Selama rekombinasi, tingkat energi yang lebih tinggi CO₂ akan bekerja untuk memberi profil penetrasi mendalam dan luas daerah lasan.

2. Oksigen (O₂)

Oksigen adalah oksidator yang bereaksi dengan komponen dalam genangan logam cair untuk membentuk oksida.

Dalam penambahan kecil yaitu sekitar (1-5%), dengan keseimbangan argon, akan memberikan stabilitas busur yang sangat baik dalam proses pengelasan. Silikon dan mangan akan berikatan dengan oksigen untuk terbentuk oksida. Oksida mengapung ke permukaan las lalu akan membentuk titik-titik kecil, lebih banyak didapati saat menggunakan CO₂ daripada dengan campuran argon dan gas oksigen.

3. Hidrogen (H₂)

Hidrogen yang ditambahkan ke argon dalam persentase kecil (1-5%), dapat berfungsi untuk melindungi stainless steel dan paduan nikel. Konduktivitas termalnya lebih tinggi sehingga menghasilkan genangan cairan, yang mendorong perbaikan pada dasar lasan dan memungkinkan penggunaan *travel speed* yang tinggi.

C. *Binary Shielding Gas Blends*

1. Argon dan Helium

Campuran biner argon dan helium berguna untuk pengelasan berbasis nikel paduan dan aluminium. Metode transfer logam yang digunakan adalah *spray*. Penambahan helium memberikan fluiditas genangan dan bentuk hasil lasan yang lebih datar. Helium meningkatkan kecepatan *travel speed*. Untuk aluminium GMAW, helium mengurangi kedalaman penetrasi yang dihasilkan jika menggunakan argon murni. Helium juga berfungsi untuk mengurangi munculnya pori-pori hidrogen dalam lasan yang menggunakan elektroda pengisi berbahan dasar aluminium dan magnesium dengan paduan dasar seri 5XXX. Komponen argon memudahkan penyalaan busur yang dan bertindak sebagai pembersih pada aluminium.

2. Argon dan CO₂

Ar dan CO₂ adalah campuran gas biner yang paling umum digunakan untuk pengelasan baja karbon GMAW. Aplikasi dari gas pelindung ini juga sangat berhasil pada proses

pengelasan baja tahan karat dimana CO₂ tidak melebihi 4%. Transfer *spray* membutuhkan kandungan CO₂ kurang dari 18%. Dengan meningkatnya persentase CO₂, maka akan ada kecenderungan untuk meningkatkan input panas.

3. Argon dan Oksigen

Penambahan sedikit oksigen ke gas argon berguna sebagai pemantap busur, meningkatkan laju perpindahan droplet logam pengisi dan mempengaruhi bentuk lasan.

D. *Ternary Gas Shielding Blends*

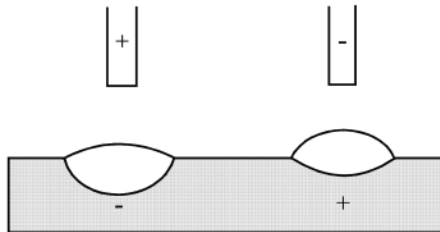
Campuran gas dengan 3 komposisi biasa digunakan pada baja karbon, baja tahan karat dan dalam kasus terbatas digunakan juga untuk paduan nikel. Untuk *short-circuit transfer* pada baja karbon penambahan dari 40% helium ke campuran argon dan CO₂, sebagai komponen ketiga untuk melindungi campuran gas, menyediakan profil penetrasi yang lebih luas. Helium memberikan konduktivitas termal yang lebih besar untuk aplikasi pada baja karbon dan stainless steel dengan *short-circuit transfer*. Profil penetrasi yang lebih luas dan meningkatkan fusi antar permukaan logam dan mengurangi kecenderungan fusi yang tidak sempurna. Untuk aplikasi baja tahan karat, penambahan helium dari 55% hingga 90% dapat mengurangi jumlah *spatter* dan meningkatkan fluiditas genangan.

2.3.1 Polaritas

Polaritas elektroda juga merupakan bagian yang penting karena adanya perubahan panas yang lebih besar pada anoda dari pada katoda. Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa masukan energi untuk melepaskan elektron di katoda juga dilakukan anoda dalam bentuk panas. Saat menggunakan pengelasan MIG menggunakan kawat elektroda, kawat biasanya terhubung dengan kutub positif. Apabila menghubungkannya dengan kutub negatif akan menyebabkan tetesan cair berada di ujung kawat terkonsentrasi dan

menggerakkan katoda secara acak sehingga membuat busur tidak stabil.

Pada penggunaan DCEP perubahan panas terbesar terjadi pada kutub positif, namun bukan berarti elektroda positif yang meleleh paling cepat tetapi sebaliknya. Hal ini dikarenakan kebanyakan panas yang dihasilkan dikembangkan pada anoda. Gambar 2.7 menjelaskan perbedaan penggunaan DCEN dan DCEP. Kombinasi tetesan dan busur yang stabil menghasilkan penetrasi yang baik. Dengan elektroda negatif, akan terjadi peningkatan efisiensi peleburan bahan elektroda.



Gambar 2.7 Penggunaan Elektroda DCEN dan DCEP (Klas Weman, 2012)

1. *Direct Current Electrode Positive (DCEP)*

Jika logam induk dihubungkan dengan kutub negatif sumber daya maka disebut DCEP. Panas terjadi pada elektroda tungsten sehingga diperlukan elektroda yang besar dengan pendinginan air yang baik. DCEP menyebabkan kolam las cair menjadi lebar dan dangkal. Metode ini biasanya digunakan untuk logam yang mudah teroksidasi seperti aluminium dan magnesium. Beberapa karakteristik dari DCEP adalah:

- a. Pada pengelasan dengan arus rendah ukuran tetesan dalam gas argon berkembang menjadi diameter lebih besar dari diameter elektroda.
- b. Ukuran droplet berbanding terbalik dengan arus dan hanya beberapa tetesan busur yang dilepaskan per detik.

-
- c. Dengan ukuran busur yang panjang, tetesan ditransfer tanpa adanya hubung singkat, tidak ada percikan dan busur menjadi stabil.
 - d. Di atas tingkat arus kritis, karakteristik transfer ini berubah dari *globular* ke mode *spray* transfer.
 - e. Pada *spray transfer*, ujung dari elektroda menjadi runcing kemudian ditransfer dengan laju sekitar seraus per detik. Arus di mana ini terjadi disebut arus transisi.
 - f. Pada *axial spray* transfer, bersifat stabil. Tidak ada percikan, tetesan ditransfer sejalan dengan elektroda dan tidak melalui jalur minimum. logam dapat diarahkan ke mana diperlukan untuk membuat las vertikal atau lasan horizontal.

2. *Direct Current Electrode Negative* (DCEN)

Jika logam induk dihubungkan dengan kutub positif sumber daya maka disebut DCEN. Elektron dari elektroda tungsten mengalir ke benda kerja dengan kecepatan tinggi sehingga menghasilkan panas yang tinggi pada benda kerja. Ini menyebabkan penyempitan dan penetrasi yang dalam pada kolom las cair. Karakteristik DCEN adalah sebagai berikut:

- a. Busur pada pengelasan GMAW menjadi tidak stabil dan banyak percikan yang terjadi. Ukuran tetesan berukuran besar dan biasanya akan berbentuk sebagai percikan dan menyebar menjauhi benda kerja.
- b. *Spray* transfer akan terjadi pada pengelasan dengan *shielding gas* argon saja.

3. *Alternating Current* (AC)

Arus bolak-balik (AC) banyak digunakan pada sumber daya yang modern dengan kemampuan membentuk gelombang square-wave AC dan wave balancing.

2.4 Elektroda ER70S-G KC26

Merupakan kawat las untuk fabrikasi baja ringan. Mengandung *deoxidizers* yang memberikan pembasahan yang lebih baik, menghasilkan bentuk lasan yang datar dan kemampuan *travel speed* yang lebih cepat. Memiliki kekuatan tarik 480MPa digunakan dalam pengelasan dengan dengan *shielding gas* 75/25 (Argon / CO₂) atau dengan kandungan Argon yang lebih tinggi, seperti 90/10. Bisa juga digunakan dengan 100% CO₂. Sesuai dengan AWS A5.18 ER70S-6. Kawat las ini bisa diaplikasikan pada berbagai baja paduan ringan dan rendah, pipa berdiameter kecil dan aplikasi tubing serta lembaran logam. Terutama digunakan untuk *single pass* pada baja di mana permukaan berkarat dan kotor tidak dibersihkan sebelum pengelasan. Spesifikasi elektroda ER70S-G KC26 dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Spesifikasi elektroda ER70S-G KC26 (PT. Komatsu)

Type	Mar ker	Stan dar AWS	Chemical Composition					Mechanical Properties Tensile Strenght [N/mm ²]		Check Hardness (HB)	
			C	Si	Mn	P	S				
KC26	KIS WEL	ER70S -G	0,06	0,8	1,53	0,014	0,01	490		137,95	
Wire Types	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	CE	Pcm
KC26	0.06	0.60	1.10	0.02	0.01	0.02	0.11	0.02	0.00	0.29	0.14

2.5 Parameter Las

Pada proses pengelasan, parameter pengelasan merupakan faktor terpenting yang akan mempengaruhi kualitas, produktivitas dan biaya dari pengelasan (Karadeniz et al., 2007). Parameter tersebut akan mempengaruhi bentuk busur dan lelehan logam elektroda sehingga perencanaanya harus diperkirakan dengan kondisi pengelasan yang berubah selama proses sehingga mendapatkan hasil yang optimal (Uslu et al., 2010; Ankara and Ozturk, 1997). Beberapa parameter las diantaranya:

2.5.1 Arus Pengelasan

Parameter ini berpengaruh langsung pada penetrasi logam las, bentuk manik las, lebar HAZ dan pencampuran logam induk. Arus las makin besar dapat memperdalam penetrasi logam dan juga memperlebar HAZ, demikian pula sebaliknya. Arus las juga dapat mempengaruhi banyaknya pencampuran logam induk. Semakin besar arus las yang diberikan, maka semakin banyak pula bagian logam induk yang mencair. Selama pengelasan, ketika busur terjadi dalam pengelasan, arus terhadap voltase yang bekerja disebut sebagai arus pengelasan. Mesin las dihubungkan ke sumber arus dengan polaritas yang sudah ditentukan. Busur listrik terjadi ketika elektroda menyentuh benda kerja dan akibatnya hubungan arus permanen terus berlanjut. Pengelasan saat ini diatur oleh tukang las sebelum aplikasi pengelasan. Selama aplikasi pengelasan, nilai arus pengelasan tidak berubah. Namun, busur yang dipotong atau saat ini dapat ditingkatkan tergantung pada aplikasi pengelasan (Yasar et al., 2010). Pengaruh arus pengelasan dengan ketebalan material dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Arus Pengelasan (I) berdasarkan ketebalan material (Urguy Soy, 2011)

Ketebalan Benda Kerja (S)	Arus Pengelasan (I)	Kedaaan Pengelasan \leq
$S \leq 3$	$0 < I < 60$	Elektroda akan melekat pada material
	$60 < I < 90$	Pengelasan yang sesuai
	$90 < I < 350$	Lelehan logam dan distorsi akan terjadi pada material
$3 < S \leq 8$	$0 < I \leq 60$	Elektroda akan melekat pada material

	$60 < I \leq 80$	Penetrasi tidak memadai
	$80 < I \leq 110$	Pengelasan yang sesuai
	$110 < I < 350$	Lelehan logam dan distorsi akan terjadi pada material
$8 < S < 20$	$0 < I \leq 60$	Elektroda akan melekat pada material
	$60 < I \leq 90$	Penetrasi tidak memadai
	$90 < I \leq 130$	Pengelasan yang sesuai
	$130 < I < 350$	Lelehan logam dan distorsi akan terjadi pada material
$S > 20$	$0 < I \leq 80$	Elektroda akan melekat pada material
	$80 < I \leq 120$	Penetrasi tidak memadai
	$120 < I \leq 150$	Pengelasan yang sesuai
	$150 < I < 350$	Lelehan logam dan distorsi akan terjadi pada material

Pengelasan saat ini dipilih sebagai 40 kali lipat dari diameter elektroda ($I = d \times 40$). Nilai ini dapat diubah menjadi 10% tergantung pada ketebalan bahan dan posisi. Diameter elektroda atau filler yang menentukan besarnya arus pengelasan. Semakin besar diameter elektroda atau filler yang digunakan maka semakin tinggi pula arus pengelasan yang dibutuhkan. Secara logika, untuk mencairkan filler las berdiameter lebih besar akan membutuhkan

panas yang besar pula. Energi panas sebanding dengan arus las. Maka dari itu, pemakaian filler las berdiameter besar membutuhkan arus las yang besar pula.

2.5.2 Tegangan Permukaan

Dalam pengelasan, voltase memegang peran yang penting dalam menentukan bentuk dan lebar dari busur, serta pada sudut tertentu juga menentukan kedalaman penetrasi. Tegangan atau *voltage* yang semakin besar maka semakin panjang busur yang terjadi dan semakin tidak terpusat, sehingga panasnya melebar dan menghasilkan penetrasi yang lebar dan dangkal. Ada pengecualian terhadap beberapa elektroda khusus untuk penembusan dalam yang memang memerlukan tegangan tinggi. Pada kecepatan tertentu, naiknya voltase akan memperdalam penembusan, tetapi melampaui voltase tersebut penembusan akan turun dengan naiknya kecepatan. (Wirjosumarto, 2000) apabila busur terlalu pendek (voltase rendah), bola-bola metal cair akan terlalu dekat dengan benda kerja sehingga temperatur terlalu panas (*overheated*) akibatnya *globular* pecah dan menghasilkan percikan las yang banyak. Busur harus cukup panjang agar bola-bola metal bahan las mencapai kolam las dengan baik. Pengelasan dengan *voltage* terlalu tinggi justru menghasilkan sambungan mentah sehingga tidak ada fusi antara bahan las dan benda kerja, penetrasi tidak sempurna, dan kontur terlalu menonjol (Widharto S, 2007).

Penggunaan tinggi rendahnya voltase tersebut digunakan dalam pengelasan dengan sistem transfer globular yang menggunakan arus searah dengan elektroda pada posisi positif (DCEP). Voltase atau tegangan busur las merupakan parameter yang akan digunakan peneliti sebagai variasi dalam penelitian untuk mendapatkan besar voltase yang tepat sehingga mendapatkan kekuatan yang besar. Voltase diperlukan untuk mendapatkan penembusan yang besar karena dengan adanya penembusan yang besar akan meningkatkan kekuatan hasil las.

2.5.3 Kecepatan Pengelasan

Pergerakan pengelasan busur sepanjang benda kerja atau lamanya lapisan las yang dibuat dalam satuan waktu dikenal sebagai kecepatan pengelasan. Ketika kecepatan lambat selama proses pengelasan, deposit logam las akan mengalami peningkatan dan akhirnya memperlebar kolam pengelasan. Dengan pertumbuhan logam las dan peningkatan masukan panas, logam cair mengalir ke depan busur dan itu mempengaruhi formasi busur. Peningkatan kecepatan akan menyebabkan berkurangnya panas pengelasan yang diberikan kepada logam akibatnya jumlah lelehan logam utama akan menurun, hal ini maka akan mempengaruhi kualitas las. Pengaruh ketebalan dengan kecepatan pengelasan dijelaskan pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Kecepatan pengelasan menurut ketebalan material (s), arus (I), dan diameter elektroda (Ugur Soy, 2011)

Ketebalan	Kecepatan Las (V_k), mm/s	Arus pengelasan (I)
$S \leq 3$	4,5	d x 40 ampere
$S > 3 \leq 8$	4,5	d x 40 ampere
$S > 8$	4,5	d x 40 ampere

Kecepatan pengelasan tergantung pada jenis elektroda. Diameter inti elektroda. Bahan yang dilas, geometri sambungan, ketelitian sambungan. Kecepatan las tidak ada hubungannya dengan tegangan tetapi berbanding lurus dengan kuat arus, sehingga pengelasan yang cepat membutuhkan arus las yang tinggi untuk mencapai hasil las yang baik. Jika kecepatan las dinaikkan maka masukan panas per satuan panjang akan menjadi kecil sehingga pendinginan akan berjalan cepat.

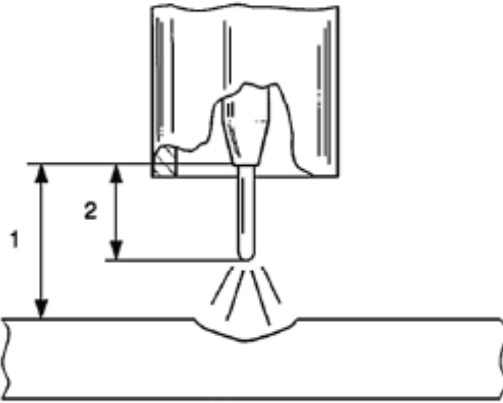
2.5.4 Ukuran Elektroda

Bahan elektroda dalam pengelasan diharapkan memiliki kekuatan tinggi, ulet dan tangguh (Oguz, 1993). Menurut standar EN ISO 2560: 2005, parameter penentuan untuk pemilihan jenis

elektroda dalam pengelasan untuk karbon polos dan baja paduan rendah adalah berdasarkan; jenis material, posisi pengelasan, bentuk slot pengelasan dan ketebalan benda kerja. Diameter elektroda berubah sesuai dengan ketebalan material dan bentuk slot pengelasan. Elektroda yang paling sering digunakan dalam aplikasi GMAW adalah elektroda dengan diameter 2,50; 3,25 dan 4.00 mm (Oz et al., 2011). Ukuran kawat elektroda juga dipilih sesuai dengan arus pengelasan. Setiap kawat elektroda memiliki rentang arus yang sangat besar. Dalam aturannya, semakin kecil ukuran kawat elektroda maka hasil transfer logam akan semakin halus. Saat mengelas dengan kawat aluminium lunak, risiko pemakanan material dapat diatasi dengan menggunakan kawat berukuran tebal. Semakin besar ukuran kawat maka harganya akan semakin rendah.

2.5.5 Perpanjangan Kawat Elektroda

Dalam mengerjakan perpanjangan kawat, paling mudah untuk mengukur jarak ujung kontak dari permukaan logam kerja yang ditunjukkan oleh Gambar 2.8. Aturan praktisnya adalah jarak normal adalah 10-15x diameter kawat. Perpanjangan kawat yang keluar dari *nozzle* apabila terlalu kecil maka akan meningkatkan risiko terbakar, di mana busur akan mengelas kawat bersama dengan ujung kontak. Jarak yang terlalu jauh ke benda kerja akan meningkatkan risiko *stutting*, terutama pada awal kontak elektroda dengan benda kerja. Jarak kontak dari ujung ke benda kerja (*contact tip-to-work distance*) juga memiliki pengaruh pada arus dan penetrasi profil lasan. Jika perpanjangan kawat meningkat, arus sedangkan masukan panas akan menurun sementara jumlah deposit logam akan berkurang. Hal ini akan mengurangi kedalaman penetrasi pada benda kerja dan akan meningkatkan risiko tidak menyatunya logam las dengan logam benda kerja. Hal yang bisa dilakukan agar menjaga kualitas lasan adalah agar menjaga jarak kawat tetap konstan selama operasi pengelasan.



Gambar 2.8 Definisi dari Jarak Kontak dari Ujung ke Benda Kerja (1) dan Perpanjangan Kawat (2) (Klas Weman, 2012)

2.5.6 Kecepatan Aliran Gas

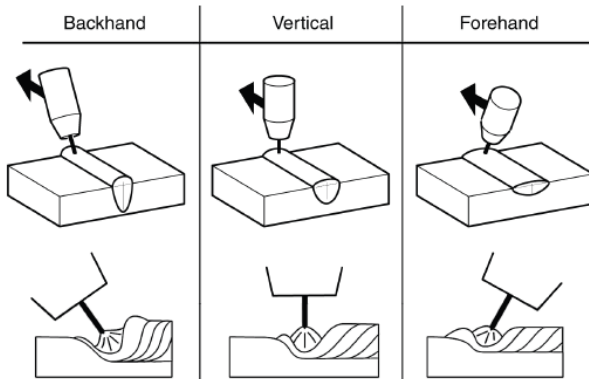
Aliran gas harus disesuaikan dengan busur. Untuk arus yang rendah, 10 liter per menit sudah memenuhi kebutuhan proses pengelasan, sementara pada arus yang lebih tinggi gas yang dibutuhkan kira-kira 20 liter per menit. Gas lebih banyak dibutuhkan pada Pengelasan aluminium lebih dibandingkan pada pengelasan baja.

Regulator gas mengurangi tekanan dan menjaga aliran gas pada jumlah yang diinginkan. Tingkat masalah yang bisa terjadi pada aliran gas tergantung pada panjang dan panjang diameter selang antara regulator dan katup magnet. Penggunaan regulator dua tahap akan menghasilkan tekanan outlet yang lebih rendah dan dapat mengurangi penumpukan gas pada saat pengelasan.

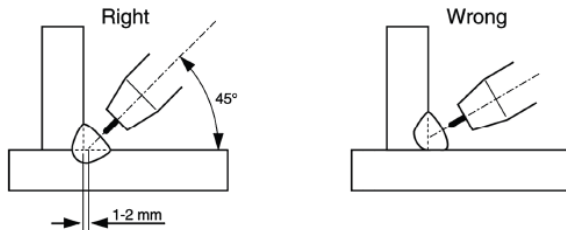
2.5.7 Torch dan Posisi Sambungan

Sudut *torch* relatif terhadap sambungan juga merupakan parameter pengelasan yang penting. Jika diarahkan menjauh dari bagian jadi dari lasan (teknik *forehand*), maka akan membuat profil penetrasi lasan lebih dangkal dan lebar (lihat Gambar 2.9). Di sisi

lain, jika diarahkan ke bagian akhir las (teknik backhand), penetrasi akan lebih dalam dan lebar daerah lasannya lebih sempit.



Gambar 2.9 Efek dari posisi elektroda dan teknik pengelasan
(Klas Weman, 2012)



Gambar 2.10 Sudut dan posisi di seluruh arah pengelasan *fillet*
(Klas Weman, 2012)

Sudut *torch* di bagian yang melintasi arah pengelasan memiliki efek langsung pengaruh pada risiko kurangnya fusi (lihat Gambar 2.10). Untuk mengurangi risiko kekurangan fusi sangat penting untuk mencegah logam leleh mengalir terlalu banyak sebelum busur. Kasus seperti ini banyak terjadi pada pengelasan dengan input panas tinggi, *weld pool* besar dan pengelasan dengan terlalu banyak *forehand* atau dalam posisi menurun. Jika pelat yang akan dilas tidak sepenuhnya horizontal tetapi memiliki sambungan

miring, itu juga akan mempengaruhi kontur las dan penetrasi profil. Dengan pengelasan menurun, penguatan las bisa lebih rendah dan kecepatan pengelasan biasanya akan meningkat. Pengelasan dengan posisi *uphill* akan mengakibatkan lelehan logam las mengalir ke bawah sehingga membentuk lasan yang dangkal.

2.6 Masukan Panas (*Heat Input*)

Dalam pengelasan, untuk mencairkan logam induk dan logam pengisi diperlukan energi yang cukup. Energi yang dihasilkan dalam proses pengelasan berasal dari bermacam-macam sumber yang tergantung pada proses pengelasannya. Pada pengelasan busur listrik, sumber energi berasal dari listrik yang diubah menjadi energi panas. Energi panas ini sebenarnya gabungan dari parameter arus las, tegangan las dan kecepatan.

pengelasan, karena proses pemanasannya tidak diam ditempat melainkan bergerak sesuai dengan kecepatan tertentu. Kualitas hasil pengelasan dipengaruhi oleh energi panas yang dipengaruhi juga oleh arus las, tegangan las dan kecepatan pengelasan. Hubungan antara ketiga parameter tersebut menghasilkan energi yang biasa disebut dengan heat input. Persamaan heat input dituliskan pada persamaan (2.1) yaitu:

$$Q = \frac{EI}{v} \dots\dots\dots (2.1)$$

- Dimana, Q = Heat input (kJ/mm)
 E = Tegangan pengelasan (Volt)
 I = Arus pengelasan (Ampere)
 V = Kecepatan pengelasan (mm/s²)

2.6.1 Efisiensi Sumber Panas

Efisiensi sumber panas η didefinisikan sebagai:

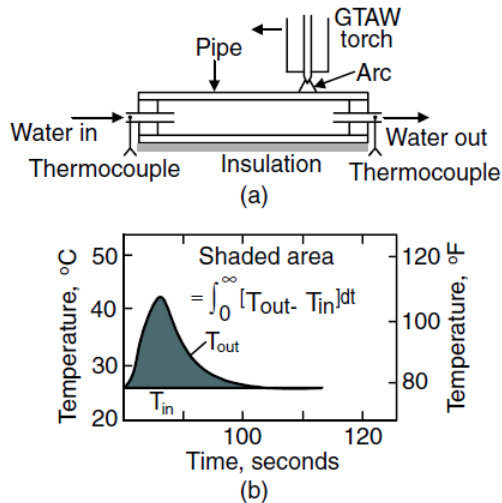
$$\eta = \frac{Qt_{weld}}{Q_{nominal}t_{weld}} = \frac{Q}{Q_{nominal}} \dots\dots\dots (2.2)$$

di mana Q adalah laju perpindahan panas dari sumber panas ke benda kerja, Q_{nominal} adalah kekuatan nominal sumber panas dan dua kali waktu pengelasan. Bagian dari daya yang disediakan oleh sumber panas ditransfer ke benda kerja dan bagian yang tersisa akan hilang ke lingkungan sehingga nilai $h < 1$. Jika efisiensi sumber panas h diketahui, laju transfer panas ke benda kerja Q , dapat dengan mudah ditentukan dari Persamaan (2.2). Dalam pengelasan busur dengan tegangan konstan E dan arus I konstan, efisiensi dapat dinyatakan sebagai

$$\eta = \frac{Qt_{\text{weld}}}{EIt_{\text{weld}}} = \frac{Q}{EI} \dots\dots\dots (2.3)$$

Persamaan (2.2) juga dapat diterapkan pada pengelasan berkas elektron, di mana h adalah efisiensi sumber panas. Dalam pengelasan sinar laser, Q_{nominal} di persamaan (2.3) adalah kekuatan sinar laser, misalkan 2500W. Perlu dicatat bahwa dalam pengelasan, istilah masukan panas sering mengacu pada Q_{nominal} , atau EI dalam kasus pengelasan busur dan istilah input panas per satuan panjang lasan sering mengacu pada rasio Q_{nominal}/V atau EI/V , di mana V adalah kecepatan pengelasan.

Efisiensi sumber panas dapat diukur dengan kalorimeter. Panas yang ditransfer dari sumber panas ke benda kerja yang kemudian ditransfer dari benda kerja ke kalorimeter (Kou dkk). Alat kalorimeter tubular sederhana digunakan untuk menentukan busur efisiensi dalam GTAW aluminium, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11a.



Gambar 2.11 Pengukuran efisiensi pada GTAW: (a) Kalorimeter; (b) Kenaikan temperatur air pendingin terhadap fungsi waktu (Sindo Kou, 2003)

Kenaikan temperatur dalam pendinginan air ($T_{out} - T_{in}$) dapat diukur menggunakan termokopel atau termistor. Perpindahan panas dari benda kerja ke kalorimeter adalah sebagai berikut:

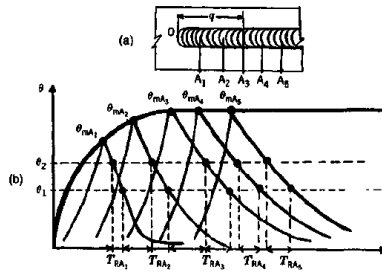
$$Qt_{weld} = \int_0^{\infty} WC(T_{out} - T_{in})dt \approx WC \int_0^{\infty} (T_{out} - T_{in})dt \dots (2.4)$$

Dimana W adalah laju aliran massa air, C panas spesifik air, T_{out} adalah temperatur air outlet, T_{in} adalah temperatur air masuk, dan waktu t . Efisiensi busur dapat ditentukan dari Persamaan (2.3) dan (2.4). Dalam GMAW, busur, tetesan logam, dan pemanasan katoda semua berkontribusi pada efisiensi sumber panas. Pada penelitian GMAW dari aluminium dan baja dengan gas pelindung berupa Ar dengan aliran arus tidak merata di permukaan benda kerja dan hanya berpusat di atas area benda kerja atau yang biasa disebut titik

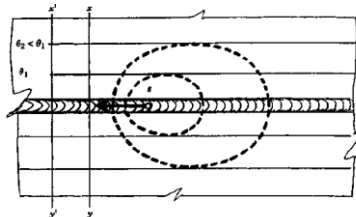
katoda. Pemanasan lokal atau pemanasan katoda, menyebabkan oksida permukaan terdisosiasi dan meninggalkan logam bersih diatas permukaan. Pemanasan katoda ini dikaitkan dengan tipe emisi pada medan elektron.

2.7 Siklus Termal pada Pengelasan

Sebagian besar proses pengelasan menyebabkan material dalam benda kerja mengalami panas. Selama proses pengelasan fusi, pengerjaannya dilakukan pada lingkungan dengan temperatur ambien. Waktu yang dibutuhkan untuk menjangkau temperatur yang diinginkan akan menentukan efek pada struktur (baik perubahan mikrostruktur untuk material dan makrostruktur untuk distorsi). Siklus termal pengelasan harus diketahui, karena sejarah termal mempengaruhi struktur dan sifat dari material tersebut. Jika termokopel ditempatkan di berbagai titik di sepanjang jalur lasan, dimana titik yang diletakkan adalah di tengah lasan dengan tujuan untuk menghindari tepi, efek yang dihasilkan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12(a). kemudian serangkaian siklus termal diperoleh, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12(b). Untuk respon setiap termokopel, jika dianalisis dari pendekatannya terhadap sumber panas, meningkatnya temperatur ke puncak dalam waktu yang cepat, maka akan semakin pendek waktu yang dapat ditahan di temperatur puncak tersebut dan kemudian terjadi penurunan temperatur yang sangat cepat sesaat setelah sumber panas melewati titik itu. Beberapa saat setelah panas dari sumber (katakanlah busur listrik) mulai membeku, dapat dilihat bahwa temperatur puncak serta sisa siklus termal, mencapai keadaan *quasi steady state*. Keadaan ini adalah hasil dari keseimbangan yang telah dicapai antara tingkat input energi dan tingkat kehilangan energi atau menghilang karena konduksi ke daerah dingin dari benda kerja atau hilangnya panas daerah sekitarnya. Hal ini dapat diartikan juga bahwa sesaat setelah sumber panas (busur listrik) mulai melakukan inisiasi dan panas mulai mengendap, temperatur isotherm tetap stabil dan akan bergerak sesuai dengan sumber panas. Ini ditunjukkan pada Gambar 2.12.

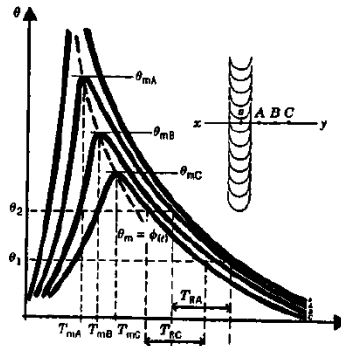


Gambar 2.12 (a) Penempatan titik termokopel sepanjang jalur pergerakan sumber panas (b) Siklus termal yang diproduksi pada tiap titik terhadap semua respon (H. Granjon, 1991)



Gambar 2.13 Skema yang menunjukkan pembentukan *quasi-steady-state* (atau kuasi-stasioner) kondisi dalam lasan yang dibuat berdasarkan selang waktu setelah pemindahan sumber panas (H. Granjon, 1991)

karena terjadinya pembentukan kondisi *quasi-steady* (meskipun setelah pemindahan sumber panas), siklus termal (temperatur terhadap waktu) dapat diketahui bahwa titik semakin menjauhi sumber panas dan melintang menjadi 4 lintasan las. Jejak temperatur terhadap waktu untuk tiga titik A, B dan C ditunjukkan pada Gambar 2.14 dengan pengamatan sebagai berikut



Gambar 2.14 Skema dari temperatur-waktu untuk tiga titik yang terletak sepanjang garis yang tegak lurus dengan lasan selama sumber panas bergerak. (H. Granjon, 1991).

1. Kurva temperatur-waktu terletak di bawah kurva yang lain, seiring dengan meningkatnya jarak dari garis tengah antar lasan. Titik saat mencapai temperatur tertinggi akan menurun seiring meningkatnya jarak lasan dari sumber panas (terutama densitas energi dan distribusi serta juga masukan panas bersihnya) dan prosedurnya (mode operasi, manipulasi, dll.). Setiap kurva menunjukkan bahwa temperatur akan kembali ke temperatur ruang.
2. Temperatur maksimum yang ditunjukkan oleh titik (T_{mA} , T_{mB} , T_{mC}) akan menurun sesuai dengan meningkatnya jarak dari garis las yang diukur terhadap waktu (t_{mA} , t_{mB} , t_{mC}) yang meningkat. Hal ini mengakibatkan puncak temperatur T_p di atur sebagai fungsi terhadap waktu. Temperatur puncak ini memisahkan bagian pemanasan siklus termal dari bagian pendinginan dan didapatkan fakta bahwa titik yang paling jauh dengan lasan sudah mendingin, sementara titik-titik yang lebih jauh masih mengalami pemanasan. Fenomena ini menjelaskan dengan pasti aspek transformasi fase yang berlangsung di zona yang terpengaruh panas, seperti tingkat deferensial dan derajat ekspansi dan kontraksi termal yang

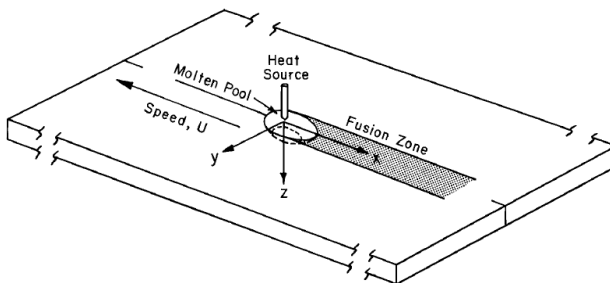
- menyebabkan tekanan yang disebabkan oleh panas dan bisa memunculkan kemungkinan terjadinya distorsi.
3. Melihat data dari grafik termal, laju pendinginan (diukur dari temperatur maksimum) menurun mengikuti jarak dari garis lasan. Namun, pada bagian pendinginan cepat, kurva yang dihasilkan sangat mirip. Hal ini dapat terlihat dari perbandingan waktu t_{RA} dan t_{RC} untuk titik A dan C .
 4. Peningkatan kecepatan pada panas las konstan menyebabkan daerah yang mengalami pemanasan mengecil sehingga garis-garis isotermis menyempit pada arah tegak lurus garis las dan memendek pada arah pengelasan.
 5. Kenaikan panas las pada kecepatan konstan memperluas daerah yang mengalami pemanasan dimana garis-garis isotermis melebar pada arah tegak lurus garis las dan memanjang pada arah las.
 6. Kenaikan panas las dan kecepatan pada harga masukan panas (heat input) konstan memperluas daerah yang mengalami pemanasan sebanding dengan panas dan kecepatan las.
 7. Kenaikan temperatur *preheat* pada kondisi panas las dan kecepatan konstan memperluas daerah yang mengalami pemanasan.
 8. Konduktivitas termal (k) sangat berpengaruh terhadap luas daerah yang mengalami pemanasan. Pada pengelasan material dengan nilai k kecil, masukan panas yang diperlukan juga kecil. Sebagai akibatnya aluminium membutuhkan masukan panas yang besar.

Distribusi spasial siklus termal pengelasan telah dijelaskan sebagai salah satu “panas dalam bentuk padat “. Sumber panas pengelasan yang dikenal sebagai garis las adalah jarak sepanjang garis lasan terhadap temperatur. Gerakan kurva ini menghasilkan isoterm yang sejajar dengan lasan itu sendiri. Ketika lasan dibuat tanpa memindahkan sumber panas, tidak ada kondisi *quasi-steady state* atau *quasi-stasioner* karena lasan diproduksi oleh input energi lokal yang cukup kuat untuk tidak diimbangi oleh konduksi panas

jauh ke dalam benda benda kerja. Namun demikian, fenomena metalurgi dapat diartikan dengan mempertimbangkan siklus temperatur-waktu sebagai $T=f(t)$ dan distribusi dari struktur yang ditunjukkan oleh $T_m=f(x)$ atau $T_m=f(r)$ dalam koordinat kutub.

2.7.1 Teori Heat Flow Rosenthal

Gambar 2.15 adalah skema yang menunjukkan pengelasan benda stasioner. Koordinat sumber panas bergerak konstan terhadap kecepatan v dalam arah negatif. Untuk transien awal dan akhir pengelasan, aliran panas dalam benda kerja yang panjang cukup stabil, sehubungan dengan sumber panas yang bergerak. Dengan kata lain, terhadap sumber panas yang bergerak, distribusi temperatur dan geometri kolam tidak berubah seiring waktu. Asumsi *steady state* ini yang pertama digunakan oleh Rosenthal untuk menyederhanakan perawatan matematika aliran panas selama pengelasan.



Gambar 2.25 Sistem koordinat (x, y, z) bergerak searah dengan sumber panas (Sindo Kou, 2012)

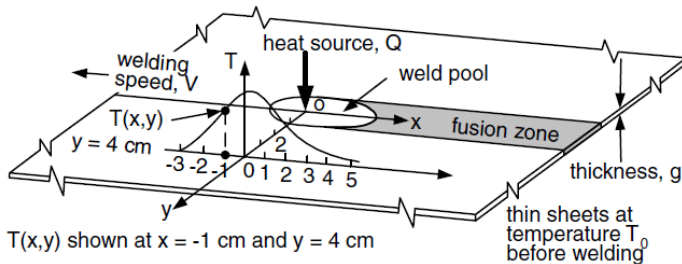
Rosenthal menggunakan asumsi sederhana untuk memperoleh persamaan analisis untuk aliran panas selama proses pengelasan dalam kondisi-kondisi berikut:

1. Aliran panas dengan kondisi *steady-state*
2. Titik sumber panas
3. Panas fusi diabaikan
4. Keadaan termal konstan

5. Tidak ada panas yang hilang dari permukaan benda kerja
6. Tidak terjadi konveksi di kolam las

A. Persamaan Rosenthal Dua Dimensi

Gambar 2.16 adalah skema yang menunjukkan proses pengelasan pada pelat tipis. Karena tipisnya benda kerja, variasi temperatur dari arah ketebalannya diabaikan dan persebaran aliran panas diasumsikan terjadi dua arah. Rosenthal menurunkan persamaan untuk aliran panas dua dimensi selama pengelasan pelat tipis dengan tebal diabaikan adalah sebagai berikut:



Gambar 2.16 Aliran panas dua dimensi selama proses pengelasan pada pelat tipis (Sindo Kou, 2012).

$$\frac{2\pi(T-T_0)kg}{Q} = \exp\left(\frac{Vr}{2\alpha}\right) K_0 \left(\frac{Vr}{2\alpha}\right) \dots\dots\dots (2.5)$$

- Dimana T = temperatur
 T_0 = temperatur benda kerja sebelum pengelasan
 K = konduktivitas termal benda kerja
 g = ketebalan benda kerja
 Q = panas yang mengalir dari sumber panas ke benda
 V = kecepatan las

α = difusifitas termal benda kerja, $k/\rho C$, dimana ρ dan C merupakan masa jenis dan spesifikasi panas dari benda kerja

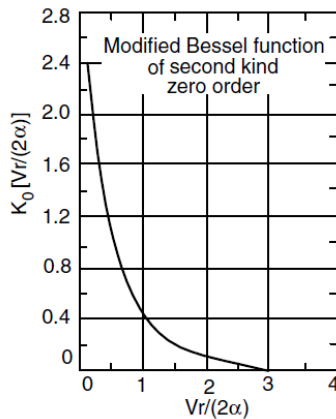
K_0 = modifikasi fungsi Bessel

r = radius dimana $(x^2 + y^2)^{1/2}$

B. Persamaan Rosenthal Tiga Dimensi

Solusi analisis yang dijabarkan oleh Rosenthal untuk aliran panas tiga dimensi pada benda yang memiliki ketebalan selama proses pengelasan dijabarkan dalam persamaan 2.6 dan Gambar 2.17

$$\frac{2\pi(T-T_0)kR}{Q} = \exp\left[\frac{-V(R-x)}{2\alpha}\right] \dots\dots\dots (2.6)$$



Gambar 2.17 Fungsi model Bessel untuk orde dua dan nol (Sindo Kou, 2012)

TABLE 2.1 Thermal Properties for Several Materials

Material	Thermal Diffusivity, α (m ² /s)	Volume Thermal Capacity, ρC_v (J/m ³ K)	Thermal Conductivity, k (J/m s K)	Melting Point (K)
Aluminum	8.5×10^{-5}	2.7×10^6	229.0	933
Carbon steel	9.1×10^{-6}	4.5×10^6	41.0	1800
9% Ni steel	1.1×10^{-5}	3.2×10^6	35.2	1673
Austenitic stainless steel	5.3×10^{-6}	4.7×10^6	24.9	1773
Inconel 600	4.7×10^{-6}	3.9×10^6	18.3	1673
Ti alloy	9.0×10^{-6}	3.0×10^6	27.0	1923
Copper	9.6×10^{-5}	4.0×10^6	384.0	1336
Monel 400	8.0×10^{-6}	4.4×10^6	35.2	1573

Source: Gray et al. (27).

Gambar 2.18 properti termal untuk beberapa material (Sindo Kou, 2012)

Dimana R adalah jarak radius dari asal dengan rumus $(x^2 + y^2 + z^2)$. Untuk keadaan pengelasan benda kerja yang diberikan, $T_{isoterm}$ pada permukaan dinyatakan x sebagai radius dari R . Sedangkan untuk Gambar 2.18 merupakan properti termal yang mendukung untuk persamaan 2.6. Persamaan (2.6) menyiratkan bahwa penampang melintang semua keadaan isothermal, termasuk batas fusi dan batas luar zona yang terkena panas, berbentuk setengah lingkaran. Persamaan (2.6) dapat digunakan untuk menghitung temperatur *steady-state* $T(x, y, z)$ yang berhubungan dengan sumber panas bergerak, di lokasi manapun dalam benda kerja.

2.8 Interpass Temperature

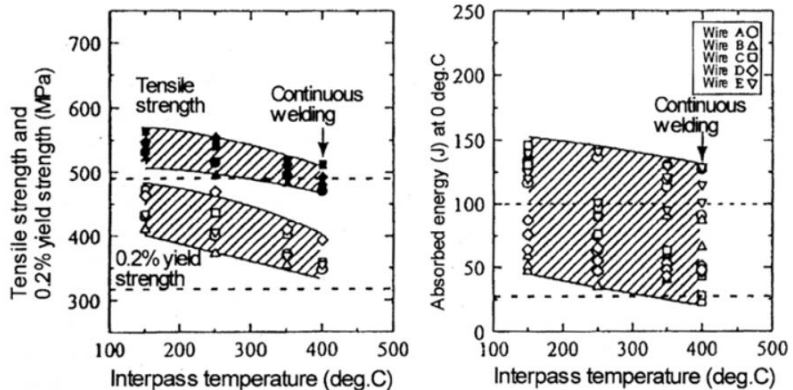
Temperatur *interpass* mengacu pada temperatur material didalam lasan daerah sesaat sebelum las kedua diterapkan. Temperatur *interpass* diaplikasikan setelah lapisan pertama dibuat. Temperatur *interpass* dapat ditentukan sebagai minimum, maksimum, atau keduanya, tergantung pada material yang dilas. Temperatur *interpass* mempengaruhi properti dari dari segala aspek berikutnya. Hasil dan kekuatan tarik utama dari logam las keduanya berkaitan dengan temperatur *interpass*. Temperatur *interpass* tinggi cenderung mengurangi kekuatan logam las. Selain

itu, lebih tinggi temperatur *interpass* biasanya akan memberikan struktur butiran yang lebih baik dan meningkatkan temperatur transisi ketangguhan *Charpy V notch*. Namun, ketika temperatur *interpass* menjadi berlebihan, maka tren ketangguhan akan semakin rendah. Tujuan dari pengendalian temperatur *interpass* adalah diantaranya:

1. Untuk meminimalkan risiko retak hidrogen untuk baja paduan karbon, karbon-mangan, dan feritik, di mana temperatur *interpass* minimum ditetapkan sama dengan temperatur pemanasan minimum.
2. Untuk mencegah kerusakan sifat mekanik untuk baja paduan karbon, karbon-mangan, dan feritik, di mana temperatur *interpass* maksimum ditentukan
3. Untuk meminimalkan risiko pematatan atau retakan cairan untuk baja tahan karat austenitik, nikel, dan paduan aluminium di mana temperatur *interpass* maksimum ditentukan.
4. Untuk menjaga pembasahan yang baik dari kolam cair ke logam dasar untuk tembaga dan paduan tembaga, di mana temperatur *interpass* minimum ditetapkan sama dengan temperatur pemanasan minimum.

Penggunaan temperatur pemanasan awal yang tinggi meningkatkan biaya pengelasan karena peningkatan penggunaan energi untuk memanaskan pekerjaan, sehingga orang-orang telah meminimalkannya dengan menggunakan bahan pengelasan lanjutan yang memiliki kemampuan las yang lebih baik. Berbeda dengan ini, temperatur *interpass* cenderung dinaikkan untuk mengisi alur pengelasan secepat mungkin untuk efisiensi pengelasan yang lebih baik, sehingga mengurangi biaya pengelasan. Di sisi lain, sifat mekanik (seperti untuk baja feritik) dan ketahanan retak (seperti untuk baja austenit) memburuk dengan temperatur *interpass* tinggi dan, dengan tingkat pendinginan yang rendah. Inilah sebabnya mengapa temperatur *interpass* maksimum sering menjadi masalah. Pada Gambar 2.19 terlihat bahwa kekuatan tarik dan kekuatan luluh serta energi metal

menurun dengan temperatur *interpass* yang tinggi. Oleh karena itu temperatur *interpass* harus dibatasi untuk memastikan sifat mekanik yang diinginkan.



Gambar 2.19 Efek temperatur *interpass* pada properti mekanik dari 490 MPa dengan pengelasan GMAW (Steel Construction Engineering, 2000)

2.9 Mikrostruktur Material Las

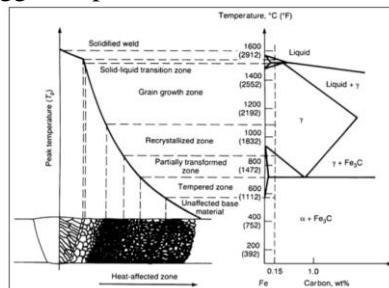
Daerah lasan terdiri dari tiga bagian yaitu daerah logam las, daerah HAZ dan daerah logam induk yang tak terpengaruhi panas.

1. Daerah Logam Las

Daerah logam las adalah bagian dari logam yang pada proses pengelasan akan mencair dan kemudian membeku. Komposisi logam las terdiri dari komponen logam induk dan bahan tambahan dari elektroda. Karena logam las dalam proses pengelasan ini mencair kemudian membeku, maka kemungkinan besar terjadi pemisahan komponen yang menyebabkan terjadinya struktur yang tidak homogen, ketidakhomogennya struktur akan menimbulkan struktur ferit kasar dan bainit atas yang menurunkan ketangguhan logam las. Struktur mikro di logam las dicirikan dengan adanya struktur berbutir panjang (columnar grains). Struktur ini berawal dari logam induk dan tumbuh ke arah tengah daerah logam las (Sonawan, 2004).

2. Daerah Pengaruh Panas/*Heat Affected Zone (HAZ)*

Daerah pengaruh panas atau *heat affected zone (HAZ)* adalah logam dasar yang bersebelahan dengan logam las yang selama proses pengelasan mengalami siklus termal pemanasan dan pendinginan cepat sehingga daerah ini yang paling kritis dari sambungan las. Secara visual daerah yang dekat dengan garis lebur las maka susunan struktur logamnya semakin kasar. Karena perubahan mikrostruktur dan pendinginannya relatif cepat, sifat mekanik pada bagian ini pun ikut terpengaruh dan cenderung bersifat getas karena adanya tegangan sisa. HAZ dapat terbagi lagi menjadi 3 daerah, yaitu daerah *supercritical*, *intercritical* dan *subcritical* atau daerah transisi yang membatasi HAZ dengan logam induk. Daerah *supercritical* terdiri dari 2 bagian, yaitu *grain growth* dan *grain refinement*. *Grain growth* terjadi akibat logamnya terpanaskan di bawah temperatur A_3 (*Upper Critical Temperature*), sedangkan *grain refinement* terjadi akibat logam terpanaskan hingga tepat di bawah temperatur A_3 . Daerah *supercritical* mempengaruhi sifat dari daerah sambungan, tetapi untuk memprediksi sifat-sifatnya perlu diketahui jumlah dan tingkat dari *grain growth* dan siklus termal daerah lasan. Heat input dari proses pengelasan harus dibatasi untuk mempersempit terbentuknya daerah *supercritical* HAZ. Pada daerah ini, logam terpanaskan hingga temperatur diantara A_3 dan A_1 .



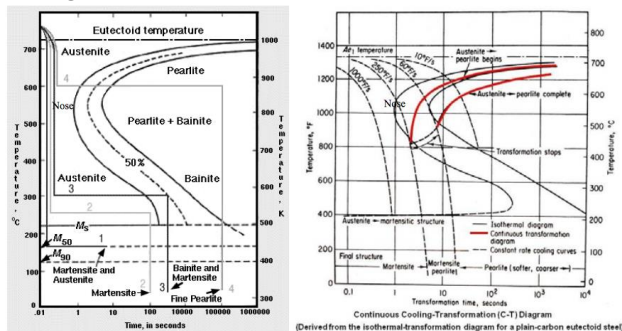
Gambar 2.20 Skema diagram dari sub-zona dari HAZ yang dihubungkan dengan diagram fasa untuk paduan 0,15% C (Lee Alan Aucot, 2015)

3. Logam Induk

Logam induk adalah bagian logam dasar di mana panas dan temperatur pengelasan tidak menyebabkan terjadinya perubahan-perubahan struktur dan sifat. Disamping ketiga pembagian utama tersebut masih ada satu daerah pengaruh panas, yang disebut batas las (Wiryosumarto, 2000).

2.10 Cooling Rate

Pada umumnya struktur dari baja tergantung dari kecepatan pendinginannya dari temperatur daerah austenit sampai ke temperatur kamar. Karena perubahan struktur ini dengan sendirinya sifat-sifat mekanik yang dimiliki juga berubah. Hubungan antara kecepatan pendinginan dan struktur mikro yang terbentuk biasanya digambarkan dalam diagram yang menghubungkan waktu, temperatur, dan transformasi yang biasa disebut diagram Continuous Cooling Transformation dan disingkat menjadi diagram CCT.



Gambar 2.21 Diagram *Time Temperature Transformation* dan *Continous Cooling Transformation* (Rahul, 2014)

Pada proses pengelasan, transformasi austenit menjadi ferit merupakan tahap yang paling penting karena akan mempengaruhi struktur logam las, hal ini disebabkan karena sifat-sifat mekanis material ditentukan pada tahap tersebut. Faktor-faktor yang mempengaruhi transformasi austenit menjadi ferit adalah masukan

panas, komposisi kimia las, kecepatan pendinginan dan bentuk sambungan las. Struktur mikro dari baja pada umumnya tergantung dari kecepatan pendinginannya dari temperatur daerah austenit sampai temperatur kamar. Karena perubahan struktur ini maka dengan sendirinya sifat-sifat mekanik yang dimiliki baja juga akan berubah.

Contoh diagram CCT ditunjukkan dalam Gambar di atas, dari diagram di atas dapat dilihat bahwa bila kecepatan pendinginan naik berarti waktu pendinginan dari temperatur austenit turun, struktur akhir yang terjadi berubah campuran ferit-perlit ke campuran ferit-perlit-bainit-*lath* martensit, ferit-bainit *lath* martensit, kemudian bainit-*lath* martensit dan akhirnya pada kecepatan yang tinggi sekali struktur akhirnya adalah *lath* martensit (Wiryo Sumarto, 2000).

Laju pendinginan akan memberikan pengaruh yang signifikan pada sifat sifat mekanik metalurgi dan kelaikan lasan. Dapat dikatakan bahwa dalam perlakuan panas baja (dan terkait proses terkait, termasuk pengelasan) laju pendinginan adalah salah satu elemen yang paling penting. Struktur metalurgi pada lasan akan sangat ditentukan oleh laju pendinginan dari temperatur puncak ketika proses pengelasan berlangsung. Untuk baja karbon atau baja paduan rendah, temperatur kritis adalah temperatur yang mendekati hidung dari perlit di TTT diagram. Pendinginan maksimum terdapat pada tengah jalur dari lasan. Namun, laju pendinginan dekat garis fusi hanya memiliki sedikit perbedaan di garis tengah. karenanya, persamaan laju pendinginan dapat diterapkan untuk seluruh logam las termasuk jalur fusi. Pada proses pengelasan yang membutuhkan setidaknya 6 *layer* atau pelat tebal, persamaan untuk *cooling rate*-nya adalah

$$R_c = - \frac{2\pi k(T_c - T_0)^2}{H_{nett}} \dots \dots \dots (2.7)$$

Sedangkan untuk pelat tipis yang kurang dari 5 *layer* pengelasan, persamaannya adalah

$$R_c = -2\pi k\rho C \left(\frac{h}{H_{nett}}\right)^2 (T_c - T_0)^3 \dots\dots\dots (2.8)$$

Keterangan

- R_c = Kecepatan pendinginan (°C/sec)
- h = Ketebalan plat (mm)
- k = Konduktivitas termal (cal/ [cm s °C])
- ρ = Densitas material (g/cm³)
- C = Spesifik panas material (KCal/g °C)
- T_i = Temperatur Awal (°C)
- T_o = Temperatur Akhir (°C)
- H_{nett} = *Heat input* (cal/cm)

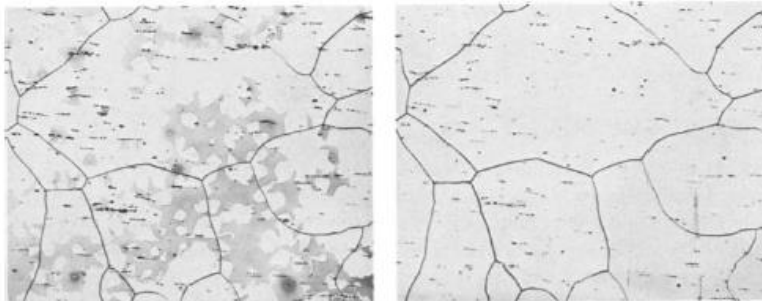
2.11 Struktur Mikro

Besi murni, saat dipanaskan, mengalami dua perubahan dalam struktur kristal sebelum meleleh. Pada temperatur ruang baja memiliki bentuk yang stabil, yaitu struktur ferit, atau *α-iron*, yang memiliki struktur kristal BCC. Ferit akan mengalami transformasi polimorfik menjadi FCC austenit, atau *γ-iron*, di 912 °C (1674 F). Austenit ini bertahan sampai 1394 °C (2541 F), pada temperatur 1400 °C austenit FCC kembali ke fase BCC yang dikenal sebagai δ-ferrit, yang akhirnya sepenuhnya menjadi *liquid* pada temperatur 1535 °C. Beberapa mikrostruktur akan dihasilkan pada baja paduan dan hubungannya dapat dilihat pada diagram Fe-Fe₃C dan pada diagram tersebut menunjukkan bahwa mikrostruktur akan berkembang tergantung pada kandungan karbon dan perlakuan panas yang diberikan.

Pada baja dengan kandungan karbon kurang dari 0,8% pembekuan dimulai dari titik likuidus. Setelah selesai pembekuannya seluruhnya menjadi austenit, perubahan selanjutnya akan terjadi pada saat telah menyentuh garis A₃, akan mulai terjadi transformasi dari γ menjadi α. Transformasi ini akan dimulai dengan terbentuknya inti-inti ferit pada batas butir austenit. (Calister, 2008)

1. Ferit

Ferit merupakan larutan padat karbon dalam besi α . Kelarutan maksimum 0,025 %C pada 723°C dan hanya 0,008 %C pada temperatur kamar. Memiliki struktur kristal BCC. Kekuatannya rendah yaitu hanya berkisar 28 Kg/mm² tetapi memiliki keuletan tinggi sampai 40% dengan kekerasan kurang dari 90 HRB. ferit lebih lunak dari sementit (Fe₃C). sifat ferit adalah lunak dan ulet sehingga bisa membuat material memiliki kemampuan untuk diberikan pembenturan atau mudah dibentuk dan biasanya material yang mengandung ferit ini sering digunakan untuk keperluan konstruksi (Darmawi, 2009). Struktur mikro ferit akan ditunjukkan pada Gambar 2.22

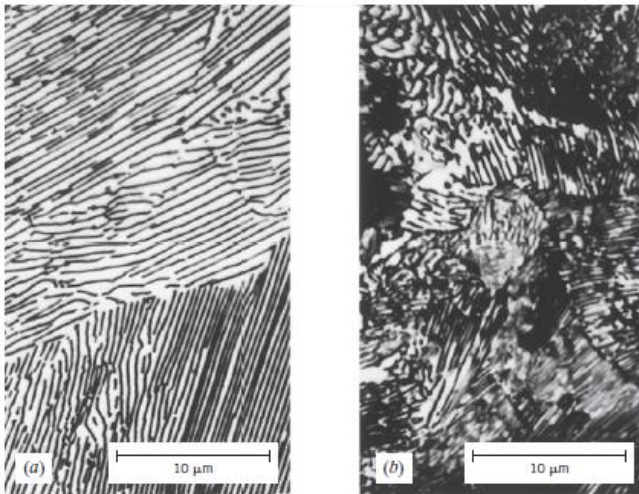


Gambar 2.22 Struktur Ferit (George F. Vander, 1999)

2. Perlit

Merupakan campuran eutektoid yang terdiri dari sementit dan ferit berlapis-lapis yang terbentuk pada temperatur 723 °C. Memiliki kekuatan tarik sebesar 84 Kg/mm², keuletan 20% dan kekerasan mencapai 250-300 BHN. Pada temperatur tepat di bawah eutektoid, lapisan yang terbentuk relatif tebal dari fase - ferrite dan Fe₃C. struktur mikro ini disebut perlit kasar. Pada temperatur ini, laju difusi relatif tinggi, sehingga selama transformasi atom karbon dapat berdifusi jarak yang relatif panjang, yang menghasilkan pembentukan *lamellar* tebal. Dengan penurunan temperatur, laju difusi karbon menurun, dan lapisan menjadi semakin tipis. Struktur berlapis tipis yang diproduksi di

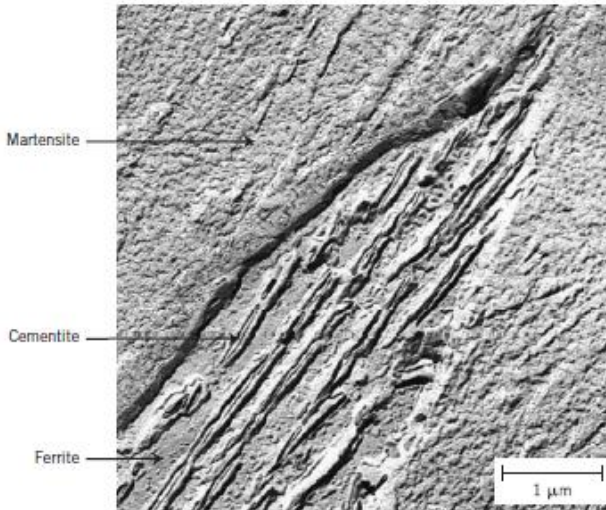
sekitar 540°C disebut perlit halus yang ditunjukkan pada Gambar 2.23 (Calister, 2008).



Gambar 2.23 Struktur dari (a) Perlit Kasar (b) Perlit Halus (Calister, 2008)

3. Bainit

Selain perlit, ada mikrokonstituen lain yang merupakan produk dari transformasi austenitik, salah satunya disebut bainit. Struktur mikro bainit terdiri dari fase ferit dan sementit, dengan bentuk yang disebabkan oleh proses difusi yang berlangsung lebih cepat dari perlit. Bainit terbentuk sebagai jarum atau pelat, tergantung pada temperature transformasi. Detail mikrostruktur dari bainit sangat halus sehingga resolusinya hanya dimungkinkan menggunakan mikroskop elektron. Gambar 2.24 adalah mikrograf elektron yang menunjukkan butiran bainit (diposisikan secara diagonal dari kiri bawah ke kanan atas) yang dari matriks ferit dan struktur sementit yang memanjang. Bainit terbentuk dalam keadaan isothermal dan terjadi pada temperatur dibawah dimana perlit terbentuk. Menurut kekerasan, bainit memiliki kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan dengan perlit.



Gambar 2.24 Struktur dari Bainit (Calister, 2008)

4. Martensit

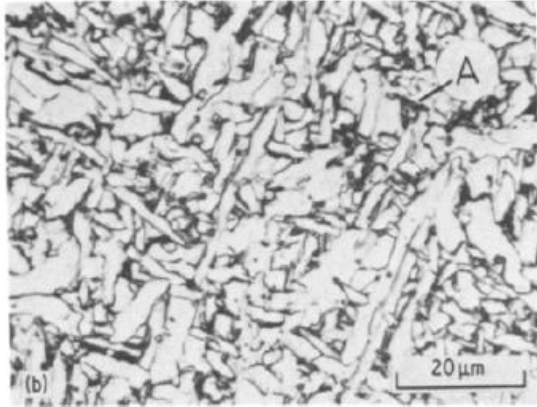
Martensit terbentuk apabila baja didinginkan dengan cepat pada temperatur yang sangat rendah. Martensit merupakan fase *non-equilibrium* yang dihasilkan dari tidak adanya difusi karbon yang terjadi dari austenit. Apabila austenit dipaksa berada pada temperatur yang cukup rendah maka dorongan termodinamik ini akan berubah menjadi gaya geser (*shear stress*) yang menggeser beberapa atom besi pada posisi tertentu sedemikian rupa dengan tujuan ingin mengubah struktur FCC menjadi BCC. Namun karena sempitnya waktu maka yang terjadi maka karbon tidak banyak yang bisa terlarut sehingga mengakibatkan salah satu rusuk BCC memanjang dan membentuk struktur BCT (*body centered tetragonal*). Kadar karbon akan berpengaruh pada pembentukan struktur martensit. Pada karbon rendah maka martensit yang terbentuk akan berbentuk *lath*. Martensit merupakan struktur yang sangat keras dikarenakan di tiap batas butirnya menyimpan tegangan yang sangat besar akibat adanya *shear stress*.



Gambar 2.24 Struktur dari Martensit (Calister, 2008)

5. Ferit *Acicular*

Struktur ini terbentuk akibat pertumbuhan ferit dari austenit yang tidak pada batas butir melainkan bergerak masuk kedalam butir austenit membentuk cabang-cabang dan ranting-ranting yang biasa disebut dengan struktur dendritik. Struktur ferit *acicular* yang berbentuk seperti anyaman dan bentuk inilah yang disebut dengan *interlocking structure*. Ferit *acicular* tumbuh secara radial dari inklusi sehingga membentuk struktur *interlocking*. Dalam batas tertentu inklusi dibutuhkan untuk nukleasi. Struktur ini yang paling diharapkan muncul pada pengelasan karena merupakan *interlocking structure* yang mampu menghambat laju perambatan retak. Dalam proses pembentukan struktur mikro, terutama ferit acicular, sangat dipengaruhi oleh banyak faktor, diantaranya adalah inklusi. Inklusi adalah partikel halus sebagai akibat dari reaksi oksidasi atau reduksi selama proses pengelasan dan tidak ikut larut dalam logam las cair. Unsur ini dapat membantu terbentuknya struktur ferit *acicular*

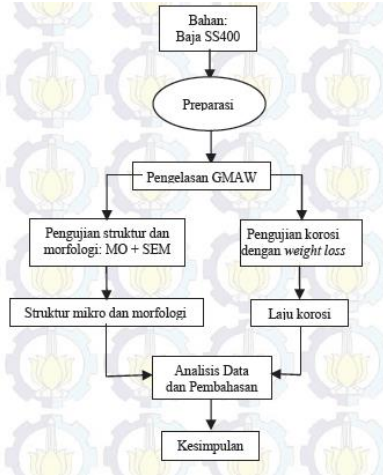


Gambar 2.25 Struktur dari Ferit *Acicular* (R. A. Ricks, 1982)

2.12 Penelitian Sebelumnya

1. Pengaruh Pengelasan GMAW Terhadap Ketahanan Korosi Baja SS400 Studi Kasus di PT. INKA Madiun, Adi Kurniawan Yusim (2011)

Pada jurnalnya, Adi melakukan uji ketahanan korosi pada baja SS400 yang sebelumnya dikenai pengerjaan pengelasan GMAW (Gas Metal Arc Welding) dengan variasi gas pelindung. Plat baja SS400 dengan ketebalan 9 mm dilas menggunakan tipe butt joint (bentuk huruf V) dengan variasi gas pelindung yaitu argon murni, argon 82%, dan CO₂ murni. Gas pelindung dalam pengelasan GMAW ini bertujuan untuk mengurangi proses oksidasi selama proses pengelasan sehingga ketahanan korosi logam las tetap baik. Korosi adalah proses yang merugikan, maka diperlukan pemilihan komposisi gas pelindung yang tepat supaya sambungan logam dalam proses pengelasan memiliki ketahanan korosi yang baik. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui ketahanan korosi pada baja SS400 yang telah dilakukan pengelasan GMAW dengan variabel gas pelindung.



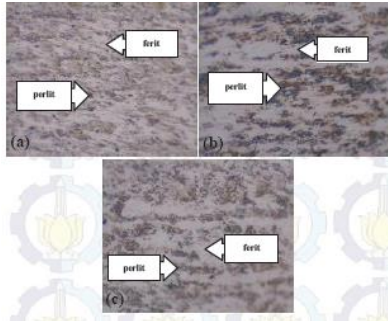
Gambar 2.25 Skema Percobaan

Pengukuran laju korosi dilakukan dengan metode kehilangan berat. Hasil percobaan menunjukkan bahwa laju korosi paling tinggi dialami oleh baja SS400 dengan gas pelindung argon murni sebesar 3,5832 mpy, sedangkan untuk gas pelindung argon 82% dan CO₂ murni masing-masing 2,9545 mpy dan 2,2991 mpy. Nilai kekerasan untuk gas pelindung argon murni 277,1 HVN; argon 82% sebesar 223,2 HVN; dan CO₂ murni 200,7 HVN.

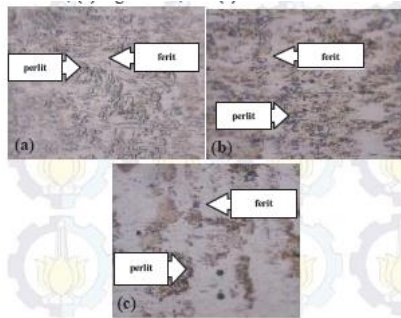


Gambar 2.26 Nilai kekerasan pada tiap-tiap daerah untuk gas pelindung bervariasi.

Hasil ini menunjukkan penggunaan gas pelindung yang berbeda menghasilkan ketahanan korosi dan nilai kekerasan yang berbeda pula. Hasil ini dapat dijelaskan dengan perolehan foto mikro yang menunjukkan adanya fase ferit dan perlit, serta distribusinya.



Gambar 2.27 Hasil uji struktur mikro baja SS400 daerah HAZ dengan perbesaran 500x: (a) argon murni, (b) argon 82%, dan (c) karbondioksida murni.



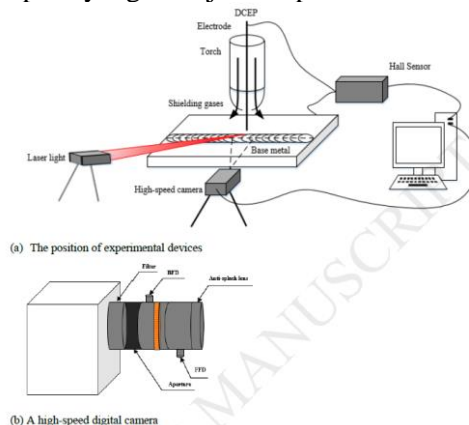
Gambar 2.28 Hasil uji struktur mikro baja SS400 daerah weld metal dengan pembesaran 500x: (a) argon murni, (b) argon 82%, (c) karbondioksida murni.

Fase yang terbentuk pada pengelasan dengan gas pelindung argon murni terdapat banyak fase perlit dibandingkan gas

pelindung argon 82% dan karbondioksida murni. Fase pelit memiliki sifat mudah bereaksi, energinya lebih tinggi sehingga mudah terkorosi, dan lebih keras karena densitasnya besar. Pengamatan morfologi permukaan baja yang telah terkorosi dilakukan dengan SEM (Scanning Electron Microscopy).

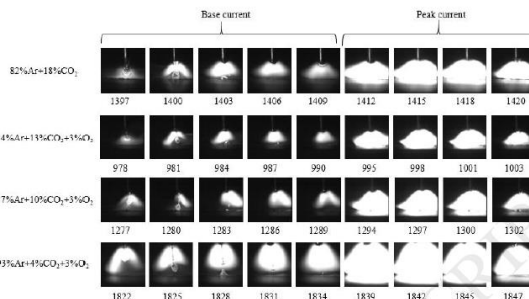
2. Effect of *Shielding Gas* on the metal transfer and weld morphology in pulsed current MAG welding of carbon steel, Yong Zhao dkk. (2018)

Serangkaian eksperimen dilakukan untuk menyelidiki pengaruh berbeda dari jenis gas pelindung pada transfer logam, morfologi las dan struktur mikro las dalam pengelasan MAG. pengelasan dilakukan dengan menggunakan kawat ER50-6 berdiameter 1,2 mm sebagai elektroda dan pelat baja Q345E dengan ketebalan 12mm sebagai logam dasar. Empat jenis campuran berikut ini diterapkan pada laju aliran 20 L.min⁻¹: 82% Ar + 18% CO₂, 84% Ar + 13% CO₂ + 3% O₂, 87% Ar + 10% CO₂ + 3% O₂, 93% Ar + 4% CO₂ + 3% O₂. Arus yang digunakan dalam proses pengelasan ini adalah 260A. Perangkat eksperimental telah diatur seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 2.29 (a).



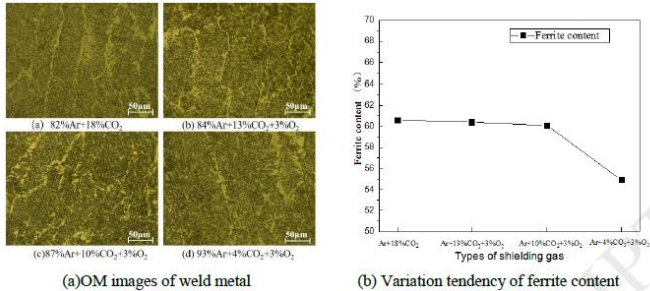
Gambar 2.29 Skema Diagram Percobaan

Hasil dari percobaan tersebut adalah, Dibandingkan dengan gas pelindung biner (Ar + CO₂), pelindung terner gas (Ar + CO₂ + O₂) dapat memperoleh kuantitas kurang percikan, transfer logam stabil, busur pembakaran, penyempurnaan tetesan logam dengan penambahan oksigen. Sebuah aliran transfer *spray* yang stabil diperoleh ketika gas shielding Ar + 4% CO₂ + 3% O₂ digunakan, tetapi perubahan mode transfer logam memiliki hubungan erat dengan busur berbentuk lonceng daripada arus kritis ketika campuran pelindung gas Ar + 13% CO₂ + 3% O₂ .

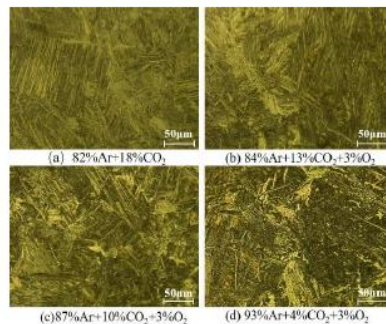


Gambar 2.30 Bentuk busur untuk berbagai komposisi gas pelindung

Konsentrasi CO₂ yang lebih tinggi memiliki efek kompresi yang jelas pada bentuk busur. Dengan meningkatkan konsentrasi CO₂, area busur semakin terang dan panjang busur menurun. Dengan peningkatan konsentrasi CO₂ dalam gas pelindung terner, lebar las dan penetrasi lasan meningkat akibat gaya busur yang lebih tinggi. Kandungan ferit dalam logam lasan sedikit meningkat dengan mempengaruhi bahan kimia komposisi dan laju pendinginan dengan peningkatan konsentrasi CO₂ di gas pelindung. *Lath* martensite reng rendah karbon didistribusikan di CGHAZ.



Gambar 2.31 Evolusi Mikrostruktur pada *Weld Metal* dengan komposisi gas pelindung yang berbeda

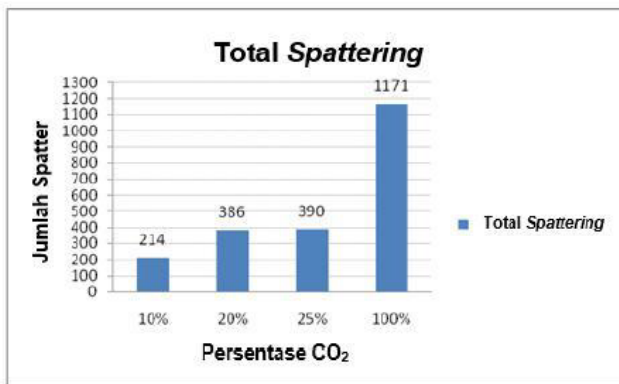


Gambar 2.32 Evolusi Mikrostruktur pada *HAZ* dengan komposisi gas pelindung yang berbeda

- Analisa Pengaruh Variasi Komposisi Gas Pelindung Terhadap Hasil Pengelasan GMAW-*Short Circuit* dengan Penggunaan Mesin Khusus *Regulated Metal Deposition* (RMD), Zakhwan Hilmy, dkk (2016)

Penelitian yang dilakukan bertujuan mengetahui bagaimana pengaruh variasi gas pelindung elektroda yang digunakan pada proses pengelasan GMAW dengan menggunakan mesin RMD (*Regulated Metal Deposition*) dengan transfer *mode* secara *short circuit* terhadap hasil pengelasan pipa baja ASTM A106 dengan komposisi Ar + CO₂ (90%+10%, 80%+20%, 75%+15%,

0%+100%) pada posisi *Flat*, *horizontal*, *vertical*, dan *overhead* di bagian *root*. Pengelasan dilakukan pada 4 posisi, yaitu *flat*, *vertical*, *overhead*, dan *horizontal*. Tiap-tiap komposisi gas dilakukan pengelasan sebanyak 3 kali (3 pipa) pada bagian *root phase*. Pengecekan hasil pengelasan secara visual untuk menganalisa bentuk *weld bead* (*convex*, *concave*, *flat*). Perhitungan spatter dilakukan secara manual dan dilakukan beberapa kali sebagai validasi. Hasil perhitungan di Gambarkan dalam bentuk grafik pada Gambar 2.30



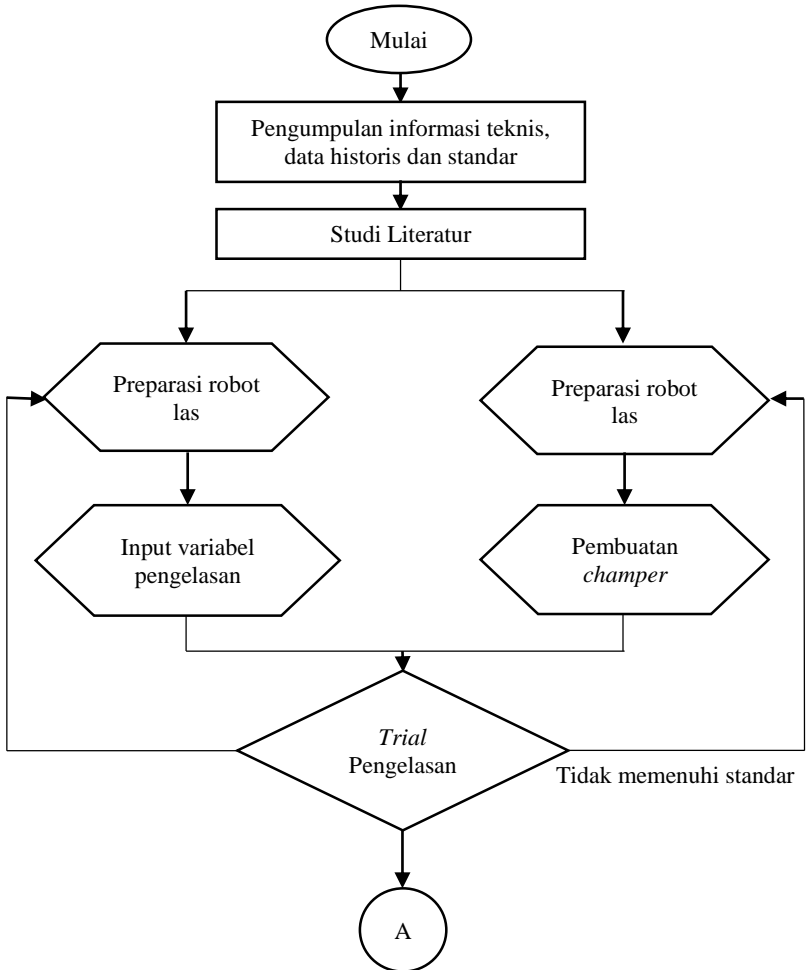
Gambar 2.33 Grafik total *Spattering*

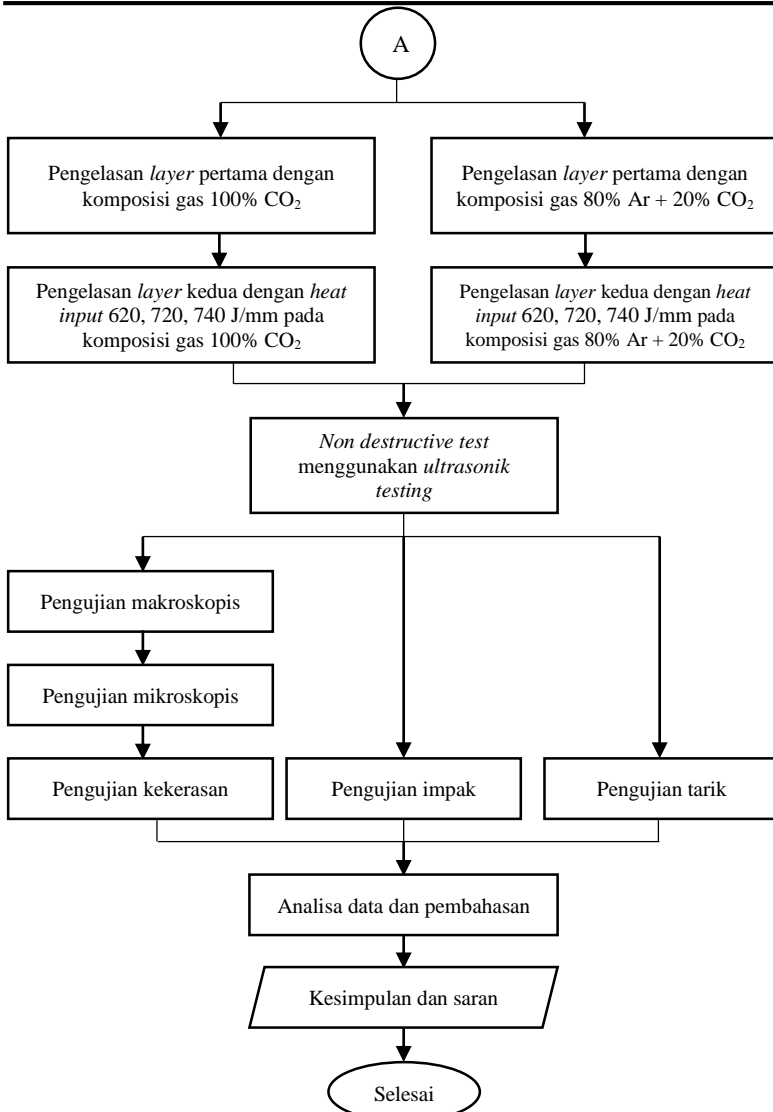
Berdasarkan Gambar 2.30 terlihat nilai kekerasan pada weld metal yang menggunakan komposisi gas Ar+CO₂ (90%+10%, 80%+20%, dan 75%+25%) memiliki perbedaan nilai kekerasan yang tidak berbeda jauh (selisih ± 3 HV), sedangkan penggunaan gas CO₂ menghasilkan nilai kekerasan yang lebih kecil dibandingkan komposisi gas yang lainnya yaitu 186.46. Sehingga dapat disimpulkan bahwa komposisi gas pelindung yang efektif untuk digunakan pada pengelasan GMAW *short circuit* dengan menggunakan mesin RMD untuk digunakan dan direkomendasikan oleh penulis pada pengelasan GMAW *short circuit* dengan menggunakan mesin RMD adalah Ar+CO₂ (80%+20%) atau Ar+CO₂ (75%+25%).

BAB III METODOLOGI

3.1 Diagram Alir

Berikut ini adalah diagram alir dari penelitian tugas akhir



**Gambar 3.1** Diagram Alir

3.2 Rancangan Penelitian

Adapun jadwal dari penelitian pada pengelasan material SS400 menggunakan metode GMAW akan dijelaskan pada Tabel 3.1 sedangkan rancangan penelitian akan dijelaskan pada Tabel 3.2:

Tabel 3.4 Rencana Kegiatan Penelitian

Kegiatan	September				Oktober				November				Desember			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Studi Literatur	■	■	■	■												
Konsultasi Kepada Pembimbing	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Penyusunan Laporan	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Preparasi Spesimen				■	■	■	■	■	■	■	■	■				
Pengelasan					■	■	■									
Pengujian Hardness						■	■									
Pengujian Impact								■								
Pengujian Metalografi								■	■	■	■	■				
Pengujian Tarik											■	■	■			
Analisa Data													■	■	■	■

Tabel 3.2 Rancangan Pengujian

Material	Komposisi Gas Pelindung (%)	Heat Input (J/mm)	Uji Visual	Uji Makroskopis	Uji Mikroskopis	Uji Tarik	Uji Keke- rasan	Uji Impact
SS400	100% CO ₂	620	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		720	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		740	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	80% Ar + 20% CO ₂	620	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		720	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		740	✓	✓	✓	✓	✓	✓

3.3 Bahan Penelitian

1. Material Uji sebagai *Base Metal*

Plat baja SS400 yang memiliki nilai *ultimate tensile strength* bernilai 400 – 510 MPa dan termasuk dalam *low carbon steel*. Material ini didapatkan dari PT. X. Adapun komposisi kimia dari material uji tertera pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Komposisi Kimia SS400

Persen Unsur (%)								
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
0.1825	0.1850	0.5800	0.0157	0.0045	0.0203	0.0243	0.0540	0.0058

2. Elektroda ER70S-G KC26

Kawat elektroda yang memiliki nilai *ultimate tensile strength* hingga 510 MPa. Material ini didapatkan dari PT. X. Untuk komposisinya akan ditunjukkan pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Komposisi Kimia ER70S-G KC26

Komposisi Kimia (%)				
C	Si	Mn	P	S
0,06	0,8	1,53	0,014	0,01

3. Gas CO₂ dan Gas Ar

Gas CO₂ dan gas Ar digunakan sebagai gas pelindung selama proses pengelasan GMAW untuk mencegah adanya reaksi/impurities yang terjadi. Material ini didapatkan dari PT. X

4. Alumina

Larutan alumina digunakan pada proses polishing untuk mengkilapkan permukaan logam. Material ini didapatkan dari PT.X.

5. Etsa

Etsa yang digunakan pada penelitian kali ini berupa 3% dan 30% nital untuk melihat struktur mikro dan makro pada daerah hasil pengelasan. Material ini didapatkan dari PT. X. Ditunjukkan pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12 Rak bahan etsa

3.4 Alat Penelitian

Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini antara lain adalah:

1. Robot pengelasan GMAW

Alat ini digunakan untuk melakukan proses pengelasan secara otomatis berdasarkan standar AWS D1.1:2000 *Structural Welding Code-Steel* (AWS, 2000). Operator akan melakukan proses *teaching* untuk memasukkan variabel pengelasan yang diinginkan. Robot pengelasan yang digunakan, dimiliki oleh PT. X, memiliki spesifikasi yang ditunjukkan pada Gambar 3.3 dibawah ini. Dan gambar untuk robot pengelasan akan ditunjukkan oleh Gambar 3.2



Gambar 3.3 Robot Pengelasan GMAW

Type	RAL06-5GH	
Degree of freedom/motion pattern	6-axis/vertical articulated	
Weight capacity	6kg	
Positional repeatability	± 0.08mm	
Radius of rotation	Maximum	1378mm
	Minimum	287mm
Range of motion	Axis 1 (revolution)	± 170°
	Axis 2(lower arm)	-90° ,+155°
	Axis 3(upper arm)	-180° ,+83°
	Axis 4(wrist swing)	± 179°
	Axis 5(wrist swing)	± 135°
	Axis 6(wrist rotation)	± 270°
Maximum speed	Axis 1 (twist)	120° /s
	Axis 2(lower arm)	120° /s
	Axis 3(upper arm)	140° /s
	Axis 4(wrist twist)	340° /s
	Axis 5(wrist swing)	340° /s
	Axis 6(wrist rotation)	520° /s
Permissible twist	Axis 4(wrist twist)	11.8N · m [1.2kg f · m]
	Axis 5(wrist swing)	9.8N · m [1.0kg f · m]
	Axis 6(wrist rotation)	5.9N · m [0.6kg f · m]
Permissible inertia moment (GD ² /4)	Axis 4(wrist twist)	0.24kg · m ²
	Axis 5(wrist swing)	0.17kg · m ²
	Axis 6(wrist rotation)	0.06kg · m ²
Body weight	130kg	
Power capacity	1.5KVA	

Range Motion

Gambar 3.3 Spesifikasi Robot GMAW

2. *Band saw*

Band saw merupakan alat berupa seperti gergaji yang digunakan untuk memotong plat baja berukuran besar. Alat yang digunakan, dimiliki oleh PT. X, ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 *Band saw*

3. *Micro cutting*

Micro cutting merupakan alat yang digunakan untuk memotong baja berdimensi kecil. Alat yang digunakan, dimiliki oleh PT. X, ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 *Micro cutting*

4. *Wire cut*

Wire cut digunakan untuk memotong baja dengan akurasi yang tinggi meman. *Wire cut* menggunakan prinsip kerja memotong logam

dengan menggunakan kawat konduktif yang dialirkan listrik. Alat yang digunakan, dimiliki oleh PT. X, ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.6 *Wire cut*

5. *Alat Milling*

Prinsip kerja mesin *milling* adalah dengan cara mencekam benda kerja, kemudian dilanjutkan dengan pemotongan dengan alat potong yang disebut *cutter*, dan akhirnya benda kerja akan berubah ukuran maupun bentuknya. Alat ini digunakan untuk membentuk spesimen *tensile*. Gambar alat *milling* ditampilkan pada Gambar 3.7



Gambar 3.7 *Alat milling*

6. *Hand grinding*

Hand grinding digunakan untuk meratakan permukaan hasil pengelasan dari spaltter/terak berlebih pada *finishing*.

7. Alat *grinding* dan *polishing*

Alat *grinding* dan *polishing* digunakan untuk meratakan permukaan baja secara otomatis. Alat yang digunakan, dimiliki oleh PT. Komatsu Indonesia, ditunjukkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Alat *grinding* dan *polishing*

8. Kertas Abrasif

Kertas abrasif digunakan untuk meratakan permukaan baja. Grade yang digunakan dimulai dari Grade 80 – 2000. Alat yang digunakan, dimiliki oleh PT. X, ditunjukkan pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Kertas Abrasif

9. Kertas Alumina

Kertas alumina digunakan untuk menghaluskan permukaan baja pada proses *polishing*.

10. Mistar

Mistar digunakan untuk melakukan pengukuran dimensi baja dengan akurasi 1 cm.

11. Jangka Sorong

Jangka sorong digunakan untuk melakukan pengukuran dimensi baja dengan akurasi 0,1 cm.

12. Mikroskop Optik

Mikroskop optik yang digunakan untuk melihat struktur mikro dan makro dari hasil pengelasan. Gambar mikroskop optik yang ada pada laboratorium metalurgi teknik material ditunjukkan oleh Gambar 3.10



Gambar 3.10 Mikroskop Optik

13. Alat Pengujian *Tensile*

Alat ini digunakan untuk mengetahui kekuatan *tensile* dari hasil pengelasan. Alat *tensile* yang digunakan merupakan milik Laboratorium Metalurgi Teknik Material ITS. Ditunjukkan pada Gambar 3.11 dibawah ini.



Gambar 3.11 Alat uji *tensile*

14. Alat Pengujian *Hardness*

Alat ini digunakan untuk mengetahui nilai kekerasan dari hasil pengelasan. Alat yang digunakan merupakan alat pengujian *microhardness* yang dimiliki oleh PT. X, alat *microhardness* ditunjukkan pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12 Alat Uji *Hardness*

15. Alat pengujian *impact*

Alat ini digunakan untuk mengetahui nilai kekuatan *impact* dari hasil pengelasan. Alat yang digunakan, dimiliki oleh PT. X, ditunjukkan pada Gambar 3.13.



Gambar 3.13 Alat Uji *Impact*

3.5 Variabel Penelitian

Variabel penelitian yang digunakan pada penelitian kali ini adalah variasi *welding parameter* berupa *Heat input* yaitu sebesar 620 J/mm, 720 J/mm, 740 J/mm dan juga variasi *Shielding gas* yaitu 100% CO₂ dan 80% CO₂ + 20% Ar. Tabel 3.4 merupakan diagram skematik dari penelitian ini.

Tabel 3.5 Variabel Penelitian

Spesi men	Layer	Shielding gas	Heat Input (J/mm)	Parameter		
				Ampere (A)	Voltage (V)	Travel Speed (mm/s)
A1	1	100% CO ₂	310	300	31	30
	2		620	320	32,4	15
A2	1		310	300	31	30
	2		720	520	46,2	20
A3	1		310	300	31	30
	2		740	420	39,2	30

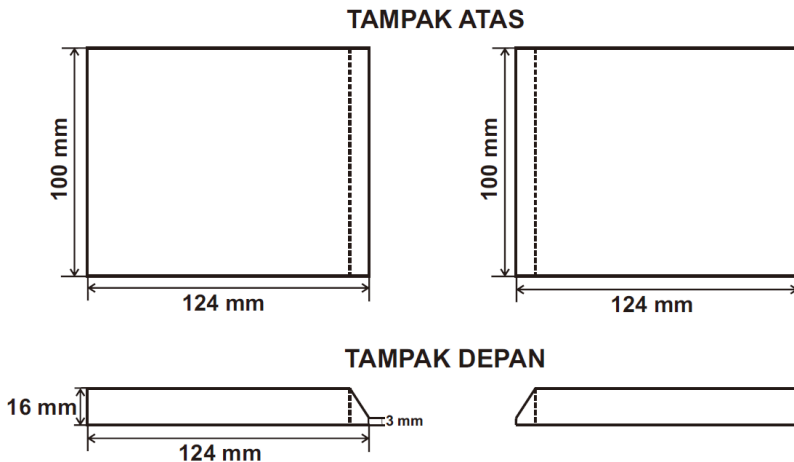
Spesi men	Layer	Shielding gas	Heat Input (J/mm)	Parameter		
				Ampere (A)	Voltage (V)	Travel Speed (mm/s)
1	1	80% CO ₂ + 20% Ar	310	300	35	30
	2		620	320	36,6	20
2	1		310	300	35	30
	2		720	520	46,2	20
3	1		310	300	31	30
	2		740	420	39,2	30

3.6 Prosedur Penelitian

3.6.1 Prosedur Proses Pengelasan

Berikut adalah prosedur pelaksanaan proses pengelasan:

1. Menyiapkan benda kerja SS400 dipotong hingga memiliki luas permukaan 300 mm x 80 mm dan ketebalan 16 mm.
2. Memberikan bevel pada kedua plat baja SS400 seperti pada Gambar 3.2 dibawah



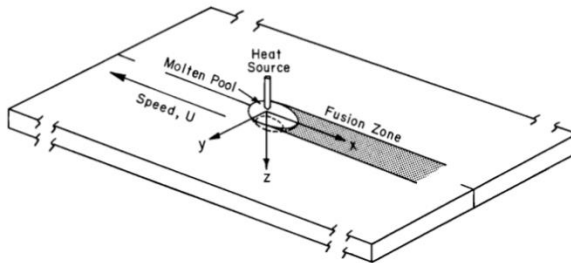
Gambar 3.2 Desain Spesimen Plat untuk Pengelasan

- Meletakkan pengajaran (*teaching*) dengan memasukkan data *welding parameter* ke robot pengelasan GMAW pada Gambar 3.3



Gambar 3.3 Panel untuk *Input Data* Pengelasan

- Melakukan trial pengelasan untuk menguji dan mengkalibrasi *welding parameter*.
- Melakukan proses pengelasan pada *layer* pertama dengan menggunakan arus 300 A sepanjang 300 mm dengan *shielding gas* 100% CO₂.
- Melakukan proses pengelasan pada *layer* kedua dengan menggunakan *Heat input* 620 J/mm sepanjang 100 mm, 720 J/mm sepanjang 100 mm dan 740 J/mm sepanjang 100 mm dengan *shielding gas* 100% CO₂. Gambar 3.4 merupakan ilustrasi proses pengelasan.



Gambar 3.4 Ilustrasi Pengelasan GMAW

7. Melakukan proses *finishing* dengan *hand grind* untuk membersihkan permukaan hasil pengelasan dari *splatter*/kerak.
8. Melakukan pemotongan hasil pengelasan dengan *band saw* hingga mendapatkan hasil spesimen dengan dimensi panjang 100 mm x lebar 250 mm x tebal 16 mm seperti pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Hasil Pemotongan *Band Saw*

9. Melakukan proses pemotongan dengan *micro cutting* untuk memperkecil dimensi sehingga bisa diproses menjadi specimen *tensile*, *hardness*, dan *impact* seperti pada Gambar 3.6



Gambar 3.6 Proses *Micro Cutting*

10. Tahap 1 – 9 lalu diulangi untuk pengelasan menggunakan *shielding gas* 80% CO₂ + 20% Ar dengan menggunakan diameter elektroda 1,4 mm.

3.6.1 Prosedur Preparasi Spesimen Metalografi

Berikut adalah prosedur pelaksanaan preparasi specimen metalografi:

1. Meratakan permukaan specimen dengan menggunakan kertas abrasi dimulai dari grade 80 – 2000.
2. Melakukan proses polishing dengan alumina dan kain bludru sampai permukaan baja mengkilap.
3. Memberikan etsa nital 30% untuk melihat struktur makro dan etsa nital 3% untuk melihat struktur mikro.
4. Melihat permukaan baja menggunakan mikroskop optic

3.6.2 Prosedur Preparasi Spesimen *Hardness*

Berikut adalah prosedur pelaksanaan preparasi specimen metalografi:

1. Memberikan rentang indentasi pada daerah hasil pengelasan (*base metal*, *HAZ*, *weld*) sebanyak 3 titik masing – masing sesuai dengan ilustrasi pada Gambar 3.7.



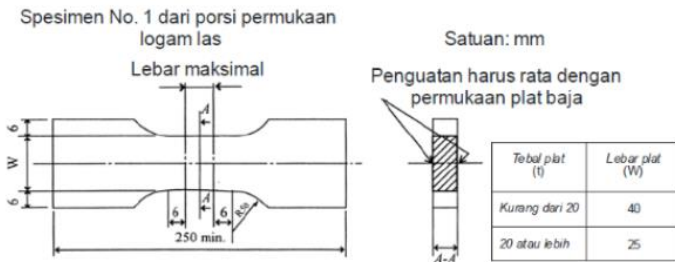
Gambar 3.7 Pembagian Titik Indentasi

2. Melakukan proses indentasi dengan menggunakan alat pengujian *hardness*.
3. Mengukur panjang diagonal kedalaman indentasi untuk mengetahui nilai kekerasannya

3.6.3 Prosedur Preparasi Spesimen *Tensile*

Berikut adalah prosedur pelaksanaan preparasi specimen metalografi:

1. Melakukan penandaan pada specimen sehingga menyerupai standar pengujian tensile seperti pada Gambar 3.8



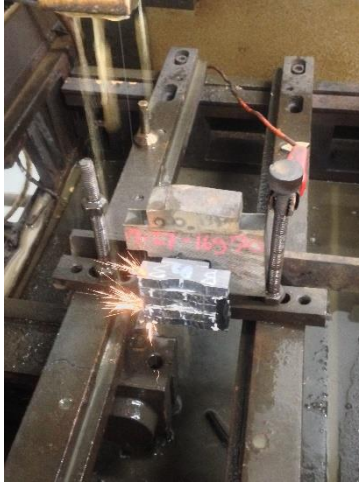
Gambar 3.8 Standar pengujian *tensile*

2. Melakukan proses *milling* untuk membuat specimen *tensile*.
3. Melakukan pengujian *tensile* menggunakan alat uji *tensile*.

3.6.4 Prosedur Preparasi Spesimen *Impact*

Berikut adalah prosedur pelaksanaan preparasi specimen metalografi:

1. Melakukan penandaan pada specimen sehingga menyerupai standar pengujian *impact*.
2. Melakukan proses *wire cut* untuk membentuk specimen *impact* pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Proses *wire cut*

3. Melakukan pengujian *impact* pada temperatur ruang.
4. Mencatat hasil sudut *impact* sebelum dan sesudah pengujian.

3.7 Proses Pengujian

Pada penelitian ini dilakukan empat pengujian. Pengujian pertama adalah pengujian visual yang bertujuan untuk mengamati tampilan permukaan spesimen. Pengujian metalografi untuk melihat struktur makro dan mikro, uji tarik untuk mengetahui kekuatan tarik spesimen, uji kekerasan untuk mengetahui nilai kekerasan spesimen dan pengujian *impact* untuk mengetahui ketangguhan hasil pengelasan.

3.7.1 Pengujian Ultrasonik

Pengujian ini memanfaatkan gelombang suara frekuensi tinggi yang dirambatkan ke dalam material dan akan dipantulkan kembali apabila ada cacat yang ditemukan. Pengujian ini dilakukan menurut standar ASTM D 2845-08 dan dilakukan di PT. X

3.7.2 Pengujian Metalografi

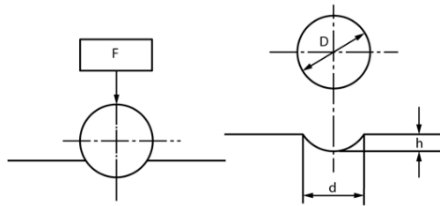
Pengujian metalografi dilakukan di PT. X dan Departemen Teknik Material dengan menggunakan mikroskop optik untuk mengamati kualitas sambungan hasil pengelasan, di mulai dari struktur mikro dan makro *base metal*, *HAZ*, dan *bead weld*. Pengujian makro (*makroscope test*) ialah proses pengujian bahan yang menggunakan mata terbuka dengan tujuan dapat memeriksa celah dan lubang dalam permukaan bahan. Angka kevalidan pengujian makro berkisar antara 0,5 sampai 50 kali. Pengujian mikro (*mikroscope test*) ialah proses pengujian terhadap bahan logam yang bentuk kristal logamnya tergolong sangat halus. Sebelum dilakukannya pengelasan, terlebih dahulu permukaan logam akan diberikan larutan etsa untuk mengkorosikan batas butir sesuai dengan standar ASTM E407-07 *Standard Practice for Microetching Metals and Alloys* untuk paduan Baja. Berikut merupakan komposisi etsa yang digunakan pada Tabel 3.6 (ASTM, 2012):

Tabel 3.6 Penggunaan Etsa (ASTM, 2012):

Komposisi etsa	Prosedur
1. 1-5 mL HNO ₃ 2. 100 mL ethanol (95%) or methanol (95%)	a) <i>Immerse few seconds to a minute.</i> b) <i>Immerse 5–40 s in 5 % HNO₃ solution. To remove stain, immerse 25 s in 10 % HCl- methanol solution.</i> ^{[1][2]} c) <i>Swab or immerse several minutes</i>

3.7.3 Pengujian *Hardness*

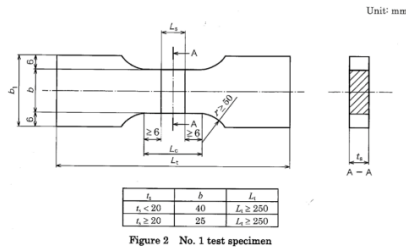
Pengujian *hardness* dilakukan di PT. X dengan menggunakan mesin *microhardness* dengan indenter baja untuk mengetahui nilai kekerasan sesuai dengan standar ASTM E10 – 15 *Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials*. Pengujian kekerasan *microhardness* dilakukan untuk menguji kekerasan pada logam induk, HAZ dan *weld metal*. Pengujian *brinell* dilakukan dengan mengidentasi pembebanan 10 Kgf. Gambar 3.10 Menunjukkan proses indentasi dari pengujian kekerasan *Brinell*. (ASTM, 2013)



Gambar 3.10 Pengujian Kekerasan (Hasan Alhamsy, 2012)

3.7.4 Pengujian *Tensile*

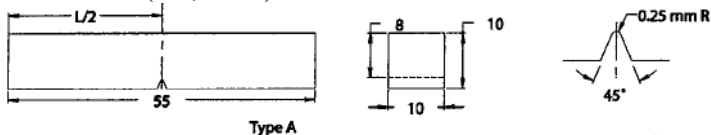
Pengujian *tensile* dilakukan di Departemen Teknik Material menggunakan alat uji *tensile* dengan standar pengujian JIS Z 3121 *Methods of Tensile Test for Butt Welded Joints* untuk mengetahui sifat mekanik berdasarkan grafik yang dihasilkan, yaitu *stress-strain graph* yang menunjukkan nilai kekuatan, UTS, *yield point*. Gambar 3.11 Menunjukkan standar bentuk spesimen JIS Z 3121. (JIS, 2013)



Gambar 3.11 Dimensi Spesimen Uji Tarik JIS Z3121 (JIS, 2013)

3.7.5 Pengujian *Impact*

Pengujian *impact* dilakukan di PT. X menggunakan alat uji *impact Charpy* dengan standar pengujian JIS Z2202 *Test Pieces for Impact Test for Metallic Materials*. Tujuan uji *impact Charpy* adalah untuk mengetahui kegetasan atau keuletan suatu bahan (*specimen*) yang akan diuji dengan cara pembebanan secara tiba-tiba terhadap benda yang akan diuji secara statik. Dimana benda uji dibuat takikan terlebih dahulu dan hasil pengujian pada benda uji tersebut akan terjadi perubahan bentuk seperti bengkokan atau patahan sesuai dengan keuletan atau kegetasan benda uji. Adapun perlengkapan yang digunakan dalam pengujian *impact* yaitu alat uji *impact* tipe *Charpy* dan benda uji (*test specimen*) sesuai pada Gambar 3.12 (JIS, 2013)



Gambar 3.12 Dimensi Spesimen Uji *Impact* JIS Z2202 (JIS, 2013)

Untuk menghitung hasil dari pengujian *impact*, menggunakan persamaan 3.1

$$I_s = \Delta E/A$$

$$= W l(\cos \beta - \cos \alpha)/A. \dots\dots\dots (3.1)$$

- ΔE = Energi (Joule)
- A = Luas penampang daerah takik (cm²)
- W = Berat pendulum (N)
- L = Panjang lengan pendulum (m)
- β = Sudut hasil pengujian *impact* (°)
- α = 140.5°

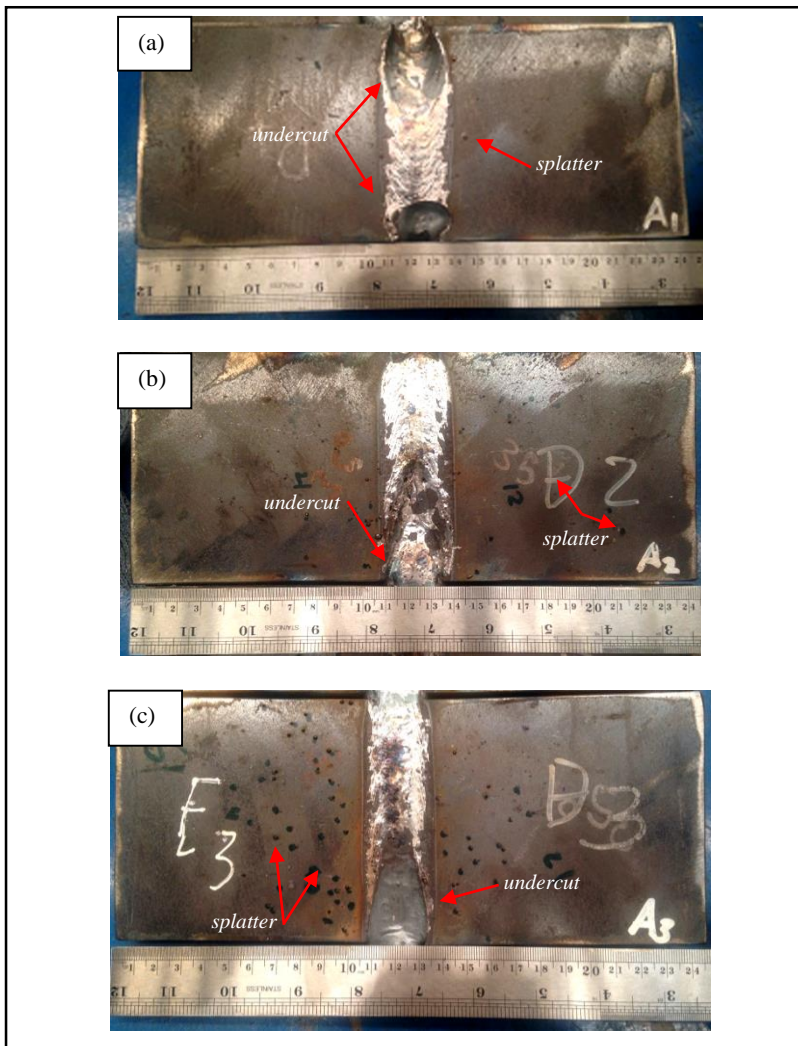
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengamatan Visual dan Ultrasonik Test Hasil Las

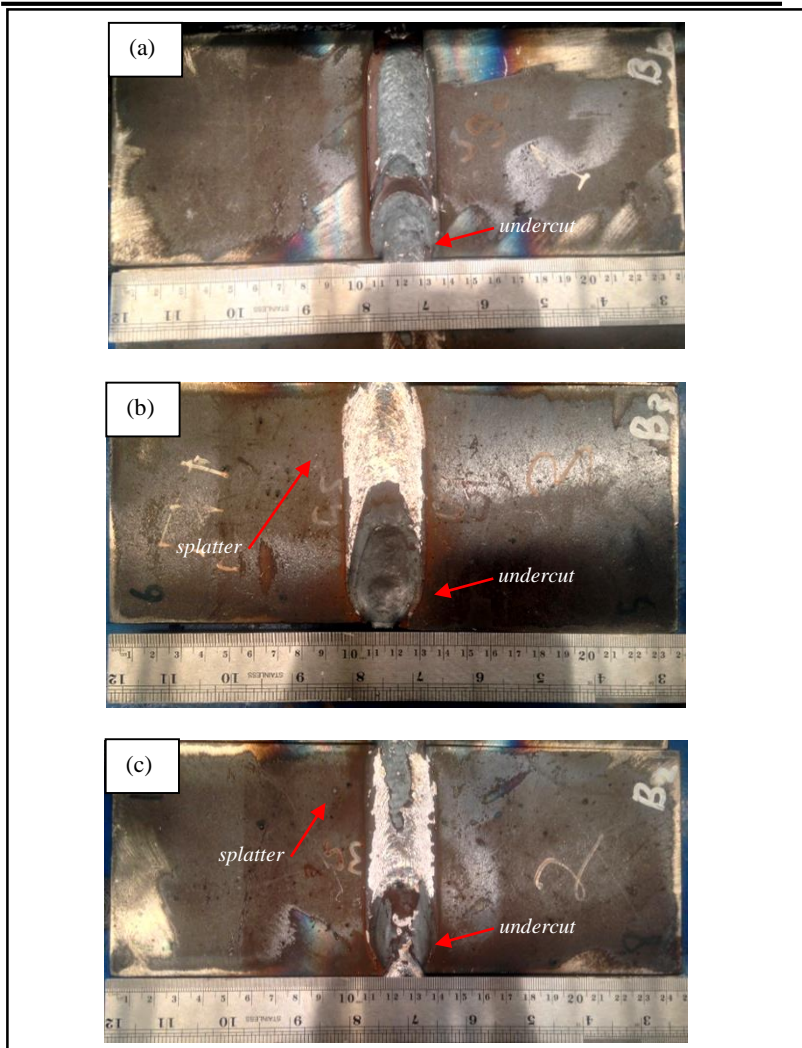
Setelah dilakukan pengelasan dengan variasi heat input dan komposisi *shielding gas*, pengamatan secara visual dan ultrasonik test dilakukan pada spesimen uji untuk mengetahui kualitas hasil lasan. Kualitas hasil las diketahui dengan mengidentifikasi adanya cacat las yang bisa dilihat secara kasat mata meliputi *undercut*, *bead porosity*, *surface crack*, dan *burn through*.

Gambar 4.1 menunjukkan hasil pengamatan visual pada hasil pengelasan dengan komposisi *shielding gas* 100% CO₂. Pada Gambar 4.1(a) menampilkan hasil visual lasan dengan parameter *heat input* 620 J/mm. Pada pengelasan dengan variasi ini didapati bahwa terdapat cacat pada spesimen berupa *undercut* pada kedua ujung sisi lasan. *Undercut* ini sendiri terjadi apabila logam lasan dari elektroda tidak mampu memenuhi kolam lasan. Selain cacat berupa *undercut*, dari Gambar tersebut juga dapat dilihat jumlah *splatter* (percikan) yang dihasilkan terdapat *splatter* 14 buah. Pada Gambar 4.1(b) merupakan penampakan visual dari spesimen dengan parameter *heat input* yang lebih tinggi yaitu 720 J/mm. Pada spesimen tersebut terlihat adanya cacat pada *undercut* pada salah satu sisi lasan dan didapati pula jumlah *splatter* yang ada yaitu sebanyak 33 buah. Jumlah *splatter* yang terjadi lebih banyak dibandingkan dengan variasi *heat input* 620 J/mm. Hal ini dikarenakan semakin tinggi *heat input* yang diberikan maka semakin besar pula energi yang diberikan pada saat penyalaan busur untuk pengelasan. Gambar 4.1(c) merupakan penampakan visual dari spesimen dengan parameter *heat input* paling tinggi yaitu sebesar 740 J/mm. Pada spesimen ini dapat dilihat bahwa cacat berupa *undercut* hanya terjadi pada salah satu ujung lasan namun membentuk cekungan yang lebih dalam dan lebih panjang dari kedua parameter *heat input* yang sebelumnya. Hasil *splatter* yang didapatkan juga lebih banyak dari kedua spesimen sebelumnya yaitu sebanyak 61 buah.



Gambar 4.1 Hasil Las Spesimen dengan Komposisi *Shielding Gas* 100% CO₂ dan Variasi *Heat Input* (a) 620 J/mm, (b) 720 J/mm, (c) 740 J/mm

Gambar 4.2 merupakan hasil penampilan visual dari spesimen dengan parameter komposisi *shielding gas* 80% CO₂ + 20% Ar dengan variasi *heat input*. Gambar 4.2(a) merupakan penampilan visual dari spesimen dengan *heat input* sebesar 620 J/mm. Pada Gambar tersebut terlihat adanya sedikit *undercut* pada salah satu sisi ujung lasan, hal ini menandakan bahwa pada komposisi *shielding gas* dengan campuran gas argon, cacat las *undercut* juga masih dapat terjadi meskipun ukurannya lebih kecil dibandingkan dengan spesimen dengan *shielding gas* 100% CO₂. Pada Gambar tersebut terlihat bahwa permukaan spesimen sangat bersih dan hanya terdapat 1 buah *splatter*, ini menandakan bahwa penggunaan *shielding gas* campuran argon menghasilkan busur las yang terkontrol dan terpusat sehingga tidak menyebabkan kolam *weld* teraduk dan menyebabkan terjadi munculnya *splatter*. Gambar 4.2(b) merupakan spesimen dengan pemberian variasi *heat input* yang lebih tinggi yaitu 720 J/mm. Pada kondisi tersebut, busur las mulai mengalami peningkatan energi, dikarenakan semakin tinggi voltase listrik yang diberikan seiring dengan peningkatan pada kuat arus pengelasan. Hal ini menyebabkan busur mulai tidak stabil sehingga *undercut* yang dihasilkan memiliki profil yang lebih dalam dan lebih luas dari Gambar 4.2(a). *Splatter* yang dihasilkan juga lebih banyak seiring dengan meningkatnya *heat input*, sehingga di permukaan spesimen ditemukan *splatter* sebanyak 11 buah. Meskipun pada parameter ini terbentuk *splatter*, namun bentuk *splatter* yang terbentuk lebih kecil dan halus dibandingkan dengan penggunaan *shielding gas* 100% CO₂. Selanjutnya merupakan Gambar 4.2(c), yang merupakan penampilan visual dari spesimen yang diberi variasi *heat input* 740 J/mm. Dari Gambar dapat dilihat terdapat cacat *undercut* pada salah satu ujung lasan dengan ukuran yang lebih besar dari parameter sebelumnya. Jumlah *splatter* yang ditemukan juga paling banyak terdapat pada parameter ini, dengan ditemukannya sebanyak 14 buah *splatter*. Hal ini membuktikan bahwa semakin besar *heat input* yang diberikan maka akan semakin banyak *splatter* yang dihasilkan.



Gambar 4.2 Hasil Las Spesimen dengan Komposisi *Shielding Gas* 80% CO₂ + 20% Ar dan Variasi *Heat Input* (a) 620 J/mm, (b) 720 J/mm, (c) 740 J/mm

Dari hasil pengamatan secara visual, pada masing-masing spesimen ditemukan cacat berupa *undercut* pada setiap ujung spesimen. Hal ini dikarenakan pada pengelasan menggunakan robot, pada jarak 5 mm awal dari ujung lasan merupakan fasa saat busur listrik belum stabil dan menyebabkan pelelehan logam elektroda tidak sempurna sehingga tidak dapat mengisi semua permukaan logam. Pada gas pelindung CO₂ 100%, busur yang terbentuk lebih tidak stabil dikarenakan CO₂ merupakan gas aktif yang memiliki konduktifitas termal yang tinggi sehingga diperlukan energi yang sangat besar saat akan melakukan proses ionisasi. Menggunakan CO₂ sebagai *shielding gas* akan menghasilkan mode transfer logam dalam bentuk globular sehingga banyak terdapat *splatter* atau percikan logam pada logam induk. Selain banyaknya *spatter* yang terbentuk, busur yang tidak stabil menyebabkan lelehan logam bagian *groove* tidak stabil dan runtuh menyebabkan cekungan di atasnya (Ning Guo, 2014). Pengelasan dengan menerapkan arus busur tinggi dari busur listrik akan menekan permukaan kolam las sehingga hanya lapisan logam tipis yang tersisa. Pematatan yang terlalu cepat dari lapisan tipis ini menghentikan peleburan las, sehingga menyebabkan terjadinya *undercut* (Jan Frostevarg, 2014).

Pada pengelasan yang menggunakan *shielding gas* berupa 80% CO₂ + 20% Ar didapatkan hasil visual yang lebih baik dikarenakan dengan penambahan penggunaan Ar yang bersifat *inert*, akan membuat busur listrik menjadi lebih stabil. Hal ini disebabkan karena Ar memiliki konduktifitas termal yang lebih rendah dibandingkan CO₂ sehingga dibutuhkan energi yang kecil untuk terjadinya ionisasi dan akan menghasilkan model transfer logam berbentuk spray sehingga meningkatkan *molten droplet transfer rate* (lincolnelectric.com). Setelah dilakukannya pengamatan visual, selanjutnya dilakukan uji Ultrasonik untuk mengetahui apakah ada cacat di dalam lasan baik itu berupa *crack*, porositas ataupun inklusi yang masuk ke dalam lasan. Pada pengujian ultrasonik, didapatkan bahwa seluruh spesimen uji tidak terdapat cacat baik itu berupa inklusi, porositas maupun *crack*. Hasil

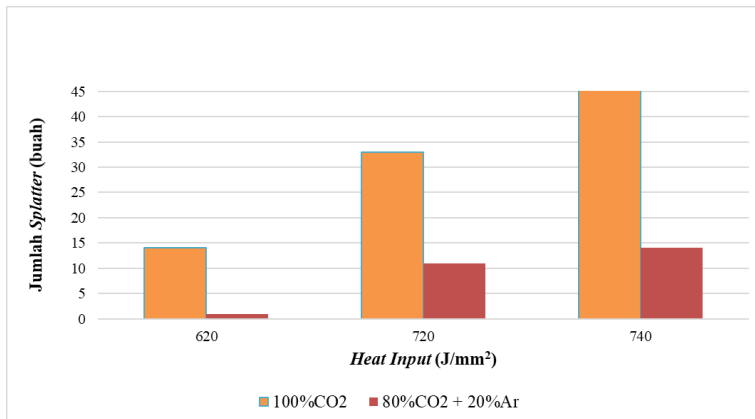
dari pemeriksaan uji ultrasonik ditampilkan pada Tabel 4.1. Setelah dilakukan uji ultrasonik, maka dilakukan *surface finishing* dari hasil pengelasan. Dari pengamatan visual permukaan lasan maka akan didapatkan data berupa jumlah percikan (*splatter*) yang membeku di permukaan hasil pengelasan. Hasil dari pengamatan hasil *splatter* ditampilkan pada Gambar 4.4 dan Tabel 4.2

Tabel 4.1 Hasil Inspeksi Pengujian Ultrasonik

<i>Shielding gas</i>	Hasil Pengujian Ultrasonik		
	620 J/mm	720 J/mm	740 J/mm
100% CO ₂	Baik	Baik	Baik
80% CO ₂ + 20% Ar	Baik	Baik	Baik

Tabel 4.2 Jumlah *Splatter* berdasarkan komposisi *shielding gas*

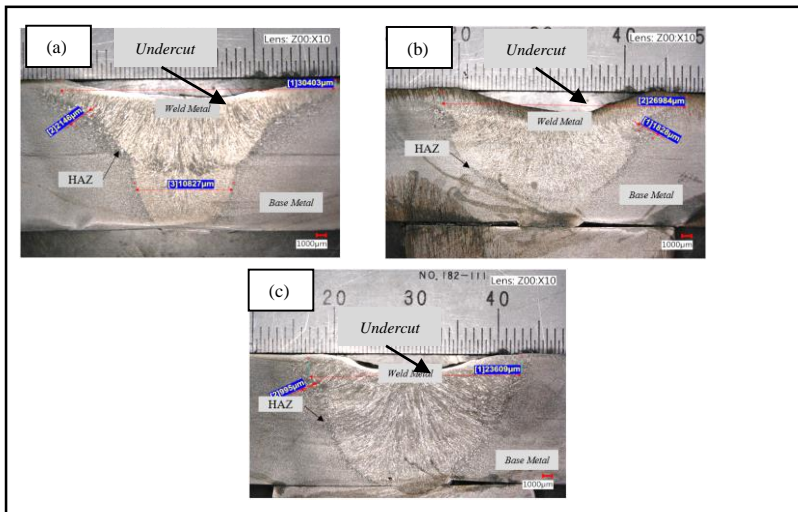
<i>Shielding gas</i>	Jumlah <i>Splatter</i> (buah)		
	620 J/mm	720 J/mm	740 J/mm
100% CO ₂	14	33	61
80% CO ₂ + 20% Ar	1	11	14



Gambar 4.3 Perbandingan jumlah *splatter* dengan komposisi *shielding gas*

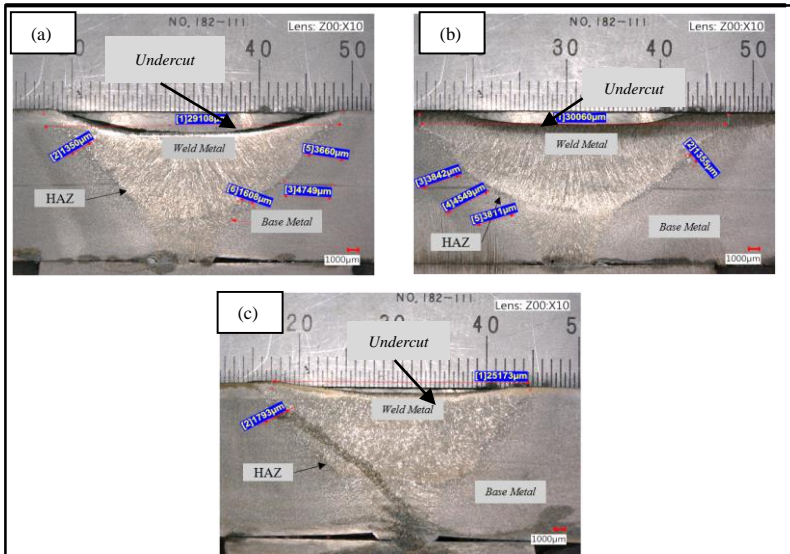
4.2 Pengamatan Makroskopik

Untuk mengidentifikasi kemungkinan tidak sempurnanya proses penyatuan pada bagian dalam lasan berupa *lack of fusion* ataupun *lack of penetration*, maka proses pengamatan makroskopik yang dilakukan pada spesimen pengelasan JIS SS400 dengan variasi gas pelindung 100% CO₂ dan 80% CO₂ + 20% Ar yang telah dipotong pada penampang area lasan. Pengujian secara makroskopik dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran 10 kali dimana spesimen yang akan diamati di etsa terlebih dahulu menggunakan larutan nital 30% dengan bahan 30 ml HNO₃ dan 70 ml alkohol 95%. Pemberian larutan etsa pada spesimen dilakukan menggunakan metode *immerse* selama 20 detik lalu kemudian spesimen dicuci menggunakan alkohol. Hal ini ditujukan untuk mempermudah proses identifikasi area lasan. Hasil yang akan diamati pada pengamatan makroskopik tersebut adalah profil hasil lasan, lebar HAZ, dan bentuk serta lebar daerah lasan. Hasil pengujian makro akan ditampilkan pada Gambar 4.4 dan 4.5



Gambar 4.4 Foto Makroskopik Spesimen dengan *Shielding gas* CO₂ 100% dengan Parameter *Heat Input* (a) 620 J/mm (b) 720 J/mm (c) 740 J/mm

Gambar 4.4 menunjukkan penampang las dengan variasi komposisi *shielding gas* 100% CO₂ setelah diberi etsa. Dapat dilihat bahwa pada spesimen diatas tidak mengindikasikan adanya cacat las internal, yang ditunjukkan dengan tidak ditemukannya rongga, poros, ataupun *crack* pada penampang lasan. Hal ini mengidentifikasi bahwa parameter pengelasan yang dipilih dan proses pengelasan tersebut dapat meminimalisir kemungkinan cacat yang terjadi. Pada uji makro ini juga akan terlihat bahwa *heat input* sangat bergantung pada kecepatan pengelasan, dan akan memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap luasan dari daerah lasan maupun daerah *Heat Affected Zone* (HAZ). Pengaruh *heat input* bisa dilihat dari lebar HAZ yang terbentuk. Semakin besar *heat input* yang digunakan maka akan semakin besar daerah HAZ yang terbentuk. Hal disebabkan karena besar *heat input* akan mempengaruhi perpindahan panas yang terjadi pada bahan yang dilas (Achmad Adam, 2017). Pada variasi *shielding gas* 100%CO₂ untuk spesimen dengan *heat input* sebesar 620 J/mm tercatat lebar HAZ yang didapatkan adalah 995 µm, untuk visual dari hasil lasan pada *heat input* ini penetrasi belum terlalu dalam dan masih berbentuk runcing. Selanjutnya pada *heat input* 720 J/mm didapati bahwa luas HAZ semakin meningkat yaitu sebesar 1828 µm dan penampilan dari penampang lasannya terbentuk semakin melebar akibat semakin besar energi yang diberikan. Untuk variasi *heat input* yang tertinggi yaitu 740 J/mm ditemukan luas HAZ paling besar yaitu sebesar 2146 µm. Sedangkan untuk hasil lasan dapat dilihat bahwa dengan pemberian *heat input* yang paling tinggi ini maka luasan *weld pool* semakin lebar dikarenakan pelelehan logam induk dan deposit logam yang terjadi semakin banyak.



Gambar 4.5 Foto Makroskopik Spesimen dengan *Shielding gas* CO₂ 80% + 20% Ar dengan Parameter *Heat Input* (a) 620 J/mm (b) 720 J/mm (c) 740 J/mm

Gambar 4.5 merupakan Gambar perbandingan permukaan lasan pada hasil pengujian menggunakan *shielding gas* 80% CO₂ + 20% Ar dengan variasi *heat input* yang berbeda. *heat input* sebesar 620 J/mm tercatat lebar HAZ yang didapatkan adalah 1350 μm, untuk visual dari hasil lasan pada *heat input* ini penetrasi belum terlalu dalam dan masih berbentuk runcing. Selanjutnya pada *heat input* 720 J/mm didapati bahwa luas HAZ semakin meningkat yaitu sebesar 1355 μm dan penampilan dari penampang lasannya terbentuk semakin dalam dan runcing dikarenakan energi yang dihasilkan oleh gas *inert* hanya terfokus pada satu titik. Untuk variasi *heat input* yang tertinggi yaitu 740 J/mm ditemukan luas HAZ paling besar yaitu sebesar 1793 μm. Sedangkan untuk hasil lasan dapat dilihat bahwa luasan *weld pool* terlihat memiliki penetrasi paling dalam dan memiliki *undercut* yang paling sedikit dikarenakan pada parameter ini, terjadi *deposit metal* yang paling

banyak. Setelah diamati, didapatkan bahwa pada seluruh spesimen, tidak ditemukan adanya *non-fusion area* yang terjadi di antara *weld metal* dan *base metal*. Dari hasil pengujian ini juga didapatkan bahwa seluruh spesimen tidak ditemukan adanya sebaran porositas, *blowhole* maupun *internal defect* lain pada area las. Dari Gambar juga dapat dilihat bahwa semakin besar *heat input* yang diberikan maka ukuran daerah HAZ semakin besar. Ukuran dari lebar HAZ dihitung menggunakan aplikasi lalu ditampilkan dalam **Tabel 4.3** lalu kemudian dilakukan pengujian lebih dalam mengenai struktur mikro.

Tabel 4.3 Hasil pengukuran lebar HAZ terhadap *heat input*

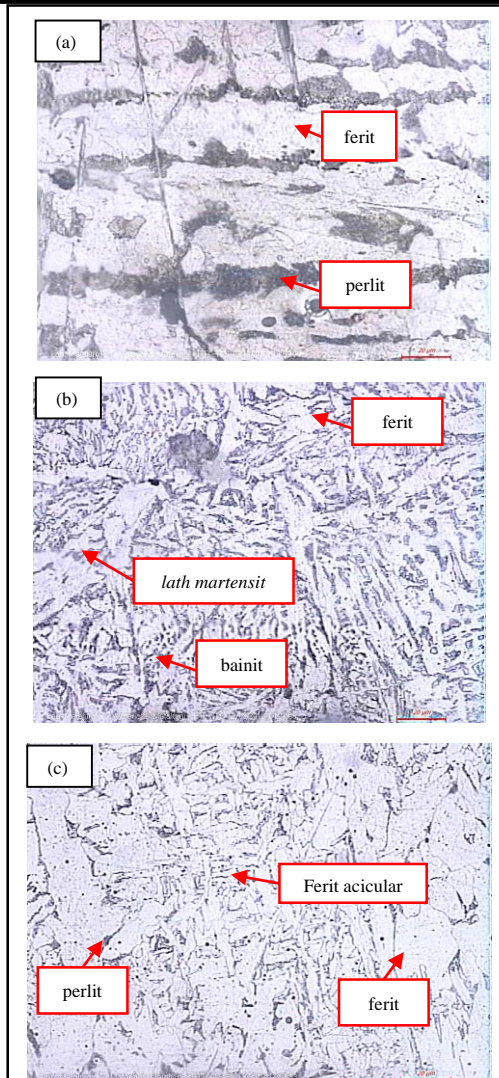
<i>Shielding gas</i>	<i>Heat Input</i> (J/mm)	Lebar HAZ (μm)
100% CO ₂	620	995
	720	1828
	740	2146
80% CO ₂ + 20% Ar	620	1350
	720	1793
	740	1355

Perbedaan yang signifikan antara spesimen dengan variasi *shielding gas* terlihat dari bentuk penetrasi yang dihasilkan oleh lasan. Pada pengelasan dengan komposisi *shielding gas* 100% CO₂ memiliki bentuk *weld pool* yang lebih lebar dibandingkan dengan komposisi *shielding gas* 80% CO₂ + 20% Ar. Pada Gambar juga dapat terlihat bahwa cacat *undercut* pada spesimen dengan *shielding gas* 80% CO₂ + 20% Ar memiliki ukuran yang lebih kecil dibandingkan dengan *shielding gas* 100% CO₂. Ini terjadi dikarenakan pada penggunaan *shielding gas* murni CO₂, seiring bertambahnya *heat input* maka lebar lasan pada bagian *root* akan semakin lebar. Hal ini dikarenakan pada penggunaan *shielding gas*

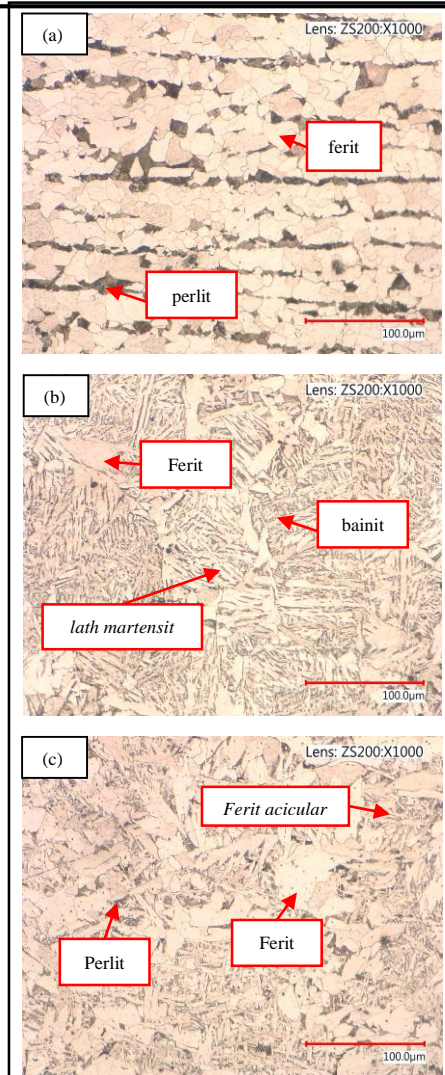
CO₂ akan terjadi reaksi oksidasi dimana pelelehan akan terfokus pada logam induk, sedangkan pada komposisi *shielding gas* campuran CO₂ + Ar penetrasi semakin dalam dan runcing dikarenakan energi yang dihasilkan terfokus untuk melelehkan elektroda sehingga *deposit* logam yang dihasilkan semakin banyak (Belinga Mvola, 2015).

4.3 Pengamatan Mikroskopik

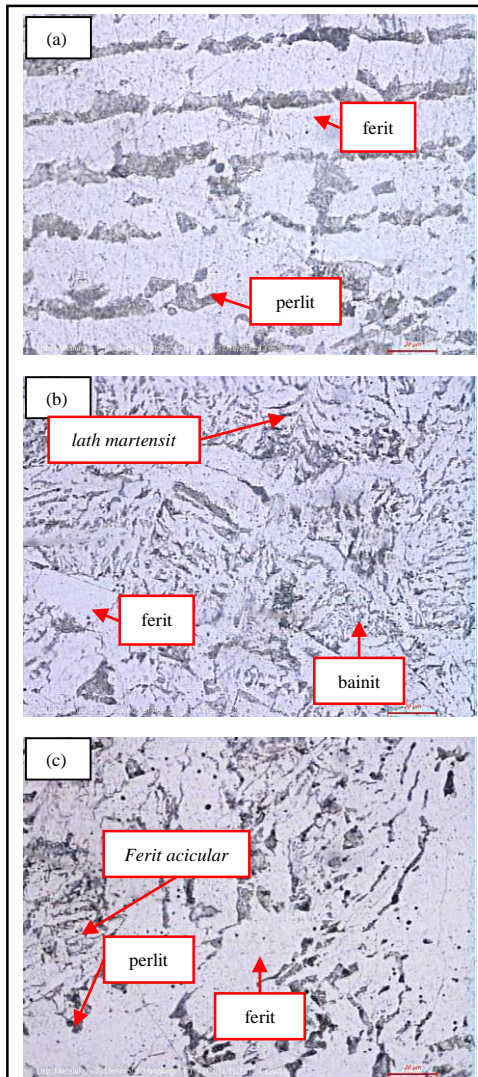
Pengujian mikroskopik dilakukan untuk mengamati struktur mikro yang terbentuk pada masing – masing spesimen. Pengujian dilakukan dengan mikroskop optik pada perbesaran 500 kali. Proses pengetsaan dilakukan dengan menggunakan larutan Nital dengan komposisi 3 ml HNO₃ + 97 ml alkohol 95%. Proses etsa dilakukan dengan tujuan untuk mengkorosi batas butir agar terlihat mikrostrukturnya. Pengetsaan dilakukan dengan cara spesimen direndam dalam larutan selama tiga hingga 5 detik lalu dicuci dengan alkohol kemudian dikeringkan. Pengamatan struktur mikro dilakukan pada tiga tempat dalam satu spesimen yaitu pada daerah *base metal*, HAZ (*heat affected zone*) dan daerah *weld*. Struktur asli dari baja SS400 termasuk dalam kategori baja karbon rendah dengan kandungan karbon sebesar 0,18%. Sedangkan daerah HAZ sendiri merupakan daerah logam dasar yang bersebelahan dengan logam las sehingga mengalami siklus termal pemanasan dan pendinginan cepat sehingga merupakan daerah yang kritis.



Gambar 4.6 Struktur Mikro *Shielding gas* 100% CO₂ dan *Heat Input* 620 J/mm dengan (a) *Base Metal* (b) *HAZ* dan (c) *Weld Metal* perbesaran 500x

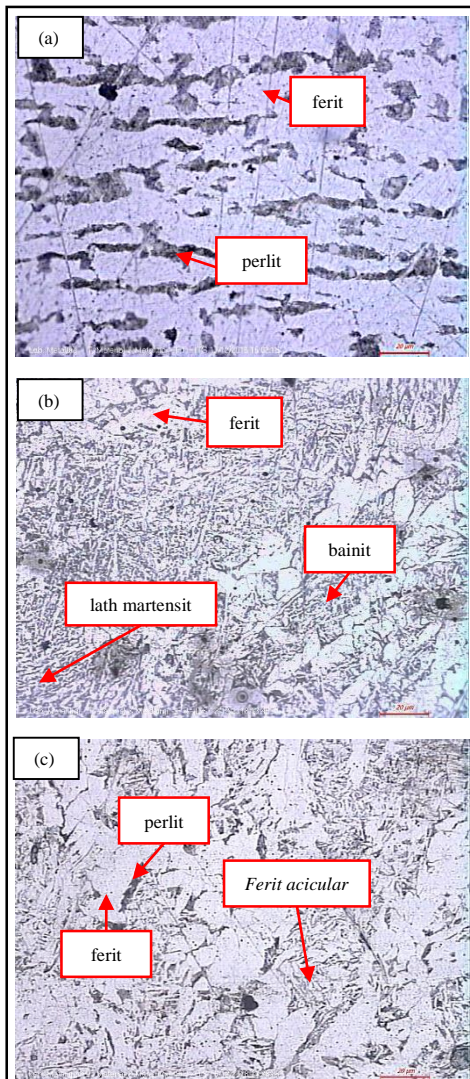


Gambar 4.7 Struktur Mikro *Shielding gas 100% CO₂* dan *Heat Input 720 J/mm* dengan (a) *Base Metal* (b) *HAZ* dan (c) *Weld Metal* perbesaran 500x

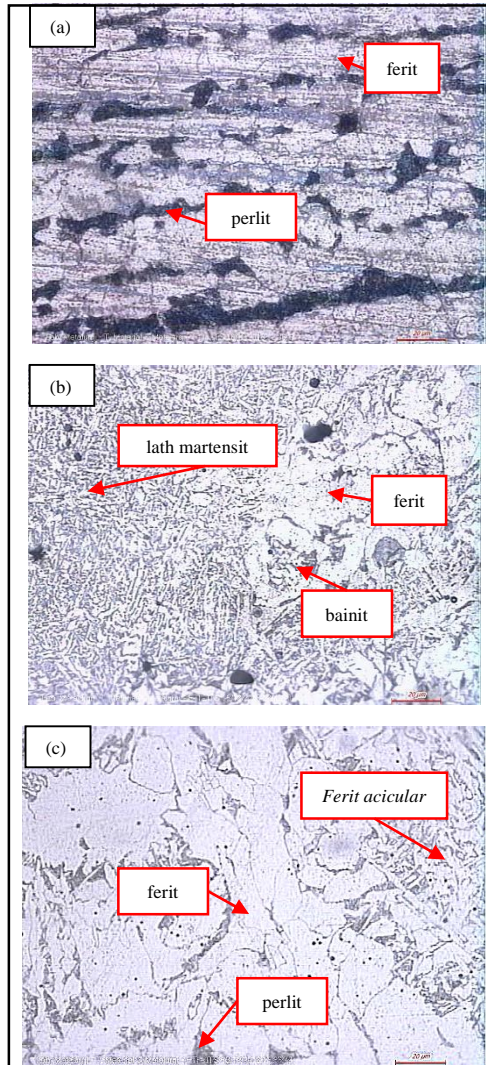


Gambar 4.8 Struktur Mikro *Shielding gas 100% CO₂* dan *Heat Input 740 J/mm* dengan (a) *Base Metal* (b) *HAZ* dan (c) *Weld Metal* perbesaran 500x

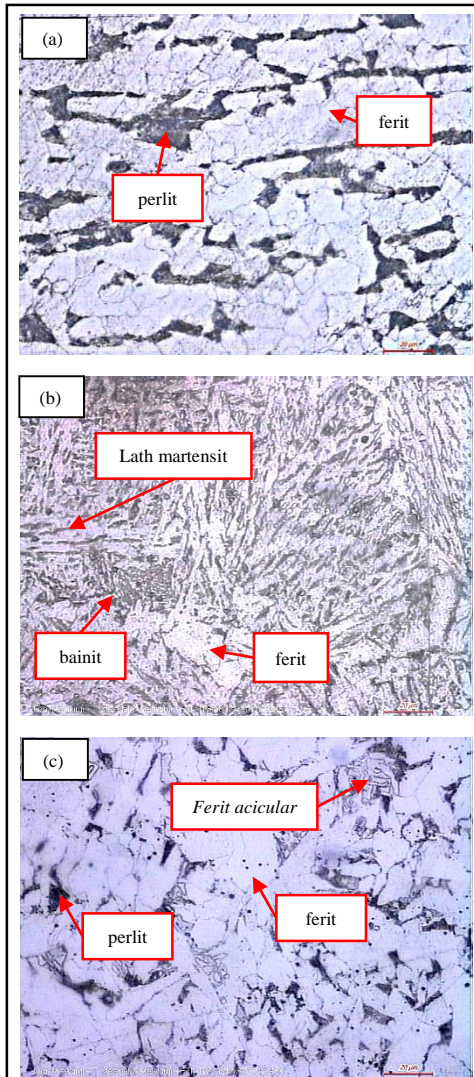
Gambar diatas merupakan hasil pengelasan dari berbagai daerah pada pengelasan. Gambar 4.6 menunjukkan mikrostruktur dari daerah *base metal*, HAZ dan *weld metal* spesimen dengan perlakuan *shielding gas* 100% CO₂ serta *heat input* sebesar 620 J/mm. Pada bagian *base metal* didapatkan struktur struktur mikro berupa ferit dan perlit. Dapat dilihat pula struktur mikro antara ferit dan perlit berlapis-lapis dan pipih dikarenakan baja SS400 dalam pembentukannya mengalami proses *cold rolling*. Pada daerah HAZ, terlihat terbentuk struktur mikro berupa ferit *lath* martensit dan bainit dengan ukuran struktur butir yang halus. Sedangkan pada daerah *weld metal* struktur yang ditemui adalah struktur *ferit acicular*, ferit serta perlit. Gambar 4.7 menunjukkan stuktur mikro untuk variasi *heat input* 720 J/mm. Struktur mikro yang ditemukan pada daerah *base metal* sama dengan sebelumnya yaitu ferit dan perlit. Sedangkan pada daerah HAZ terdapat skstruktur bainit, *grain boundary* ferit dan *lath martensit*. Untuk daerah *weld metal*, terlihat adanya struktur mikro berupa *ferit acicular*, *grain boundary* ferit dan sedikit perlit. Pada parameter ini, ukuran butir dari ferit mulai membesar dikarenakan naiknya masukan panas yang diberikan seiring bertambahnya *heat input*. Gambar 4.8 menampilkan struktur mikro dari parameter *heat input* yang tertinggi yaitu 740 J/mm. Pada paramenter ini, daerah *base metal*, HAZ dan daerah *weld metal* memiliki struktur mikro yang sama dengan masukan *heat input* 720 J/mm. Yang membedakan disini adalah pada 740 J/mm di daerah HAZ dan *weld metal* ukuran butir ferit semakin membesar sehingga pada tampilannya, di HAZ jumlah struktur bainit dan *lath* martensit mengalami penurunan jumlah. Hal ini juga terjadi pada daerah *weld metal*, pada *heat input* yang paling rendah, jumlah ferit *acicular* sangat banyak, lalu seiring meningkatnya *heat input*, maka austenit memiliki energi yang lebih banyak untuk berubah menjadi ferit. *Cooling rate* pada logam juga berpengaruh pada pembentukan butir. Semakin tinggi temperatur yang dicapai, maka semakin pelan logam tersebut mengalami pendinginan sehingga butir ferit yang terbentuk akan semakin besar (Sindo Kou, 2003).



Gambar 4.9 Struktur Mikro *Shielding gas* 80% CO₂ + 20% Ar dan *Heat Input* 620 J/mm dengan (a) *Base Metal* (b) *HAZ* dan (c) *Weld Metal* perbesaran 500x



Gambar 4.10 Struktur Mikro *Shielding gas* 80% CO₂ + 20% Ar dan *Heat Input* 720 J/mm dengan (a) *Base Metal* (b) HAZ dan (c) *Weld Metal* perbesaran 500x



Gambar 4.11 Struktur Mikro *Shielding gas* 80% CO₂ + 20% Ar dan *Heat Input* 740 J/mm dengan (a) *Base Metal* (b) HAZ dan (c) *Weld Metal* perbesaran 500x

Gambar 4.9 hingga Gambar 4.11 menunjukkan struktur mikro dari daerah *base metal*, HAZ dan *weld metal* spesimen dengan perlakuan *shielding gas* 80% CO₂ + 20% Ar. Gambar 4.9 merupakan spesimen dengan *heat input* sebesar 620 J/mm. Pada bagian *base metal* didapatkan struktur yang sama dengan penggunaan *shielding gas* CO₂ murni yaitu ferit dan perlit yang berbentuk lapisan pipih. Hal ini menandakan bahwa *base metal* tidak mengalami rekristalisasi pada saat proses pengelasan dengan *heat input* tinggi. Pada daerah HAZ, terlihat terbentuk struktur mikro berupa ferit, bainit dan *lath martensit* dalam jumlah banyak dengan ukuran struktur butir yang halus. Sedangkan pada daerah *weld metal* struktur yang ditemui adalah struktur *ferit acicular*, ferit dengan sedikit perlit. Gambar 4.10 menunjukkan stuktur mikro untuk variasi *heat input* 720 J/mm. Struktur mikro yang ditemukan pada daerah *base metal* sama dengan sebelumnya yaitu ferit dan perlit. Sedangkan pada daerah HAZ terdapat skstruktur bainit, ferit dan *lath martensit*. Untuk daerah *weld metal*, terlihat adanya struktur mikro berupa *ferit acicular*, *grain boundary* ferit dan sedikit perlit. Gambar 4.11 menampilkan struktur mikro dari parameter *heat input* yang tertinggi yaitu 740 J/mm. Pada parameter ini, daerah *base metal*, HAZ dan daerah *weld metal* memiliki struktur mikro yang sama dengan masukan *heat input* yang lainnya.

Gas argon memiliki konduktifitas termal yang lebih kecil dibandingkan dengan CO₂ sehingga dalam penggunaannya maka akan menurunkan temperatur busur pada saat pengelasan sehingga struktur yang terbentuk lebih halus dibandingkan dengan penggunaan *shielding gas* 100% CO₂ karena laju pendinginannya lebih cepat. Struktur mikro yang dihasilkan pada tiap daerah memiliki kesamaan. Pada daerah *base metal* struktur yang muncul adalah ferit dan perlit, pada HAZ akan terbentuk ferit, bainit dan ferit acicular. Dan pada daerah *weld* ditemui struktur mikro berupa ferit dan *ferit acicular*. Persebaran komposisi selanjutnya akan ditampilkan pada Tabel 4.4

Tabel 4.4 Tabel Komparasi Fasa

Komposisi <i>Shielding</i> <i>gas</i>	<i>Heat</i> <i>Input</i> (J/mm)	Struktur Mikro		
		<i>Base</i> <i>Metal</i>	HAZ	<i>Weld</i> <i>Metal</i>
100% CO ₂	620	F, P	B, P, F, LM	F, AF, P
	720	F, P	B, P, F, LM	F, AF, P
	740	F, P	B, P, F, LM	F, AF, P
80% CO ₂ + 20% Ar	620	F, P	B, P, F, LM	F, AF, P
	720	F, P	B, P, F, LM	F, AF, P
	740	F, P	B, P, F, LM	F, AF, P

Keterangan: F (Ferit), P (Perlit), B (Bainit), AF (Ferit *acicular*), LM (*Lath* Martensit)

Struktur mikro yang muncul pada seluruh base metal merupakan ferit dan perlit. Hal ini sesuai dengan struktur mikro dari baja JIS SS400 sebagai logam induk yang merupakan baja karbon rendah yang memiliki struktur mikro ferit dan perlit. Karakteristik ferit pada baja karbon rendah sendiri memiliki sel satuan kubus pusat badan atau body centered cubic (bcc) yang menunjukkan titik mulur yang jelas dan menjadi getas pada temperatur rendah. Perlit sendiri merupakan lapisan yang terdiri dari ferit dan sementit.

Pada daerah *weld metal* berdasarkan diagram *CCT* dapat dilihat bahwa struktur mikro yang terbentuk pada daerah lasan ini adalah ferit batas butir, dan ferit *acicular*, dan nampak bahwa ferit *acicular* mempunyai jumlah cukup banyak pada daerah ini. Struktur ferit *acicular* inilah yang diharapkan dari setiap proses pengelasan, karena struktur ini sebagai *interlocking structure* yang mampu menghambat laju perambatan retak. Pada daerah

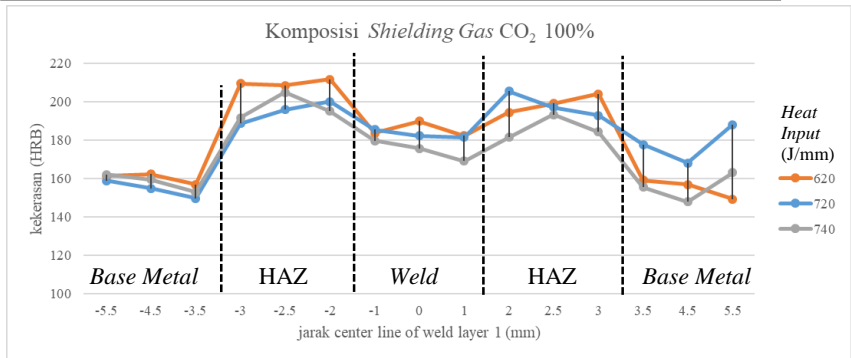
perbatasan antara las dengan HAZ. Pembentukan struktur ferit *acicular* paling banyak terdapat pada *heat input* 620 J/mm. Hal ini disebabkan karena karena masukan panas paling kecil dan menyebabkan pendinginan terjadi lebih cepat sehingga struktur ferit *acicular* mudah terbentuk. Ferit *acicular* ini berbentuk intragranular dengan ukuran yang kecil dan mempunyai arah orientasi yang acak. Biasanya terbentuk pada temperatur sekitar 650 °C dan mempunyai ketangguhan paling tinggi dibandingkan dengan struktur mikro yang lain. Keuletan dan ketangguhan logam las akan meningkat jika struktur mikro yang terbentuk berupa ferit *acicular*, sebaliknya penurunan keuletan dan ketangguhan terjadi jika pada logam las struktur mikro yang terbentuk berupa ferit batas butir, bainit, atau *lath* martensit (Suharno, 2006). Pada daerah HAZ terlihat adanya struktur bainit. Hal ini disebabkan karena terjadinya pengasaran pada butir austenit saat pemanasan dan laju pendinginan yang relatif lebih cepat dari pada daerah las. Struktur bainit merupakan pendinginan yang terjadi pada austenit metastabil sehingga terjadi presipitasi hanya pada sementit sedangkan yang lainnya tetap larut (Tata Surdia 1999). Bentuk dari bainit pada struktur mikro bisa menyerupai jarum yang terdiri dari matriks berupa ferit dan bentuk memanjang dari presipitasi sementit (Calister, 2008). Karena bainit memiliki struktur yang lebih halus, maka kekerasannya lebih tinggi dibandingkan dengan perlit. Selain bainit, pada daerah HAZ ini juga terlihat struktur *Lath* Martensit. Struktur ini dapat muncul akibat pendinginan yang cepat. Martensit adalah fasa larutan padat lewat jenuh dari karbon dalam bentuk *body centered tetragonal* (BCT). Transformasi menuju martensit tidak bersifat difusi, sehingga martensit memiliki komposisi yang sama dengan austenit, untuk kadar karbon hingga 2%. Difusi tidak terjadi karena pendinginan yang cepat, karbon tidak terpecah antara sementit dan ferit tetapi terperangkap pada kondisi octahedral dari maka terbentuklah fasa baru yang bernama martensit (Sri Nugroho, 2005). Martensit memiliki kekerasan yang sangat tinggi dan memiliki sifat yang getas. Pada karbon rendah, martensit yang mungkin terjadi adalah *lath martensit*.

4.4 Pengujian Kekerasan

Untuk mengetahui kekerasan pada masing – masing spesimen, dilakukan pengujian kekerasan pada daerah *weld metal* HAZ dan *base metal*. Lalu dilakukan indentasi yang mengacu pada standar ASTM E10. Nilai distribusi kekerasan ditampilkan pada Tabel 4.5

Tabel 4.5 Nilai Distribusi Kekerasan Masing-masing Spesimen

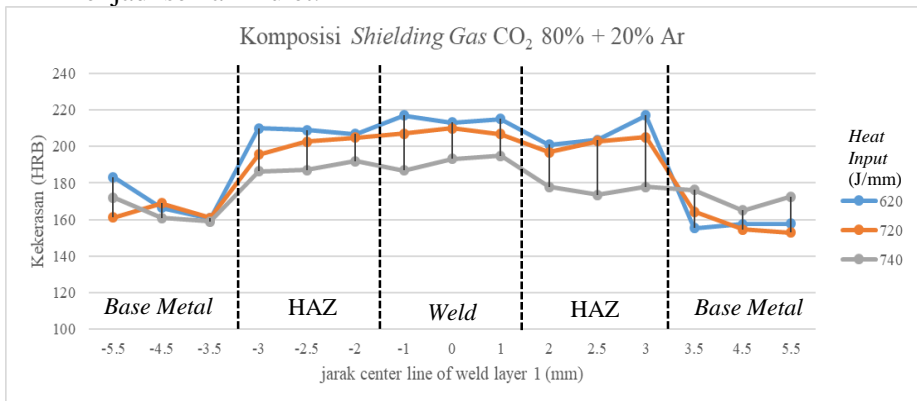
100% CO ₂ <i>Shielding gas</i>					
<i>Heat Input</i> (J/mm)	Nilai Kekerasan (HB)				
	<i>Base</i>	HAZ	<i>Weld</i>	HAZ	<i>Base</i>
620	161.3	209.4	183.6	194.4	159.2
	162.4	208.4	189.8	199	156.9
	156.9	211.6	182.3	204	149.4
Rata-rata	160	210	185	199	155
720	159	188.7	185.5	205.5	177.6
	155	195.9	182.2	197.1	168
	149.8	200	181.4	192.8	188
Rata-rata	155	195	183	198	178
740	162.1	191.7	179.6	181.4	155.5
	159.5	204.8	175.6	193.2	148
	153	195	169	184.2	163.2
Rata-rata	158	197	175	186	156
80% CO ₂ + 20% Ar <i>Shielding gas</i>					
620	183.3	210	217	201	155.3
	166.5	209	213	203.6	157.5
	160.6	206.7	215	217	157.8
Rata-rata	170.1	208.6	215.0	207.2	156.9
720	161.2	195.6	207	196.7	164.3
	169	202.7	210	203	154.7
	161	204.8	206.7	205	153
Rata-rata	163.7	201.0	207.9	201.6	157.3
740	172	186.5	186.8	173.6	176.2
	161	187.1	193.2	173.6	165
	159	192	194.8	178	172.6
Rata-rata	164.0	188.5	191.6	175.1	171.3



Gambar 4.11 Grafik nilai distribusi kekerasan spesimen dengan *shielding gas* 100% CO₂

Gambar 4.11 menunjukkan grafik kekerasan dari spesimen dengan variasi *heat input* dan *shielding gas* 100% CO₂. Dari Gambar dapat terlihat bahwa kekerasan tertinggi terdapat pada bagian HAZ. Hal ini terjadi karena di daerah HAZ terjadi pengkasaran butir dan struktur yang terbentuk didominasi oleh struktur bainit dan *lath* martensit. Kekerasan lalu diikuti oleh daerah *weld metal* dan terakhir adalah kekerasan pada *base metal*. Dari grafik ditunjukkan bahwa kekerasan tertinggi didapatkan pada masukan *heat input* yang paling kecil yaitu 620 J/mm. Kekerasan pada daerah HAZ rata-rata mencapai 210 HB dan sekaligus menjadi daerah yang terkeras. Disusul oleh kekerasan pada *weld metal* dengan 185 HB dan terakhir pada *base metal* yaitu dengan kekerasan rata-rata mencapai 160 HB. Selanjutnya untuk urutan kekerasan yang kedua adalah masukan *heat input* 720 J/mm dengan kekerasan HAZ rata-rata mencapai 198 HB, *weld metal* sebesar 183 HB dan *base metal* mencapai 178 HB. Kekerasan terendah terdapat pada *heat input* tertinggi yaitu pada 740 J/mm dengan kekerasan HAZ mencapai 197 HB, daerah *weld metal* memiliki kekerasan rata-rata sebesar 179 HB dan kekerasan *base metal* rata-rata sebesar 158 HB. Besarnya nilai kuat arus juga mempengaruhi nilai kekerasan dari spesimen, dari pengolahan data yang dilakukan semakin kecil *heat input* yang diberikan, maka

mengakibatkan nilai kekerasan yang didapat akan semakin tinggi. Karena saat kuat arus pengelasan yang dipakai semakin kecil, akan mengakibatkan temperatur lelehan elektroda pengelasan akan semakin kecil sehingga laju pendinginan menjadi lebih cepat dan penyebaran HAZ juga akan semakin sempit (A.S Mohruni 2013). Menurut struktur mikro, pada daerah HAZ terbentuknya struktur bainit yang memiliki kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan dengan ferit dan perlit sehingga didapatkan bahwa kekerasan tertinggi terdapat pada daerah HAZ. Ditemukan juga bahwa kekerasannya akan semakin menurun dikarenakan semakin tinggi *heat input* maka laju pendinginan semakin lambat sehingga butir yang terbentuk pada struktur mikro menjadi lebih besar dan menjadi semakin ulet.



Gambar 4.12 Grafik nilai distribusi kekerasan spesimen dengan *shielding gas* 80% CO₂ + 20% Ar

Gambar 4.12 menunjukkan grafik kekerasan dari spesimen dengan variasi *heat input* dan *shielding gas* 80% CO₂ + 20% Ar. Dari gambar dapat terlihat bahwa kekerasan tertinggi HAZ hampir sama dengan kekerasan pada daerah *weld*. Salah satu faktor yang berkontribusi terhadap kekerasan yang lebih rendah di zona HAZ adalah faktor input panas yang tinggi, dan karena penyimpanan panas di wilayah ini. Dalam pengelasan baja karbon rendah

menggunakan pengelasan gas *inert* dijelaskan bahwa nukleasi butir dan pertumbuhan austenit dapat menyebabkan berkurangnya dislokasi dibandingkan dengan kondisi dasarnya. Sehingga laju pendinginan akan menjadi lebih lambat akibat tingginya *heat input* sehingga pada daerah HAZ mengalami pembesaran butir pada penggunaan campuran gas 80% CO₂ + 20% Ar dan memiliki kekerasan yang lebih rendah dari daerah *weld* (Wan Shaiful, 2015). Dari grafik ditunjukkan bahwa kekerasan tertinggi didapatkan pada masukan *heat input* yang paling kecil yaitu 620 J/mm karena akan mengalami laju pendinginan yang paling cepat. Kekerasan pada daerah HAZ rata-rata mencapai 207,2 HB. Lalu kekerasan pada *weld metal* adalah 215 HB dan terakhir pada *base metal* yaitu dengan kekerasan rata-rata mencapai 170 HB. Selanjutnya untuk kekerasan pada *heat input* 720 J/mm dengan kekerasan HAZ rata-rata mencapai 201,6 HB, *weld metal* sebesar 207,9 HB dan *base metal* mencapai 161 HB. Kekerasan terendah terdapat pada *heat input* tertinggi yaitu pada 740 J/mm dengan kekerasan HAZ mencapai 188,5 HB, daerah *weld metal* memiliki kekerasan rata-rata sebesar 191,6 HB dan kekerasan *base metal* rata-rata sebesar 171,3 HB.

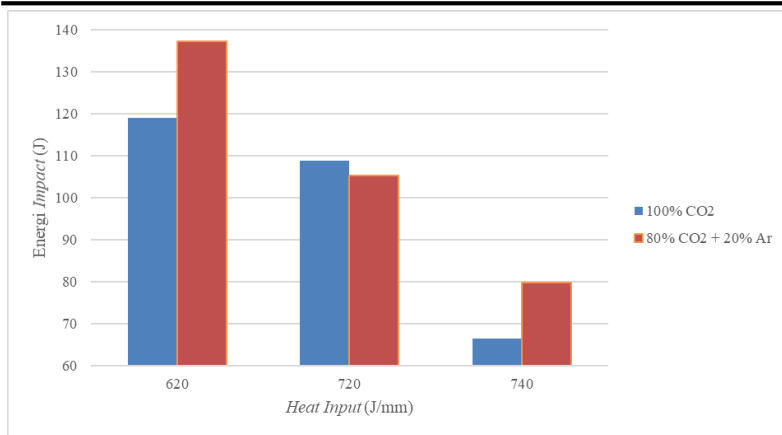
Berdasarkan pada data diatas nilai kekerasan rata-rata pada masing-masing daerah dengan menggunakan *shielding gas* CO₂ 100% dan campuran CO₂ 80% + Ar 20% mengalami perbedaan. Pada seluruh spesimen, nilai kekerasan mengalami penurunan pada daerah *base metal*. Sedangkan untuk daerah HAZ dan daerah *weld metal* pada gas pelindung CO₂ 100%, tren kekerasan menunjukkan bahwa HAZ memiliki kekerasan yang tinggi dibandingkan dengan *weld metal* dan untuk spesimen dengan gas pelindung CO₂ 80% + Ar 20% menunjukkan tren kekerasan bahwa daerah *weld* memiliki kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan dengan daerah HAZ. Berdasarkan *heat input* yang diberikan, nilai kekerasan tertinggi dimiliki oleh spesimen dengan masukan *heat input* 620 J/mm dan kekerasan terendah dimiliki oleh spesimen dengan masukan *heat input* 740 J/mm.

4.5 Pengujian *Impact*

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui seberapa besar energi yang mampu diserap material dalam temperatur tertentu. Sehingga benda uji tersebut mengalami deformasi. Pada pengujian ini, akan dilakukan pada temperatur ruang (25°C) jadi memungkinkan patahan yang terbentuk adalah patahan yang berbentuk *ductile* atau ulet. Pengujian *impact* ini menggunakan metode *charpy* dimana berat pendulum yang digunakan adalah 25,7 kg dan panjang lengan pengayun sebesar 659 mm mengacu pada standar JIS Z2242. Spesimen kemudian diberi takik bentuk V pada daerah las dengan kedalaman takik sebesar 2 mm. Uji *impact* lalu dilakukan pada 6 spesimen dengan 3 spesimen untuk variasi *shielding gas* 100% CO₂ dengan masing-masing satu spesimen pada *heat input* 620 J/mm, 720 J/mm dan 740 J/mm. Lalu untuk *shielding gas* 80% CO₂ + 20% Ar juga diberikan 3 spesimen dengan masing-masing 1 pada *heat input* 620 J/mm, 720 J/mm dan 740 J/mm. Berikut merupakan hasil dari uji *impact* akan ditampilkan pada Tabel 4.4 dan Gambar 4.12.

Tabel 4.6 Nilai Energi dan Kekuatan *Impact* Tiap Spesimen

<i>Shielding gas</i>	100% CO ₂			80% CO ₂ + 20% Ar		
	620 J/mm	720 J/mm	740 J/mm	620 J/mm	720 J/mm	740 J/mm
Energi Impact 1 (J)	122,37	107,93	63,27	135,41	103,62	63,27
Energi Impact 2 (J)	118,03	116,58	68,64	142,07	102,18	71,36
Energi Impact 3 (J)	116,58	102,18	67,29	133,96	109,94	105,05
Standar (Joule)	27	27	27	27	27	27
Rata-rata	118,99	108,90	66,40	137,15	105,25	79,89
Standard Deviasi	3,01	7,25	2,80	4,32	4,13	22,16



Gambar 4.13 Grafik nilai distribusi kekuatan *impact* spesimen dengan *shielding gas*

Dari Gambar 4.13 diperoleh bahwa rata-rata ketangguhan *impact* paling tinggi terjadi pada spesimen pengelasan dengan menggunakan *shielding gas* 80% CO₂ + 20% Ar. Hal ini sejalan dengan teori bahwa penambahan gas argon pada komposisi *shielding gas* akan meningkatkan ketangguhan *impact* pada lasan karena penambahan gas argon akan menyebabkan pengurangan oksida (Belinga Mvola, 2016). Pada pengelasan dengan *shielding gas* campuran CO₂ dan Ar didapati bahwa energi *impact* tertinggi berada di *heat input* paling rendah (620 J/mm) yaitu adalah 137,15 J dan hasil energi *impact* yang paling rendah ditemui pada *heat input* yang paling besar yaitu pada 740 J/mm dengan 79,89 J. Sedangkan pada pengelasan dengan *shielding gas* 100% CO₂ didapatkan bahwa untuk energi *impact* tertinggi didapat pada *heat input* paling kecil (620 J/mm) yaitu sebesar 118 J dan untuk energi *impact* yang terkecil terdapat pada *heat input* paling tinggi (740 J/mm) yaitu sebesar 66,4 J.

Dari Gambar 4.13 juga dapat diketahui bahwa pada kedua perlakuan pengelasan dengan *shielding gas* berbeda memiliki tren ketangguhan *impact* yang sama yaitu akan menurun seiring dengan meningkatnya *heat input*. Hal ini berarti ketangguhan *impact*

logam induk (*raw material*) lebih tinggi dari ketangguhan impak logam las pada variasi masukan panas (*heat input*) 720 J/mm dan 740 J/mm. Hasil ini dikarenakan, bahwa peningkatan *heat input* pada pengelasan yang berdampak pada memperlambat laju pendinginan dan peningkatan kekuatan sambungan las, tetapi ketangguhannya menjadi turun, selain itu proses pengelasan mengakibatkan terjadinya penurunan sifat mekanik logam hasil las khususnya ketangguhan *impact* dari logam induknya. Sedangkan masukan panas (*heat input*) berpengaruh terhadap laju pendinginan pada proses pengelasan yang sangat mempengaruhi sifat fisik dan mekanik logam las (Wijoyo, 2016). Pada tingkat pendinginan yang rendah, pertumbuhan hasil butir austenit yang akhirnya mengarah pada pembentukan perlit kasar dan ferit *acicular*. Keberadaan ferit *acicular* diinginkan karena mempunyai sifat *interlocking* sehingga meningkatkan ketangguhan logam las. Diamati bahwa ketangguhan logam yang dilas meningkat dengan meningkatnya fraksi volume ferit *acicular*. Sifat yang saling terkait dari ferit *acicular*, bersama dengan ukuran butiran halus yang memberikan ketahanan maksimum terhadap perambatan retak. Butir ferit menjadi lebih besar dalam kondisi input panas tinggi. Karena kekuatan hasil butir ferit lebih rendah daripada perlit dan ferit *acicular*, maka inisiasi retakan dan pertumbuhan retakan lebih mungkin terjadi pada butir ferit (Wan Shaiful, 2015). Diketahui bahwa patah yang dihasilkan dari semua spesimen merupakan patah ulet atau *ductile* karena temperatur pada saat pengujian adalah temperatur ruang. Dan dari pembahasan diatas didapatkan bahwa hasil pengujian sesuai dengan teori.

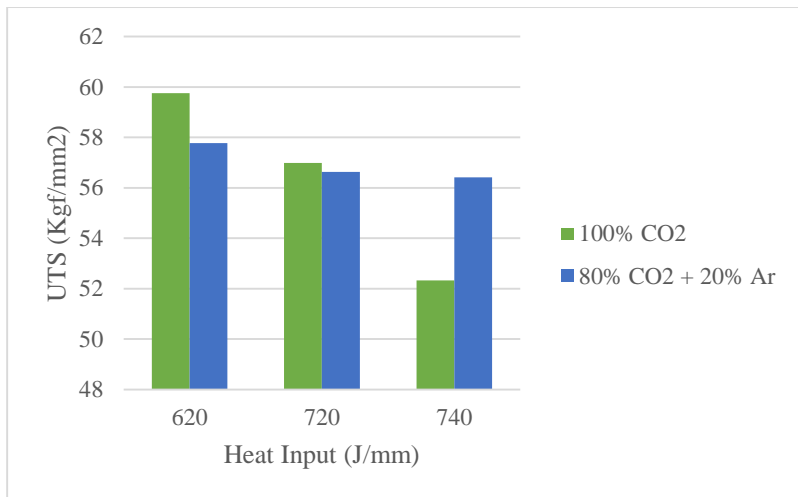
4.6 Pengujian Tarik

Pengujian tarik ini dilakukan untuk mengetahui nilai UTS (*Ultimate Tensile Strength*) dari masing-masing benda uji dengan perbedaan komposisi *shielding gas*. SS400 diuji menggunakan mesin uji tarik yang ada di departemen teknik material ITS dengan menggunakan standar JIS Z3121. Panjang dari spesimen adalah 250 mm dengan tebal dan lebar *gauge length* adalah 16 mm dan 40

mm. Dari hasil pengujian tarik didapatkan beberapa data berupa *yield point*, *yield strenght* dan *ultimate tensile strength* yang akan ditampilkan pada Tabel 4.6

Tabel 4.7 Hasil pengujian tarik

<i>Shielding gas</i>	<i>Heat Input (J/mm)</i>	Area (mm)	yield point (kgf)	Yield strength (kgf/mm)	Max Load (kgf)	UTS (kgf/mm ²)	Standar (Kgf/mm ²)
100% CO ₂	620	600,18	25571,9	42,61	35862,06	59,75	40
	720	605,6	24739,28	40,85	3451,41	56,99	40
	740	641,6	24151,6	37,64	33575,67	52,33	40
80% CO ₂ + 20% Ar	620	600	25162,32	41,94	34662,57	57,77	40
	720	619,08	25313,42	40,89	35058,71	56,63	40
	740	616,99	24997,64	40,52	34806,82	56,41	40



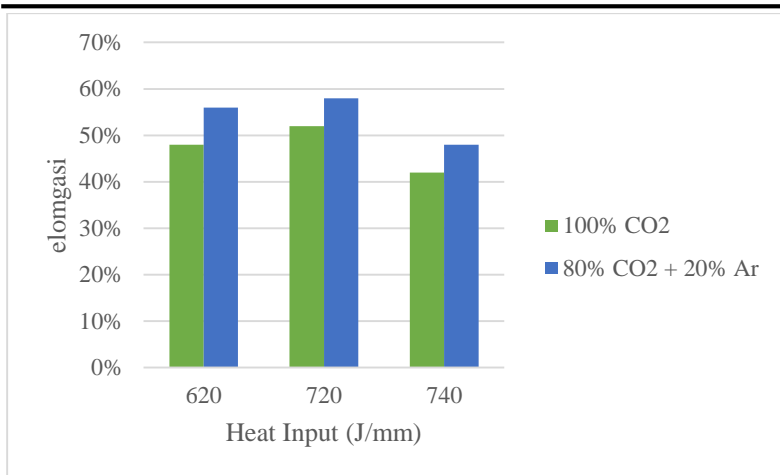
Gambar 4.14 Grafik Nilai Distribusi UTS Spesimen dengan Komposisi *Shielding gas*

Pada Gambar 4.14 dapat terlihat bahwa kekuatan tarik akan menurun seiring bertambahnya *heat input* yang diberikan. Hal ini sesuai dengan teori dimana kekuatan tarik akan berbanding lurus dengan kekerasan. Pada grafik juga didapati bahwa kekuatan tarik yang tertinggi terdapat pada penggunaan *shielding gas* 100% CO₂

dengan kekuatan paling tinggi ada pada variasi *heat input* 620 J/mm dengan 59,75 Kgf/mm² dan kekuatan terendah ada pada *heat input* 740 J/mm dengan kekuatan sebesar 52,33 Kgf/mm². Sedangkan untuk variabel *shielding gas* 80% CO₂ + 20% Ar memiliki nilai UTS paling tinggi pada 620 J/mm sebesar 57,77 Kgf/mm², lalu nilai terendah berada pada *heat input* 740 J/mm dengan 56,41 Kgf/mm². Pada pengelasan, *heat input* yang semakin tinggi menyebabkan tingginya temperatur pengelasan sehingga akan memperlambat laju pendinginannya sehingga butir yang terbentuk memiliki ukuran yang besar dan kasar. Ukuran butir yang besar akan mempengaruhi sifat ulet dari logam. Menurut (Callister, 2015) kekuatan dan kekerasan merupakan indikator ketahanan logam terhadap deformasi plastis sehingga sifat kekerasan akan sejajar dengan kekuatan tarik dari suatu material. Oleh karena itu butir yang kasar akan memiliki kekerasan yang rendah begitu pula dengan kekuatan tariknya.

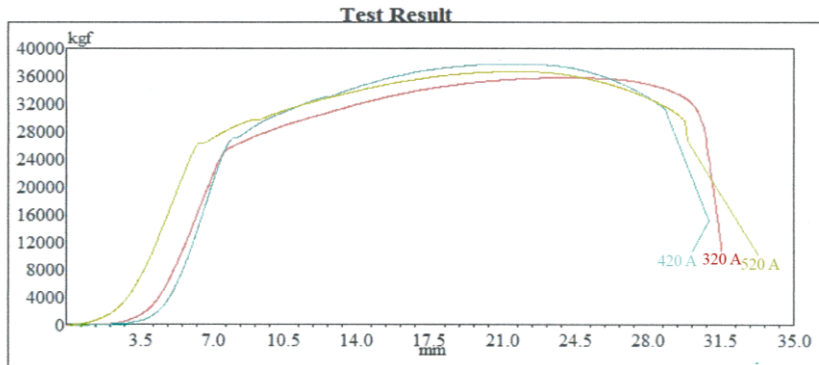
Tabel 4.8 Hasil Presentase Elongasi

<i>Shielding gas</i>	<i>Heat Input</i> (J/mm)	Gauge Length (cm)	Selisih Panjang ▲l (cm)	% Elongation	Standard (%)
100% CO ₂	620	5	2,4	48%	21%
	720	5	2,6	52%	21%
	740	5	2,1	42%	21%
80% CO ₂ + 20% Ar	620	5	2,8	56%	21%
	720	5	2,9	58%	21%
	740	5	2,4	48%	21%

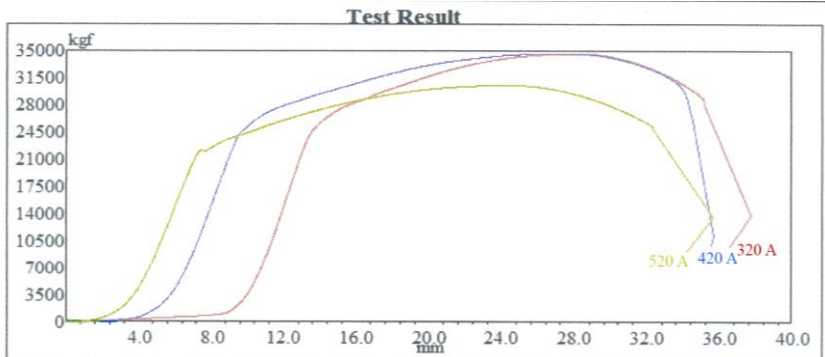


Gambar 4.15 Grafik Perbandingan Elongasi Spesimen dengan Komposisi *Shielding gas*

Selain UTS, didapatkan pula presentase elongasi tiap variabel yang dijelaskan pada Gambar 4.15. pada gambar tersebut didapatkan bahwa presentase elongasi terbesar dihasilkan oleh variabel dengan *shielding gas* 80% CO₂ + 20% Ar dengan *heat input* 720 J/mm yaitu sebesar 58% sementara presentasi elongasi terkecil didapatkan pada 100% CO₂ dengan *heat input* 740 J/mm yaitu sebesar 42% hasil perbandingan menunjukkan bahwa pada dengan *shielding gas* 80% CO₂ + 20% Ar akan memperbesar elongasi panjang dikarenakan pada penggunaan gas ini, bagian base metal tidak terkena dampak pemanasan dikarenakan panas yang dihasilkan tidak terlalu tinggi sehingga pada saat terjadi patahan di base metal yang memiliki fasa ferit – perlit maka sifatnya tergolong lunak karena tidak ada struktur untuk memperkuat. Sifat kekerasan berbanding terbalik dengan keuletan sehingga penurunan kekerasan menyebabkan peningkatan sifat keuletan. Sifat keuletan dapat diukur dari deformasi plastis yang terjadi berupa adanya penambahan panjang. Semakin besar penambahan panjang akan meningkatkan presentase elongasinya.



(a)

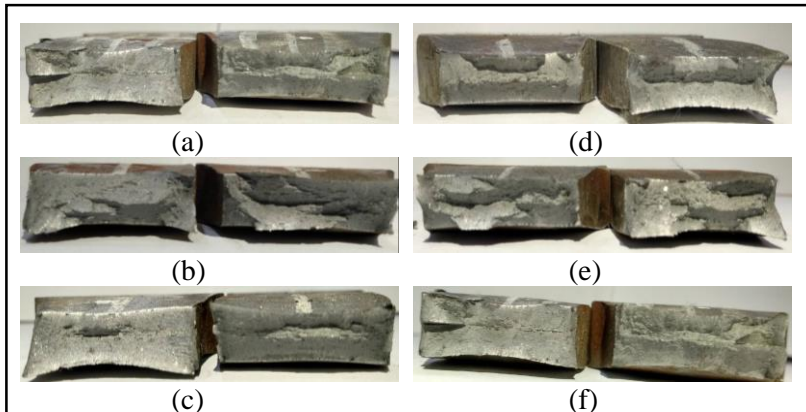


(b)

Gambar 4.16 (a) Kurva Perbandingan Gaya dan Pertambahan Panjang untuk *Shielding gas* 100% CO₂ (b) untuk *Shielding gas* 80% CO₂ + 20% Ar

Dari hasil patahan pada semua spesimen, letak patahan pada hasil uji tarik terjadi pada daerah *base metal* dan permukaan patahan bersifat ulet / *ductile*. Hal ini dikarenakan karena secara visual permukaan patahan memiliki permukaan yang buram dan berserabut serta memiliki profil *cup* and *cone* yang ditunjukkan pada Gambar 4.17. Hal ini memperkuat bahwa terjadinya elongasi

pada spesimen menunjukkan bahwa spesimen mengalami proses deformasi plastis terlebih dahulu sebelum mengalami *fracture*.



Gambar 4.17 Patahan Tarik *Shielding gas* 100% CO₂ (a) 620 J/mm (b) 720 J/mm (c) 740 J/mm; Untuk *Shielding gas* 80% CO₂ + 20% Ar (d) 620 J/mm (e) 720 J/mm (f) 740 J/mm

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan pada penelitian ini adalah:

1. Komposisi *shielding gas* pada pengelasan GMAW JIS G30101 mempengaruhi sifat mekanik dan struktur mikro dari spesimen diantaranya:
 - a. Jumlah *splatter* paling banyak berada pada spesimen dengan *shielding gas* 100% CO₂ dengan *heat input* 740 J/mm dengan 61 buah dan jumlah yang terkecil terdapat pada variasi *shielding gas* 80% CO₂ + 100% Ar dengan 1 buah.
 - b. Pada *shielding gas* 100% CO₂ bentuk las yang terbentuk adalah lebar dan dalam sedangkan pada *shielding gas* 80% CO₂ + 20% Ar, bentuk las yang terbentuk adalah runcing dan memiliki penetrasi yang lebih dalam. Sedangkan untuk lebar HAZ, semakin tinggi *heat input* yang diberikan maka luas HAZ akan semakin lebar. HAZ paling lebar terdapat pada spesimen dengan *shielding gas* 100% CO₂ pada 740 J/mm dengan luas 2146 μm, dan HAZ tersempit ditemukan pada spesimen dengan variasi 620 J/mm dengan luas 995 μm.
 - c. Pada penggunaan *shielding gas* 80% CO₂ + 20% Ar menghasilkan struktur mikro yang lebih halus dibandingkan dengan penggunaan *shielding gas* 100% CO₂.
 - d. Pada penggunaan 100% CO₂, HAZ memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan dengan *weld metal*. Sedangkan pada 80% CO₂ + 20% Ar diketahui bahwa *weld metal* lebih keras dibandingkan HAZ.
 - e. Nilai kekuatan *impact* yang tertinggi terdapat pada penggunaan *shielding gas* 380% CO₂ + 20% Ar dan

- kekuatan *impact* yang terkecil terdapat pada penggunaan *shielding gas* 100% CO₂.
- f. Untuk uji tarik didapati bahwa pada *heat input* paling rendah nilai UTS tertinggi dimiliki oleh *shielding gas* 100% CO₂ sedangkan pada *heat input* tertinggi, hasil UTS tertinggi terdapat pada *shielding gas* 80% CO₂ + 20% Ar. Sedangkan untuk elongasi, hasil *shielding gas* memiliki elongasi yang lebih besar dibandingkan dengan 100% CO₂
2. Variasi *heat input* pada pengelasan GMAW JIS G30101 mempengaruhi sifat mekanik dan struktur mikro dari spesimen diantaranya:
- a. Pada hasil *splatter*, semakin naik *heat input* yang diberikan maka semakin banyak *splatter* yang dihasilkan. Semakin meningkatnya *heat input* juga akan memperbesar ukuran *undercut*.
 - b. Pada mikrostruktur, semakin tinggi *heat input* yang diberikan maka akan memperbesar ukuran butir.
 - c. Pada luas HAZ, nilai kekerasan, kekuatan tarik didapati bahwa semakin meningkatnya *heat input* maka akan semakin meningkatkan nilai kekerasan dan kekuatan tarik serta lebar HAZ. Sedangkan pada kekuatan *impact* akan mengalami penurunan seiring meningkatnya *heat input*.

5.1 Saran

Adapun beberapa saran yang dapat digunakan untuk melanjutkan penelitian ini kedepannya, diantaranya:

1. Menambahkan variasi jenis *shielding gas* yang berbeda untuk menganalisa lebih lanjut mengenai pengaruh komposisi antara elektroda dan *base metal*.
2. Menambahkan jumlah spesimen dan pengujian agar didapatkan hasil yang lebih akurat dan meminimalisir kemungkinan eror yang terjadi selama penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Ade Saputra, Wahyu. 2012. “Analisis Pengaruh Aplikasi Post Weld Heat Treatment (PWHT) pada Pengelasan Cast Steel (SC 42) dengan Carbon Steel (Grade E) Terhadap Sifat Mekanik dan Metalurgi”. **Jurnal Teknik Pomits Vol. 1**, No. 2, (2012) ISSN: 2301-9271. Surabaya.
- Aucott, Lee Alan. 2015. “Mechanism of Solidification Cracking during Welding of High Strength Steels for Subsea Linepipe.” **University of Leicester**.
- Becken, O. dan Sommermeyer, K. 1936. “Operation About Cathode Arc Release”. **Time, for Physics 102**, p. 551. Germany.
- Bitharas, I, dkk. 2017. “Visualisation and Optimisation of Shielding Gas Coverage During Gas Metal Arc Welding”. **Journal of Materials Processing Technology**. UK.
- Darmawi. 2009. “Perbedaan Struktur Mikro, Kekerasan dan Ketangghuan Baja HQ 705 Bila di Quench dan di Tempering pada Media Es, Air dan Oli”. **Jurnal Rekayasa Mesin Vol. 9 No. 1 Maret 2009**. Palembang
- Dilthey, U. 2003. “Welding Technology 1 Welding and Cutting Technologies”. **ISF Welding Institute Aachen University**. Germany.
- Du, Chengchao, dkk. 2018. “Effect of Post-Weld Heat Treatment on The Microstructure and Mechanical Properties of The 2205DSS/Q235 Laser Beam Welding Joint”. **Journal of Material Processing**. China.
- “Gas Metal Arc Welding Guidelines.” **Lincoln Electric**. America.
- Hasrizam, Wan Shaiful, dkk. 2015. “Effect of Welding Heat Input on Microstructure and Mechanical Properties at Coarse Grain Heat Affected Zone of ABS Grade a Steel”. **ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences**. Malaysia
- Hilmy, Zakwan, dkk. 2016. “Analisa Pengaruh Variasi Komposisi Gas Pelindung Terhadap Hasil Pengelasan Gmaw-Short

- Circuit dengan Penggunaan Mesin Khusus Regulated Metal Deposition (RMD)”. **Teknik Kelautan FTK-ITS**. Surabaya.
- Kah, P, dkk. 2012. “Advanced Gas Metal Arc Welding Processes”. **Springer-Verlag**, London.
- Khan, Ibrahim. 2007. “Welding Science and Technology”. **New Age International (P) Ltd**. India.
- Kou, Sindo. 2003. “Welding Metallurgy”. **John Wiley & Sons, Inc.** Canada.
- Lancaster, J. F. “The Physics of Welding”. **Pergamon Press**. United Kingdom.
- Li, Dayong, dkk. 2018. “Effect of Shielding gas on GMAW of 10Ni5CrMoV HSLA Steel Using High Cr-Ni Austenitic Wire”. **Journal of Materials Processing Tech.** **259** (2018) 116-125. China.
- Mc Cormac, Jack C., dan Csernak, Stephern F. 2012. “Structural Steel Design”. **Pearson Education, Inc.**, Upper Saddle River. New Jersey.
- Messler, Robert W. 2004. “Principel of Welding”. **WILEY-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA. Weinheim**. Singapore.
- Mohrni, A. S., dan Kembaren B.H. 2013. “Pengaruh Variasi Kecepatan dan Kuat Arus terhadap Kekerasan, Tegangan Tarik, Struktur Mikro Baja Karbon Rendah dengan Elektroda E6013”. **Jurnal Rekayasa Mesin Vol. 13**. Palembang.
- Mukhopadhyay S. 2008. “Effect of shielding gas mixture on gas metal arc welding of HSLA steel using solid and flux-cored wires”. **Jadavpur University**. India
- Mvola Belinga, Kah Paul. 2016. “Effects of shielding gas control: welded joint properties in GMAW”. **Springer Verlag**. London
- Oguz, B. 1993. “Handbook of arc welding”. **Perlikon Publications**, Istanbul. Turkey.
- Palani, P.K. dan Murugan, N. 2005. “Selection of Parameters of Pulsed Current Gas Metal Arc Welding”. **Elsevier B.C Journal of Materials Processing Technology** **172** (2006) 1–10. India.

- Pires, I, dkk. 2007. "Analysis of The Influence of Shielding gas Mixtures on The Gas Metal Arc Welding Metal Transfer Modes and Fume Formation Rate". **IST, Seccao de Tecnologia Mecanica**. Portugal.
- Pratomo, Sri Bimo, dkk. 2015. "Morfologi Struktur dan Karakteristik Sifat Mekanik Serta Keausan Baja Bainit dengan Variasi Mangan Hasil Normalizing untuk Tapak Kendaraan Tempur". **Balai Besar Logam dan Mesin**. Bandung. Indonesia.
- Privoznik, L. J. 2007. "Welding Handbook". **American Welding Society**. America.
- Ricks, R. A. 1982. "The Nature of Acicular Ferrite in HSLA Steel Weld Metal. Journal of Materials Science 17". **Cambridge**, UK
- Schafranski, Lincon Luiz, dkk. 2017. "Benefits from H₂ and CO₂ Addition in Argon Gas Mixtures in GMAW". **Journal of Materials Processing Technology**.
- Soy, Ugur, dkk. 2011. "Determination of Welding Parameters for Shielded Metal Arc Welding". **Scientific Research and Essays Vol. 6(15), pp. 3153-3160**. Turkey.
- Steel Construction Engineering. 2000. Vol. 7 No.26.
- Suharno. 2008. "Struktur Mikro Las Baja C-Mn Hasil Pengelasan Busur Terendam dengan Variasi Masukan Panas". **Jurnal Teknik Mesin Vol. 1**
- Suratman, R. dan Sonawan W. 2003. "Pengantar Untuk Memahami Proses Pengelasan Logam". **Alfabeta**. Bandung.
- Susanto, Riswan Eko Wahyu dan Presetio, Putut Jatmiko Dwi. 2017. "Pengaruh Variasi Kecepatan Elektroda Las GMAW dan Perlakuan Panas Terhadap Sifat Mekanika Baja Karbon SS400". **Jurnal Teknik Mesin, Volume 6, nomor 1 Politeknik Kediri**. Kediri.
- Syahbuddin dan Abdul Rahmam. 2003. "Pertumbuhan Lapisan Intermetalik Fe-Zn pada Permukaan Sambungan Las Baja Struktur SS400 selama Galvanis pada 460 °C". **Jurnal desain dan kontruksi volume 2 no. 1**.

- Voort, George F. Vander. 1999. "Methalography Principles and Practice". **ASM International**. USA
- Weman, Klas. 2012. "Welding Process Handbook". **Woodhead Publishing Limited**. United Kingdom.
- Widharto. 2007. "Menuju Juru Las Tin gkat Dunia". **Cetakan Pertama. PT Pradnya Paramita**. Jakarta.
- Wijoyo. 2016. "Pengaruh Masukan Panas (heat input) Terhadap Ketangguhan Impak Sambungan Las TIG Al-13,5 Si". **Jurnal SIMETRIS Vol. 7**. Surakarta
- Wiryosumarto, H., dan Okumura, T. 2000. "Teknologi Pengelasan Logam". **Cetakan Kedelapan. PT Pradnya Paramita**. Jakarta.
- Yasar, Y., dkk. 2011. "Design and Manufacturing of Virtual Welding Simulator, 2nd Progress Report of 109M087 Numbered Research Project". **The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK), pp. 14-33**. Turkey.
- Yusim, Adi Kurniawan. 2013. "Pengaruh Pengelasan GMAW Terhadap Ketahanan Korosi Baja SS400 Studi Kasus di PT. INKA Madiun". **Jurusan Fisika ITS**. Surabaya.
- Zhao, Yong, dkk. 2018. "Effect of Shielding gas on The Metal Transfer and Weld Morphology in Pulsed Current MAG Welding of Carbon Steel". **Provincial Key Lab of Advanced Welding Technology, Jiangsu University of Science and Technology**. China.

LAMPIRAN

Lampiran 1

PT KOMATIS INDONESIA
Fabrication Inspection Section

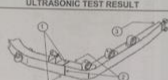
ULTRASONIC TEST RESULT

Doc. No. 001-0001-001
Rev. 01

EQUIPMENT: SPECTRA
SHEET: 1

UT TYPE: EPOCH 600
PROBE: MUR20-V
CABLE: MFC-L
COURTNEY: SNC
SAR OPERATIONAL: GO OK

COMPONENT: MODEL: MUR20-V
PART NUMBER: MUR20-V-1
PART NAME: C-ROCK
GRADE: 2
FIELD SECTION: BELLERBY



NO	PROG. NO.	REQ. Q.A. 12	INSPECTOR	POINT NO.	FIELD EVIDENCE		REMARKS	
					1	2	1	2
1	1001	4/16/20	SND	R	0.0	0.0	0.0	0.0
2								
3								
4								
5								

ULTRASONIC SCANNING REFERENCE TO PER PLAN

Scan	Time	Depth	Amplitude	Gain	Filter	Mode	Probe	Frequency	Velocity	Angle	Distance
1	1001	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	1002	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	1003	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	1004	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	1005	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Inspector: [Signature]
Checked: [Signature]
Approved: [Signature]

Date: 04/16/2020

Page 1 of 1

Lampiran 3



TEST PIECE	LAYER	BASE METAL			HAZ			WELD METAL			HAZ			BASE METAL		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
A1	1	161.3	162.4	156.9	209.4	208.4	211.6	183.6	189.8	182.3	194.4	199	204	159.2	156.9	149.4
	2				170	190	200	166.5	169	165	173.6	172.3	170			
A2	1	159	155	149.8	188.7	195.9	200	185.5	182.2	181.4	205.5	197.1	192.8	177.6	168	188
	2				205	195	197	168	165	168.1	182.9	187.6	173.6			
A3	1	162.1	159.5	153	191.7	204.8	195	179.6	175.6	169	181.4	193.2	184.2	155.5	148	163.2
	2				207.5	204.8	203.6	187.8	188.1	188.5	204.8	202.5	197.9			
B1	1	183.3	166.5	160.6	210	209	206.7	217	213	215	201	203.6	217	155.3	157.5	157.8
	2				194.4	196.7	196.4	190.9	206	194	180	185.1	180.3			
B2	1	161.2	169	161	195.6	202.7	204.8	207	210	206.7	196.7	203	205	164.3	154.7	153
	2				199	197.5	196	197.1	197.9	198	188	179	189			
B3	1	172	161	159	186.5	187.1	192	186.8	193.2	194.8	177.9	173.6	178	176.2	165	172.6
	2				200.8	199	197.4	199.1	205	201	198	200.5	201.1			
C1	1	177.6	153.6	148.7	173.2	185	185	169.8	177.3	177.3	180.3	176.2	175.2	144.1	156.1	172
	2				175	180.9	174.8	176	177	177.6	171	172.3	170			
C2	1	167.8	158.9	157.2	165	175.7	168.4	184.5	187.5	212.5	167.3	181	165.1	151.6	161	165.2
	2				199.1	184.5	231.9	180	189.2	197.9	165.3	162.4	181.4			
C3	1	167.6	156.9	156.7	161.3	183.3	189.2	181.4	197.5	191.3	207	199	184.9	153.6	157.8	156.4
	2				194.4	177.9	202.5	181.6	181.4	174.6	213.2	213	204			
D1	1	167	172.6	186.5	207.9	201.9	209	184.9	191.7	192.1	198.7	186.5	189.2	154.7	157.2	164.8
	2				200.1	200.9	200	190	183	192.4						
D2	1	156.7	158.1	167.3	211.6	209	207	194.4	190.9	204.1	207	209.2	205	152	151.9	159.6
	2				202.4	208.6	201.7	200	202	204	199.5	201.6	200.9			
D3	1	168.2	167.6	162	202	197.1	208	181.4	187.5	189	179	179.5	183	159	161	160
	2				198.9	199	200	197.3	199.9	195	177	172.7	174.6			

Lampiran 3

Spesimen	W	L	B	cosA	cosB	cosB - cosA	ΔE	A	Is
620	251.86	0.6595	92	-0.772	-0.035	0.737	122.371	0.8	152.96
	251.86	0.6595	93.5	-0.772	-0.061	0.711	118.028	0.8	147.53
	251.86	0.6595	94	-0.772	-0.070	0.702	116.581	0.8	145.73
720	251.86	0.6595	97	-0.772	-0.122	0.650	107.925	0.8	134.91
	251.86	0.6595	94	-0.772	-0.070	0.702	116.581	0.8	145.73
	251.86	0.6595	99	-0.772	-0.156	0.615	102.184	0.8	127.73
740	251.86	0.6595	113	-0.772	-0.391	0.381	63.267	0.8	79.08
	251.86	0.6595	111	-0.772	-0.358	0.413	68.643	0.8	85.80
	251.86	0.6595	111.5	-0.772	-0.367	0.405	67.292	0.8	84.11
620	251.86	0.6595	87.5	-0.772	0.044	0.815	135.413	0.8	169.27
	251.86	0.6595	85.2	-0.772	0.084	0.855	142.067	0.8	177.58
	251.86	0.6595	88	-0.772	0.035	0.807	133.965	0.8	167.46
720	251.86	0.6595	98.5	-0.772	-0.148	0.624	103.617	0.8	129.52
	251.86	0.6595	99	-0.772	-0.156	0.615	102.184	0.8	127.73
	251.86	0.6595	96.3	-0.772	-0.110	0.662	109.941	0.8	137.43
740	251.86	0.6595	113	-0.772	-0.391	0.381	63.267	0.8	79.08
	251.86	0.6595	110	-0.772	-0.342	0.430	71.358	0.8	89.20
	251.86	0.6595	98	-0.772	-0.139	0.632	105.051	0.8	131.31

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Ajeng Prameswati lahir pada 6 November 1997 dari ayah bernama Nurhudha Dodik Hariyono dan ibu Luluk Irawati, S.T. Penulis merupakan putri pertama dari dua bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal di SD Negeri Sukabumi 3, SMPN 1 Probolinggo, lalu SMAN 1 Probolinggo. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan tinggi di Institut Teknologi Sepuluh di Jurusan Teknik Material, Fakultas Teknologi Industri ITS Surabaya. Di Jurusan

Teknik Material dan Metalurgi ini penulis mengambil bidang Metalurgi manufaktur sebagai topik penelitian tugas akhir.

Semasa kuliah penulis aktif di himpunan mahasiswa jurusan teknik material dan metalurgi (HMMT) sebagai staff BSO Minat Bakat 2016/2017, kemudian menjadi Sekertaris Umum BSO Minat Bakat HMMT FTI-ITS 2017/2018. Selain itu penulis juga menjabat sebagai Bendahara Umum di organisasi NACE ITS *Student Chapter*. Penulis juga memiliki pengalaman kerja praktek di JOB Pertamina Jambi Merang ditempatkan pada divisi *Asset Integrity* dan di PT. Komatsu Indonesia dan ditempatkan di divisi *engineering*.

Email: ajengprameswati97@gmail.com