



TUGAS AKHIR (WE40050)

ANALISIS PENGARUH VARIASI *WELDING SQUENCE* DAN *TRAVEL SPEED* PADA MATERIAL ALUMINIUM 6061 DENGAN PROSES PENGELASAN GTAW TERHADAP DISTORSI, METALOGRAFI DAN SIFAT MEKANIK.

**RAYNALDO FAJRI FIRMANSYAH
NRP. 0722040116**

**CALON DOSEN PEMBIMBIN :
MOH. SYAIFUL AMRI, S.ST.,M.T.
Dr. RIKAT EKA PRASETYAWAN, S.Pd.,MP.d.**

**PROGRAM STUDI D4 TEKNIK PENGELASAN
JURUSAN TEKNIK BANGUNAN KAPAL
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
SURABAYA
2026**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



PPNS POLITEKNIK
PERKAPALAN
NEGERI SURABAYA

TUGAS AKHIR (WE40050)

ANALISIS PENGARUH VARIASI *WELDING SQUENCE* DAN *TRAVEL SPEED* PADA MATERIAL ALUMINIUM 6061 DENGAN PROSES PENGELASAN GTAW TERHADAP DISTORSI, METALOGRAFI DAN SIFAT MEKANIK.

Raynaldo Fajri Firmansyah

NRP. 0722040116

DOSEN PEMBIMBING:

Moh. Syaiful Amri, S.ST., M.T.

Dr. Rikat Eka Prasetyawan, S.Pd.,MP.d.

PROGRAM STUDI D4 TEKNIK PENGELASAN
JURUSAN TEKNIK BANGUNAN KAPAL
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
SURABAYA
2026

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**HALAMAN PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**ANALISIS PENGARUH VARIASI *WELDING SQUENCE* DAN *TRAVEL*
SPEED PADA MATRIAL ALUMINIUM 6061 DENGAN PROSES
PENGELASAN GTAW TERHADAP DISTORSI, METALOGRAFI DAN
SIFAT MEKANIK**

Disusun Oleh:

Raynaldo Fajri Firmansyah

0722040116

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Kelulusan

Program Studi D4 Teknik Pengelasan

Jurusan Teknik Bangunan Kapal

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir Tanggal Ujian: 27 Juli 2026

Periode Wisuda: Oktober 2026

Menyetujui,

Dosen Penguji

NIDN/NUPTK

Tanda Tangan

1. Moh. Miftachul Munir, S.T., M.T.

(0030086807)

(.....)

2. Moh. Syaiful Amri, S.ST., M.T.

(0007019102)

(.....)

3. Yudi Andika, S.Pd., M.T.

(9852773674130342)

(.....)

4. Hidayat, S.T., M.Sc.

(9037773674130363)

(.....)

Dosen Pembimbing

NIDN/NUPTK

Tanda Tangan

1. Moh. Syaiful Amri, S.S.T., M.T.

(0007019102)

(.....)

2. Dr. Rikat Eka Prasetyawan, S.Pd., MP.d.

(0729108702)

(.....)

Menyetujui
Ketua Jurusan,

Mengetahui
Koordinator Program Studi,



Ir. Priyambodo Nur Ardi N, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 198103242014041001

Moh. Syaiful Amri, S.ST., M.T.
NIP. 199101072019031016

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT

 PPNS BRL	<u>PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT</u>	No. : F.WD 1.021 Date : 3 September 2015 Rev. : 01 Page : 1 dari 1
---	--	---

Yang bertandatangan dibawah ini :

Nama : Raynaldo Fajri Firmansyah

NRP : 0722040116

Jurusan/Prodi : Teknik Bangunan Kapal/D4 Teknik Pengelasan

Dengan ini menyatakan dengan sesungguhnya bahwa :

Tugas Akhir yang akan saya kerjakan dengan judul :

ANALISIS PENGARUH VARIASI *WELDING SQUENCE* DAN *TRAVEL SPEED* PADA MATERIAL ALUMINIUM 6061 DENGAN PROSES PENGELASAN GTAW TERHADAP DISTORSI, METALOGRAFI DAN SIFAT MEKANIK.

Adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain.

Apabila dikemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam karya ilmiah tersebut, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan peraturan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan penuh tanggung jawab.

Surabaya, 20 Juli 2026

Yang membuat pernyataan,



Raynaldo Fajri Firmansyah
NRP. 0722040116

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur atas kehadiran Allah SWT atas segala rahmat, hidayah, serta karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul " Analisis Pengaruh Variasi *Welding Sequence* Dan *Travel speed* Pada Material Aluminium 6061 Dengan Proses Pengelasan Gtaw Terhadap Distorsi, Metalografi Dan Sifat Mekanik" Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Terapan Teknik (S.Tr.T.) pada Program Studi Diploma IV Teknik Pengelasan, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

Dalam proses penyusunan Tugas Akhir ini, penulis menyadari bahwa masih banyak hambatan dan tantangan yang dihadapi. Namun, berkat bimbingan, bantuan, doa, serta dukungan dari berbagai pihak, Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang senantiasa memberikan kesehatan, kemudahan, dan kekuatan sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini
2. Kedua orang tua, kakak, dan adek penulis, Bapak Badrul Khusnaeni, Ibu Sriyanti kakak Lorentino Fajarudin Basriansyah, Titonio Dira Mahendra dan adek Anindya Fara Fatina serta seluruh keluarga yang selalu memberikan doa, kasih sayang, motivasi, dan dukungan baik moril maupun materiil selama proses penyusunan Tugas Akhir.
3. Bapak Rachmad Tri Soelistijono, S.T., M.T., selaku Direktur Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
4. Bapak Priyambodo Nur Ardi N., S.T., M.T., Ph.D, selaku Ketua Jurusan Teknik Bangunan Kapal.
5. Bapak Moh. Syaiful Amri, S.ST., M.T., selaku Ketua Program Studi Diploma IV Teknik Pengelasan, serta selaku Dosen Pembimbing I yang telah memberikan bimbingan, arahan, saran, motivasi, serta ilmu yang sangat bermanfaat selama proses penelitian hingga penyusunan Tugas Akhir.
6. Ibu Adristi Nisazafira, S.T., M.T., selaku Koordinator Tugas Akhir Program Studi Diploma IV Teknik Pengelasan.

7. Bapak Dr. Rikat Eka Prasetyawan, S.Pd.,MP.d. selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan bimbingan, arahan, ilmu, motivasi, serta masukan selama penyusunan Tugas Akhir.
8. Seluruh dosen Program Studi Diploma IV Teknik Pengelasan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya yang telah memberikan ilmu pengetahuan, pengalaman, dan wawasan selama masa perkuliahan.
9. Seluruh teknisi Laboratorium Material dan Laboratorium Pengelasan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya yang telah membantu pelaksanaan pengujian dan pengambilan data selama penelitian.
10. Teman-teman Program Studi Diploma IV Teknik Pengelasan, khususnya rekan-rekan Teknik Pengelasan angkatan 2022, yang selalu memberikan dukungan, motivasi, dan kerja sama selama penyusunan Tugas Akhir VIVAT TL WE BROTHERS.
11. Terima kasih untuk diriku sendiri. Terima kasih telah bertahan di saat ingin menyerah, dan tetap melangkah maju meski prosesnya tidak mudah. Tugas akhir ini adalah bukti nyata atas ketangguhan, kesabaran, dan kerja keras yang telah kamu korbankan untuk masa depanmu.
12. Terima kasih yang tidak terhingga penulis sampaikan kepada Novi Zuhrotul Afifah, yang senantiasa hadir menemani perjalanan ini meski terhalang jarak. Terima kasih telah menjadi tempat pulang bagi penulis untuk berbagi keluh kesah, serta selalu ada dalam setiap kondisi, baik suka maupun duka hingga tugas akhir ini selesai.
13. Semua pihak yang telah membantu baik secara langsung maupun tidak langsung sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun demi penyempurnaan penelitian di masa mendatang. Penulis berharap Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat serta menjadi referensi bagi perkembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang teknik pengelasan dan rekayasa material.

ANALISIS PENGARUH VARIASI *WELDING SEQUENCE* DAN *TRAVEL SPEED* PADA MATERIAL ALUMINIUM 6061 DENGAN PROSES PENGELASAN GTAW TERHADAP DISTORSI, METALOGRAFI DAN SIFAT MEKANIK.

RAYNALDO FAJRI FIRMANSYAH

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh *welding sequence* (*Alternating sides*, *Center to end*, dan *Intermitten*) serta *travel speed* (95–100 mm/menit dan 115–120 mm/menit) terhadap distorsi, struktur metalografi, dan nilai kekerasan pada sambungan las Aluminium 6061 menggunakan metode *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW). Pengujian yang dilakukan meliputi pengukuran distorsi, pengamatan makro dan mikrostruktur, uji kekerasan *Vickers*, serta analisis statistik menggunakan *Two-way ANOVA*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi metode *Alternating sides* dengan *travel speed* tinggi (115–120 mm/menit) menghasilkan distorsi terendah sebesar 1,20 mm dan luas *Heat Affected Zone* (HAZ) tersempit sebesar 12,40 mm², sedangkan metode *Center to end* menghasilkan distorsi tertinggi sebesar 2,42 mm akibat akumulasi panas yang terkonsentrasi di tengah pelat, dan *travel speed* rendah menghasilkan luas HAZ terbesar sebesar 20,29 mm² akibat *heat input* yang lebih tinggi. Struktur mikro pada base metal relatif seragam dan tidak terpengaruh variasi parameter las, daerah HAZ mengalami pertumbuhan butir (*grain coarsening*) disertai pelarutan sebagian presipitat Mg₂Si, sementara *weld metal* menunjukkan struktur dendrit halus akibat pendinginan cepat namun kehilangan presipitat penguat; *travel speed* tinggi terbukti memperhalus struktur butir dan menekan pengasaran mikrostruktur pada daerah HAZ. Nilai kekerasan tertinggi pada daerah HAZ diperoleh pada kombinasi metode *Center to end* dengan *travel speed* tinggi (115–120 mm/menit) sebesar 72,3 HV. Hasil *Two-way ANOVA* menunjukkan bahwa *travel speed* dan *welding sequence* masing-masing berpengaruh signifikan terhadap nilai kekerasan (Sig. < 0,001), namun interaksi antara kedua faktor tersebut tidak signifikan (Sig. = 0,072). Dengan demikian, metode *Alternating sides* dengan *travel speed* tinggi direkomendasikan untuk meminimalkan distorsi dan mempersempit daerah HAZ, sedangkan metode *Center to end* dengan *travel speed* tinggi lebih unggul dalam mempertahankan kekerasan pada daerah HAZ sambungan las Aluminium 6061.

Kata kunci: *Welding sequence*; *Travel speed*; Aluminium 6061; GTAW; Distorsi; Metalografi; Kekerasan

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

ANALYSIS OF THE EFFECT OF WELDING SEQUENCE AND TRAVEL SPEED VARIATIONS ON ALUMINIUM 6061 MATERIAL WITH GTAW WELDING PROCESS ON DISTORTION, METALLOGRAPHY AND MECHANICAL PROPERTIES.

RAYNALDO FAJRI FIRMANSYAH

ABSTRACT

This study aims to analyze the effect of welding sequence (Alternating sides, Center to end, and Intermittent) and travel speed (95–100 mm/min and 115–120 mm/min) on distortion, metallographic structure, and hardness value of Aluminum 6061 weld joints using the Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) method. The tests conducted include distortion measurement, macro and microstructure observation, Vickers hardness testing, and statistical analysis using Two-way ANOVA. The results show that the combination of the Alternating sides method with high travel speed (115–120 mm/min) produced the lowest distortion of 1.20 mm and the narrowest Heat Affected Zone (HAZ) area of 12.40 mm², whereas the Center to end method produced the highest distortion of 2.42 mm due to concentrated heat accumulation at the center of the plate, and low travel speed produced the widest HAZ area of 20.29 mm² due to higher heat input. The microstructure of the base metal was relatively uniform and unaffected by variations in welding parameters, the HAZ experienced grain coarsening accompanied by partial dissolution of Mg₂Si precipitates, while the weld metal exhibited a fine dendritic structure due to rapid cooling but with a loss of strengthening precipitates; high travel speed was shown to refine the grain structure and suppress microstructural coarsening in the HAZ. The highest hardness value in the HAZ was obtained from the combination of the Center to end method with high travel speed (115–120 mm/min), reaching 72.3 HV. The Two-way ANOVA results indicate that both travel speed and welding sequence significantly affect hardness values (Sig. < 0.001), while the interaction between the two factors is not significant (Sig. = 0.072). Therefore, the Alternating sides method with high travel speed is recommended to minimize distortion and narrow the HAZ area, while the Center to end method with high travel speed is superior in maintaining hardness in the HAZ of Aluminum 6061 weld joints.

Keywords: Welding sequence; Travel speed; Aluminum 6061; GTAW; Distortion; Metallography; Hardness

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	v
PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT	vii
KATA PENGANTAR	ix
ABSTRAK.....	xi
<i>ABSTRACT</i>	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
DAFTAR LAMPIRAN	xxiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Penelitian	4
1.4. Manfaat Penelitian	4
1.5. Batasan Masalah	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Aluminium Seri 6061.....	7
2.2 Proses Pengelasan GTAW	9
2.3 Parameter Pengelasan	11
2.4 Logam Pengisi (<i>Filler Metal</i>).....	12
2.5 Elektroda Tungsten	13
2.6 Gas pelindung	14
2.7 <i>Welding Sequence</i>	15
2.7.1 <i>Alternating sides</i>	16
2.7.2 <i>Working from center to ends</i>	16
2.7.3 <i>Stitch / intermittent welding</i>	17
2.8 Kecepatan Pengelasan (<i>Travel speed</i>).....	17
2.9 Distorsi dan Tegangan Sisa.....	19
2.10 Pengujian.....	20
2.10.1 Pengujian visual	21

2.10.2 Pengujian distorsi	21
2.10.3 Pengujian struktur makro dan mikro	24
2.10.4 Pengujian kekerasan	28
2.11 ANOVA (<i>Analyze Of Variance</i>)	33
2.12 Penelitian Terdahulu	34
BAB 3 METOLOGI PENELITIAN	37
3.1. Skema Diagram Alir.....	37
3.2. Studi Literatur.....	38
3.3. Pengumpulan Data.....	38
3.4. Persiapan Alat dan Bahan.....	39
3.4.1. Alat.....	39
3.4.2. Bahan	40
3.5. Pengelasan	40
3.5.1. Proses pengelasan	43
3.5.2 Elektroda tungsten	43
3.5.3 Pengelasan tanpa <i>treatment (baseline/control)</i>	45
3.6 Pengujian	47
3.6.1. Pengujian visual	47
3.6.2. Pengukuran distorsi.....	48
3.6.3 Pengujian struktur makro dan mikro.....	50
3.6.4 Pengujian kekerasan (<i>hardness</i>)	54
3.7 Analisis dan Pembahasan	56
3.7.1 ANOVA	56
3.8. Kesimpulan dan Saran.....	58
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	59
4.1 Hasil penelitian	59
4.1.1 Hasil variasi <i>welding sequence</i> dan <i>travel speed</i> terhadap besarnya distorsi.....	64
4.1.2 Hasil variasi <i>welding sequence</i> dan <i>travel speed</i> terhadap struktur makro dan mikro	72
4.1.3 pengaruh variasi <i>welding sequence</i> dan <i>travel speed</i> terhadap nilai kekerasan (<i>hardness</i>)	88

4.2	Pembahasan.....	97
4.2.1	Pembahasan uji distorsi.....	97
4.2.2	Pembahasan uji makro.....	99
4.2.3	Pembahasan uji mikro	101
4.2.4	Pembahasan Uji <i>Hardness</i>	105
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN		115
5.1	Kesimpulan	115
5.2	Saran.....	116
DAFTAR PUSTAKA		119
LAMPIRAN		123

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Skema Pengelasan GTAW	9
Gambar 2. 2 Jenis – Jenis <i>Welding Sequence</i>	15
Gambar 2. 3 Ilustrasi <i>Alternating sides</i>	16
Gambar 2. 4 Ilustrasi <i>Working from Center to ends.</i>	16
Gambar 2. 5 Ilustrasi <i>Intermittent Welding</i>	17
Gambar 2.6 Pengaruh Kecepatan Pengelasan.....	18
Gambar 2. 7 Hubungan Tegangan Sisa.....	20
Gambar 2. 8 Macam–Macam Distorsi	23
Gambar 2. 9 Diagram Fasa Aluminium 6061.....	25
Gambar 2. 10 Struktur Mikro Aluminium 6061	26
Gambar 2. 11 Struktur Mikro <i>Base Metal</i> Aluminium 6061	27
Gambar 2. 12 Identasi Struktur Mekanik Pengujian.....	29
Gambar 2. 13 Pengujian <i>Hardness Rockwell</i>	31
Gambar 2. 14 Ilustrasi Pengujian <i>Hardness Brinell</i>	32
Gambar 2. 15 Ilustrasi Pengujian <i>Hardness Brinell</i>	32
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian	38
Gambar 3. 2 Alat yang di gunakan Pengelasan Aluminium seri 6061	39
Gambar 3. 3 Aluminium Seri 6061	40
Gambar 3. 4 Posisi Pengelasan T Joint.....	40
Gambar 3. 5 <i>Alternating sides</i>	41
Gambar 3. 6 <i>Work from Center to ends</i>	41
Gambar 3. 7 <i>Stitch / Intermittent Welding</i>	42
Gambar 3. 8 Proses Pengelasan	43
Gambar 3. 9 <i>Filler</i> metal 5356.....	43
Gambar 3. 10 Elektroda Tungsten WP	43
Gambar 3. 11 Desain <i>joint</i>	46
Gambar 3. 12 <i>Marking Lines Distortion</i>	49
Gambar 3. 13 Spesimen Makro	50
Gambar 3. 14 Alat Uji Mikro.....	51
Gambar 3. 15 Spesimen Uji Mikro	52

Gambar 3. 16 Alat Uji Kekerasan	54
Gambar 3. 17 Lokasi Pengujian <i>Hardness</i>	54
Gambar 4. 1 Visual Report	63
Gambar 4. 2 3D Diagram Tanpa <i>Treatment travel speed</i> 100-110 mm/menit.....	65
Gambar 4. 3 3D Diagram <i>Alternating sides</i> Lambat	66
Gambar 4. 4 3D Diagram <i>Alternating sides</i> Cepat.....	67
Gambar 4. 5 3D Diagram <i>Center to end</i> lambat.....	68
Gambar 4. 6 3D Diagram <i>Center to end</i> cepat	69
Gambar 4. 7 3D Diagram <i>Intermitten</i> Lambat	70
Gambar 4. 8 3D Diagram <i>Intermitten</i> Cepat	71
Gambar 4. 9 Grafik Hasil Uji Distorsi.....	72
Gambar 4. 10 Hasil Pengujian Makro <i>Leg Length</i> dan <i>Throat</i>	74
Gambar 4. 11 Luas Delusi	78
Gambar 4. 12 Hasil Pengujian Mikro Pada Base Metal	81
Gambar 4. 13 Hasil Pengujian Mikro Pada HAZ	84
Gambar 4. 14 Hasil Pengujian Mikro Pada Weld Metal	87
Gambar 4. 15 Titik Pengujian <i>Hardness</i>	88
Gambar 4. 16 Nilai Rata-Rata Pengujian <i>Hardness</i>	96

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Komposisi Kimia Aluminium Seri 6061	8
Tabel 2. 2 <i>Properties</i> Gas Pelindung	10
Tabel 2. 3 Parameter Pengelasan	11
Tabel 2. 4 Besar Arus Untuk Diameter Logam Pengisi.....	13
Tabel 2. 5 Kesesuaian Logam Pengisi	13
Tabel 2. 6 Komposisi Kimia Elektroda Tungsten WP	14
Tabel 2. 7 <i>Acceptance Criteria</i> Visual pada Sambungan Las T <i>Joint</i>	21
Tabel 2. 8 Toleransi Distorsi Angular.....	22
Tabel 2. 9 Perbedaan Pengujian Makro dan Pengujian Mikro	27
Tabel 2. 10 <i>Acceptance Criteria Macrostruktur</i>	28
Tabel 2. 11 <i>Acceptance Criteria Mikrostruktur</i>	28
Tabel 2. 12 <i>Acceptance Criteria</i> Pengujian <i>Hardness</i> Vicker	32
Tabel 2. 13 Penelitian Terdahulu	34
Tabel 3. 1 Perbandingan <i>Travel speed</i> 95 – 100 mm/menit dan 115 – 200 mm/menit	41
Tabel 3. 2 Parameter Pengelasan	42
Tabel 3. 3 <i>Acceptance Criteria</i> Visual pada Sambungan Las T <i>Joint</i>	48
Tabel 3. 4 <i>Acceptance Criteria</i> Macrostruktur	53
Tabel 3. 5 <i>Acceptance Criteria</i> Mikrostruktur.....	53
Tabel 3. 6 <i>Acceptance Criteria</i> Pengujian <i>Hardness</i> Vicker	55
Tabel 3. 7 <i>Standard Hardness Scales and Test Forces</i>	56
Tabel 4. 1 Identifikasi Pengelasan	59
Tabel 4. 2 Parameter Pengelasan	60
Tabel 4. 3 Tabel Hasil Uji Visual	61
Tabel 4. 4 Tanpa <i>Tretmen travel speed</i> 100-110 mm/menit.....	65
Tabel 4. 5 <i>Alternating side</i> Metode <i>Travel speed</i> 95 – 100 mm/menit.....	66
Tabel 4. 6 <i>Alternating side</i> Metode <i>Travel speed</i> 115 – 120 mm/menit.....	67
Tabel 4. 7 <i>Center to end Travel speed</i> 95 – 100 mm/menit.....	68
Tabel 4. 8 <i>Center to end Travel speed</i> 115 – 120 mm/menit.....	69
Tabel 4. 9 <i>Intermiten Travel speed</i> 95 – 100 mm/menit.....	70
Tabel 4. 10 <i>Intermiten Travel speed</i> 115 – 120 mm/menit.....	71

Tabel 4. 11 Panjang <i>Leg Length</i>	75
Tabel 4. 12 Panjang <i>Throat</i>	76
Tabel 4. 13 Presentase Delusi.....	79
Tabel 4. 14 Hasil <i>Hardness Test Tanpa Treatment</i>	89
Tabel 4. 15 Hasil <i>Hardness Test Alternating sides Travel speed 95 – 100 mm/menit</i>	90
Tabel 4. 16 Hasil <i>Hardness Test Alternating sides Travel speed 115 – 120</i> <i>mm/menit</i>	90
Tabel 4. 17 Hasil <i>Hardness Test Center to end Travel speed 95-100 mm/menit</i>	91
Tabel 4. 18 Hasil <i>Hardness Test Center to end Travel speed 115-120 mm/menit</i>	92
Tabel 4. 19 Hasil <i>Hardness Test Intermitten Travel speed 95 – 100 mm/menit</i> ..	93
Tabel 4. 20 Hasil <i>Hardness Test Intermitten Travel speed 115 – 120 mm/menit</i>	94
Tabel 4. 21 Hasil Uji Normalitas WM, HAZ, dan BM	106
Tabel 4. 22 Hasil Uji Homogenitas WM.....	107
Tabel 4. 23 Hasil Uji Homogenitas HAZ	108
Tabel 4. 24 Hasil Uji Homogenitas BM.....	109
Tabel 4. 25 Hasil ANOVA <i>Two Way BM</i>	110
Tabel 4. 26 Hasil Uji ANOVA <i>Two-way BM</i>	111
Tabel 4. 27 Hasil Uji <i>Non Parametik HAZ</i>	112

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A. 1 <i>Mill Certificate Alumunium 6061-T6</i>	123
Lampiran A. 2 <i>Mill Certificate Filler Metal ER5356</i>	124
Lampiran B. 1 Persiapan Material Alumunium 6061-T6	125
Lampiran B. 2 <i>Flow Rate</i>	126
Lampiran B. 3 Ampere dan Voltase Pengelasan	127
Lampiran B. 4 Proses Pengelasan	128
Lampiran B. 5 <i>Preparation Material</i>	129
Lampiran B. 6 Preparation Material	130
Lampiran C. 1 Dokumentasi Pengujian Distorsi	131
Lampiran C. 2 Dokumentasi Spesimen Uji Metalografi Dan <i>Hardness</i>	132
Lampiran D. 1 Stopwatch pengelasan.....	133
Lampiran E. 1 <i>Visual Report</i>	134

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

PT. X merupakan perusahaan manufaktur yang bergerak di bidang sistem manajemen kabel dan panel listrik. Dalam menunjang kerapihan dan keamanan instalasi kabel, PT. X menggunakan *ducting* sebagai jalur penempatan kabel. *Ducting* yang di gunakan terbuat dari material aluminium, khususnya aluminium seri 6061, karena memiliki karakteristik yang sesuai untuk aplikasi industri panel listrik. Selain berfungsi sebagai pelindung kabel, penggunaan *ducting* aluminium juga memberikan nilai estetika yang lebih baik pada instalasi sistem kelistrikan.

Aluminium seri 6061 memiliki berbagai keunggulan, antara lain merupakan salah satu material logam yang paling banyak di gunakan di dunia industri karena karakteristiknya yang ringan, tahan korosi, mudah diproses, dan memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang baik dan bersifat isolator. Paduan aluminium seri 6061 sering di gunakan untuk pembuatan *ducting* sehingga sangat menarik untuk aplikasi struktural di industri manufaktur, transportasi, dan *aerospace*. Di sektor manufaktur, aluminium 6061 telah diaplikasikan dalam komponen mesin dan struktur karena kemampuannya menahan beban sambil memberikan pengurangan bobot yang signifikan dibandingkan baja. Di industri transportasi seperti otomotif dan kereta, paduan ini di gunakan dalam rangka kendaraan dan bodi untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar serta kinerja dinamis kendaraan. Di industri *aerospace*, aluminium 6061 di gunakan pada struktur sayap, *fuselage* kecil, dan elemen struktural lain yang membutuhkan kekuatan moderat namun tetap ringan. Umumnya material aluminium jenis 6061 diaplikasikan untuk *automotif* dan alat-alat konstruksi karena memiliki *machine ability*, *corrosion*, konduktivitas *thermal* dan elektik yang cukup baik (Bashoruddin & Nasution, 2022). Meskipun memiliki banyak keunggulan, aluminium juga memiliki tantangan tersendiri dalam proses penyambungan, khususnya pada proses pengelasan. Sifat konduktivitas panas yang tinggi dan koefisien muai termal yang besar

menyebabkan material aluminium rentan mengalami distorsi selama proses pengelasan. Distorsi ini dapat memengaruhi dimensi, bentuk, dan kualitas hasil pengelasan, sehingga berpotensi menurunkan kualitas produk yang dihasilkan. Salah satu untuk mengendalikan distorsi adalah dengan mengatur *welding sequence*, yakni urutan jalur pengelasan yang mempengaruhi distribusi panas di sepanjang sambungan las. Variasi urutan seperti *Alternating sides*, *Work from Center to ends*, dan *Intermittent Welding* membantu menyebarkan panas secara lebih merata sehingga dapat mengurangi akumulasi panas lokal dan meminimalkan deformasi akhir. Ini konsisten dengan rekomendasi praktik pengelasan untuk mengontrol distorsi dengan mengubah urutan pemasukan panas. Parameter lain yang krusial adalah *travel speed*, atau kecepatan gerak kepala las, yang secara langsung berhubungan dengan input panas termal (Lukas Febri, 2023).

Salah satu untuk mengendalikan distorsi dan perubahan struktur mikro pada pengelasan aluminium adalah dengan mengatur *welding sequence* dan *travel speed*. Variasi *welding sequence* berpengaruh terhadap distribusi panas dan urutan penyusutan material, sedangkan *travel speed* memengaruhi besar heat input yang diterima material. Pengaturan kombinasi *welding sequence* dan *travel speed* yang tepat diharapkan dapat menghasilkan distribusi panas yang lebih merata, sehingga distorsi dapat dikurangi dan struktur mikro yang terbentuk menjadi lebih baik. *Travel speed* yang lebih cepat cenderung menghasilkan input panas yang lebih rendah per satuan panjang, sehingga mengurangi ukuran HAZ dan perubahan struktur mikro yang merugikan. Sebaliknya, kecepatan yang terlalu lambat menyebabkan akumulasi panas lebih besar yang dapat memperluas HAZ dan memperbesar distorsi serta perubahan butir mikrostruktur (Khosroyan & Darvazi, 2020).

Oleh karena itu, Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode eksperimen melalui proses pengelasan *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) pada material aluminium seri 6061. Variasi *welding sequence* dan *travel speed* diterapkan dengan parameter pengelasan lainnya dijaga konstan. Hasil pengelasan kemudian dianalisis secara statistik menggunakan ANOVA dua

faktor atau (*Two-way ANOVA*) karena melibatkan dua faktor perlakuan yaitu *welding sequence* dan *travel speed*, serta memungkinkan analisis pengaruh variasi tersebut terhadap struktur mikro dan distorsi yang terjadi, sehingga diperoleh parameter pengelasan yang optimal. Pemilihan *travel speed* 95 - 100 mm/menit dan 115 – 120 mm/menit dalam penelitian ini merepresentasikan perbedaan *heat input* yang signifikan sekaligus realistis pada proses *welding* aluminium seri 6061, karena perubahan kecepatan sebesar tersebut dapat menciptakan variasi *profil termal* yang dapat diukur dalam hal dampak terhadap distorsi dan struktur mikro. Hal ini memungkinkan analisis yang lebih tajam atas pengaruh kecepatan terhadap respons material. Oleh karena itu, diperlukan penelitian yang sistematis untuk mengukur bagaimana kombinasi *welding sequence* dan variasi *travel speed* yangengaruhi struktur mikro (*metallography*) dan distorsi pada aluminium 6061 dengan data empiris yang dapat dianalisis secara statistik. Sehingga hasilnya dapat di gunakan sebagai dasar rekomendasi parameter las yang optimal dalam industri manufaktur dan struktural yang semakin menuntut efisiensi, kualitas, serta performa pengelasan Aluminium yang tinggi terhadap kualitas hasil sambungan. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam memahami karakteristik metalurgi sambungan logam tak sejenis serta menjadi acuan praktis dalam penerapan teknik pengelasan di industri, khususnya di PT. X yang berhubungan langsung dengan permintaan teknis dari pihak klien.

1.2. Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana hasil variasi *welding sequence* dan *travel speed* terhadap besarnya distorsi?
2. Bagaimana hasil variasi *welding sequence* dan *travel speed* terhadap struktur makro dan mikro?
3. Bagaimana pengaruh variasi *welding sequence* dan *travel speed* terhadap nilai kekerasan (*hardness*)?

1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis parameter proses pengelasan terhadap struktur mikro (*metallography*) dan distorsi pada *aluminium* seri 6061. Secara khusus tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui hasil variasi *welding sequence* dan *travel speed* terhadap distorsi pada pengelasan aluminium seri 6061.
2. Mengetahui hasil variasi *welding sequence* dan *travel speed* terhadap struktur makro dan mikro pada pengelasan aluminium seri 6061 menggunakan proses pengelasan GTAW.
3. Mengetahui pengaruh hasil variasi *welding sequence* dan *travel speed* terhadap nilai kekerasan (*hardness*) pada pengelasan aluminium seri 6061.

1.4. Manfaat Penelitian

Manfaat yang didapatkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Manfaat Akademis

Penelitian ini diharapkan dapat menambah dan memperkaya kajian ilmiah dalam bidang teknik manufaktur dan pengelasan, khususnya yang berkaitan dengan pengaruh variasi *welding sequence* dan *travel speed* terhadap struktur mikro dan distorsi pada pengelasan *aluminium* seri 6061. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi ilmiah bagi peneliti selanjutnya dalam mengembangkan studi mengenai optimasi parameter pengelasan aluminium paduan, baik melalui pendekatan eksperimental maupun pemodelan numerik.

2. Manfaat Praktis

Secara praktis, penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi parameter pengelasan berupa kombinasi *welding sequence* dan *travel speed* yang optimal untuk mengurangi distorsi pada pengelasan *aluminium* seri 6061. Rekomendasi tersebut diharapkan dapat diaplikasikan dalam industri manufaktur, transportasi, dan struktur, sehingga mampu meningkatkan kualitas dimensi, efisiensi proses

produksi, serta performa struktural dari komponen aluminium hasil pengelasan.

1.5. Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terarah dan fokus pada permasalahan yang dikaji, maka ditetapkan beberapa batasan sebagai berikut:

1. Material yang di gunakan dalam penelitian ini adalah aluminium seri 6061 dengan ukuran 200 mm x 200 mm x 4 mm dan 100 mm x 200 mm x 4 mm sebagai material dasar pengelasan.
2. Proses pengelasan yang diterapkan dibatasi pada satu jenis metode pengelasan, yaitu *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW/TIG).
3. Variasi *welding sequence* yang diteliti dalam penelitian ini dibatasi pada tiga jenis, yaitu:
 - *Alternating sides*
 - *Working from Center to ends*
 - *Stitch (Intermittent) Welding*
4. Variasi *travel speed* dalam penelitian ini dibatasi pada dua tingkat kecepatan, yaitu 95 - 100 mm/menit dan 115 - 120 mm/menit.
5. Parameter pengelasan lainnya, meliputi arus las, tegangan, jenis kawat pengisi (*filler metal*), jenis gas pelindung, dan posisi pengelasan, dijaga konstan selama seluruh proses penelitian.
6. Menggunakan elektroda Tungsten WP dan menggunakan filler metal ER 5356
7. Menggunakan posisi pengelasan 1F (*Down Hand*).
8. Penelitian ini menggunakan pengujian terhadap spesimen sebagai berikut:
 - a. Pengujian distorsi
 - b. Pengujian makro dan mikro (*metallography*)
 - c. Pengujian kekerasan (*hardness*)
9. Distorsi yang dianalisis dibatasi pada distorsi geometrik tertentu yang terukur secara manual akibat proses pengelasan.

10. Pengamatan struktur mikro (*metallography*) dilakukan menggunakan mikroskop optik, dengan fokus pada daerah logam las (*weld metal*) dan zona terpengaruh panas (*heat affected zone*).
11. Penelitian ini tidak mencakup pengujian sifat mekanik, seperti uji tarik, maupun uji impak.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Aluminium Seri 6061

Pada tahun 1809 aluminium ditemukan oleh Sir Humphrey Davy sebagai suatu unsur, dan Pada tahun 1825 pertama kali direduksi sebagai logam oleh H. C. Oersted. Ditinjau dari penggunaannya aluminium sebagai logam mendapat urutan yang kedua setelah besi dan baja setiap tahunnya, dan ini merupakan urutan yang tertinggi di antara logam-logam *non-ferrous*. Produksi aluminium di dunia mencapai 15 juta ton per-tahunnya, yang tercatat pada tahun 1981 (Surdia, Tata, 1995).

Aluminium adalah material logam yang tidak berbahan besi (*non ferrous*) yang mempunyai keunggulan pada berat jenisnya yang sangat ringan dan keuletannya yang dapat ditingkatkan sesuai yang dibutuhkan, kekuatan aluminium dapat ditingkatkan dengan menggunakan campuran (*alloying*) dan memberikan perlakuan panas. Aluminium merupakan salah satu material sering di gunakan, aluminium yang pada umum di gunakan dalam bentuk Paduan dengan unsur penambah utama seperti *Silicon (Si)*, *Copper (Cu)*, *Magnesium (Mg)*, *Iron (Fe)*, *Mangan (Mn)* dan *Zincum (Zn)* (Subagyo, 2017). Aluminium memiliki jumlah yang sangat banyak melebihi dari komposisi unsur. Paduan pada aluminium yang mengandung dua atau lebih unsur kimia yang mampu mempengaruhi sifat mekanik paduan tersebut. Pada percobaan kali ini spesimen yang di gunakan adalah aluminium 6061 umumnya material aluminium jenis 6000 diaplikasikan untuk dan konstruksi ringan. Aluminium seri 6061 merupakan salah satu paduan aluminium yang paling luas penggunaannya dalam bidang teknik karena memiliki keseimbangan yang baik antara kekuatan mekanik, ketahanan korosi, kemudahan fabrikasi, serta kemampuan las yang baik. Paduan ini termasuk ke dalam kelompok *Aluminium-Magnesium-Silikon (Al-Mg-Si)* yang dapat diperkuat melalui proses perlakuan panas (*heat treatable alloy*).

Kelebihan aluminium yaitu memiliki berat yang relatif ringan dengan berat jenis sebesar 2.7 g/cm^3 atau hamper $1/3$ dari berat jenis baja, kekuatan

mekanis dan sifat-sifat fisiknya dapat ditingkatkan dengan cara menambahkan unsur-unsur Paduan (Altenpohl, 1982). Jenis aluminium yang sering di gunakan dalam industri yaitu aluminium seri 6061. Aluminium 6061 tergolong aluminium seri 6xxx dengan elemen pepadu magnesium dan *silicon*, Paduan jenis ini termasuk dalam jenis yang dapat di *heat treatment* dan mempunyai sifat mampu potong dan daya tahan korosi yang cukup baik (ASM, 1998). Komposisi kimia paduan AI 6061 secara umum ditandai oleh kandungan Aluminium sebagai unsur dominan, sementara unsur paduan lainnya berperan dalam meningkatkan sifat mekanik dan respons terhadap perlakuan panas. Berikut adalah Tabel 2.1 yang menunjukkan komposisi kimia aluminium seri 6061.

Tabel 2. 1 Komposisi Kimia Aluminium Seri 6061

No.	Element	(%)	No.	Element	(%)
1.	Si	1,07	17.	Co	0,0136
2.	Fe	0,657	18.	Ga	0,0167
3.	Cu	0,255	19.	Hg	<0,00100
4.	Mn	0,0926	20.	In	<0,00030
5.	Mg	1,5	21.	La	0,00063
6.	Cr	0,301	22.	Li	0,0132
7.	Zn	0,0425	23.	Na	0,0083
8.	Ti	0,0986	24.	P	0,0045
9.	Ag	0,0028	25.	Pb	<0,00050
10.	B	0,0056	26.	Sb	0,0281
11.	Ba	0,0012	27.	Sn	<0,00100
12.	Be	0,00036	28.	Sr	0,00016
13.	Bi	<0,00100	29.	V	0,0079
14.	Ca	0,0107	30.	Zr	0,0075
15.	Cd	0,0013	31.	Ni	<0,00040
16.	Ce	<0,0015	32.	Al	95,1

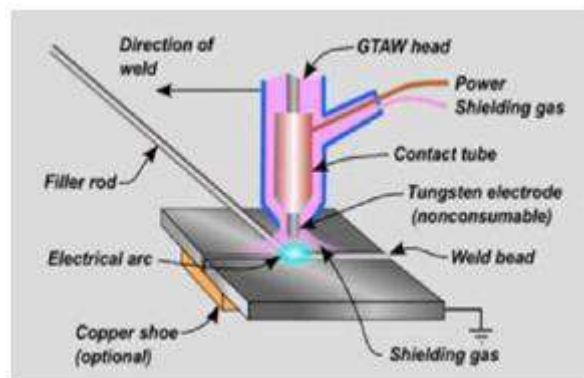
Sumber: Zulhanif & Hasymi, 2023

Komposisi kimia aluminium paduan 6061 menunjukkan dominasi unsur Al sebagai matriks dengan tambahan Mg dan Si masing-masing dalam kisaran $\pm 1,5$ % dan $\pm 1,07$ %, serta sejumlah kecil unsur paduan lainnya (Zulhanif & Hasymi, 2023). Sifat mekanik aluminium 6061 sangat dipengaruhi oleh kondisi perlakuan panas yang diberikan, terutama kondisi temper T6 yang umum di gunakan dalam aplikasi struktural. Pada kondisi T6, paduan ini telah

mengalami *solution heat treatment* diikuti dengan *artificial aging* sehingga menghasilkan kombinasi kekuatan dan ketangguhan yang baik. Aluminium 6061 memiliki sifat fisik khas seperti massa jenis rendah ($\pm 2,7 \text{ g/cm}^3$) yang mendukung aplikasi pada struktur ringan, konduktivitas termal dan listrik yang tinggi, serta ketahanan korosi yang cukup baik di lingkungan *atmosfer* biasa (Perdana dkk., 2022)

2.2 Proses Pengelasan GTAW

Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) adalah proses pengelasan busur listrik yang menggunakan *elektroda tungsten* yang tidak terumpan (*non-consumable*) untuk menghasilkan busur yang melelehkan logam dasar dan, bila diperlukan, kawat pengisi. Area pengelasan dilindungi oleh gas *inert* (umumnya *argon* atau *helium*) agar oksidasi dan kontaminasi udara tidak terjadi pada kolam las yang cair. GTAW sering disebut juga TIG (*Tungsten Inert Gas*) *Welding* dalam terminologi internasional. GTAW memberikan kendali panas yang halus dan kontrol ukuran kolam las yang sangat baik sehingga menghasilkan sambungan dengan kualitas visual dan mekanik yang tinggi, terutama pada material tipis dan logam *nonferrous* seperti aluminium. Proses pengelasan aluminium akan dijelaskan pada Gambar 2.1 di bawah:



Gambar 2. 1 Skema Pengelasan GTAW
(Syahrani dkk., 2007)

Elektroda pada GTAW termasuk elektroda tidak terumpan (*non consumable*) berfungsi sebagai tempat tumpuan terjadinya busur listrik. GTAW mampu menghasilkan lasan berkualitas tinggi pada hampir semua jenis logam mampu las. Sumber listrik GTAW dapat menggunakan generator AC maupun DC. Ciri khas generator jenis AC yaitu merupakan kombinasi

antara *cleaning* dengan penetrasi medium dan mencegah elektroda *tungsten overheating*. Penggunaan arus DC dibedakan menjadi dua yaitu DCEP (*Direct Current Electrode Positive*) atau Polaritas Terbalik, di mana elektroda positif dan benda kerja negatif, menghasilkan penetrasi dalam dan DCEN (*Direct Current Electrode Negative*) atau Polaritas Lurus, di mana elektroda negatif dan benda kerja positif, menghasilkan laju deposisi tinggi dengan penetrasi dangkal (Syahrani dkk., 2007).

Pemilihan proses las GTAW sangat ideal untuk pengelasan logam tipis dan logam reaktif, seperti aluminium, titanium dan zirkonium, karena mampu menghasilkan sambungan yang bersih dan berkualitas tinggi. Keunggulan utama GTAW meliputi presisi dalam pengaturan parameter pengelasan, kemampuan untuk menyambung tanpa menggunakan bahan pengisi, serta hasil pengelasan yang bebas dari kontaminasi (Chauhan, 2016). Namun, salah satu tantangan dalam GTAW adalah terjadinya perubahan mikrostruktur yang dapat memengaruhi sifat mekanik sambungan, terutama pada baja tahan karat austenitik dan ferritik. Terdapat beberapa pilihan gas pelindung pada proses pengelasan yang dijelaskan pada Tabel 2.2, namun pengelasan GTAW yang dilaksanakan menggunakan Gas Argon.

Tabel 2. 2 *Properties Gas Pelindung*

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

Sumber: Ramakrishnan, 1972

Argon adalah gas mulia yang stabil, sulit bereaksi dengan unsur lainnya. Potensial ionisasi argon lebih rendah daripada helium. Argon memiliki konduktivitas panas rendah mengakibatkan *density arc* yang terjadi lebih padat sehingga kampuh las yang dihasilkan lebih sempit. Penggunaan argon sebagai

gas pelindung menghasilkan busur yang lebih stabil meskipun menggunakan arus rendah.

Helium merupakan gas mulia yang tidak mudah bereaksi dengan unsur lainnya. Konduktivitas panas helium lebih tinggi dari Argon. Dengan semakin tinggi konduktivitas panas gas, busur semakin lebar, *density arc* semakin turun. Meskipun helium lebih mudah terionisasi, *arc initiation* lebih mudah dan *voltage drop* lebih rendah jika menggunakan argon sebagai gas pelindung (Ramakrishnan, 1972).

2.3 Parameter Pengelasan

Parameter pengelasan merupakan sekumpulan variabel teknis yang berperan penting dalam menentukan besarnya panas, kestabilan busur, serta kualitas hasil las. Dalam proses *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW), baik manual maupun otomatis, variabel seperti arus, tegangan, kecepatan pengelasan, laju gas pelindung, dan jarak elektroda terhadap benda kerja sangat berpengaruh terhadap bentuk kolam las, kedalaman penetrasi, serta struktur mikro sambungan. Menurut Mitru (2021), setiap perubahan kecil pada parameter-parameter tersebut dapat menyebabkan variasi signifikan pada hasil las, termasuk risiko cacat seperti porositas, *undercut*, atau kurang fusi. Parameter pengelasan untuk pengujian penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2.3 Berikut.

Tabel 2. 3 Parameter Pengelasan

<i>Test Piece</i>	<i>Pass</i>	<i>Process</i>	<i>Filler Metal</i>	<i>Polarity</i>	<i>Ampere</i>	<i>Voltage</i>	<i>Travel speed (mm/min)</i>	<i>Heat Input (Kj/mm)</i>
AA	1	GTAW	ER 5356	DCEP	138	11	100 – 110	0,94
A1	1	GTAW	ER 5356	DCEP	113	9	95 – 100	0,77
A2	1	GTAW	ER 5356	DCEP	108	8	115 – 120	0,44
B1	1	GTAW	ER 5356	DCEP	140	12	95 – 100	0,96
B2	1	GTAW	ER 5356	DCEP	129	10	115 – 120	0,52
C1	1	GTAW	ER 5356	DCEP	133	10	95 – 100	0,84
C2	1	GTAW	ER 5356	DCEP	110	9	115 – 120	0,50

Keterangan :

(AA) : Tanpa *Treatment*

(A1) : *Alternating sides* variasi *Travel speed* 95 – 100 mm/menit

(A2) : *Alternating sides* variasi *Travel speed* 115 – 120 mm/menit

(B1) : *Center to end* variasi *Travel speed* 95 – 100 mm/menit

(B2) : *Center to end* variasi *Travel speed* 115 – 120 mm/menit

(C1) : *Intermitten* variasi *Travel speed* 95 – 100 mm/menit

(C2) : *Intermitten* variasi *Travel speed* 115 – 120 mm/menit

2.4 Logam Pengisi (*Filler Metal*)

Elektroda merupakan bahan tak habis pakai (*nonconsumable*) sehingga memerlukan bahan tambah untuk mengisi kampuh logam lasan, bahan ini yang sering disebut dengan (*filler rod*). Bahan tambah ini berupa logam pengisi (*filler metal*) yang di gunakan untuk mengisi kampuh pada proses pengelasan GTAW atau TIG. *Filler* yang di gunakan seri ER 4043 dan ER 5356. “ER” mengacu pada “*Electrode Rod*” atau batang elektroda dalam Bahasa Indonesia. Ini menunjukkan bahwa *filler* ini di gunakan dalam proses pengelasan. ER 4043, 40” mengacu pada komposisi kimia dari *filler* tersebut. Pada kasus ER 4043, ini menunjukkan bahwa *filler* ini terbuat dari aluminium “4” menunjukkan kualitas dan kekuatan mekanis *filler* tersebut. ER 4043 termasuk dalam kategori *filler* aluminium dengan kekuatan menengah. “3” mengindikasikan kelas aluminium yang dapat diisi oleh *filler* tersebut. ER 4043 di gunakan untuk pengelasan dan pengisi logam pada aluminium seri 6XXX, seperti 6061 dan 6063.

Sedangkan ER 5356, “53” mengacu pada komposisi kimia dari *filler* tersebut. Pada kasus ER 5356, ini menunjukkan bahwa *filler* ini terbuat dari aluminium-magnesium. “5” menunjukkan kualitas dan kekuatan mekanis *filler* tersebut. ER 5356 termasuk dalam kategori *filler* aluminium dengan kekuatan menengah. “6” mengindikasikan kelas aluminium yang dapat diisi oleh *filler* tersebut. ER 5356 di gunakan untuk pengelasan dan pengisi logam pada aluminium kelas 5XXX, seperti 5052, 5083, dan 5086. Di bawah ini adalah Tabel 2.4 yang menunjukkan berapa besar arus dan diameter logam pengisi yang harus di gunakan (Lubis dkk., 2024)

Tabel 2. 4 Besar Arus Untuk Diameter Logam Pengisi

Diameter Batang Logam Pengisi(mm)	Arus Pengelasan (Ampere)
1,6	40 - 100
2,0	60 - 130
2,4	70 - 150
3,2	130- - 200
4,0	180- 250
5,0	240- 360
6,0	>340

Sumber: Lubis dkk., 2024

Pemilihan logam pengisi harus diperhatikan dan dipertimbangkan dengan baik. Hal tersebut berguna agar hasil akhir dari sambungan las sesuai yang diharapkan dengan memiliki sifat ketangguhan yang tinggi serta meminimalisir kecacatan yang terjadi. Berikut ini Tabel 2.5 untuk melihat kesesuaian logam pengisi terhadap logam induk.

Tabel 2. 5 Kesesuaian Logam Pengisi

Logam induk	AC4D	AC4C ADC1 2	AC7A	A7N 01	6061 6063 6101 6151	5056	5154
6061 6063 6101 6151	ER 4043	ER 4043	ER 5356	ER 5356	ER 4043		
A7NO1	ER 4043	ER 4043	ER 5356	ER 5356			
AC7A	-	ER 4043	ER 4043				
AC4C ADC12	ER 4043	ER 4043					
AC4D	ER 4043						

Sumber: Lubis dkk., 2024

2.5 Elektroda Tungsten

Elektroda tungsten merupakan komponen utama dalam proses pengelasan *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) yang berfungsi sebagai pembentuk busur listrik antara elektroda dan logam dasar. Pada penelitian ini digunakan elektroda WP (Pure Tungsten) dengan diameter 2,4 mm, yang memiliki tingkat kemurnian tinggi tanpa tambahan oksida tanah jarang (*rare-earth oxides*). Kode klasifikasi EWP (berdasarkan standar AWS) memiliki arti sebagai berikut:

E : Electrode (digunakan sebagai elektroda pada proses GTAW).

W : Tungsten.

P : Pure (menandakan tungsten murni).

Berdasarkan AWS A5.12, elektroda WP memiliki karakteristik khusus di mana ujung elektroda akan membentuk bulatan (balling) saat terkena panas, sehingga sangat stabil digunakan pada arus bolak-balik (AC). Elektroda ini merupakan pilihan utama untuk pengelasan logam ringan seperti aluminium dan magnesium. Komposisi kimia elektroda WP berdasarkan standar tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.6 berikut:

Tabel 2. 6 Komposisi Kimia Elektroda Tungsten WP

<i>Clasification Symbol</i>	<i>Chemical Composition Requirements</i>		<i>Color Code</i>
	<i>Impurities, Mass Percent</i>	<i>Tungsten, Mass Percen</i>	
EWP (WP)	<i>Max 0,5</i>	<i>Min 9,5</i>	<i>Green</i>

Sumber : ASME, 2019

2.6 Gas pelindung

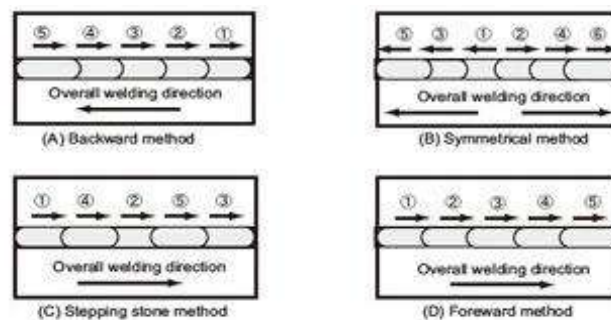
Gas pelindung (*Shielding gas*) merupakan salah satu komponen penting dalam proses *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) karena berfungsi melindungi logam cair, elektroda tungsten, dan kolam las dari kontaminasi udara sekitar seperti oksigen (O_2), nitrogen (N_2), dan hidrogen (H_2). Kontaminasi gas-gas tersebut dapat menyebabkan cacat seperti porositas, retak panas, dan oksidasi berlebih pada hasil las. Berdasarkan (ASME IX, 2025) QW-408 serta (ASME, 2019) SFA-5.32 (*Specification for Welding Shielding Gases*), gas pelindung yang digunakan dalam proses GTAW untuk aluminium direkomendasikan menggunakan gas Argon (UHP). Gas Argon UHP (Ultra High Purity) adalah gas pelindung murni berkinerja tinggi dengan kadar kemurnian minimal 99,995% yang secara khusus digunakan untuk melindungi proses pengelasan GTAW pada material sensitif seperti aluminium. Berdasarkan standar SFA-5.32, gas ini diklasifikasikan sebagai Group I Inert Gases, yaitu gas mulia yang secara termodinamika bersifat sepenuhnya lembam (tidak aktif) sehingga tidak akan bereaksi secara kimia dengan kolam las cair maupun elektroda tungsten pada suhu ekstrem. Secara fisik, Argon UHP memiliki densitas

atau massa jenis yang lebih berat daripada udara atmosfer, membuatnya mampu menciptakan selimut pelindung mekanis yang solid di atas area las guna mengisolasi kontaminasi oksigen dan kelembaban udara luar yang memicu porositas. Selain itu, gas ini didefinisikan oleh karakteristik tegangan ionisasinya yang rendah, sebuah sifat elektrik yang mempermudah pembentukan plasma busur listrik sehingga menghasilkan nyala api las yang sangat stabil, fokus, dan konsisten saat dioperasikan secara otomatis.

2.7 *Welding Sequence*

Welding sequence adalah urutan atau strategi penerapan las pada suatu struktur selama proses pengelasan yang dirancang untuk mengontrol distribusi panas, tegangan sisa, dan distorsi yang terjadi pada komponen yang dilas. Urutan pengelasan menentukan bagian mana yang dilas terlebih dahulu dan bagian mana yang dilas kemudian sehingga perubahan temperatur selama pengelasan tidak terjadi secara sekaligus pada seluruh struktur. Dengan memodifikasi *Welding sequence*, distribusi *thermal cycle* selama pengelasan dapat diatur sedemikian rupa untuk mengurangi akumulasi panas lokal yang berlebihan dan mengendalikan deformasi yang timbul.

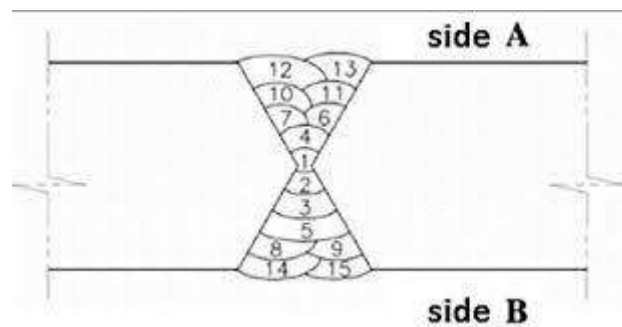
Selama proses pengelasan, material akan menerima masukan panas yang dapat menyebabkan penyusutan atau pemuaian. Oleh karena itu, diperlukan langkah langkah untuk meminimalkan efek tersebut. Salah satu untuk mengatasi hal tersebut adalah dengan mematuhi prosedur pengelasan secara umum. Terdapat berbagai teknik urutan pengelasan yang dapat diterapkan, seperti yang dijelaskan dalam Gambar 2.2 jenis – jenis *welding sequence*.



Gambar 2. 2 Jenis – Jenis *Welding Sequence*
(Oliver, 2006)

2.7.1 Alternating sides

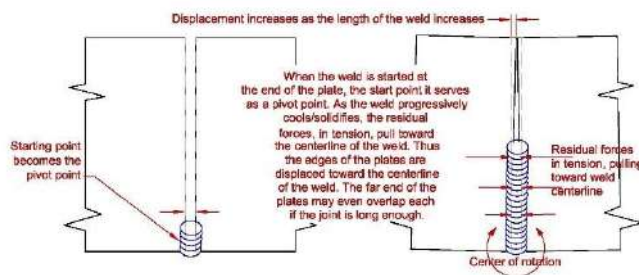
Alternating sides welding sequence adalah strategi di mana las dilakukan secara bergantian di sisi kiri dan kanan dari sambungan yang sama. Tujuannya adalah untuk meminimalkan penumpukan panas pada satu sisi sehingga gradien temperatur melintang lebih kecil sehingga dapat meminimalisir distorsi. Ilustrasi *alternating sides* seperti tampak pada Gambar 2.3 berikut.



Gambar 2. 3 Ilustrasi *Alternating sides*
(Setyawan dkk., 2014)

2.7.2 Working from center to ends

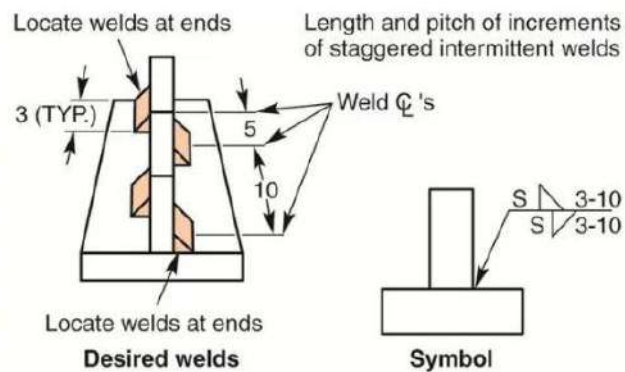
Working from center to ends welding sequence adalah urutan pengelasan yang dimulai di tengah sambungan (*mid-point*) dan kemudian dilanjutkan ke arah kedua ujungnya secara simetris. Strategi ini penting untuk pengelasan pelat panjang atau struktur yang sensitif terhadap distorsi mode lentur atau gelombang. Untuk lebih jelasnya, peneliti menampilkan Gambar 2.4 sebagai ilustrasi.



Gambar 2. 4 Ilustrasi *Working from Center to ends*.
(Setyawan dkk., 2014)

2.7.3 *Stitch / intermittent welding*

Stitch welding atau *intermittent welding* adalah teknik pengelasan di mana las tidak dilakukan secara satu garis penuh, tetapi dibuat dalam beberapa *short welds* yang terpisah dengan jarak tertentu di antara masing-masing *bead* las seperti pada Gambar 2.5. Metode ini sering di gunakan pada struktur tipis atau ketika distorsi las perlu diminimalkan tanpa kehilangan kekuatan struktural utama.



Gambar 2. 5 Ilustrasi *Intermittent Welding*.
(Setyawan dkk., 2014)

2.8 Kecepatan Pengelasan (*Travel speed*)

Kecepatan pengelasan (*Travel speed*) adalah laju pergerakan relatif obor las atau material sambungan sepanjang sambungan las selama proses pengelasan. *Travel speed* dapat didefinisikan secara sederhana sebagai jarak yang ditempuh selama proses pengelasan dibagi waktu yang diperlukan, atau secara matematis dijabarkan pada Persamaan 2.1 berikut:

$$S = L/t \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana:

S = *Travel speed* (mm/min)

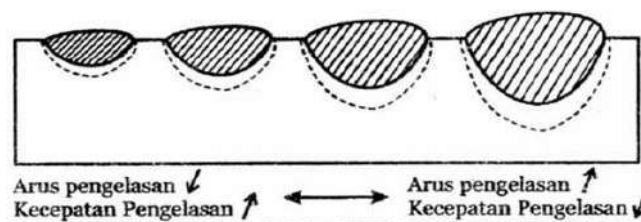
L = jarak sambungan yang ditempuh selama pengelasan (mm)

t = waktu pengelasan (menit)

Kecepatan pengelasan (*Travel speed*) merupakan salah satu parameter penting yang menentukan besarnya masukan panas (*heat input*), kedalaman penetrasi, dan perubahan bentuk hasil las. Menurut Azis (2025) melaporkan bahwa pada pengelasan baja A36 menggunakan metode FCAW, variasi

kecepatan pengelasan secara signifikan memengaruhi karakteristik geometris hasil las. Kecepatan 115 - 120 mm/menit dengan arus 140 A menghasilkan nilai distorsi paling rendah, sedangkan kecepatan 95 - 100 mm/menit menyebabkan peningkatan deformasi akibat masukan panas yang lebih tinggi dan pendinginan lambat. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa pengaturan parameter yang seimbang antara arus dan kecepatan mampu menghasilkan sambungan dengan bentuk manik las yang seragam serta penetrasi optimal. Dengan demikian, pengendalian *Travel speed* dalam proses pengelasan berperan penting untuk menjaga kestabilan dimensi, kualitas sambungan, dan karakteristik mekanik hasil las. Pada penelitian ini, variasi *Travel speed* dianalisis untuk melihat pengaruhnya terhadap kekerasan dan struktur mikro sambungan, dengan memastikan prosedur pengelasan sesuai ketentuan standar.

Kecepatan pengelasan mempengaruhi lebar lajur las dan kedalaman penetrasi TIG dan juga berpengaruh terhadap biaya. Pada beberapa aplikasi, kecepatan pengelasan dipandang sebagai obyektif bersama dengan variabel lainnya dipilih untuk mendapatkan konfigurasi las yang dikehendaki pada kecepatan tertentu (Sriwidharto, 2006). Kecepatan pencairan dari logam yang dilas. Semakin besar arus listrik, masukan panas semakin meningkat. Masukan panas yang terlalu besar menyebabkan keretakan dan mempengaruhi struktur mikro sehingga mengakibatkan menurunnya ketangguhan dan kekuatan daerah las (Wiryosumarto & Okumura, 2000). Sedangkan penggunaan arus yang terlalu kecil mengurangi masukan panas sehingga pencairan logam tidak optimal. Gambar 2.6 merupakan skema pengaruh kecepatan pengelasan terhadap penetrasi.



Gambar 2.6 Pengaruh Kecepatan Pengelasan.
(Sonawan, H., & Suratman, 2003)

Pada kasus lain, kecepatan pengelasan mungkin merupakan variabel yang tidak bebas yang dipilih dengan variabel lain untuk mendapatkan mutu dan keseragaman las yang diperlukan. Pada jenis mekanisasi las, kecepatan pengelasan biasanya tetap untuk segala jenis obyek pengelasan, sedang variabel lainnya seperti arus dan tegangan dapat diatur sesuai dengan kebutuhan (Sriwidharto, 2006).

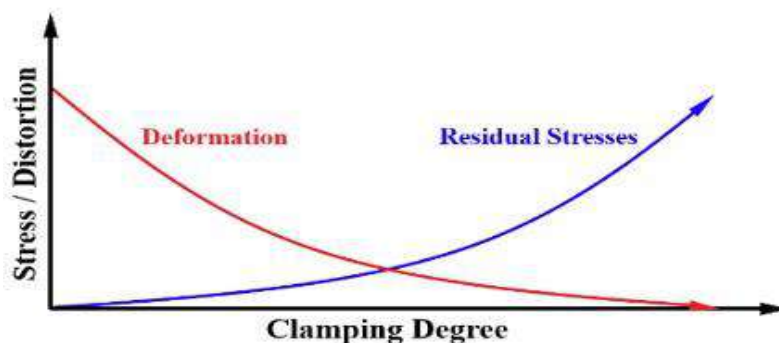
2.9 Distorsi dan Tegangan Sisa

Proses pengelasan melibatkan siklus termal yang kompleks, yang menyebabkan ekspansi dan kontraksi termal yang tidak merata pada daerah las dan logam sekitarnya. Efek termal ini sering menimbulkan distorsi serta tegangan sisa, yang dapat memengaruhi ketelitian dimensi dan performa struktural dari sambungan las. Menurut Afonso (2022), salah satu bentuk distorsi yang paling umum dan signifikan pada sambungan *butt Joint* adalah distorsi sudut (*angular distortion*), yang terjadi akibat penyusutan *transversal* yang tidak seragam pada arah ketebalan pelat, terutama saat gradien panas tidak terdistribusi secara baik. Tegangan sisa tinggi muncul ketika deformasi dibatasi (*clamping*), sedangkan tegangan sisa rendah terjadi bila deformasi dibiarkan bebas. Dalam penelitian spesimen las tidak diklem selama proses pengelasan, sehingga deformasi dapat berlangsung secara bebas. Pendekatan ini memberikan gambaran perilaku tegangan sisa dan distorsi dalam kondisi termal tanpa pembatasan mekanis (*clamping*), yang sering terjadi dalam praktik pengelasan aktual (Afonso dkk., 2022).

Beragam parameter pengelasan diketahui memengaruhi pembentukan distorsi dan tegangan sisa, antara lain heat input (yang dipengaruhi oleh arus, tegangan, dan kecepatan pengelasan), sudut gerak *torch*, dan laju aliran gas pelindung. Penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan arus dan tegangan cenderung meningkatkan jumlah panas masuk (*heat input*), sehingga berisiko memperbesar distorsi. Sebaliknya, peningkatan kecepatan pengelasan dan laju pengumpanan kawat dapat membantu mengurangi akumulasi panas dan, dengan demikian, menurunkan tingkat distorsi.

Selain parameter proses tersebut, urutan pengelasan (*welding sequence*) juga memiliki pengaruh signifikan terhadap tingkat distorsi.

Menurut Afonso (Afonso et al., 2022) melalui pengukuran metrologi dan analisis statistik, metode pengelasan simetris (*symmetrical method*) menghasilkan distorsi sudut yang paling kecil di antara tiga metode yang diuji. Metode *symmetrical method* menunjukkan distorsi rata-rata sekitar 9,8% lebih rendah dibanding *single-pass method* (SP) dan 12% lebih rendah dibanding *backward method* (BM). Hal ini menegaskan bahwa tidak hanya parameter fisis seperti arus dan tegangan yang harus dikontrol, tetapi juga strategi distribusi panas melalui urutan pengelasan sangat penting dalam mengendalikan tegangan sisa dan deformasi. Adapun hubungan antara *Clamping Degree* dengan tingkat distorsi diilustrasikan pada Gambar 2.7.



Gambar 2. 7 Hubungan Tegangan Sisa
(Afonso dkk., 2022)

2.10 Pengujian

Pengujian dan pemeriksaan dalam industri dapat dikelompokkan menjadi dua jenis utama pengujian dan pemeriksaan yang dilakukan untuk kepentingan pembuat, serta yang dilakukan untuk kepentingan pengguna. Meskipun alat dan metode yang di gunakan dalam kedua jenis tersebut serupa, perbedaannya terletak pada peran masing-masing pihak. Selain itu, di era modern, pengujian juga dilakukan untuk kepentingan pihak ketiga, seperti pemerintah, komunitas akademik, asosiasi industri, dan masyarakat umum (Wiryosumarto & Okumura, 2000).

Dalam konteks pengelasan, pengujian dan pemeriksaan bertujuan untuk memastikan kualitas dan memberikan kepercayaan terhadap struktur las. Oleh karena itu, pemeriksaan harus dilakukan secara berkesinambungan, mulai dari tahap perencanaan hingga penggunaan. Selain itu, pengujian dan

pemeriksaan juga berfungsi sebagai penilaian mutu untuk menjamin kualitas hasil akhir.

2.10.1 Pengujian visual

Pengujian visual las merupakan langkah inspeksi nondestruktif pertama yang wajib dilakukan sesuai (AWS, 2025) *Clause 8 (Inspection)*. Pengujian visual diterapkan setelah proses GTAW dengan elektroda WP (komposisi: 99,5% W, 0,5% ThO₂) pada sambungan plat *double bottom*. Inspeksi ini mendeteksi cacat permukaan seperti *crack*, *incomplete fusion*, *undercut*, dan *porosity* yang dapat memperburuk distorsi termal tanpa *clamping* (Afonso dkk., 2022) serta meningkatkan tegangan sisa (Radaj, 1992). Berikut ringkasan kriteria utama dari (AWS, 2025), dapat dilihat pada Tabel 2.7 berikut.

Tabel 2. 7 *Acceptance Criteria Visual* pada Sambungan Las T Joint

Kategori Ketidaktelesmpurnaan	Kriteria Penerimaan
Crack (retak)	Dilarang sepenuhnya, apa pun ukuran/lokasi
Incomplete Fusion	Tidak boleh ada kurang fusi antar lapis las atau las-base metal.
Incomplete Joint Penetration	Untuk groove welds: tidak boleh ada kurang penetrasi.
Crater Crack	Semua crater harus diisi penuh kecuali ujung fillet <i>intermittent</i> .
Weld Profiles	Sesuai 5.23 (convexity, concavity, reinforcement, overlap, fillet size).
Undercut	<25 mm tebal: ≤1 mm, akumulasi ≤2 mm/50 mm dalam 300 mm. ≥25 mm: ≤2 mm. Primary member: ≤0.25 mm jika transverse ke tarik.
Porosity/Piping	Statis: isolated ≤2.5 mm, cluster ≤1/4 panjang las. Siklik: lebih ketat, lihat Table 8.1 Item 8.
Overlap	Tidak boleh ada.

Sumber: AWS, 2025

2.10.2 Pengujian distorsi

Distorsi dan tegangan sisa merupakan efek samping dari suatu proses pengelasan yang tidak diharapkan. Distorsi las merupakan perubahan bentuk setelah pengelasan yang menjadikan bentuk tidak sesuai desain awal, ukuran tidak presisi, serta butuh biaya perbaikan yang besar. Adapun tegangan sisa merupakan tegangan yang merugikan yang terjadi setelah proses pengelasan. Tegangan sisa yang tinggi akan mempengaruhi kekuatan struktur dan kerusakan

awal konstruksi las. Tegangan sisa sulit untuk diukur, namun menjadi berbahaya jika dikombinasikan dengan tegangan saat pembebanan terjadi. Tegangan sisa yang tinggi menyebabkan turunnya ketahanan fatik, turunnya kekuatan Tarik dan berkurangnya ketahanan korosi (Radaj, 1992). Oleh karena itu, tegangan sisa menjadi sangat penting untuk diketahui serta pengaruhnya pada efek kegagalan konstruksi.

Penelitian sebelumnya dilakukan (Conrardy dkk., 2006) yang menyatakan pengelasan plat cenderung mudah terjadidistorsi, yang pada efek akhirnya meningkatkan biaya pada perbaikan las. Seperti dicontohkan pada pembuatan kapal di Australia dan Selandia Baru yang menerapkan material *high strength steel* dengan ketebalan plat kurang dari 4 mm, distorsi akibat pengelasan terjadi pada sambungan plat tersebut menjadi permasalahan yang signifikan (McPherson, 2007). Menurut *The Welding Institute* (TWI), biaya upah untuk memperbaiki distorsi pengelasan terhadap (Andritsos & Prat, 2000) biaya upah total fabrikasi sebesar 30% (Andritsos & Prat, 2000). Batasan distorsi pada penelitian ini diatur oleh (ISO 13920, 2023) yang dijelaskan pada Tabel 2.8 berikut:

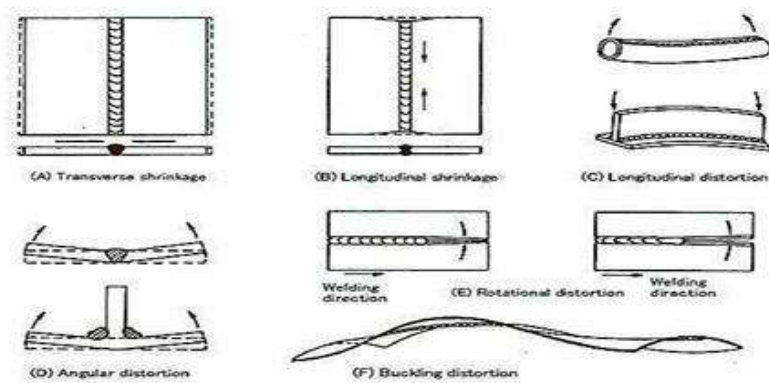
Tabel 2. 8 Toleransi Distorsi Angular

Tolerance class	Range of nominal sizes l mm (relates to longer side of the surface)									
	$30 < l \leq 120$	120 < 1 ≤ 400	400 < 1 ≤ 1 000	1 000 < 1 ≤ 2 000	2 000 < 1 ≤ 4 000	4 000 < 1 ≤ 8 000	8 000 < 1 ≤ 12 000	12 000 < 1 ≤ 16 000	16 000 < 1 ≤ 20 000	1 > 20 000
	Tolerances t mm									
E	0,5	1	1,5	2	3	4	5	6	7	8
F	1	1,5	3	4,5	6	8	10	12	14	16
G	1,5	3	5,5	9	11	16	20	22	25	25
H	2,5	5	9	14	18	26	32	36	40	40

Sumber : (ISO 19920,2023)

Dalam proses pengelasan, material pada sambungan menerima beban panas tinggi. Panas ini terdistribusi tidak merata, sehingga suhu

pada daerah lasan dan zona terpengaruh panas (HAZ) lebih tinggi dibandingkan logam induk yang tidak terkena panas. Selama pendinginan, daerah lasan akan menyusut dan menjadi padat, menciptakan tegangan tarik di sekitar lasan dan HAZ. Jika tegangan tarik ini melebihi titik luluh (*yield point*) logam induk, maka dapat terjadi distorsi plastis yang menyebabkan perubahan dimensi dan penyimpangan material, dikenal sebagai distorsi. Macam-macam distorsi dalam pengelasan dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Macam–Macam Distorsi
(Wiryosumarto & Okumura, 2000)

Ada beberapa cara untuk mengurangi distorsi akibat proses pengelasan diantara nya dengan melakukan:

- Jumlah *welding pass* Semakin banyak welding pass yang di gunakan meningkatkan resiko terjadinya distorsi.
- Urutan Pengelasan (*welding sequence*) Mengelas sambungan yang panjang ada kecenderungan terjadi distorsi yang besar, untuk pencegahannya yaitu dengan melakukan teknik urutan pengelasan (*welding sequence*).
- Penggunaan penahan alat seperti penahan atau tanggem dapat mengurangi pergerakan atau pergeseran material. Namun, setelah penahan dilepas, distorsi yang terjadi relatif kecil karena pengaruh tegangan sisa.
- Detail Sambungan Geometri dan jenis sambungan las sangat memengaruhi pola distorsi yang muncul. Semakin merata

penyebaran logam las pada kampuh, semakin kecil kemungkinan terjadinya distorsi, terutama distorsi angular.

2.10.3 Pengujian struktur makro dan mikro

Pengujian makro adalah lanjutan dari pengamatan visual dengan perbedaan adanya proses *machining* pada material untuk dibuat spesimen. Hal ini menunjukkan bahwa pengujian makro termasuk *Destructive Test* (DT) dengan perbesaran 5-50x. Adapun tujuan pengujian makro adalah

- Menilai penetrasi *weld metal*.
- Memeriksa apakah ada cacat las yang tidak tampak secara visual seperti porositas, *lack of fusion*, dan *slag inclusion*.

Setelah melakukan langkah langkah di atas, selanjutnya adalah mengamati ukuran *leg length* pada hasil analisa makro. *Leg length* (z) adalah jarak dari titik *root* atau pertemuan dua pelat ke *toe* atau ujung las pada masing masing sisi *fillet weld*. Kemudian mengamati *throat* aktual dengan rumus 2.2 sesuai standart AWS D1.1 2025 sebagai berikut :

$$\alpha_{throat} = 0,707 \cdot z \dots\dots\dots (2.2)$$

Dengan,

z = panjang *leg length*.

Setelah mengamati panjang *throat* aktual, selanjutnya adalah menghitung presentase dilusi (*dillution*), dengan rumus 2.3 sesuai standart AWS D1.1 2025 sebagai berikut ini.

$$\text{Dilusi} = \frac{A_{BM}}{A_{BM} + A_{WM}} \cdot 100\% \dots\dots\dots (2.3)$$

Dengan,

A_{BM} = Luas *base metal*

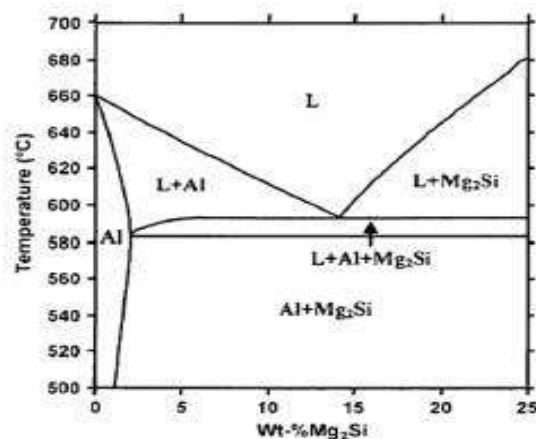
A_{WM} = Luas *weld metal*

Struktur mikro adalah gambaran dari kumpulan fasa-fasa yang dapat diamati melalui teknik metalografi. Struktur mikro suatu logam dapat dilihat dengan menggunakan mikroskop. Mikroskop yang dapat di gunakan yaitu mikroskop optik dan mikroskop elektron. Sebelum

dilihat dengan mikroskop, permukaan logam harus dibersihkan terlebih dahulu, kemudian reaksikan dengan reagen kimia untuk mempermudah pengamatan. Proses ini dinamakan *etching*. Untuk mengetahui sifat dari suatu logam, kita dapat melihat struktur mikronya. Setiap logam dengan jenis berbeda memiliki struktur mikro yang berbeda. Dengan melalui diagram fasa, kita dapat meramalkan struktur mikronya dan dapat mengetahui fasa yang akan diperoleh pada komposisi dan temperatur tertentu dan dari struktur mikro kita dapat melihat (Safi'I, 2019).

- a. Ukuran dan bentuk butir.
- b. Distribusi fasa yang terdapat dalam material.
- c. Pengotor yang terdapat dalam material.

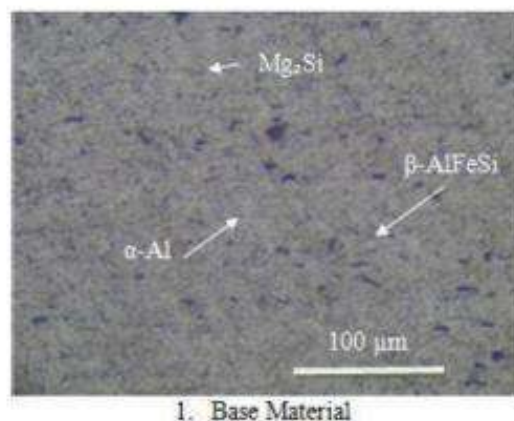
Alumunium seri 6061 memiliki komposisi unsur paling besar yang berupa magnesium (Mg) dan silikon (Si) yang sangat mempengaruhi sifat mekanik dari paduan alumunium seri 6061, sehingga jika paduan alumunium seri 6061 diberi perlakuan panas maka yang terbentuk adalah senyawa Mg_2Si . Senyawa tersebut dapat di perjelas dengan diagram fasa aluminium 6061 pada Gambar 2.9.



Gambar 2. 9 Diagram Fasa Aluminium 6061.
(Perdana dkk., 2022)

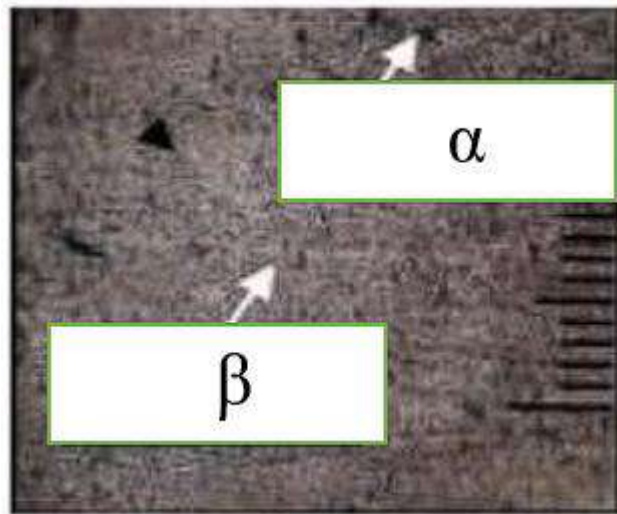
Dari struktur mikro kita juga dapat memprediksi sifat mekanik dari suatu material sesuai dengan yang kita inginkan (Safi'I, 2019). Aluminium 6061 tergolong aluminium seri 6xxx dengan elemen pepadu magnesium dan silikon, paduan jenis ini termasuk dalam jenis yang dapat di *heat treatment* dan mempunyai sifat mampu potong dan

daya tahan korosi yang cukup baik (Setyawan dkk., 2014). Aluminium 6061 memiliki struktur kristal berdasarkan sistem kristal kubik wajib yang dikenal sebagai sistem kristal kubik pusat (*face-centered cubic/FCC*). Dalam sistem ini, atom-atom aluminium tertata dalam tata letak yang teratur di sepanjang tiga arah yang saling tegak lurus. Paduan aluminium 6061 umumnya memiliki dua fase utama, yaitu fase aluminium α (alpha) dan fase magnesiumsilikon (Mg-Si). Fase α adalah matriks paduan yang terdiri dari aluminium dengan sedikit unsur paduan lainnya yang terlarut di dalamnya. Fase Mg-Si terdiri dari partikel-partikel kecil yang terdiri dari magnesium (Mg) dan silikon (Si) yang membentuk fase diskrit di dalam matriks aluminium, dapat dilihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2. 10 Struktur Mikro Aluminium 6061
(Perdana dkk., 2022)

Struktur mikro pada Gambar 2.10 menunjukkan persebaran komposisi kimia material aluminium dimana fase α -Al cenderung menyebar secara merata pada seluruh bagian permukaan. Fase tersebut terlihat rapat karena tidak adanya celah yang diisi oleh fase MgSi. terdapat fase β AlFeSi. Fase β -AlFeSi tersebut hanya nampak di beberapa tempat di semua daerah spesimen aluminium 6061 karena kecilnya presentase unsur Fe pada aluminium 6061, struktur mikro dan base metal dapat di lihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2. 11 Struktur Mikro *Base Metal* Aluminium 6061
(Perdana dkk., 2022)

Fasa yang terlihat dari Gambar 2.11 merupakan beta yang berwarna putih dan alpha yang berwarna hitam (gelap). Fasa beta merupakan fasa yang memiliki kekuatan rendah namun memiliki keuletan yang baik. Fasa alpha merupakan fasa yang memiliki kekuatan yang kuat dan cukup keras (Ketaren dkk., 2019). Perbedaan antara uji makro dan uji mikro terdapat pada Tabel 2.9 berikut ini.

Tabel 2. 9 Perbedaan Pengujian Makro dan Pengujian Mikro

<i>Macro Examination</i>	<i>Micro Examination</i>
Uji visual terdapat cacat	Uji visual terdapat cacat dan grain structure
Evaluasi visual di bawah perbesaran x5	Evaluasi visual di bawah perbesaran x 100 hingga x1000
Poles kertas gosok hingga grit 400	Poles kertas gosok hingga grit 1200 + serbuk alumina
Dieatsa menggunakan larutan asam nitrat 5-10%	Dieatsa menggunakan larutan asam nitrat 1-5%

Sumber: Munir dkk., 2019

Untuk hasil akhir pengujian makro dan mikro harus memenuhi kriteria berdasarkan Tabel 2.10 dan Tabel 2.11 berikut.

Tabel 2. 10 *Acceptance Criteria Macrostruktur*

No.	Cacat Macrostruktur	Kriteria Penerimaan Maksimum (AWS D1.1:2025)	Aplikasi T-Joint Al 6061 (t=4 mm)	Status
1	Incomplete Fusion (Root/Toe)	Nol; full fusion $\geq 100\%$ root & sidewalls	Fusion lengkap toe-to-root	Reject jika $< 100\%$
2	Cracks (Longitudinal/Transverse)	Nol toleransi (termasuk HAZ microcrack)	Bebas retak WM/HAZ	Reject absolut
3	Slag Inclusions/Porosity	Individual ≤ 1.6 mm; cluster ≤ 3 mm ² ; spacing $\geq 6 \times$ diameter	Total inclusions $< 5\%$ area las	Pass minor
4	Undercut/Overlap	Kedalaman ≤ 0.4 mm; panjang beruntun ≤ 50 mm	Undercut toe ≤ 0.4 mm	Conditional
5	Leg Size/Throat Thickness	Leg ≥ 4 mm (t plat); throat ≥ 4 mm (full penetration)	Throat = tebal plat vertikal	Verifikasi gauge
6	Excessive Convexity/Concavity	Convexity ≤ 1 mm; concavity ≤ 0.5 mm	Bead profile uniform	Grind jika exceed
7	Laps/Seams/Folds	Nol	Permukaan las halus	Reject
8	Fusion Line Irregularity	Smooth transition WM $\rightarrow$ BM; no sharp steps	Fusion line continuous	Pass

Sumber: AWS, 2025

Tabel 2. 11 *Acceptance Criteria Mikrostruktur*

No.	Parameter Mikrostruktur	Kriteria Penerimaan Maksimum (AWS D1.1:2025 Clause 4.13)	Aplikasi GTAW Al 6061	Status
1	Grain Size (ASTM E112)	WM: Equiaxed fine (G8-G10); HAZ: $\leq G6$, width ≤ 2 mm	Grain refined vs base metal	Reject coarse HAZ
2	Porosity Mikro (ASTM E562)	$\leq 1\%$ area point count; max dia ≤ 0.1 mm	Gas porosity minimal	Pass $< 1\%$
3	Cracks/Liquation	Nol (dendrite alignment uniform WM)	No HAZ liquation cracks	Reject absolut
4	Inclusions (Oxide/Sulfide)	ASTM E45 $\leq$ Grade B; stringer ≤ 0.05 mm ²	Clean WM/HAZ	Pass
5	HAZ Width	$\leq 2 \times$ tebal plat (≤ 8 mm); no overheating	HAZ minimal ($\sim 1-2$ mm ideal)	Conditional
6	Dendritic Structure	Uniform, no center-line piping; direction radial dari fusion	Equiaxed grains WM	Pass
7	Phase Transformation	No brittle phases; consistent Mg ₂ Si precipitates Al 6061	HAZ softening minimal	Verifikasi

Sumber: AWS, 2025

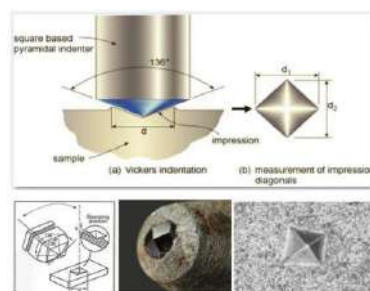
2.10.4 Pengujian kekerasan

Uji kekerasan merupakan pengujian dengan tujuan untuk mengetahui kekerasan dari material atau spesimen setelah dilakukan pengelasan, dan pengujian ini didefinisikan sebagai kemampuan suatu

material atau lasan untuk tahan terhadap penggoresan, pengikisan, indentasi atau penetrasi. Daerah yang di uji kekerasannya yaitu daerah terpengaruh panas atau *Heat Affected Zone (HAZ)*, *weld metal* dan *base metal* pada setiap spesimen. Terdapat 3 metode pengujian kekerasan yang sering di gunakan dalam menguji kekerasan logam, antara lain adalah:

1. *Hardness Vickers*

Prinsip dasar pengujian *vickers* sama dengan uji *brinell*, perbedaannya penggunaan indenter intan yang berbentuk piramid beralas bujur sangkar dan sudut puncak antara dua sisi yang berhadapan 136° . Pengukuran diagonal segi empat lebih akurat dibandingkan pengukuran pada lingkaran. Pengujian ini dapat dilakukan untuk spesimen tipis hingga 0,006 inci. Nilai yang diperoleh akurat hingga nilai 1300 (setara dengan *brinell* 850). Indenter relatif tidak menjadi rata seperti pada *Brinell*. Beban yang di gunakan pada uji *vickers* antara 1 hingga 120 kgf. Perubahan beban relatif tidak mempengaruhi hasil pengujian, penggunaan beban yang berbeda akan tetap menghasilkan nilai yang sama untuk material yang sama (Firmansyah dkk., 2025). Ilustrasi indentasi dapat dilihat pada Gambar 2.12 berikut.



Gambar 2. 12 Identasi Struktur Mekanik Pengujian *Hardness Vickers* (Firmansyah dkk., 2025)

Pembebanan yang dapat di gunakan dalam metode uji ini antara 1 hingga 120 Kgf, dan perubahan pembebanan relatif tidak memiliki pengaruh dalam perubahan hasil uji pada material yang sama. Nilai *Hardness vickers* sendiri dapat dihitung dengan Persamaan 2.4 dan Persamaan 2.5

$$VHN = \frac{2P \sin(\frac{a}{2})}{D^2} = \frac{1,854 P}{D^2} \dots\dots\dots (2.4)$$

$$D = \frac{d_1 + d_2}{2} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana:

- P = Beban yang di gunakan (kgf)
- D = Diagonal rata-rata (mm)
- d_1 = diagonal 1
- d_2 = diagonal 2
- a = sudut indenter (136°)

Penulis menggunakan metode *hardness vickers* dikarenakan relevan dengan penelitian dengan pembebanan 10 kgf. Uji kekerasan dengan metode *vickers* ini menggunakan indenter yang terbuat dari intan dengan bentuk piramid beralas bujur sangkar dengan sudut antara kedua sisi sebesar 136° .

2. *Hardness Rockwell*

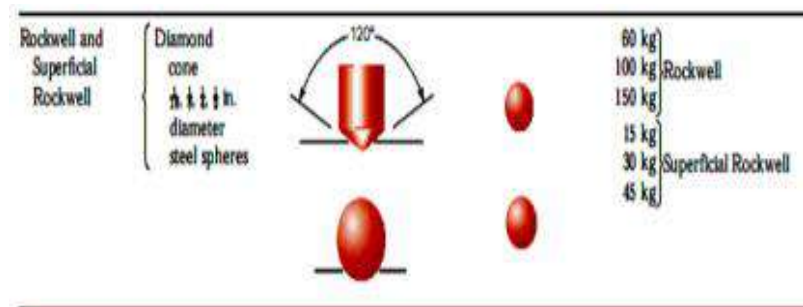
Pengujian *hardness rockwell* merupakan proses pembentukan lekukan pada permukaan logam memakai indenter atau penetrator yang ditekan dengan beban tertentu. Pada pengujian *hardness rockwell* angka kekerasan yang ditunjukkan merupakan kombinasi antara beban dan indenter yang dipakai, maka perlu diberikan awalan huruf pada angka kekerasan yang menunjukkan kombinasi beban dan penumbuk tertentu untuk skala beban yang di gunakan, skala yang sering di gunakan adalah A dengan beban 60 kgf, B beban 100 kgf, dan C beban 150 kgf. Pada pengujian kekerasan bahan dengan metode Rockwell, kedalaman penetrasi permanen yang dihasilkan dari penerapan dan pelepasan beban utama dipakai untuk menentukan angka kekerasan *rockwell*, dapat dilihat pada Persamaan 2.6 (Sulaeman dkk., 2018), dan Gambar 2.13 Pengujian *hardness rockwell* (Callister Jr, 2007).

$$HR = E - e \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana:

E = konstanta dengan nilai 100 untuk indenter intan dan 130 untuk indenter bola.

e = kedalaman penetrasi permanen karena beban utama (F_1) diukur dengan satuan 0,002 mm. Jadi, $e = h/0,002$.



Gambar 2. 13 Pengujian *Hardness Rockwell*
(Callister Jr, 2007)

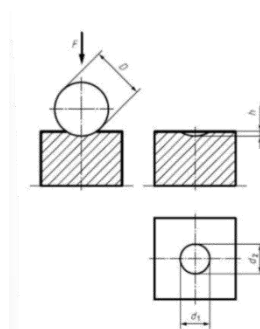
3. *Hardness Brinell*

Pengujian *Brinell* merupakan jenis *hardness* test dengan menusuk atau menekan spesimen menggunakan indenter berbentuk bola yang terbuat dari baja yang sudah dikeraskan atau karbida tungsten. Indenter bola baja di gunakan untuk material yang memiliki kekerasan *brinell* hingga 450 BHN. Indenter bola karbida tungsten harus di gunakan apabila material yang di uji memiliki kekerasan *Brinell* antara 451-650 BHN. Pengujian yang standar dilakukan dengan menggunakan diameter 10 mm bola baja atau karbida tungsten dengan beban 3000 kgf untuk logam keras, beban 1500 kgf untuk logam pertengahan, dan beban 500 kgf serta lebih rendah untuk material lunak. Indenter selain diameter 10 mm bisa di gunakan, misal 5 mm, 2,5 mm dan 1 mm. Jika menggunakan diameter indenter selain 10 mm maka beban harus disesuaikan mengikuti formula $P/D^2 = \text{konstan}$. Nilai konstanta tergantung dengan material yang di uji, 30 di gunakan untuk baja dan paduannya, 10 di gunakan untuk tembaga dan paduannya dan 5 di gunakan untuk aluminium dan paduannya. Ilustrasi pengujian *hardness brinell* dapat dilihat pada Gambar 2.14 dan Gambar 2.15.

Kemudian untuk menentukan kekerasan dapat menggunakan Persamaan 2.7.

Test	Indenter	Shape of Indentation		Load	Formula for Hardness Number ^a
		Side View	Top View		
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			P	$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$

Gambar 2. 14 Ilustrasi Pengujian *Hardness Brinell*
(Callister Jr, 2007)



Gambar 2. 15 Ilustrasi Pengujian *Hardness Brinell*
(Firmansyah dkk., 2025)

$$HBW = \frac{2F_{kgf}}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana:

- F = Gaya tekan (kgf)
- D = Diameter indenter (mm)
- d = Diameter indentasi (mm)

Berikut ini Tabel 2.12 *Acceptance Criteria* pengujian *Hardness* yang akan dilakukan untuk mengetahui nilai kekerasan yang akan diuji.

Tabel 2. 12 *Acceptance Criteria* Pengujian *Hardness* Vicker

<i>Acceptance Criteria Hardness Vicker Test</i>		
<i>Hardness Test Method</i>	<i>Hardness test locations for welding procedure qualification</i>	<i>Maximum acceptable Hardness</i>
Aluminium 6061	Base metal	95 – 107 HV
Filler E 5356	Weld metal	60 – 80 HV
HAZ	HAZ	55-70 HV

Sumber: pqr PTD

2.11 ANOVA (*Analyze Of Variance*)

Anova atau *analyze of variance* adalah teknik statistik yang digunakan dalam menguji pengaruh dari satu ataupun lebih variabel bebas terhadap suatu variabel terikat dengan cara membandingkan perbedaan rata-rata antar kelompok perlakuan. ANOVA sendiri merupakan metode analisis yang digunakan dalam penelitian eksperimen untuk mengetahui apakah terdapat pengaruh yang signifikan dari perlakuan tertentu terhadap hasil yang diamati (Widiyanto, 2017). Menurut (Sudirman, 2023) ANOVA bertujuan untuk mempelajari atau menguji hipotesis yang menyatakan parameter rata-rata variabel kriterium untuk dua atau lebih kelompok sampel, baik dalam penelitian eksperimen ataupun penelitian *exposfacto* atau *causal-komparatif*.

ANOVA digunakan sebagai pengganti untuk membandingkan rata-rata keragaman populasi. Tipe data yang benar untuk ANOVA adalah nominal dan nomor urut variabel independen ketika data variabel independen rendah bentuk tengah atau relatif, harus diubah ke bentuk 15 ordinal atau pertama secara nominal. Sedangkan variabel terikatnya adalah interval atau rasio. yang penting asumsi dasar yang harus dipenuhi dalam analisis varians adalah:

1. Kenormalan : distribusi data harus normal agar data berdistribusi normal dapat ditempuh dengan cara memperbanyak jumlah sampel dalam kelompok.
2. Kesamaan : variasi Setiap kelompok hendaknya berasal dari populasi yang sama dengan variansi yang sama pula. Bila banyaknya sampel sama pada setiap kelompok maka kesamaan variasinya dapat diabaikan. Tapi bila banyak sampel pada masing-masing kelompok tidak sama maka kesamaan variasi sangat diperlukan.
3. Pengamatan : sampel hendaknya diambil secara acak (random), sehingga setiap pengamatan merupakan informasi yang bebas.

Menurut Singh (2006) dalam (Sudirman, 2023) jenis – jenis ANOVA terdiri dari :

- a. ANOVA satu faktor, yaitu ANOVA yang didasarkan pada pengamatan 1 kriteria atau 1 faktor yang menimbulkan variasi.

- b. ANOVA dua faktor, yaitu ANOVA yang didasarkan pada pengamatan 2 kriteria atau 2 faktor yang menimbulkan variasi.
- c. ANOVA tiga faktor, yaitu ANOVA yang didasarkan pada pengamatan 3 kriteria atau 3 faktor yang menimbulkan variasi.

Pada penelitian ini, metode analisis statistik yang digunakan adalah ANOVA dua faktor atau (*Two-way ANOVA*) karena melibatkan dua faktor perlakuan yaitu *welding squence* dan *travel speed*, serta memungkinkan analisis pengaruh kedua faktor tersebut dengan makro mikro dan distorsi.

2.12 Penelitian Terdahulu

Dalam penelitian ini, penulis merujuk pada sejumlah penelitian terdahulu yang relevan dengan topik yang diangkat. Hasil dan kesimpulan dari penelitian sebelumnya dijadikan referensi dalam tahap persiapan serta pelaksanaan penelitian ini. Berbagai studi yang telah dipublikasikan sebelumnya dipelajari dan dirangkum sebagai dasar ilmiah untuk mendukung analisis mengenai pengaruh *welding sequence*, terhadap distorsi, struktur mikro, ketahanan korosi, dan sifat mekanik material Aluminium Sa 6061 dengan metode *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW). Guna menjabarkan, peneliti merumuskan penelitian terdahulu pada Tabel 2.13.

Tabel 2. 13 Penelitian Terdahulu

No	Judul	Penulis	Kesimpulan
1.	Studi Eksperimen Dan Numerik Pengaruh Variasi Urutan Pengelasan Terhadap Distorsi Sudut Pada Struktur Panel Baja A36	Aviciena G.S. (2018)	Berdasarkan hasil eksperimen dan pemodelan numerik yang dilakukan, distorsi pada variasi loncat tercatat sebesar 42,5 mm dan 42,6 mm, lebih rendah dibandingkan dengan metode lurus 49,5 mm dan 45 mm serta simetris 47,5 mm dan 44,2 mm. Hasil ini menegaskan efektivitas urutan pengelasan loncat dalam mengurangi distorsi selama proses pengelasan.
2.	Effect Of Welding Sequence On Multi Pass Temper Bead Welding Joint Of PT.INKA Bogie LRT On Distorction, Micro Structure and Hardness. Dalam Jurnal Integrasi (Vol. 103, Nomor 2).	Munir, M. M., Khoirul, I. R., syaiful, M. A., & Ari, A. W. (2019)	Proses <i>Temper Bead Welding</i> pada fabrikasi <i>Joint bogie</i> untuk <i>Light Rail Transit</i> (LRT) mengungkap bahwa meskipun proses temper dapat menurunkan kekerasan material, namun efeknya tidak signifikan dan terbukti menurunkan distorsi. Urutan pengelasan dengan sequence C menunjukkan tingkat distorsi paling rendah dibandingkan dengan sequence B. Dimana sequence B mengindikasikan bahwa pemilihan urutan

No	Judul	Penulis	Kesimpulan
			pengelasan yang tepat berperan penting dalam kontrol distorsi struktur las
3.	Analysis of the effect of welding sequence and speed on the distortion of ASTM A36 Joints by MK Method.	Purnama, D., & Nanda Garjati, V. (2023)	Menunjukkan bahwa distorsi pengelasan sangat dipengaruhi oleh masukan panas dan urutan pengelasan yang diterapkan. Distorsi meningkat seiring dengan bertambahnya masukan panas, sementara pengulangan urutan pengelasan pada jalur yang sama dapat menyebabkan akumulasi tegangan termal. Hal ini menyebabkan stabilitas proses pemanasan dan pendinginan material terganggu. Analisis statistik dalam penelitian ini mengungkapkan bahwa variabel urutan pengelasan dan masukan panas memberikan kontribusi signifikan terhadap pengurangan distorsi hingga 80,4%
4.	Thermal and mechanical analysis of multipass SS316L using GTAW process. Materials Today: Proceedings, 46, 562–566.	Vemanaboina, H., Venugopal, C., & Kotthinti, N. K. (2021)	Pengaruh parameter pengelasan terhadap distorsi menunjukkan bahwa semakin rendah distorsi yang terjadi, semakin baik pula kualitas hasil las yang diperoleh. Distorsi maksimum yang tercatat dalam studi ini masih berada dalam batas standar industri, sementara kekuatan tarik sambungan las mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya masukan panas. Temuan ini menegaskan bahwa pengaruh parameter pengelasan terhadap distorsi dan sifat mekanik material tidak dapat diabaikan dalam optimasi proses pengelasan.

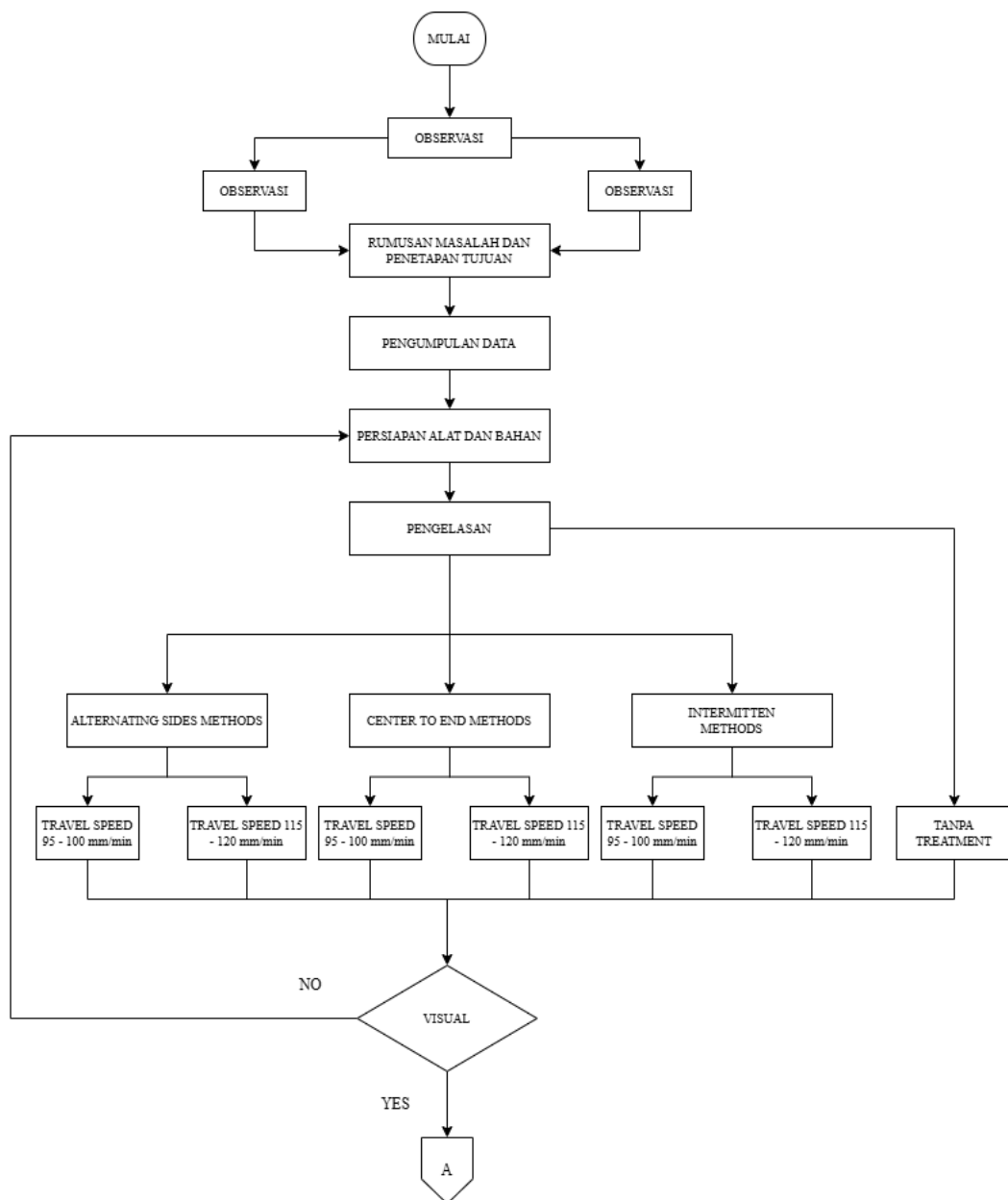
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

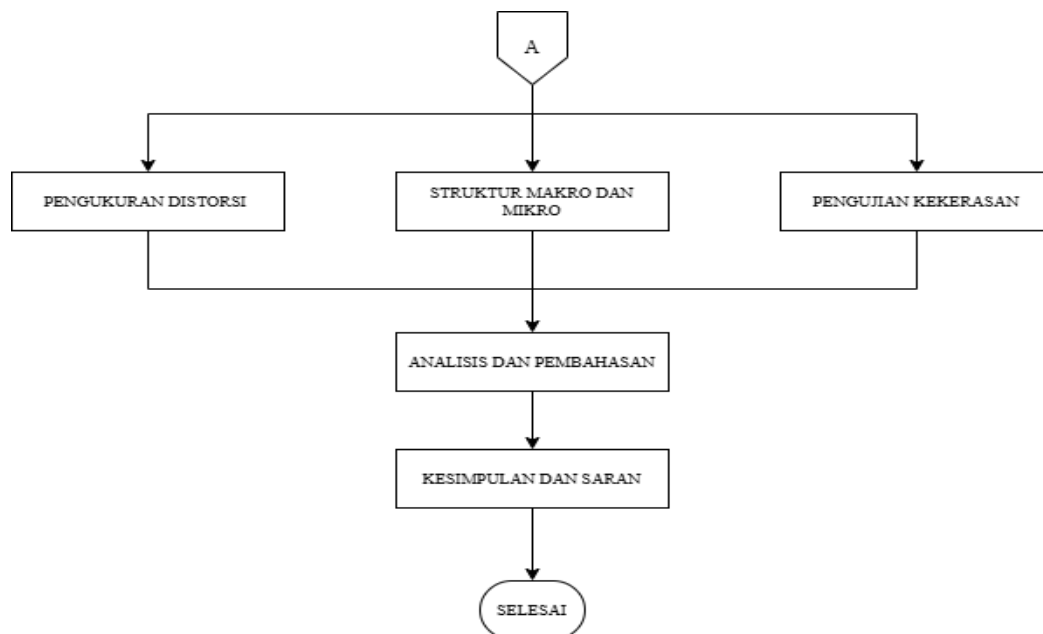
BAB 3

METOLOGI PENELITIAN

3.1. Skema Diagram Alir

Prosedur Penelitian dilakukan dengan metode diagram alir untuk mempermudah proses pengerjaan tugas akhir ini. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 3.1.





Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.2. Studi Literatur

Langkah awal dalam penelitian ini adalah melakukan studi literatur untuk mengumpulkan referensi yang relevan dengan topik penelitian. Tahap berikutnya adalah mempersiapkan alat dan bahan, termasuk perangkat *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW), material alumium seri 6061 dengan dimensi material 200 mm x 200 mm x 4 mm dan 100 mm x 200 mm x 4 mm, dan filler metal ER 5356 . Sumber referensi yang di gunakan mencakup *handbook*, jurnal ilmiah, modul, dan lainnya. Referensi tersebut terkait dengan topik seperti pengelasan GTAW, urutan pengelasan (*welding sequence*), Posisi Pengelasan (1F *Down Hand*), Bentuk Pengelasan (*T Joint Tanpa Groove*), kemudian dilakukan pengujian visual untuk mengetahui distorsi yang terjadi setelah proses pengelasan, pengujian struktur mikro dan makro, dan pengujian kekerasan.

3.3. Pengumpulan Data

Data yang dikumpulkan dalam penelitian ini meliputi *mill certificate material* Aluminium seri 6061 dan spesifikasi *filler metal* yang di gunakan ER 5356. Selain itu, dilakukan pula pengumpulan data langsung dari lapangan untuk mendukung keakuratan hasil penelitian. Data tambahan mencakup dasar teori dan tinjauan pustaka yang relevan, baik yang secara

langsung maupun tidak langsung berhubungan dengan proses pengelasan GTAW, variasi *welding sequence*, meliputi *Alternating sides*, *Work from Center to ends* dan *Stitch / Intermittent Welding* dengan variasi *travel speed* 95 - 100 mm/menit dan 115 – 120 mm/menit.

Langkah ini bertujuan untuk memastikan bahwa semua variabel yang memengaruhi proses pengelasan telah dipertimbangkan secara menyeluruh. Dengan mengintegrasikan data dari berbagai sumber, penelitian diharapkan dapat memberikan hasil yang komprehensif dan mendalam terkait pengaruh variasi *welding sequence* dan kualitas dengan variasi *Alternating sides*, *Work from Center to ends* dan *Stitch / Intermittent Welding* dengan variasi *travel speed* 95 - 100 mm/menit dan 115 – 120 mm/menit.

3.4. Persiapan Alat dan Bahan

Untuk melaksanakan Penelitian ini diperlukan alat dan bahan untuk mendukung berjalannya proses. Adapun alat dan bahan yang dibutuhkan antara lain:

3.4.1. Alat

Dalam penelitian ini membutuhkan peralatan-peralatan yang mendukung dalam proses pembentukan dan penganalisaan spesimen benda uji untuk mendapatkan ukuran dan bentuk spesimen yang sesuai dengan standard. Peralatan-peralatan tersebut seperti mesin las GTAW, *filler metal* ER 5356, gerinda tangan, tabung gas argon dan *stopwatch* dapat di lihat pada Gambar 3.2 antara lain:



Peralatan yang digunakan dalam proses pengelasan GTAW.

Gambar 3. 2 Alat yang di gunakan Pengelasan Aluminium seri 6061

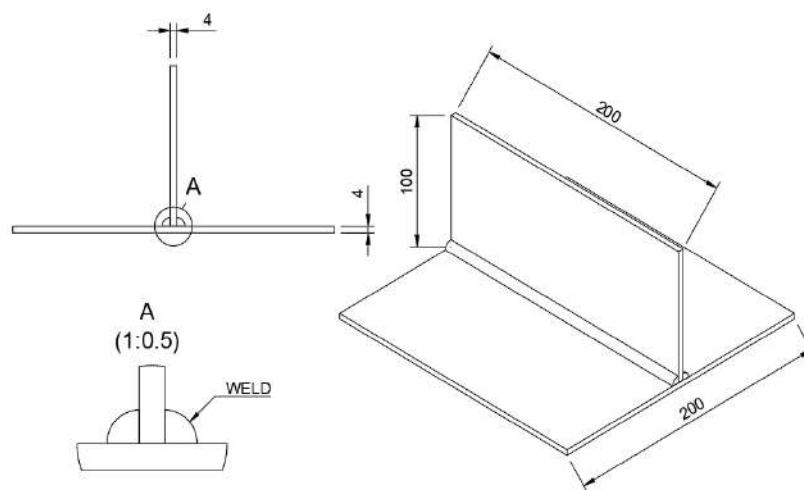
3.4.2. Bahan

Material yang di gunakan adalah Aluminium seri 6061 sebanyak 14 pelat atau 7 sambungan. Untuk 1 pelat memiliki dimensi 200 mm x 200 mm x 4 mm dan 100 mm x 200 mm x 4 mm. Contoh lembar aluminium dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3. 3 Aluminium Seri 6061

Posisi pengelasan 1 F *down hand* dengan tipe sambungan yang di gunakan merupakan *T Joint*. Bentuk dan dimensi dari material dapat dilihat dalam Gambar 3.4 Posisi Pengelasan *T Joint*.



Gambar 3. 4 Posisi Pengelasan T Joint

3.5. Pengelasan

Metode pengelasan yang di gunakan dalam penelitian ini adalah *Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)* karena metode ini mampu menghasilkan sambungan las dengan kontrol panas yang baik, kualitas las yang tinggi, serta cocok untuk pengelasan aluminium. GTAW juga memungkinkan pengendalian parameter seperti arus, tegangan, dan *Travel speed* secara stabil sehingga mendukung analisis eksperimental (Pratikno dkk., 2020).

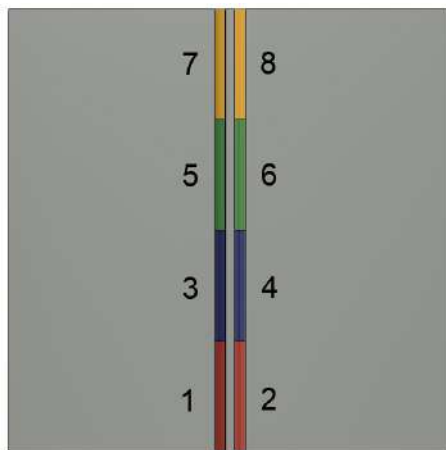
Travel speed divariasikan pada dua tingkat, yaitu 95 – 100 mm/menit

dan 115 – 120 mm/menit. *Travel speed* merupakan parameter penting karena secara langsung memengaruhi *heat input*. *Travel speed* yang lebih rendah menghasilkan heat input yang lebih tinggi, sehingga memperpanjang waktu paparan panas pada material, sedangkan *travel speed* yang lebih tinggi menurunkan heat input dan mempercepat pendinginan (Wicaksono dkk., 2019). Perbandingan antara *travel speed* dijelaskan pada Tabel 3.1 dan Gambar 3.5, Gambar 3.6, Gambar 3.7 merupakan ilustrasi pengaplikasian *welding sequence*. Dan penggunaan parameter pengelasan dapat dilihat pada Tabel 3.2.

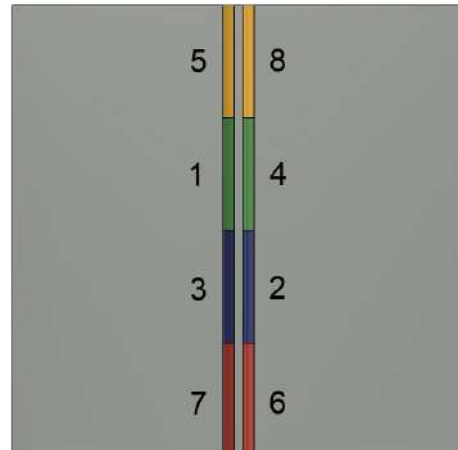
Tabel 3. 1 Perbandingan *Travel speed* 95 – 100 mm/menit dan 115 – 200 mm/menit

Teknik Las	<i>Travel Speed</i> 95 – 100 mm/ menit	<i>Travel speed</i> 115 - 120 mm/ menit
<i>Alternating sides</i>	<i>Heat input</i> lebih tinggi, gradien termal meningkat.	<i>Heat input</i> lebih rendah, lebih merata.
<i>Center to ends</i>	Risiko distorsi lebih tinggi karena panas terakumulasi di area awal.	Distorsi relatif lebih rendah, struktur lebih konsisten.
<i>Stitch/Intermittent</i>	Heat input dan distorsi lebih rendah dari las kontinu, tetapi masih lebih tinggi dibanding 13 mm/s.	Kombinasi rendah <i>heat input</i> & teknik <i>intermiten</i> → distorsi minimal.

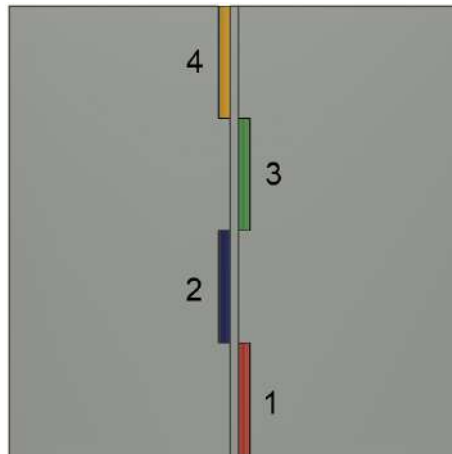
Sumber: Wicaksono dkk., 2019



Gambar 3. 5 *Alternating sides*



Gambar 3. 6 *Work from Center to ends*



Gambar 3. 7 *Stitch / Intermittent Welding*

Tabel 3. 2 Parameter Pengelasan

<i>Test Piece</i>	<i>Pass</i>	<i>Process</i>	<i>Filler Metal</i>	<i>Polarity</i>	<i>Ampere</i>	<i>Voltage</i>	<i>Travel speed (mm/min)</i>	<i>Heat Input (Kj/mm)</i>
AA	1	GTAW	ER 5356	DCEP	138	11	100 – 110	0,94
A1	1	GTAW	ER 5356	DCEP	113	9	95 – 100	0,77
A2	1	GTAW	ER 5356	DCEP	108	8	115 – 120	0,44
B1	1	GTAW	ER 5356	DCEP	140	12	95 – 100	0,96
B2	1	GTAW	ER 5356	DCEP	129	10	115 – 120	0,52
C1	1	GTAW	ER 5356	DCEP	133	10	95 – 100	0,84
C2	1	GTAW	ER 5356	DCEP	110	9	115 – 120	0,50

Sumber: Dokumen pribadi

Keterangan :

(AA) : *Tanpa Treatment*

(A1) : *Alternating sides variasi Travel speed 95 – 100 mm/menit*

(A2) : *Alternating sides variasi Travel speed 115 – 120 mm/menit*

(B1) : *Center to end variasi Travel speed 95 – 100 mm/menit*

(B2) : *Center to end variasi Travel speed 115 – 120 mm/menit*

(C1) : *Intermitten variasi Travel speed 95 – 100 mm/menit*

(C2) : *Intermitten variasi Travel speed 115 – 120 mm/menit*

3.5.1. Proses pengelasan

Parameter yang di gunakan dalam proses pengelasan yang menggunakan material Aluminium seri 6061 dengan *filler metal* ER 5356 seperti yang dijelaskan Gambar 3.8 dan Gambar 3.9 sebagai logam pengisi.



Gambar 3. 8 Proses Pengelasan



Gambar 3. 9 Filler metal 5356

3.5.2 Elektroda tungsten

Untuk pemilihan elektroda tungsten digunakan jenis WP (99,5% Tungsten) dengan diameter 2,4 mm, sesuai spesifikasi pada ASME Section II Part C – SFA-5.12 / AWS A5.12. Elektroda tungsten WP ditunjukkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3. 10 Elektroda Tungsten WP

Langkah–langkah proses pengelasan dengan *travel speed* 95-100 mm/menit dan 115-120 mm/menit dengan *Alternating sides Method* dijelaskan sebagai berikut:

A. Pengelasan menggunakan *travel speed* 95-100 mm/menit.

1. Mempersiapkan mesin las GTAW yang di gunakan.

2. Mempersipakan material Aluminium seri 6061 yang dilas.
3. Persiapan permukaan (material bersih dari kotoran, minyak dan lain-lain).
4. Atur parameter pengelasan yang di gunakan dapat dilihat pada Tabel 3.2.
5. Mengatur kecepatan *travel speed* 95-100 mm/menit.
6. Melakukan proses pengelasan.

B. Pengelasan menggunakan *travel speed* 115-120 mm/menit.

1. Mempersiapkan mesin las GTAW yang di gunakan.
2. Mempersipakan material Aluminium seri 6061 yang dilas.
3. Persiapan permukaan (material bersih dari kotoran, minyak dan lain-lain).
4. Atur parameter pengelasan yang di gunakan dapat dilihat pada Tabel 3.2.
5. Mengatur kecepatan *travel speed* 115-120mm/menit.
6. Melakukan proses pengelasan.

Langkah–langkah proses pengelasan dengan *travel speed* 95-100 mm/menit dan 115-120 mm/menit dengan *Working from Center to ends Method* dijelaskan sebagai berikut:

A. Pengelasan menggunakan *travel speed* 95-100 mm/menit.

1. Mempersiapkan mesin las GTAW yang di gunakan.
2. Mempersipakan material Aluminium seri 6061 yang dilas.
3. Persiapan permukaan (material bersih dari kotoran, minyak dan lain-lain).
4. Atur parameter pengelasan yang di gunakan dapat dilihat pada Tabel 3.2.
5. Mengatur kecepatan *travel speed* 95-100 mm/menit.
6. Melakukan proses pengelasan.

B. Pengelasan menggunakan *travel speed* 115-120 mm/menit.

1. Mempersiapkan mesin las GTAW yang di gunakan.
2. Mempersipakan material Aluminium seri 6061 yang dilas.

3. Persiapan permukaan (material bersih dari kotoran, minyak dan lain-lain).
4. Atur parameter pengelasan yang di gunakan dapat dilihat pada Tabel 3.2.
5. Mengatur kecepatan *travel speed* 115-120 mm/menit.
6. Melakukan proses pengelasan.

Langkah–langkah proses pengelasan dengan *travel speed* 95-100 mm/menit dan 115-120 mm/menit dengan *Intermittent Method* dijelaskan sebagai berikut:

A. Pengelasan menggunakan *travel speed* 95-100 mm/menit.

1. Mempersiapkan mesin las GTAW yang di gunakan.
2. Mempersipakan material Aluminium seri 6061 yang dilas.
3. Persiapan permukaan (material bersih dari kotoran, minyak dan lain-lain).
4. Atur parameter pengelasan yang di gunakan dapat dilihat pada Tabel 3.2.
5. Mengatur kecepatan *travel speed* 95-100 mm/menit.
6. Melakukan proses pengelasan.

B. Pengelasan menggunakan *travel speed* 115-120 mm/menit.

1. Mempersiapkan mesin las GTAW yang di gunakan.
2. Mempersipakan material Aluminium seri 6061 yang dilas.
3. Persiapan permukaan (material bersih dari kotoran, minyak dan lain-lain).
4. Atur parameter pengelasan yang di gunakan dapat dilihat pada Tabel 3.2.
5. Mengatur kecepatan *travel speed* 115-120 mm/menit.
6. Melakukan proses pengelasan.

3.5.3 Pengelasan tanpa *treatment* (*baseline/control*)

Pengelasan tanpa *treatment* dalam penelitian ini digunakan sebagai kondisi perbandingan (*baseline*) terhadap tiga variasi *welding sequence treatment*, yaitu *alternating sides*, *working from center to ends*, dan *stitch intermittent welding*, untuk mengevaluasi efektivitas strategi

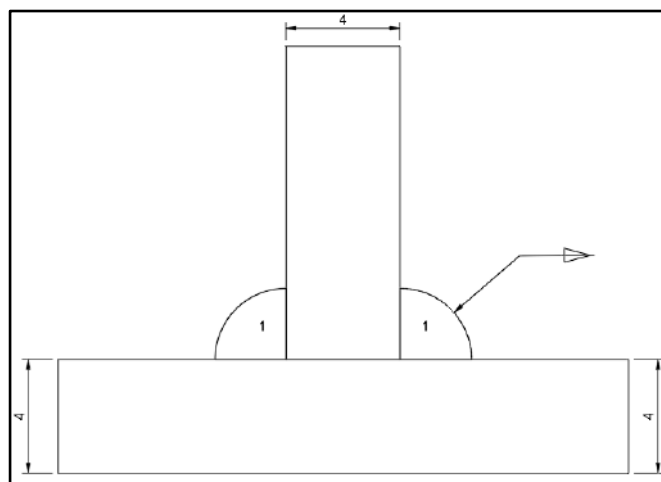
pengendalian distorsi pada sambungan *T-joint* aluminium 6061 dengan proses GTAW. Metode ini merepresentasikan praktik pengelasan konvensional atau *straight/continuous/single-pass welding*, di mana las dilakukan secara kontinu searah dari satu ujung sambungan ke ujung lainnya tanpa modifikasi urutan atau strategi distribusi panas khusus, sehingga cenderung menghasilkan akumulasi panas linear yang lebih tinggi dan distorsi geometris maksimum sebagai acuan pembanding.

Langkah–langkah proses pengelasan tanpa *treatment* dijelaskan sebagai berikut:

A. Pengelasan menggunakan *travel speed* 100-110 mm/menit.

1. Mempersiapkan mesin las GTAW yang di gunakan.
2. Mempersipakan material Aluminium seri 6061 yang dilas.
3. Persiapan permukaan (material bersih dari kotoran, minyak dan lain–lain).
4. Atur parameter pengelasan yang di gunakan dapat dilihat pada Tabel 3.2.
5. Mengatur kecepatan *travel speed* 100-110 mm/menit.
6. Melakukan proses pengelasan tanpa menggunakan tretment.

Untuk desain *joint* pada masing-masing variasi dapat dilihat pada Gambar 3.11.



Gambar 3. 11 Desain *joint*

3.6 Pengujian

Dalam penelitian ini, dilakukan serangkaian pengujian untuk memperoleh data yang mendukung pencapaian tujuan penelitian. Pengujian ini berperan sebagai referensi tambahan yang memberikan informasi tentang metode yang paling efektif dalam menghasilkan hasil terbaik setelah dilakukan proses pengelasan dengan variasi *welding sequence* dan kualitas dengan variasi *Alternating sides*, *Work from Center to ends* dan *Stitch / Intermittent Welding* dengan variasi *Travel speed* 95 - 100 mm/s dan 115 – 120 mm/s. Berikut adalah pengujian yang dilaksanakan dalam penelitian ini.

3.6.1. Pengujian visual

Pengujian visual merupakan pengujian non-destruktif pertama yang dilakukan pada semua spesimen hasil pengelasan GTAW aluminium 6061 (termasuk variasi *welding sequence*, *travel speed*, dan tanpa *treatment*) untuk mendeteksi cacat permukaan las secara cepat dan ekonomis sebelum pengujian destruktif lanjutan seperti distorsi, metalografi, dan kekerasan. Pengujian ini mengikuti standar AWS

D1.1:2025 Table 6.1 dan 8.1 untuk *visual Acceptance Criteria*, dengan fokus pada *fillet T-joint* (posisi 1F), memastikan kualitas *bead* las sebelum analisis lebih lanjut.

Pengujian dilakukan segera setelah spesimen mendingin alami (~1 jam pasca-las) menggunakan mata telanjang terlatih (atau kaca pembesar 5-10x jika diperlukan), pencahayaan minimal 350 lux, dan penggaris fleksibel untuk ukur dimensi. Cacat yang dicek meliputi *incomplete fusion*, *crack*, *undercut*, *overlap*, *porosity*, *slag inclusion*, dan *excessive convexity/concavity*, khususnya pada GTAW aluminium yang rentan oksidasi dan porositas akibat gas Arc tidak sempurna.

Adapun langkah-langkah untuk melakukan pengujian secara visual:

1. Persiapan: Bersihkan slag/sisa *spatter* dengan sikat kawat atau gerinda halus (*non-metal brush* untuk aluminium); label spesimen (e.g., AS-8/1 untuk *Alternating sides travel* 95 mm/menit replikasi 1).
2. Pemeriksaan Umum: Periksa keselarasan T-joint (*alignment offset* ≤ 3 mm), warna *bead* (abu-hitam indikasi oksidasi *reject*), dan distorsi

kasar (angular >3 mm catat untuk VT *fail*).

3. Pemeriksaan Detail *Bead* Las (panjang 200 mm, ukur setiap 50 mm):
 - a. Size/Dimensi: Lebar *bead* 6-8 mm, *throat* tinggi ≥ 4 mm (*full penetration*); gunakan *weld gauge*.
 - b. *Undercut*: ≤ 0.4 mm kedalaman, tidak beruntun >50 mm.
 - c. *Porosity/Cluster*: Diameter ≤ 1.6 mm, jarak antar >25 mm; tidak >5% panjang las.
 - d. *Crack*: Nol toleransi (*longitudinal/transverse/microcrack*).
 - e. *Incomplete Fusion*: Nol overlap/*slug entrapment*.
 - f. *Convexity/Concavity*: ≤ 1 mm.
4. Dokumentasi: Foto makro (*scale* 1:1) dari *toe*, *root*, dan sisi las; sketsa cacat jika ada; ukur dengan *caliper* digital.
5. Keputusan: *Pass* jika lolos semua *criteria*, sesuai dengan Tabel 3.3

Tabel 3. 3 *Acceptance Criteria* Visual pada Sambungan Las T Joint

Kategori Ketidaksempurnaan	Kriteria Penerimaan
Crack (retak)	Dilarang sepenuhnya, apa pun ukuran/lokasi
Incomplete Fusion	Tidak boleh ada kurang fusi antar lapis las atau las-base metal.
Incomplete Joint Penetration	Untuk groove welds: tidak boleh ada kurang penetrasi.
Crater Crack	Semua crater harus diisi penuh kecuali ujung fillet <i>intermittent</i> .
Weld Profiles	Sesuai 5.23 (<i>convexity</i> , <i>concavity</i> , <i>reinforcement</i> , <i>overlap</i> , <i>fillet size</i>).
Undercut	<25 mm tebal: ≤ 1 mm, akumulasi ≤ 2 mm/50 mm dalam 300 mm. ≥ 25 mm: ≤ 2 mm. Primary member: ≤ 0.25 mm jika transverse ke tarik.
Porosity/Piping	Statis: isolated ≤ 2.5 mm, cluster $\leq 1/4$ panjang las. Siklik: lebih ketat, lihat Table 8.1 Item 8.
Overlap	Tidak boleh ada.

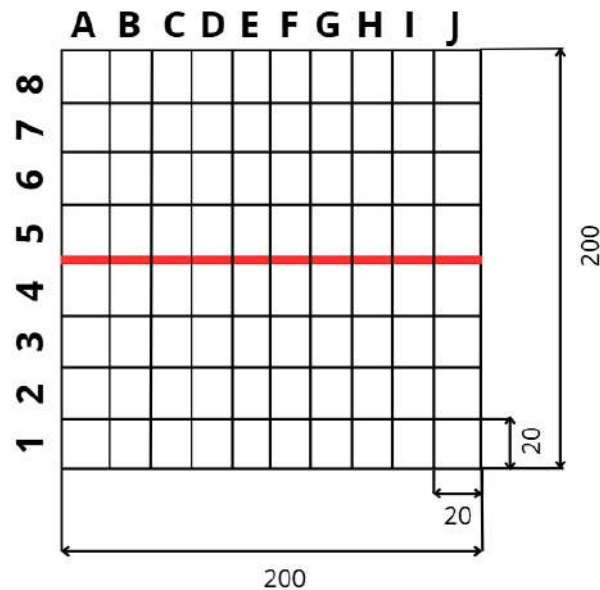
Sumber : AWS, 2025

3.6.2. Pengukuran distorsi

Sebelum melakukan proses pengelasan, dilakukan pengukuran distorsi yang dibagi menjadi 2 tahap yaitu sebelum proses pengelasan dan setelah proses pengelasan. Tahap pertama pengukuran menggunakan *dial gauge*, untuk proses pengukuran sebagai berikut:

1. Haluskan sisi material yang disambung menggunakan mata gerinda amplas.

2. Lakukan *tack weld* pada material yang dilas di permukaan yang rata.
3. Bersihkan hasil *tack weld* hingga rata menggunakan gerinda tangan.
4. Kemudian lakukan *marking* pada material sejauh 20 mm ke kanan dan kiri dari jalur las dan 20 mm dari arah melintang jalur las sesuai dengan ketentuan (ISO 13920, 2023) pada Gambar 3.12 *Marking Lines Distortion*.



Gambar 3. 12 *Marking Lines Distortion*

5. Atur *dial gauge* pada meja perata dan lakukan kalibrasi 0 pada 1 titik. Pengukuran kerataan setelah *tack weld* kemudian geser pada setiap ujung garis dan perpotongan garis dan catat nilai yang keluar pada indikator *dial gauge*.

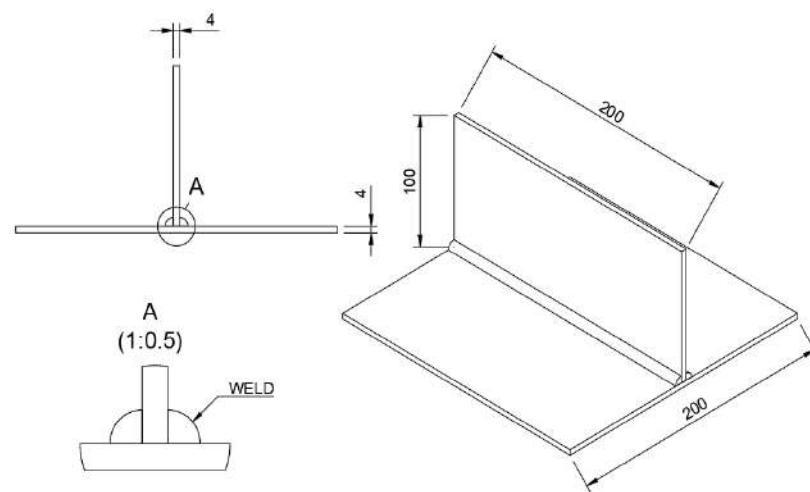
Jika sebelumnya dilakukan pengukuran kelurusan material sebelum proses pengelasan. Maka setelah proses pengelasan dilakukan juga pengukuran distorsi setelah pengelasan. Langkah–langkah pengukuran sebagai berikut:

1. Letakkan material di atas *support* agar material tetap.
2. Atur *dial gauge* pada meja perata lalu aktifkan magnet pada *dial gauge*, dan lakukan kalibrasi 0 di atas permukaan plat yang telah di las.
3. Ukur distorsi pada setiap garis perpotongan yang ada pada *marking* material pengukuran distorsi setelah pengelasan.
4. Catat nilai pada *dial gauge*.

5. Masukkan data keprogram excel untuk menampilkan grafik.

3.6.3 Pengujian struktur makro dan mikro

Pengujian metalografi atau *metallography* test dilakukan untuk mengetahui struktur makro dan mikro yang terjadi setelah dilakukan proses pengelasan dengan variasi *welding sequence* dan *travel speed*. Untuk pengujian makro dan mikro menggunakan 1 spesimen uji dari masing-masing variabel. Dimensi dari specimen uji ini ditunjukkan pada Gambar 3.13 berikut.



Gambar 3. 13 Spesimen Makro

Adapun alat dan bahan yang perlu dipersiapkan dalam pengujian makro adalah:

1. Spesimen uji 7 buah
2. Macro lens
3. Mesin poles
4. Cairan etsa
5. *Dryer*
6. Penggaris
7. Majun atau *tissue*

Untuk test metode pada pengujian makro merujuk pada (ASTM-E340-15, n.d.), Adapun Langkah-langkah dalam pengujian makro Adalah sebagai berikut:

1. Potong material dengan dimensi lebar 15mm dan Panjang 50mm

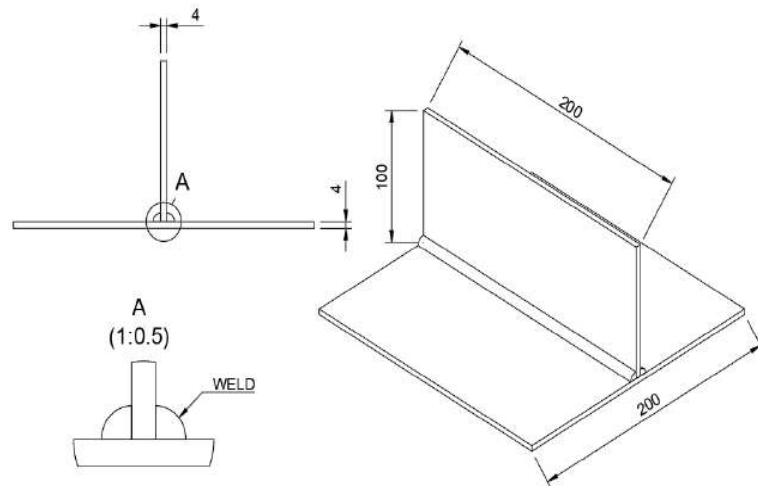
2. Ratakan pada sisi spesimen dengan menggunakan grinding agar permukaan uji lebih halus dan cepat saat proses poles.
3. Karena spesimen memiliki ketebalan yang relatif tipis, berikan resin untuk menambah penampang dan memudahkan dalam pengujian
4. Haluskan permukaan uji menggunakan mesin poles dengan ukuran kertas penghalus ukuran 600, 1000, 2000 dan dilanjut pada tahap poles dengan kain woll, lalu bersihkan permukaan dengan kain majun atau tissue.
5. Lakukan proses etsa menggunakan (HF 0,5 ml + HCL 1 ml + aquades 8,5 ml) sampai terlihat struktur makronya lalu bilas dengan air.
6. Keringkan spesimen yang telah diberikan cairan ethanol, kemudian keringkan dengan dryer. Dan pengujian dapat dilakukan.

Micro examination sendiri didefinisikan sebagai pengujian yang dapat dilakukan dengan mikroskop dengan pembesaran X50 sampai dengan X500 dengan atau tanpa proses etsa. Alat uji mikro dapat dilihat pada Gambar 3. 14 berikut.



Gambar 3. 14 Alat Uji Mikro

Berikut adalah dimensi specimen uji mikro yang ditunjukan pada Gambar 3.15 berikut.



Gambar 3. 15 Spesimen Uji Mikro

Adapun alat dan bahan yang perlu dipersiapkan sebagai berikut:

1. Spesimen uji 7 buah
2. Mesin poles
3. Cairan etsa (HF 0,5 ml + HCL 1 ml + aquades 8,5 ml)
4. *Dryer*
5. Alat uji mikro

Untuk test *methode* pada pengujian mikro merujuk pada (ASTM-E407-23, 2023), Adapun Langkah-langkah dalam pengujian mikro Adalah sebagai berikut:

1. Potong material dengan dimensi lebar 15mm dan Panjang 30mm
2. Haluskan pada sisi spesimen untuk membentuk kontur permukaan uji yang lebih halus dan cepat saat proses poles.
3. Berikan monting dari resin untuk menambah penampang untuk memudahkan handling dan persiapan pengujian
4. Haluskan permukaan uji menggunakan mesin poles dengan amplas ukuran 80, 150, 250, 400, 600, 800, 1000, 2000 dan dilanjut pada tahap poles dengan kain woll dan autosol, lalu bersihkan permukaan dengan kain majun atau *tissue*.
5. Buat larutan 2ml HF, 3ml HCL, 5ml HNO_3 , 190ml *water* lalu aduk rata hingga merata. Kemudian aplikasikan pada permukaan spesimen menggunakan pipet dan beri waktu jeda 2-30 detik lalu dapat dibilas dengan air (ASTM E407-23 2023).

6. Keringkan spesimen yang telah di berikan cairan, kemudian keringkan spesimen menggunakan *dryer*. Dan pengujian dapat dilakukan.

Pada pengujian makro dan mikro, hasil akhir harus memenuhi *Acceptance Criteria* berdasarkan Tabel 3.4 dan Tabel 3.5 berikut.

Tabel 3. 4 *Acceptance Criteria* Macrostruktur

No.	Cacat Macrostruktur	Kriteria Penerimaan Maksimum (AWS D1.1:2025)	Aplikasi T-Joint Al 6061 (t=4 mm)	Status
1	Incomplete Fusion (Root/Toe)	No!; full fusion $\geq 100\%$ root & sidewalls	Fusion lengkap toe-to-root	Reject jika $< 100\%$
2	Cracks (Longitudinal/Transverse)	No! toleransi (termasuk HAZ microcrack)	Bebas retak WM/HAZ	Reject absolut
3	Slag Inclusions/Porosity	Individual ≤ 1.6 mm; cluster ≤ 3 mm ² ; spacing $\geq 6 \times$ diameter	Total inclusions $< 5\%$ area las	Pass minor
4	Undercut/Overlap	Kedalaman ≤ 0.4 mm; panjang beruntun ≤ 50 mm	Undercut toe ≤ 0.4 mm	Conditional
5	Leg Size/Throat Thickness	Leg ≥ 4 mm (t plat); throat ≥ 4 mm (full penetration)	Throat = tebal plat vertikal	Verifikasi gauge
6	Excessive Convexity/Concavity	Convexity ≤ 1 mm; concavity ≤ 0.5 mm	Bead profile uniform	Grind jika exceed
7	Laps/Seams/Folds	No!	Permukaan las halus	Reject
8	Fusion Line Irregularity	Smooth transition WM $\rightarrow$ BM; no sharp steps	Fusion line continuous	Pass

Sumber: AWS, 2025

Tabel 3. 5 *Acceptance Criteria* Mikrostruktur

No.	Parameter Mikrostruktur	Kriteria Penerimaan Maksimum (AWS D1.1:2025 Clause 4.13)	Aplikasi GTAW Al 6061	Status
1	Grain Size (ASTM E112)	WM: Equiaxed fine (G8-G10); HAZ: $\leq G6$, width ≤ 2 mm	Grain refined vs base metal	Reject coarse HAZ
2	Porosity Mikro (ASTM E562)	$\leq 1\%$ area point count; max dia ≤ 0.1 mm	Gas porosity minimal	Pass $< 1\%$
3	Cracks/Liquation	No! (dendrite alignment uniform WM)	No HAZ liquation cracks	Reject absolut
4	Inclusions (Oxide/Sulfide)	ASTM E45 $\leq$ Grade B; stringer ≤ 0.05 mm ²	Clean WM/HAZ	Pass
5	HAZ Width	$\leq 2 \times$ tebal plat (≤ 8 mm); no overheating	HAZ minimal ($\sim 1-2$ mm ideal)	Conditional
6	Dendritic Structure	Uniform, no center-line piping; direction radial dari fusion	Equiaxed grains WM	Pass
7	Phase Transformation	No brittle phases; consistent Mg ₂ Si precipitates Al 6061	HAZ softening minimal	Verifikasi

Sumber: AWS, 2025

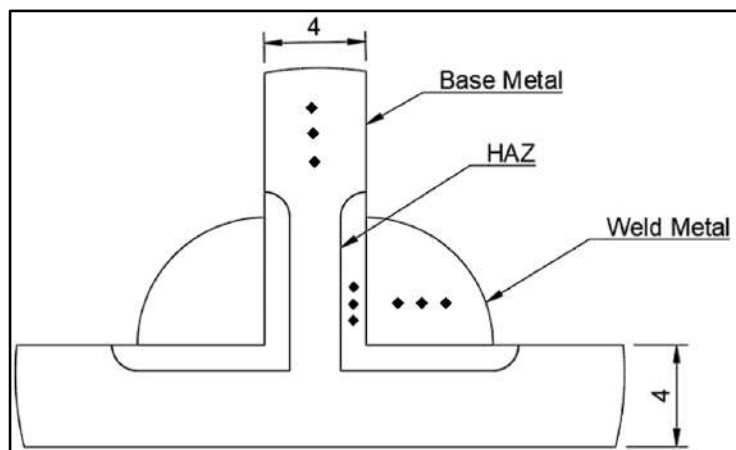
3.6.4 Pengujian kekerasan (*hardness*)

Hardness test merupakan salah satu bentuk pengujian merusak yang bertujuan untuk mengetahui kemampuan material untuk menerima beban tanpa mengalami deformasi plastis yaitu tahan terhadap indentasi/penetrasi, tahan terhadap penggoresan dan tahan terhadap aus. Pada pengujian ini menggunakan metode piramida intan dengan beban 5 kgf dan waktu pembebanan 12 detik. Berikut adalah Gambar 3.16 Alat Uji Kekerasan.



Gambar 3. 16 Alat Uji Kekerasan

Berikut adalah lokasi pengujian *hardness* dapat dilihat pada Gambar 3.17.



Gambar 3. 17 Lokasi Pengujian *Hardness*

Adapun langkah-langkah dalam pengujian kekerasan dengan menggunakan metode *vickers* adalah:

1. Material uji dihaluskan permukaannya yang akan diamati dengan menggunakan *Polishing machine* dengan grid 320.
2. Lakukan proses etsa menggunakan cairan campuran HF dan air pada material yang telah dipoles dengan grid 320.
3. Keringkan menggunakan *hair dryer*.
4. Nyalakan mesin uji *hardness*.
5. Lakukan verifikasi mesin uji menggunakan *standard block for hardness*.
6. Setting beban indentor sebesar 5 kgf.
7. Atur *dwell time* yang akan di gunakan yakni 12 detik.
8. Letakkan spesimen dan atur dengan tepat pada titik penetrasi yang telah ditentukan.
9. Tekan tombol *start* untuk memulai pembebanan.
10. Setelah 12 detik lakukan pengukuran diagonal 1 dan diagonal 2 pada indentasi.
11. Catat nilai kekerasan yang dihasilkan berdasarkan pengukuran diagonal 1 dan diagonal 2.
12. Lakukan prosedur nomor 8 sampai nomor 11 untuk masing-masing titik yang ditentukan.

Setelah dilakukan langkah-langkah tersebut, pada tahap akhir pengujian kekerasan harus memenuhi kriteria berdasarkan Tabel 3.6 berikut.

Tabel 3. 6 *Accpetance Criteria* Pengujian *Hardness Vickers*

<i>Acceptance Criteria Hardness Vickers Test</i>		
<i>Hardness Test Method</i>	<i>Hardness test locations for welding procedure qualification</i>	<i>Maximum acceptable Hardness</i>
Aluminium 6061	Base metal	95 – 107 HV
Filler E 5356	Weld metal	60 – 80 HV
HAZ	HAZ	55-70 HV

Sumber: pqr PTD

Untuk standart pengujian *hardness* dapat dilihat pada Tabel 3.7 berikut.

Tabel 3. 7 *Standard Hardness Scales and Test Forces*

Vickers scale	Knoop scale ^A	Test force (N)	Approximate Test force (kgf)	Approximate Test force (gf)
HV 0.001	HK 0.001	0.009807	0.001	1
HV 0.01	HK 0.01	0.09807	0.01	10
HV 0.015	HK 0.015	0.1471	0.015	15
HV 0.02	HK 0.02	0.1961	0.02	20
HV 0.025	HK 0.025	0.2451	0.025	25
HV 0.05	HK 0.05	0.4903	0.05	50
HV 0.1	HAK 0.1	0.9807	0.1	100
HV 0.2	HK 0.2	1.961	0.2	200
HV 0.3	HK 0.3	2.942	0.3	300
HV 0.5	HK 0.5	4.903	0.5	500
HV 1	HK 1	9.807	1	1000
HV 2	HK 2	19.61	2	2000
HV 3		29.41	3	
HV 5		49.03	5	
HV 10		98.07	10	
HV 20		196.1	20	
HV 30		294.1	30	
HV 50		490.3	50	
HV 100		980.7	100	

Sumber : ASTM

3.7 Analisis dan Pembahasan

Setelah semua data telah didapatkan dari proses pengelasan dan Pengujian yang telah dilakukan. Selanjutnya akan dilakukan analisa dan pembahasan, apakah dengan menerapkan variasi *Welding sequence* dan *Travel speed* dapat meminimalisir distorsi dan mempengaruhi sifat mekanik logam las.

3.7.1 ANOVA

Analisis statistik *Two-way ANOVA (Analysis of Variance* dua faktor) dilakukan untuk menguji pengaruh simultan dua faktor independen utama dalam penelitian, yaitu *welding sequence* (3 level: *alternating*

sides/AS, *working from center to ends/WCE*, *stitch intermittent welding/SIW*, ditambah *baseline* tanpa *treatment/NT*) dan *travel speed* (2 level: 95-100 mm/s dan 115-120 mm/s) terhadap respons dependen berupa nilai distorsi (mm), ukuran *grain* mikrostruktur (μm), dan kekerasan Vickers (HV). Metode ini memungkinkan deteksi efek utama (*main effect*) masing-masing faktor, efek interaksi (*interaction effect*) antar faktor, serta signifikansi statistik dengan tingkat kepercayaan $\alpha = 0,05$ (95%), sesuai rencana analisis pada BAB 1 dan tinjauan pustaka ANOVA.

Data input berasal dari pengujian pasca-visual (hanya spesimen lolos VT), dengan 2-3 replikasi per sel kombinasi (total 28 spesimen: 4 *sequence* $\times$ 2 *speed* $\times$ 3 replika minimum), menghasilkan desain faktorial 4 $\times$ 2 lengkap untuk asumsi *normalitas*, *homogenitas* varians, dan independensi data terpenuhi (uji *Shapiro-Wilk* $p > 0,05$, *Levene* $p > 0,05$).

Analisis dilakukan menggunakan software statistik seperti Minitab 22, SPSS 29, atau Microsoft Excel dengan Data Analysis ToolPak, melalui prosedur sistematis berikut:

1. Persiapan Data: Susun tabel data mentah dalam format columnar (kolom: *Sequence*, *Speed*, Distorsi/*Hardness*/Grain, Replikasi); hitung rata-rata dan standar deviasi per sel; buang outlier (>3 SD dari *mean*).
2. Uji Asumsi:
 - a. Normalitas: *Shapiro-Wilk* test pada residu ($p > 0,05$ = normal).
 - b. Homogenitas Varians: *Levene* test antar grup ($p > 0,05$ = homogen).
 - c. Independensi: Diharapkan dari desain eksperimen acak.
3. Pembangkitan Model ANOVA:
Di mana Y = respons (distorsi dll.), $i=1-4$ (sequence), $j=1-2$ (speed), $k=1-3$ (replikasi).
4. Perhitungan ANOVA Table:
 - a. Sumber Variasi: *Sequence* (DF=3), *Speed* (DF=1), *Interaction* (DF=3), Error (DF=20), Total (DF=27).
 - b. F-statistic: $MS_{\text{Factor}}/MS_{\text{Error}}$; $p\text{-value} < 0,05$ = signifikan.
5. Post-Hoc Test (jika efek utama signifikan): Tukey HSD untuk *multiple*

comparison antar *level sequence* (misal AS vs SIW); buat *interaction plot* (*line graph*) untuk visualisasi efek gabungan.

6. Interpretasi dan Rekomendasi:

- a. Efek main signifikan: Faktor dominan
- b. Interaksi signifikan: Kombinasi optimal
- c. Main plot/response surface untuk prediksi parameter industri PT X.

Analisis ini menghasilkan rekomendasi parameter optimal untuk minimalkan distorsi <3 mm (AWS, 2025), tingkatkan kekerasan HAZ, dan struktur mikro halus, siap aplikasikan pada *ducting* aluminium 6061.

3.8. Kesimpulan dan Saran

Setelah dilakukan analisis dan pembahasan, selanjutnya akan dilaksanakan penelitian guna mengembangkan penelitian sebelumnya. Peneliti menggunakan proses pengelasan GTAW dengan variasi *travel speed* 95-100 mm/menit dan 115-120 mm/menit guna menghasilkan *heat input* yang lebih stabil. Kemudian *welding sequence* dengan mengambil metode *alternating sides*, *working from center to ends*, dan *stich (intermittent)* dengan tujuan mengurangi kemungkinan terjadi distorsi.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil penelitian

Pada proses pengelasan ini dimulai dengan persiapan alat dan bahan hingga tahap pengelasan selesai. Tahap pengelasan tersebut dilakukan dengan beberapa proses pengujian dengan data-data sebagai berikut :

1. Material : Aluminium seri 6061
2. Bentuk : Plat dengan *thickness* 4 mm
3. Desain sambungan : *T-Joint*
4. Proses Las : GTAW
5. Logam pengisi : ER 5356
6. Diameter Elektroda : 2,4 mm

Untuk mempermudah dalam melakukan identifikasi hasil pengelasan, digunakan penamaan variasi yang dapat dilihat pada Tabel 4.1

Tabel 4. 1 Identifikasi Pengelasan

NO	KODE VARIASI	JENIS <i>TREATMENT</i>	VARIASI PENGELASAN
1	AA	Tanpa <i>Treatment</i>	<i>Travel speed</i> 95 - 100 mm/menit
2	A1	<i>Alternating sides</i> Lambat	<i>Travel speed</i> 95 - 100 mm/menit
3	A2	<i>Alternating sides</i> Cepat	<i>Travel speed</i> 115 - 120 mm/menit
4	B1	<i>Center to end</i> Lambat	<i>Travel speed</i> 95 - 100 mm/menit
5	B2	<i>Center to end</i> Cepat	<i>Travel speed</i> 115 - 120 mm/menit
6	C1	<i>Stich / Intermittent</i> Lambat	<i>Travel speed</i> 95 - 100 mm/menit
7	C2	<i>Stich / Intermittent</i> Cepat	<i>Travel speed</i> 115 - 120 mm/menit

Parameter-parameter pengelasan yang digunakan pada proses pengelasan yang mangacu pada jurnal dan telah dilakukan trial & eror untuk mendapatkan hasil pengelasan yang di inginkan. Adapun parameter yang sudah dicatat dapat dilihat pada Tabel 4.2 berikut ini

Tabel 4. 2 Parameter Pengelasan

<i>Test Piece</i>	<i>Pass</i>	<i>Process</i>	<i>Filler Metal</i>	<i>Polarity</i>	<i>Ampere</i>	<i>Voltage</i>	<i>Travel speed (mm/min)</i>	<i>Heat Input (Kj/mm)</i>
AA	1	GTAW	ER 5356	DCEP	138	11	100 – 110	0,94
A1	1	GTAW	ER 5356	DCEP	113	9	95 – 100	0,77
A2	1	GTAW	ER 5356	DCEP	108	8	115 – 120	0,44
B1	1	GTAW	ER 5356	DCEP	140	12	95 – 100	0,96
B2	1	GTAW	ER 5356	DCEP	129	10	115 – 120	0,52
C1	1	GTAW	ER 5356	DCEP	133	10	95 – 100	0,84
C2	1	GTAW	ER 5356	DCEP	110	9	115 – 120	0,50

Sumber : dokumen pribadi

Keterangan :

(AA) : Tanpa *Treatment*

(A1) : *Alternating sides* variasi *Travel speed* 95 – 100 mm/menit

(A2) : *Alternating sides* variasi *Travel speed* 115 – 120 mm/menit

(B1) : *Center to end* variasi *Travel speed* 95 – 100 mm/menit

(B2) : *Center to end* variasi *Travel speed* 115 – 120 mm/menit

(C1) : *Intermitten* variasi *Travel speed* 95 – 100 mm/menit

(C2) : *Intermitten* variasi *Travel speed* 115 – 120 mm/menit

Langkah berikutnya setelah data dan parameter aktual pengelasan terkumpul adalah dengan pengujian hasil las guna mengevaluasi nilai-nilai yang diperoleh. Adapun hasil pengujian yang dilakukan sebagai berikut:

Pengujian Visual merupakan pengujian pasca pengelasan yang bertujuan untuk mengetahui kualitas hasil pengelasan secara makroskopis. Pengujian ini dilakukan secara langsung dan dapat diamati oleh mata manusia dengan bantuan beberapa alat seperti *welding gauge*, senter, dan kaca pembesar.

Pada penelitian ini pengujian visual dilakukan pada pengelasan GTAW pada material Aluminium 6061 *thickness* 4 mm dengan variasi penggunaan *welding sequence* (*alternating side*, *center to end*, dan *intermittent welding*) serta variasi *travel speed* kelompok cepat (115 - 120 mm/menit) dan kelompok lambat (95 - 100 mm/menit). Pada pengujian visual ini mengacu standar untuk mengetahui kualitas hasil pengelasan dan batasan toleransi yang

diperbolehkan. Adapun standar yang digunakan pada pengujian visual penelitian ini menggunakan standar AWS D1.1:2025. Menurut AWS D1.1:2025 *Visual Inspection*, hasil pengelasan harus fusi, bebas dari retakan, bebas dari cacat permukaan yang kritis, serta penembusan tidak mengalami luapan panas berlebih atau terbakar (*burn through*). Hasil Visual dapat dilihat pada Tabel 4.3 sedangkan dokumentasi hasil inspeksi visual ditunjukkan pada Gambar 4.1 sebagai berikut:

Tabel 4. 3 Hasil Uji Visual

VISUAL REPORT							
Stamp	Gap	Jenis Kampuh	Result				
			Crack	Incomplete Fusion	Undercut	Porosity	Result
AA	-	<i>T Joint</i>	-	-	-	-	<i>Accepted</i>
A1	-	<i>T Joint</i>	-	-	-	-	<i>Accepted</i>
A2	-	<i>T Joint</i>	-	-	-	-	<i>Accepted</i>
B1	-	<i>T Joint</i>	-	-	-	-	<i>Accepted</i>
B2	-	<i>T Joint</i>	-	-	-	-	<i>Accepted</i>
C1	-	<i>T Joint</i>	-	-	-	-	<i>Accepted</i>
C2	-	<i>T Joint</i>	-	-	-	-	<i>Accepted</i>

Keterangan :

(AA) : Tanpa *Treatment*

(A1) : *Alternating sides* variasi *Travel speed* 95 – 100 mm/menit

(A2) : *Alternating sides* variasi *Travel speed* 115 – 120 mm/menit

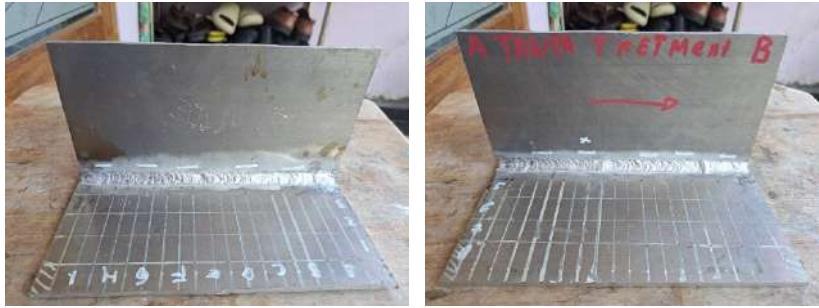
(B1) : *Center to end* variasi *Travel speed* 95 – 100 mm/menit

(B2) : *Center to end* variasi *Travel speed* 115 – 120 mm/menit

(C1) : *Intermitten* variasi *Travel speed* 95 – 100 mm/menit

(C2) : *Intermitten* variasi *Travel speed* 115 – 120 mm/menit

Dokumentasi hasil inspeksi visual ditambahkan sebagai bukti pendukung terhadap hasil uji visual pengelasan pada setiap variasi. Dokumentasi tersebut disusun berdasarkan penamaan spesimen dan dapat dilihat pada Gambar 4.1 di bawah ini.



(AA)



(A1)



(A2)



(B1)



(B2)



(C1)



(C2)

Gambar 4. 1 Visual Report

Keterangan :

(AA) : Tanpa *Treatment*

(A1) : *Alternating sides* variasi *Travel speed* 95 – 100 mm/menit

(A2) : *Alternating sides* variasi *Travel speed* 115 – 120 mm/menit

(B1) : *Center to end* variasi *Travel speed* 95 – 100 mm/menit

(B2) : *Center to end* variasi *Travel speed* 115 – 120 mm/menit

(C1) : *Intermitten* variasi *Travel speed* 95 – 100 mm/menit

(C2) : *Intermitten* variasi *Travel speed* 115 – 120 mm/menit

Kriteria keberterimaan (*acceptance criteria*) pada standar AWS digunakan sebagai acuan untuk menentukan kelayakan hasil pengelasan berdasarkan kondisi permukaan sambungan las. Beberapa persyaratan yang menjadi perhatian dalam pengujian visual antara lain tidak terdapat *crack* pada *weld face*, kedalaman *undercut* tidak melebihi 1 mm, tidak ditemukan indikasi *incomplete fusion* (IF) dan *incomplete penetration* (IP), serta tinggi *weld reinforcement* tidak melebihi 3 mm. Berdasarkan hasil pengujian visual yang ditampilkan pada Tabel 4.1, seluruh *coupon test* hasil pengelasan kombinasi GTAW dinyatakan memenuhi kriteria keberterimaan tersebut. Dengan demikian, seluruh spesimen dapat diterima karena tidak menunjukkan diskontinuitas visual yang melebihi batas standar AWS.

4.1.1 Hasil variasi *welding sequence* dan *travel speed* terhadap besarnya distorsi

Proses pengukuran distorsi pelat setelah proses pengelasan bertujuan untuk mengetahui hasil perbandingan setiap nilai distorsi spesimen yang berbeda karena memiliki beberapa variasi pengelasan yang berbeda-beda. Pengujian distorsi pada penelitian dilakukan guna mengetahui perbandingan pengelasan tanpa *treatment* dengan variasi *pengelasan welding sequence (alternating side, center to end, dan intermittent welding)*, apakah penerapan variasi tersebut dapat lebih optimal dalam mengurangi adanya distorsi yang disebabkan oleh akumulasi *heat input* yang berlebih.

Pengukuran nilai distorsi dalam penelitian ini dilakukan menggunakan *dial gauge* yang dilakukan sebelum pengelasan untuk memastikan kerataan awal hasil *tack-weld* dan sesudah proses pengelasan untuk menghasilkan kontur aktual distorsi yang selanjutnya akan disimulasikan menggunakan *Software Excel* dengan *3D surface diagram*. Data hasil pengukuran tersebut dijelaskan secara detail pada Tabel 4.4 hingga Tabel 4.10 beserta dengan diagram *surface* berikut :

Tabel pengujian tanpa *treatment*

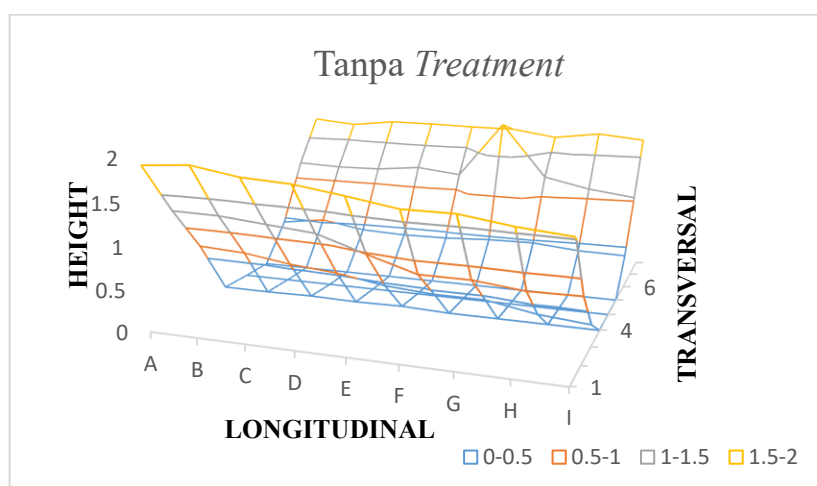
Hasil pengujian tanpa *treatment* dapat dilihat pada Tabel 4.4 dan Diagram *surface* berikut.

Tabel 4. 4 Tanpa *Tretmen travel speed* 100-110 mm/menit

Kode Garis	Titik Sample									Rata-Rata (mm)
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	1,91	1,95	1,86	1,83	1,75	1,66	1,66	1,58	1,53	1,75
2	1,27	1,26	1,21	1,16	0,98	0,81	0,81	0,75	0,76	1,00
3	0,7	0,67	0,59	0,54	0,45	0,41	0,41	0,31	0,26	0,48
4	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0	0	0	0	0,01
WELD METAL										
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
6	0,45	0,53	0,44	0,42	0,43	0,46	0,47	0,42	0,41	0,45
7	1,19	1,17	1,18	1,24	1,18	1,9	1,23	1,11	1,04	1,25
8	1,74	1,69	1,76	1,76	1,75	1,75	1,67	1,75	1,7	1,73
Nilai total rata-rata distorsi transversal										6,67

Sumber: dokumen pribadi

Hasil grafik 3D yang dibuat menggunakan *Software* Excel dapat dilihat pada Gambar 4.2 sebagai berikut:



Gambar 4. 2 3D Diagram Tanpa *Treatment travel speed* 100-110 mm/menit

Tabel 4.4 dan Gambar 4.2 merupakan hasil data dari pengukuran distorsi spesimen dengan pengelasan GTAW variasi Tanpa *Treatment* (*Continuous Straight Welding*). Proses pengukuran distorsi dilakukan menggunakan dial indikator dengan titik sejumlah 72 titik diukur pada *fixed point* (koordinat melintang A sampai I dan membujur 1 sampai 8). Pada Tabel yang tertera di atas diketahui nilai distorsi *transversal* paling maksimal sebesar 1,95 mm yang terletak pada titik koordinat B1.

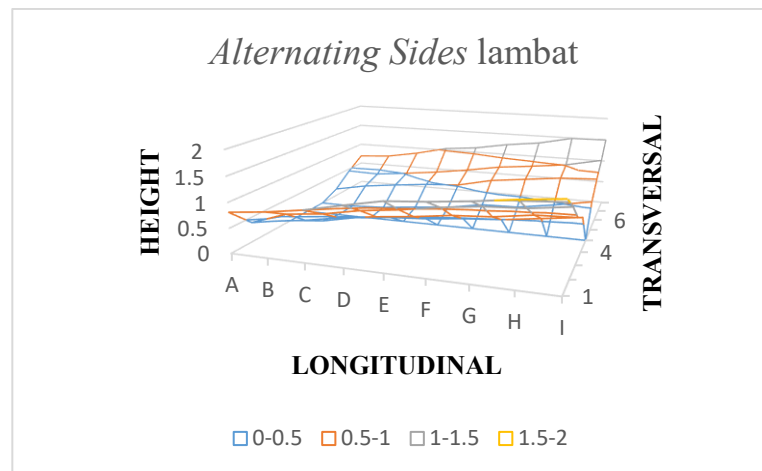
Hasil pengujian *Alternating side* dengan *travel speed* 95 – 100 mm/menit dapat dilihat pada Tabel 4.5 dan Diagram *surface* berikut.

Tabel 4. 5 *Alternating side* Metode *Travel speed* 95 – 100 mm/menit

Kode Garis	Titik Sample									Rata-Rata (mm)
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	0,81	0,89	1	1,16	1,31	1,37	1,45	1,55	1,63	1,24
2	0,39	0,64	0,72	0,86	0,95	1,07	1,16	1,2	1,3	0,92
3	0,2	0,3	0,43	0,53	0,61	0,71	0,76	0,87	0,9	0,59
4	0	0,07	0,22	0,3	0,35	0,43	0,49	0,59	0,69	0,35
WELD METAL										
5	0	0	0,04	0,12	0,19	0,32	0,34	0,46	0,6	0,23
6	0,16	0,3	0,39	0,47	0,52	0,69	0,78	0,87	0,91	0,57
7	0,45	0,43	0,51	0,6	0,71	0,84	0,92	1,01	1,17	0,74
8	0,69	0,74	0,87	1,04	1,11	1,24	1,33	1,49	1,5	1,11
Nilai total rata-rata distorsi transversal										5,75

Sumber: dokumen pribadi

Hasil grafik 3D yang dibuat menggunakan *Software* Excel dapat dilihat pada Gambar 4.3 sebagai berikut:



Gambar 4. 3 3D Diagram *Alternating sides* Lambat

Tabel 4.5 dan Gambar 4.3 merupakan hasil data dari pengukuran distorsi spesimen dengan pengelasan GTAW variasi *Alternating side* Metode *Travel speed* Lambat (95 – 100 mm/menit). Proses pengukuran distorsi dilakukan menggunakan dial indikator dengan titik sejumlah 72 titik diukur pada *fixed point* (koordinat melintang A sampai I dan membujur 1 sampai 8). Pada tabel data yang tertera di atas diketahui nilai distorsi *transversal* paling maksimal sebesar 1,63 mm yang terletak pada titik koordinat I1.

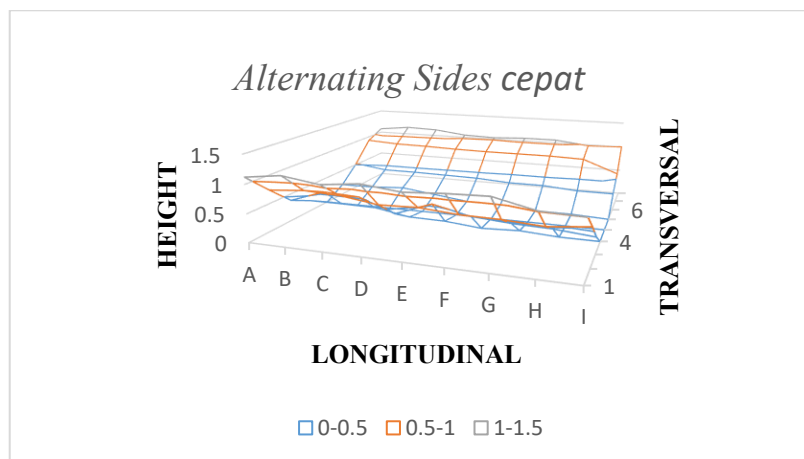
Hasil pengujian *Alternating side* dengan *travel speed* 115 – 120 mm/menit dapat dilihat pada Tabel 4.6 dan Diagram *surface* berikut.

Tabel 4. 6 *Alternating side* Metode *Travel speed* 115 – 120 mm/menit

Kode Garis	Titik Sample									Rata-Rata (mm)
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	1,12	1,2	1,11	1,18	1,11	1,15	1,17	1,02	1	1,12
2	0,74	0,79	0,76	0,67	0,69	0,64	0,63	0,59	0,66	0,69
3	0,38	0,6	0,57	0,33	0,57	0,42	0,37	0,35	0,29	0,43
4	0,2	0,2	0,19	0,08	0,07	0,01	0,04	0	0	0,09
WELD METAL										
5	0,2	0,21	0,25	0,17	0,09	0,09	0,03	0,03	0	0,12
6	0,52	0,43	0,43	0,42	0,41	0,37	37	0,32	0,32	4,47
7	0,92	0,88	0,87	0,85	0,84	0,84	0,84	0,82	0,57	0,83
8	1,08	1,15	1,13	1,05	1,03	1,06	1,06	0,98	1	1,06
Nilai total rata-rata distorsi transversal										8,80

Sumber: dokumen pribadi

Hasil grafik 3D yang dibuat menggunakan *Software* Excel dapat dilihat pada Gambar 4.4 sebagai berikut:



Gambar 4. 4 3D Diagram *Alternating sides* Cepat

Tabel 4.6 dan Gambar 4.4 merupakan hasil data dari pengukuran distorsi spesimen dengan pengelasan GTAW variasi *Alternating side* Metode *Travel speed* Cepat (115 – 120 mm/menit). Proses pengukuran distorsi dilakukan menggunakan dial indikator dengan titik sejumlah 72 titik diukur pada *fixed point* (koordinat melintang A sampai I dan membujur 1 sampai 8). Pada tabel data yang tertera di atas diketahui nilai distorsi *transversal* paling maksimal sebesar 1,20 mm yang terletak pada titik koordinat B1.

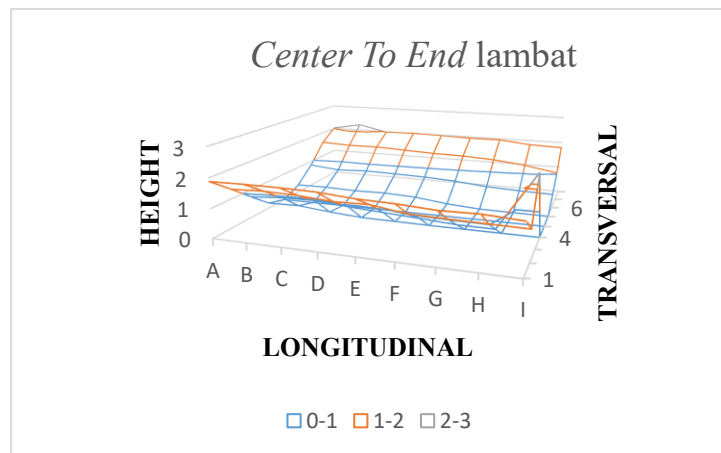
Hasil pengujian *Center to end* dengan *travel speed* 95 – 100 mm/menit dapat dilihat pada Tabel 4.7 dan Diagram *surface* berikut.

Tabel 4. 7 *Center to end Travel speed* 95 – 100 mm/menit

Kode Garis	Titik Sample									Rata-Rata (mm)
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	1,88	1,9	1,9	1,88	1,79	1,76	1,69	1,71	1,64	1,79
2	1,33	1,37	1,34	1,26	1,28	1,11	1,08	1,06	1,04	1,21
3	0,75	0,83	0,85	0,75	0,68	0,61	0,53	0,52	2,42	0,88
4	0,19	0,21	0,1	0,02	0,01	0	0	0	0	0,06
WELD METAL										
5	0,29	0,3	0,27	0,29	0,24	0,1	0,02	0,01	0	0,17
6	0,85	0,74	0,79	0,77	0,74	0,68	0,57	0,52	0,49	0,68
7	1,59	1,54	1,55	1,5	1,45	1,43	1,37	1,24	1,03	1,41
8	2,02	2,23	1,98	2	1,98	1,94	1,95	1,83	1,79	1,97
Nilai total rata-rata distorsi transversal										8,18

Sumber: dokumen pribadi

Hasil grafik 3D yang dibuat menggunakan *Software* Excel dapat dilihat pada Gambar 4.5 sebagai berikut:



Gambar 4. 5 3D Diagram *Center to end* lambat

Tabel 4.7 dan Gambar 4.5 merupakan hasil data dari pengukuran distorsi spesimen dengan pengelasan GTAW variasi *Center to end Travel speed* Lambat (95 – 100 mm/menit). Proses pengukuran distorsi dilakukan menggunakan *dial indicator* dengan titik sejumlah 72 titik diukur pada *fixed point* (koordinat melintang A sampai I dan membujur 1 sampai 8). Pada tabel data yang tertera di atas diketahui nilai distorsi *transversal* paling maksimal sebesar 2,42 mm yang terletak pada titik koordinat I3.

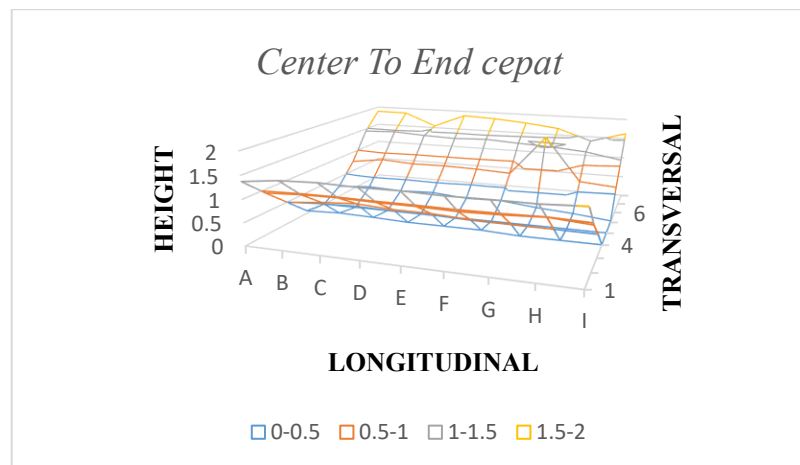
Hasil pengujian *Center to end* dengan *travel speed* 115 – 120 mm/menit dapat dilihat pada Tabel 4.8 dan Diagram *surface* berikut.

Tabel 4. 8 *Center to end Travel speed* 115 – 120 mm/menit

Kode Garis	Titik Sample									Rata-Rata (mm)
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	1,37	1,46	1,49	1,47	1,48	1,46	1,47	1,47	1,51	1,46
2	0,92	0,96	0,97	0,95	0,95	0,93	0,95	0,99	0,93	0,95
3	0,49	0,57	0,62	0,57	0,57	0,52	0,51	0,5	0,49	0,54
4	0,06	0,09	0,07	0,04	0,04	0,04	0	0	0	0,04
WELD METAL										
5	0,26	0,32	0,29	0,32	0,25	0,27	0,18	0,12	0,03	0,23
6	0,75	0,86	0,81	0,82	0,8	0,76	1,72	0,69	0,62	0,87
7	1,44	1,47	1,42	1,39	1,42	1,37	1,33	1,26	1,11	1,36
8	1,88	1,87	1,55	1,88	1,84	1,77	1,67	1,39	1,63	1,72
Nilai total rata-rata distorsi transversal										7,16

Sumber: dokumen pribadi

Hasil grafik 3D yang dibuat menggunakan *Software* Excel dapat dilihat pada Gambar 4.6 sebagai berikut:



Gambar 4. 6 3D Diagram *Center to end* cepat

Tabel 4.8 dan Gambar 4.6 merupakan hasil data dari pengukuran distorsi spesimen dengan pengelasan GTAW variasi *Center to end Travel speed* Cepat (115 – 120 mm/menit). Proses pengukuran distorsi dilakukan menggunakan dial indikator dengan titik sejumlah 72 titik diukur pada *fixed point* (koordinat melintang A sampai I dan membujur 1 sampai 8). Pada tabel data yang tertera di atas diketahui nilai distorsi *transversal* paling maksimal sebesar 1,88 mm yang terletak pada titik koordinat A8 dan D8.

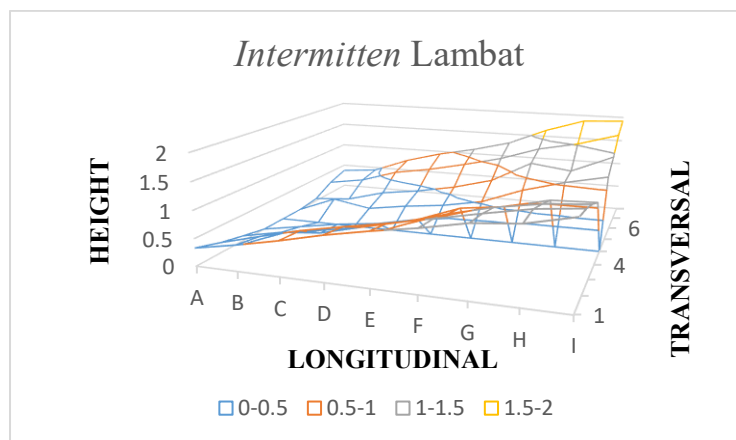
Hasil pengujian *Intermitten* dengan *travel speed* 95 – 100 mm/menit dapat dilihat pada Tabel 4.9 dan Diagram *surface* berikut.

Tabel 4. 9 *Intermitten Travel speed* 95 – 100 mm/menit

Kode Garis	Titik Sample									Rata-Rata (mm)
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	0,33	0,47	0,63	0,81	0,96	1,09	1,25	1,32	1,5	0,93
2	0,19	0,39	0,58	0,73	0,87	1,03	1,19	1,34	1,42	0,86
3	0,09	0,24	0,31	0,5	0,68	0,9	1,09	1,22	1,29	0,70
4	0	0,13	0,26	0,35	0,51	0,8	0,9	1,09	1,12	0,57
WELD METAL										
5	0	0,3	0,17	0,29	0,38	0,53	0,83	1,05	1,22	0,53
6	0,05	0,11	0,32	0,43	0,58	0,79	1,21	1,11	1,45	0,67
7	0,25	0,37	0,61	0,74	0,91	1,1	1,36	1,52	1,75	0,96
8	0,37	0,44	0,73	0,94	1,1	1,3	1,63	1,88	1,92	1,15
Nilai total rata-rata distorsi transversal										6,37

Sumber: dokumen pribadi

Hasil grafik 3D yang dibuat menggunakan *Software* Excel dapat dilihat pada Gambar 4.7 sebagai berikut:



Gambar 4. 7 3D Diagram *Intermitten Lambat*

Tabel 4.9 dan Gambar 4.7 merupakan hasil data dari pengukuran distorsi spesimen dengan pengelasan GTAW variasi *Intermitten Travel speed* Lambat (95 – 100 mm/menit). Proses pengukuran distorsi dilakukan menggunakan dial indikator dengan titik sejumlah 72 titik diukur pada *fixed point* (koordinat melintang A sampai I dan membujur 1 sampai 8). Pada tabel data yang tertera di atas diketahui nilai distorsi *transversal* paling maksimal sebesar 1,92 mm yang terletak pada titik koordinat I8.

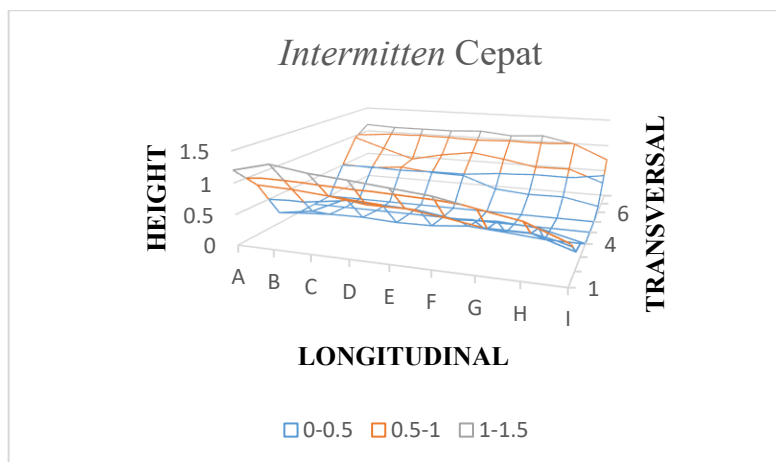
Hasil pengujian *Intermitten* dengan *travel speed* 115 – 120 mm/menit dapat dilihat pada Tabel 4.10 dan Diagram *surface* berikut.

Tabel 4. 10 *Intermiten Travel speed* 115 – 120 mm/menit

Kode Garis	Titik Sample									Rata-Rata (mm)
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	1,2	1,34	1,25	1,2	1,14	1,08	0,96	0,85	0,61	1,07
2	0,82	0,8	0,75	0,67	0,67	0,59	0,49	0,49	0,29	0,62
3	0,18	0,27	0,54	0,5	0,47	0,38	0,42	0,38	0,23	0,37
4	0	0,04	0,05	0,02	0,03	0,09	0,05	0	0	0,03
WELD METAL										
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
6	0,51	0,49	0,55	0,49	0,48	0,27	0,22	0,23	0,11	0,37
7	0,96	0,77	0,59	0,72	0,81	0,72	0,61	0,62	0,4	0,69
8	1,14	1,11	1,11	1,11	1,14	1,08	1,12	0,99	0,72	1,06
Nilai total rata-rata distorsi transversal										4,21

Sumber: dokumen pribadi

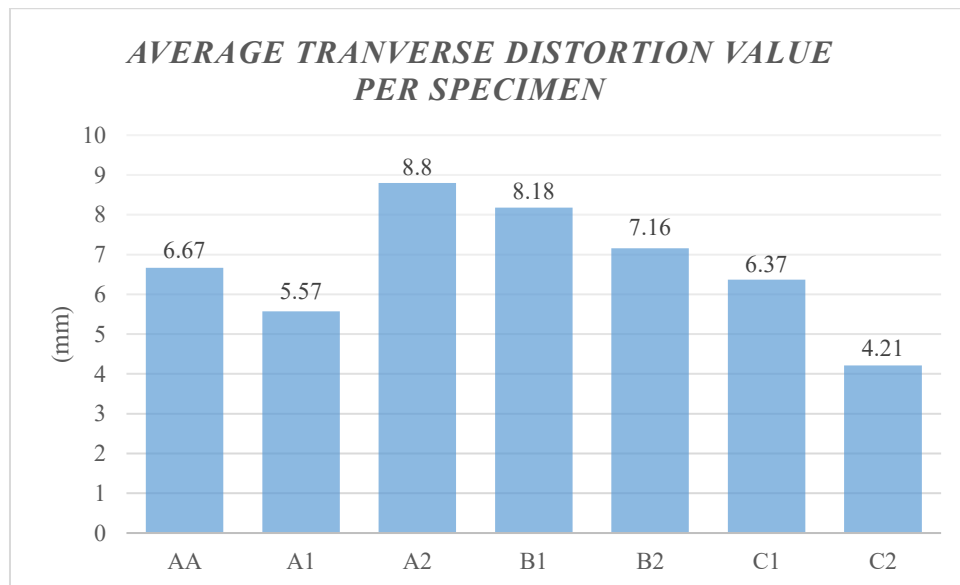
Hasil grafik 3D yang dibuat menggunakan *Software* Excel dapat dilihat pada Gambar 4.8 sebagai berikut:



Gambar 4. 8 3D Diagram *Intermitten* Cepat

Tabel 4.10 dan Gambar 4.8 merupakan hasil data dari pengukuran distorsi spesimen dengan pengelasan GTAW variasi *Intermitten Travel speed* Lambat (115 – 120 mm/mnit). Proses pengukuran distorsi dilakukan menggunakan dial indikator dengan titik sejumlah 72 titik diukur pada *fixed point* (koordinat melintang A sampai I dan membujur 1 sampai 8). Pada tabel data yang tertera di atas diketahui nilai distorsi *transversal* paling maksimal sebesar 1,34 mm yang terletak pada titik koordinat B1. Dari hasil keseluruhan uji distorsi maka dapat disajikan dengan chart yang tertera pada Gambar 4.9

untuk menampilkan perbandingan rata-rata kekuatan tarik dari setiap variasi berdasarkan *Wwlding Squence* dan *Travel Speed* berikut :

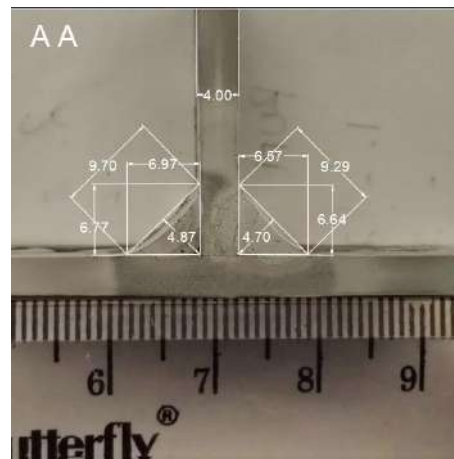


Gambar 4. 9 Grafik Rata Rata Hasil Uji Distorsi

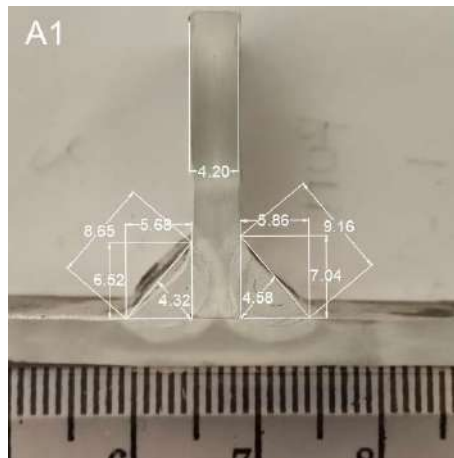
4.1.2 Hasil variasi *welding sequence* dan *travel speed* terhadap struktur makro dan mikro

A. Analisis Pengujian Makro

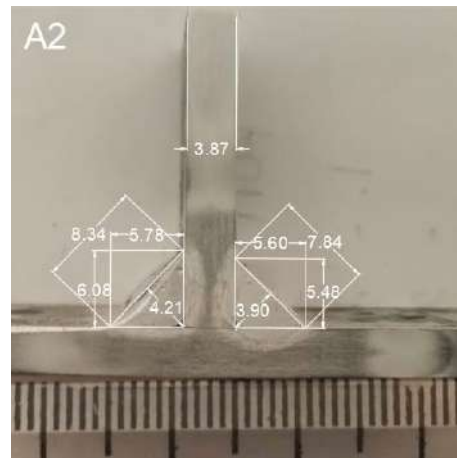
Pengujian Makro dilakukan untuk mengetahui kualitas struktur makro hasil pengelasan. Pengamatan dilakukan dengan cara menggunakan cairan etsa khusus aluminium (*reagen Tucker/Poulton*) yang terdiri dari campuran 3mL HNO₃ + 3 mL HCL + 3 mL HF + 90 mL air sesuai dengan standart ASTM E340-15 yang di oleskan pada permukaan specimen agar dapat dilakukan identifikasi hasil kedalaman penetrasi disetiap variasi yang dilakukan. Cairan etsa ini digunakan untuk memunculkan batas fusi dan mengetahui profil penampang logam las pada sambungan pengelasan *T-Joint*. Selain itu juga untuk mempermudah dalam analisa foto makro etsa pada daerah *weld metal*, *base metal*, dan daerah *Heat Affected Zone* (HAZ). Dari beberapa variasi yang diteliti maka setelah dilakukan makro etsa dapat dilihat pada Gambar 4.9 di bawah ini:



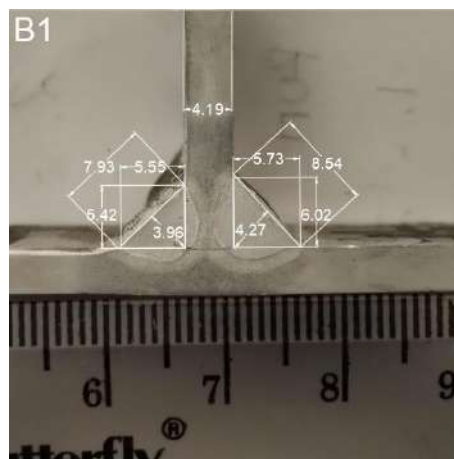
(AA)



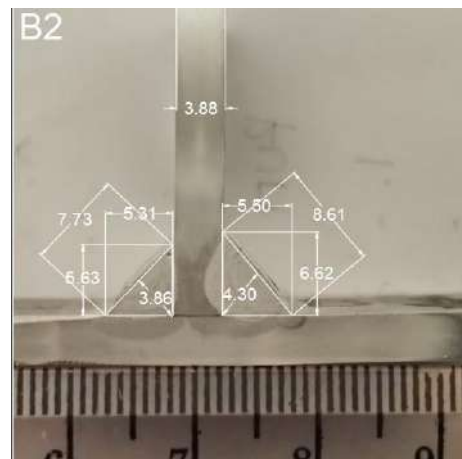
(A1)



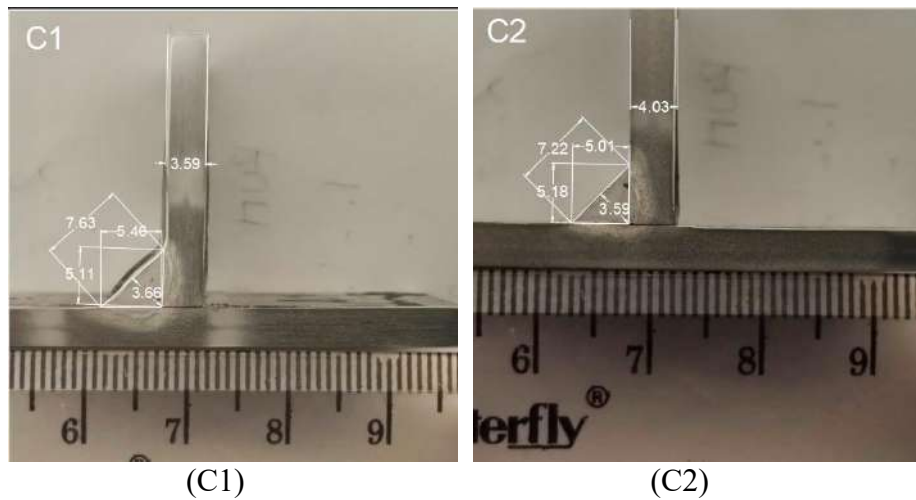
(A2)



(B1)



(B2)



Gambar 4. 10 Hasil Pengujian Makro *Leg Length* dan *Throat*

Keterangan :

(AA) : Tanpa *Treatment*

(A1) : *Alternating sides* variasi *Travel speed* 95 – 100 mm/menit

(A2) : *Alternating sides* variasi *Travel speed* 115 – 120 mm/menit

(B1) : *Center to end* variasi *Travel speed* 95 – 100 mm/menit

(B2) : *Center to end* variasi *Travel speed* 115 – 120 mm/menit

(C1) : *Intermitten* variasi *Travel speed* 95 – 100 mm/menit

(C2) : *Intermitten* variasi *Travel speed* 115 – 120 mm/menit

Pengujian makro dilakukan dengan menghaluskan salah satu permukaan potongan melintang spesimen menggunakan kertas amplas secara bertahap, dimulai dari grit kasar hingga grit halus, sampai permukaan spesimen cukup rata dan halus untuk dilakukan pengamatan makro. Setelah proses pengamplasan, permukaan spesimen dilakukan proses etsa agar batas antara weld metal, HAZ, dan base metal dapat terlihat dengan lebih jelas. Berdasarkan hasil pengujian, seluruh spesimen menunjukkan kualitas hasil pengelasan yang baik dan tidak ditemukan adanya cacat pengelasan (*welding imperfection*) pada penampang makro. Adapun panjang *leg length* dan *throat* pada masing-masing spesimen ditunjukkan pada Tabel 4.11 dan Tabel 4.12 sebagai berikut.

Tabel 4. 11 Panjang *Leg Length*

Specimen	Leg Length					
	Leg Length Kiri		Average Kiri (mm)	Leg Length Kanan		Average Kanan (mm)
	LL Vertikal (mm)	LL Horizontal (mm)		LL Vertikal (mm)	LL Horizontal (mm)	
AA	6,77	6,97	6,87	6,64	6,57	6,605
A1	6,52	5,68	6,1	7,04	5,86	6,45
A2	6,08	5,78	5,93	5,48	5,6	5,54
B1	5,42	5,55	5,49	6,02	5,73	5,88
B2	5,63	5,31	5,47	6,62	5,5	6,06
C1	5,11	5,46	5,285	-	-	-
C2	5,18	5,01	5,095	-	-	-

Keterangan :

(AA) : Tanpa *Treatment*

(A1) : *Alternating sides* variasi *Travel speed* 95 – 100 mm/menit

(A2) : *Alternating sides* variasi *Travel speed* 115 – 120 mm/menit

(B1) : *Center to end* variasi *Travel speed* 95 – 100 mm/menit

(B2) : *Center to end* variasi *Travel speed* 115 – 120 mm/menit

(C1) : *Intermitten* variasi *Travel speed* 95 – 100 mm/menit

(C2) : *Intermitten* variasi *Travel speed* 115 – 120 mm/menit

Berdasarkan hasil pengukuran pada Tabel 4.11, spesimen tanpa perlakuan (AA) menghasilkan nilai leg length rata-rata tertinggi di antara seluruh spesimen, yaitu 6,87 mm pada sisi kiri dan 6,605 mm pada sisi kanan. Nilai ini secara konsisten lebih besar dibandingkan spesimen yang menerapkan variasi welding sequence, yang mengindikasikan bahwa pengelasan tanpa pembagian segmen menghasilkan deposit logam las yang lebih besar akibat masukan panas yang terkonsentrasi dan berlangsung kontinu tanpa jeda.

Pada spesimen dengan variasi welding sequence, peningkatan *travel speed* dari kecepatan rendah (95–100 mm/menit) ke kecepatan tinggi (115–120 mm/menit) secara umum cenderung menurunkan nilai leg length. Hal ini terlihat pada metode *Alternating side* (A1 sebesar 6,1 mm menjadi A2 sebesar 5,93 mm pada sisi kiri) dan metode *Intermitten* (C1 sebesar 5,285 mm menjadi C2 sebesar 5,095 mm). Sementara itu, pada metode *Center to end* (B1 dan B2) nilai leg length relatif stabil, bahkan

sedikit meningkat pada sisi kanan (5,88 mm menjadi 6,06 mm), yang menunjukkan bahwa pengaruh *travel speed* terhadap ukuran leg length pada metode ini tidak sedominan pada metode lainnya. Nilai leg length terkecil secara keseluruhan diperoleh pada spesimen C2 (metode *Intermitten* kecepatan tinggi), yang hanya terukur pada satu sisi mengingat konfigurasi pengelasan pada metode tersebut hanya dilakukan pada satu jalur sambungan. Kondisi ini mengindikasikan bahwa kombinasi metode segmental berselang dengan *travel speed* tinggi menghasilkan volume deposit logam las paling minim akibat waktu pemanasan yang terputus-putus pada tiap segmen.

Tabel 4. 12 Panjang *Throat*

SPESEMEN	Throat Kiri (mm)	Throat Kanan (mm)
AA	4,87	4,7
A1	4,32	4,58
A2	4,21	3,9
B1	3,96	4,27
B2	3,86	4,3
C1	3,66	-
C2	3,59	-

Keterangan :

(AA) : Tanpa *Treatment*

(A1) : *Alternating sides* variasi *Travel speed* 95 – 100 mm/menit

(A2) : *Alternating sides* variasi *Travel speed* 115 – 120 mm/menit

(B1) : *Center to end* variasi *Travel speed* 95 – 100 mm/menit

(B2) : *Center to end* variasi *Travel speed* 115 – 120 mm/menit

(C1) : *Intermitten* variasi *Travel speed* 95 – 100 mm/menit

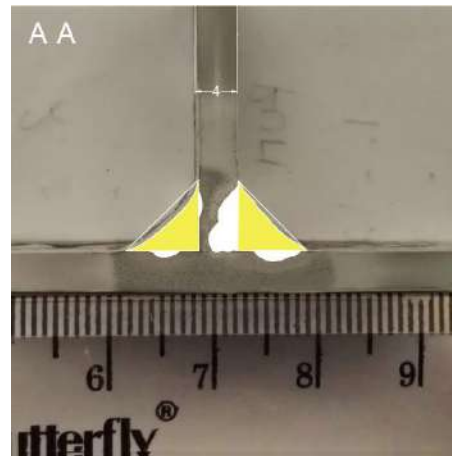
(C2) : *Intermitten* variasi *Travel speed* 115 – 120 mm/menit

Hasil pengukuran throat pada Tabel 4.12 di atas menunjukkan kecenderungan yang sejalan dengan hasil leg length. Spesimen AA kembali mencatatkan nilai throat tertinggi, yaitu 4,87 mm pada sisi kiri dan 4,7 mm pada sisi kanan, sedangkan nilai throat terendah diperoleh pada spesimen C2 sebesar 3,59 mm.

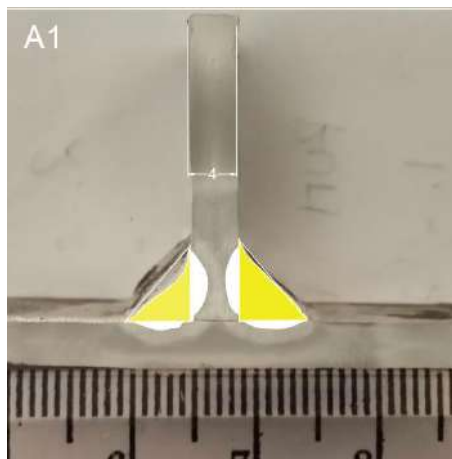
Pada seluruh variasi welding sequence, peningkatan *travel speed* secara konsisten menurunkan nilai throat pada sisi kiri, yaitu pada metode

Alternating side (A1 4,32 mm menjadi A2 4,21 mm), *Center to end* (B1 3,96 mm menjadi B2 3,86 mm), dan *Intermitten* (C1 3,66 mm menjadi C2 3,59 mm). Kecenderungan serupa juga terlihat pada sisi kanan metode *Alternating side* (A1 4,58 mm menjadi A2 3,9 mm), meskipun pada metode *Center to end* nilai throat sisi kanan sedikit meningkat (B1 4,27 mm menjadi B2 4,3 mm). Secara umum, penurunan nilai throat seiring naiknya *travel speed* disebabkan oleh berkurangnya masukan panas (heat input) per satuan panjang pengelasan, sehingga volume logam las yang mencair dan mengisi kampuh sambungan menjadi lebih sedikit. Hal ini menegaskan bahwa *travel speed* memiliki pengaruh yang lebih dominan dibandingkan *welding sequence* terhadap dimensi throat hasil pengelasan.

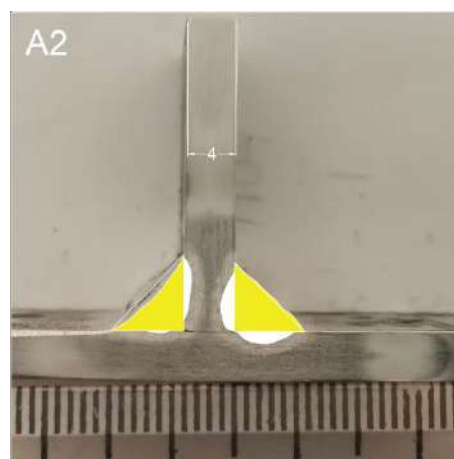
Setelah melakukan pengamatan makro pada panjang *leg length* dan *throat*, selanjutnya mencari presentase dari delusi pada hasil pengujian makro. Hasil pengamatan delusi pada pengujian makro dapat dilihat pada Gambar 4.11 berikut ini.



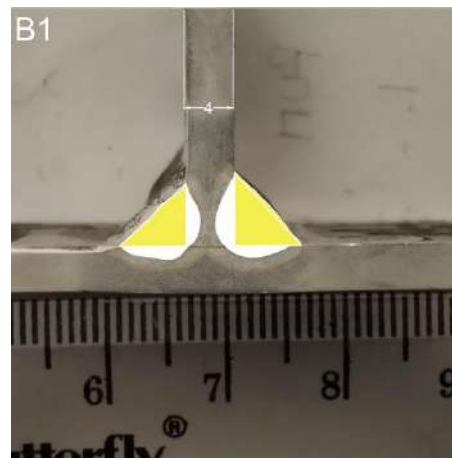
(AA)



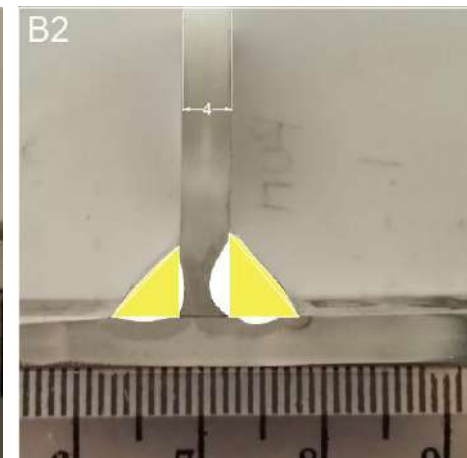
(A1)



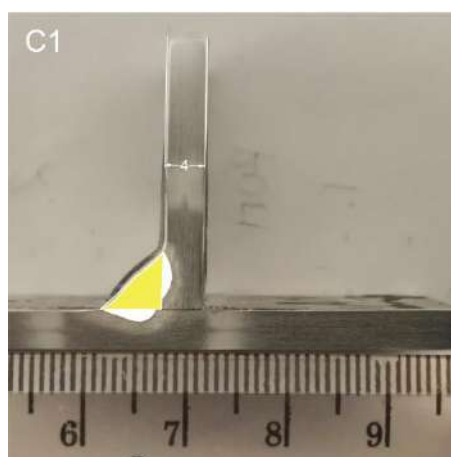
(A2)



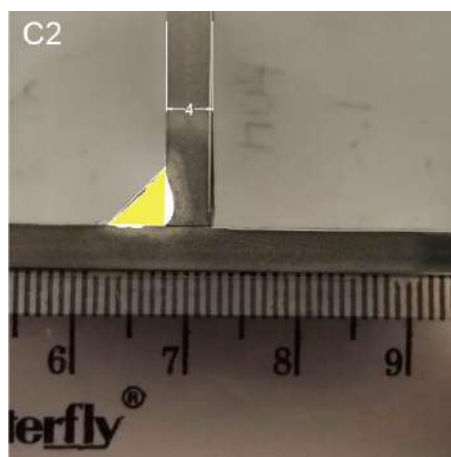
(B1)



(B2)



(C1)



(C2)

Gambar 4. 11 Luas Delusi

Keterangan :

(AA) : Tanpa *Treatment*

(A1) : *Alternating sides* variasi *Travel speed* 95 – 100 mm/menit

(A2) : *Alternating sides* variasi *Travel speed* 115 – 120 mm/menit

(B1) : *Center to end* variasi *Travel speed* 95 – 100 mm/menit

(B2) : *Center to end* variasi *Travel speed* 115 – 120 mm/menit

(C1) : *Intermitten* variasi *Travel speed* 95 – 100 mm/menit

(C2) : *Intermitten* variasi *Travel speed* 115 – 120 mm/menit

Adapun presentase delusi pada masing-masing spesimen ditunjukkan pada Tabel 4.13 sebagai berikut.

Tabel 4. 13 Presentase Delusi

SPESIMEN	Delusi Kiri			Delusi Kanan		
	$A_{BM} (mm^2)$	A_{Total}	Delusi %	$A_{BM} (mm^2)$	A_{Total}	Delusi %
AA	1,64	18,1	8%	14,52	33,04	31%
A1	7,84	20,76	27%	7,17	26,89	21%
A2	2,276	16,036	12%	6,666	22,726	23%
B1	8,53	23,87	26%	10,21	29,75	26%
B2	1,76	17,99	9%	6,882	27,422	20%
C1	18,31	31,41	37%	-	-	-
C2	2,54	14,33	15%	-	-	-

Keterangan :

(AA) : Tanpa *Treatment*

(A1) : *Alternating sides* variasi *Travel speed* 95 – 100 mm/menit

(A2) : *Alternating sides* variasi *Travel speed* 115 – 120 mm/menit

(B1) : *Center to end* variasi *Travel speed* 95 – 100 mm/menit

(B2) : *Center to end* variasi *Travel speed* 115 – 120 mm/menit

(C1) : *Intermitten* variasi *Travel speed* 95 – 100 mm/menit

(C2) : *Intermitten* variasi *Travel speed* 115 – 120 mm/menit

Berdasarkan hasil pengukuran presentase delusi pada Tabel 4.13, spesimen C1 (metode *Intermitten* kecepatan rendah) mencatatkan presentase delusi tertinggi, yaitu sebesar 37% pada sisi kiri, sedangkan presentase delusi terendah diperoleh pada spesimen B2 (metode *Center to end* kecepatan tinggi) sebesar 9% pada sisi kiri. Spesimen AA menunjukkan presentase delusi sebesar 14% pada sisi kiri dan 17% pada

sisi kanan, sehingga distribusi delusi pada spesimen ini relatif seimbang antara kedua sisi meskipun proses pengelasan berlangsung kontinu tanpa pembagian segmen.

Secara umum, peningkatan *travel speed* dari kecepatan rendah ke kecepatan tinggi secara konsisten menurunkan presentase delusi pada kedua sisi sambungan untuk seluruh metode welding sequence yang memiliki data lengkap. Pada metode *Alternating side*, presentase delusi menurun dari A1 (27% kiri; 21% kanan) menjadi A2 (12% kiri; 19% kanan). Pada metode *Center to end*, penurunan serupa terjadi dari B1 (26% kiri; 26% kanan) menjadi B2 (9% kiri; 20% kanan). Kecenderungan yang sama juga ditunjukkan pada metode *Intermitten*, dari C1 (37%) menjadi C2 (15%) pada sisi kiri. Konsistensi penurunan presentase delusi pada kecepatan tinggi di kedua sisi ini sejalan dengan hasil leg length dan throat, yang menegaskan bahwa peningkatan *travel speed* efektif dalam mengurangi masukan panas sehingga jumlah base metal yang ikut mencair dan bercampur dengan weld metal menjadi lebih sedikit. Presentase delusi tertinggi pada spesimen C1 mengindikasikan adanya konsentrasi panas lokal yang lebih besar, yang kemungkinan disebabkan oleh siklus pemanasan-pendinginan berulang akibat pengelasan yang terputus-putus (start-stop) pada metode *Intermitten* kecepatan rendah.

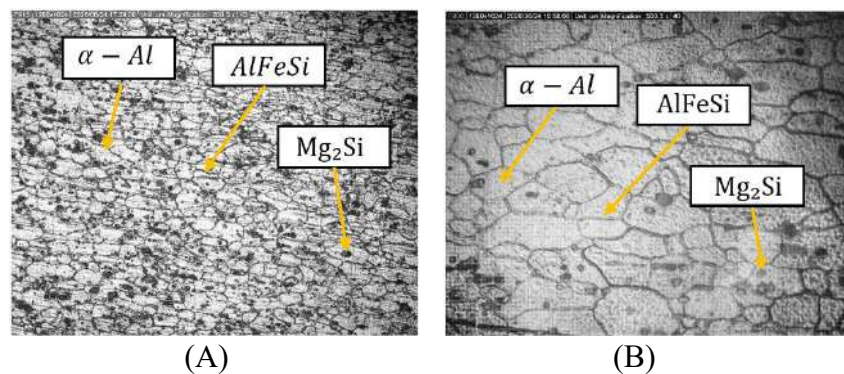
B. Analisis Pengujian Mikro

Pengamatan struktur mikro dilaksanakan setelah tahapan pemolesan (*polishing*) dan pengorosan (*etching*) permukaan spesimen selesai dilakukan. Fokus pengamatan diarahkan pada tiga area utama, yaitu logam induk (*base metal*), daerah terdampak panas (*Heat Affected Zone*), serta logam las (*weld metal*) guna membandingkan efek termal dari tiap variasi perlakuan, dengan menyertakan area yang bebas dari paparan panas sebagai pembanding kontrol. Pengujian metalografi ini diaplikasikan untuk mengamati serta mengidentifikasi karakteristik fasa dan mikrostruktur material menggunakan bantuan mikroskop optik pada tingkat perbesaran tertentu. Dalam penelitian ini, visualisasi struktur mikro diamati melalui perbesaran 200x dan 500x

agar bentuk morfologi butirannya dapat diinterpretasikan dengan lebih jelas dan akurat. Pelaksanaan pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi terjadinya transformasi fasa maupun perubahan butiran kristal pada material Aluminium 6061 yang dipicu oleh siklus termal pengelasan dari masing-masing variasi parameter spesimen. Adapun dokumentasi dan pemaparan mengenai karakteristik struktur mikro tersebut disajikan sebagai berikut :

- **Pengujian Mikro pada *Base Metal***

Pada penelitian ini dilakukan pengujian struktur mikro pada daerah *Base Metal* untuk mengidentifikasi karakteristik mikrostruktur awal material Aluminium seri 6061 T6. Karena seluruh spesimen menggunakan material dasar yang sama, mikrostruktur yang terbentuk pada daerah *Base Metal* cenderung serupa. Hasil pengamatan struktur mikro pada spesimen AA, A1, B1, B2, C1 dan C2 di daerah *Base Metal* ditunjukkan pada Gambar 4.12. Pengamatan dilakukan sebagai pembandingan terhadap perubahan mikrostruktur yang terjadi pada daerah HAZ dan *Weld Metal* akibat variasi *Welding Sequence* dan *travel speed* pada proses pengelasan GTAW.



Gambar 4. 12 Hasil Pengujian Mikro Pada Base Metal

Keterangan :

(A) Perbesaran x 200

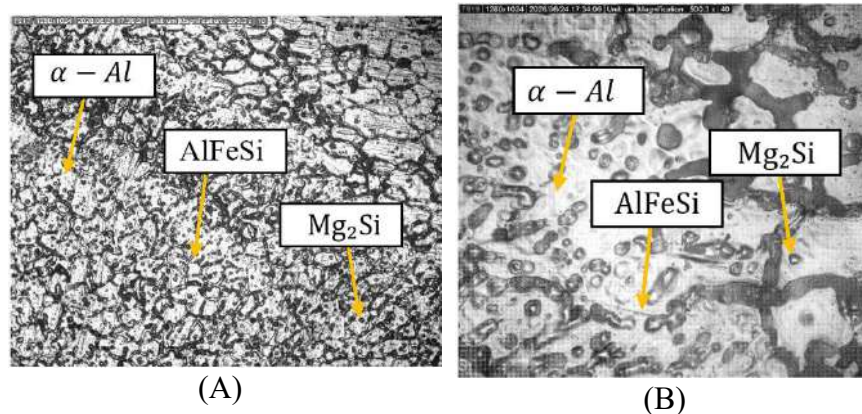
(B) Perbesaran x 500

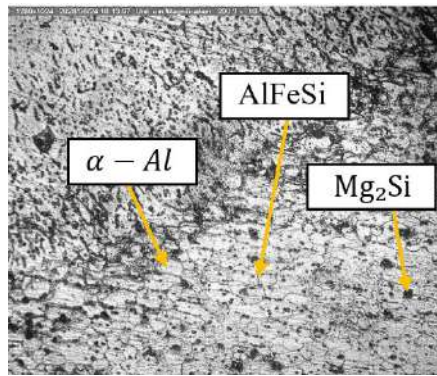
Berdasarkan hasil pengamatan struktur mikro Base Metal Aluminium 6061 pada pembesaran $200\times$ dan $500\times$, terlihat bahwa mikrostruktur didominasi oleh fasa matriks (α) (Alpha-Aluminium) yang berorientasi memanjang akibat efek proses pengerolan (rolling), serta

sebaran fasa intermetalik (β)($AlFeSi$) dan senyawa penguat Magnesium Silisida (Mg_2Si). Hasil pengamatan pada seluruh spesimen menunjukkan karakteristik mikrostruktur yang relatif sama karena seluruh spesimen menggunakan material dasar yang sama dan daerah *Base Metal* tidak mengalami pengaruh langsung dari siklus termal proses pengelasan GTAW. Dengan demikian, variasi *welding sequence* (urutan pengelasan) serta variasi *travel speed* tidak menyebabkan perubahan mikrostruktur pada daerah *Base Metal*, sehingga fasa yang terbentuk tetap stabil berupa matriks (α), fasa (β), dan senyawa (Mg_2Si).

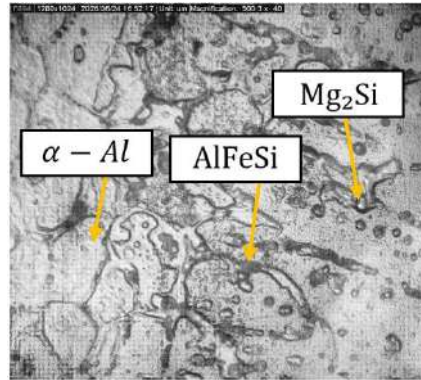
- **Pengujian struktur mikro pada HAZ**

Pada penelitian ini dilakukan pengujian struktur mikro pada daerah *Heat Affected Zone (HAZ)* untuk mengetahui perubahan mikrostruktur yang terjadi akibat pengaruh siklus termal selama proses pengelasan serta pengaruh variasi *Welding Sequence* dan *travel speed*. Hasil pengamatan struktur mikro pada spesimen AA (tanpa *Treatment*), A1 (*Alternating side travel speed* 95-100 mm/min), A2 (*Alternating side travel speed* 115-120 mm/min), B1 (*Center to end travel speed* 95-100 mm/min), B2 (*Center to end travel speed* 115-120 mm/min), C1 (*Intermiten travel speed* 95-100 mm/min), dan C2 (*Intermiten travel speed* 115-120 mm/min) pada daerah HAZ dapat dilihat pada Gambar 4.13. Pengamatan dilakukan untuk mengidentifikasi perubahan karakteristik mikrostruktur yang terjadi pada daerah yang mengalami pengaruh panas pengelasan dibandingkan dengan mikrostruktur awal pada daerah *Base Metal*.

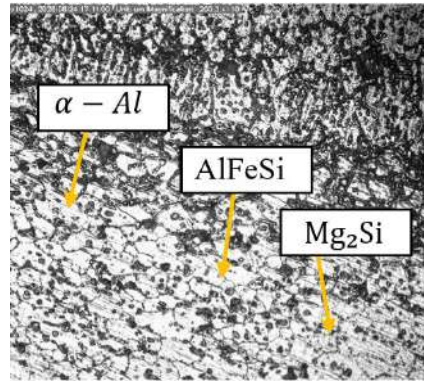




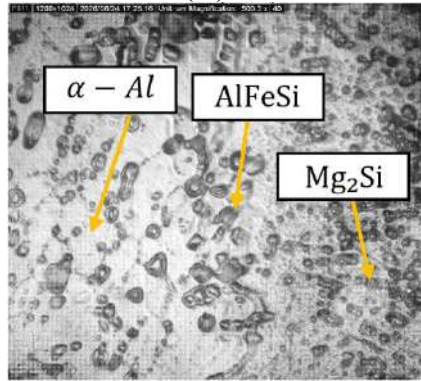
(C)



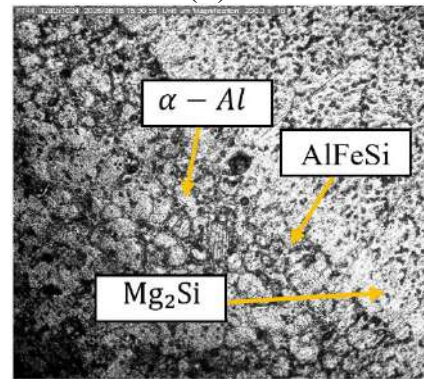
(D)



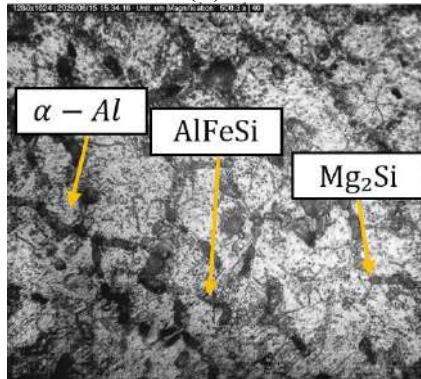
(E)



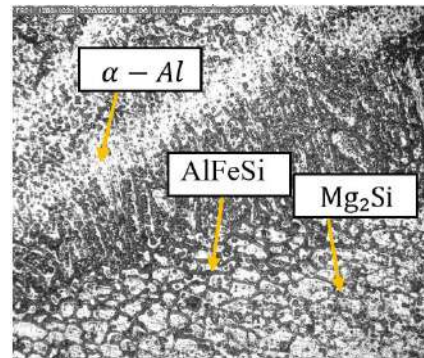
(F)



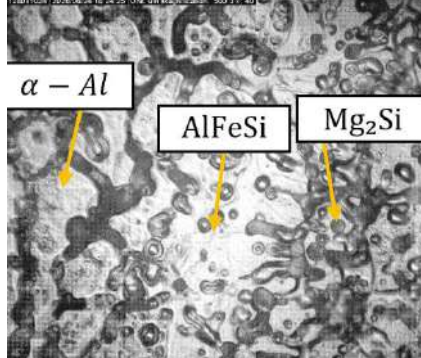
(G)



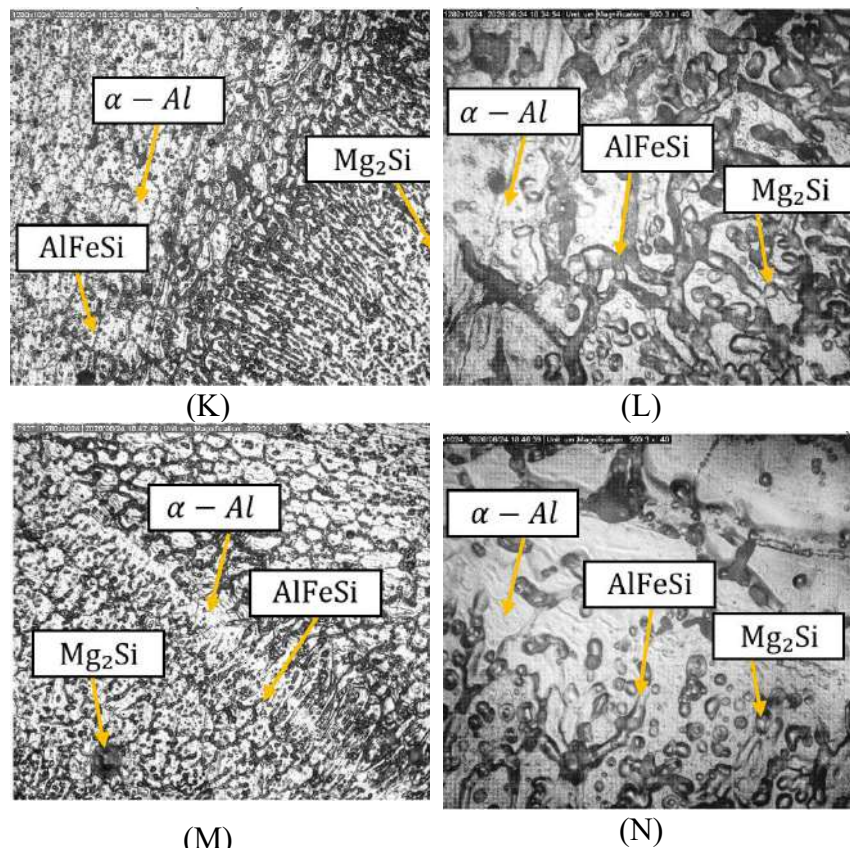
(H)



(I)



(J)



Gambar 4. 13 Hasil Pengujian Mikro Pada HAZ

Keterangan :

- (A) Spesimen AA Perbesaran 200X
- (C) Spesimen A1 Perbesaran 200X
- (E) Spesimen A2 Perbesaran 200X
- (G) Spesimen B1 Perbesaran 200X
- (I) Spesimen B2 Perbesaran 200X
- (K) Spesimen C1 Perbesaran 200X
- (M) Spesimen C2 Perbesaran 200X

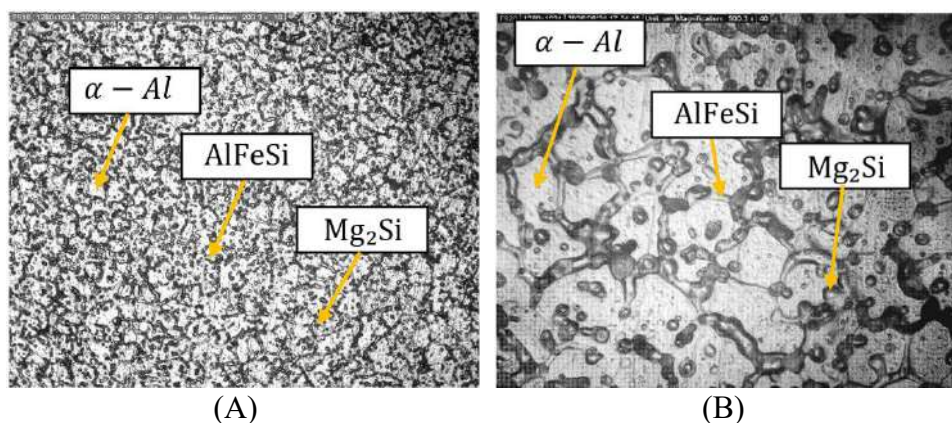
- (B) Spesimen AA Perbesaran 500X
- (D) Spesimen A1 Perbesaran 500X
- (F) Spesimen A2 Perbesaran 500X
- (H) Spesimen B1 Perbesaran 500X
- (J) Spesimen B2 Perbesaran 500X
- (L) Spesimen C1 Perbesaran 500X
- (N) Spesimen C2 Perbesaran 500X

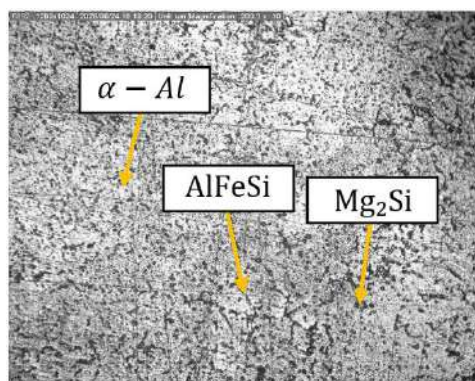
Berdasarkan hasil pengamatan struktur mikro pada daerah *Heat Affected Zone* (HAZ) Aluminium 6061 pada pembesaran 200 $\times$ dan 500 $\times$, terlihat bahwa mikrostruktur pada daerah ini masih didominasi oleh matriks (α) (Alpha-Aluminium), namun mengalami fenomena penuaan berlebih (*overaging*) akibat pengaruh siklus termal (*thermal cycle*) dari pengelasan GTAW. Pengaruh panas tersebut menyebabkan terjadinya pelarutan sebagian (*partial dissolution*) atau aglomerasi (pembesaran ukuran) pada fasa intermetalik (β)(*AlFeSi*) dan senyawa

penguat Magnesium Silisida (Mg_2Si) yang tersebar di batas butir. Hasil pengamatan menunjukkan karakteristik mikrostruktur daerah HAZ bervariasi pada setiap spesimen karena sangat dipengaruhi oleh jumlah masukan panas (*heat input*). Dengan demikian, variasi *welding sequence* (urutan pengelasan) serta variasi *travel speed* (95-100 mm/min dan 115-120 mm/min) memberikan pengaruh nyata terhadap struktur mikro di daerah HAZ, di mana kecepatan pengelasan yang lebih rendah atau urutan pengelasan yang menumpuk panas akan memperluas ukuran daerah HAZ dan meningkatkan tingkat aglomerasi fasa penguat (Mg_2Si).

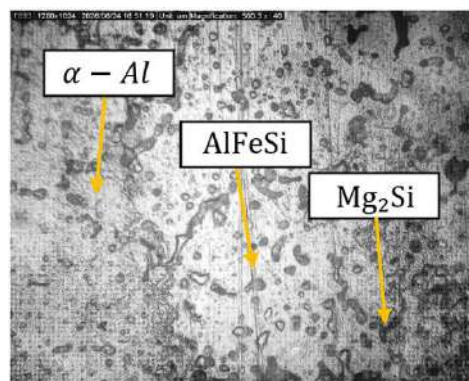
- **Pengujian struktur mikro pada *weld metal***

Pada penelitian ini dilakukan pengujian struktur mikro pada daerah *Weld Metal* (WM) untuk mengamati karakteristik mikrostruktur yang terbentuk akibat variasi *Welding Sequence* dan *travel speed*. Hasil pengamatan struktur mikro pada spesimen AA (tanpa *Treatment*), A1 (*Alternating side travel speed* 95-100 mm/min), A2 (*Alternating side travel speed* 115-120 mm/min), B1 (*Center to end travel speed* 95-100 mm/min), B2 (*Center to end travel speed* 115-120 mm/min), C1 (*Intermiten travel speed* 95-100 mm/min), dan C2 (*Intermiten travel speed* 115-120 mm/min) dapat dilihat pada Gambar 4.14. Pengamatan dilakukan untuk mengidentifikasi perbedaan karakteristik mikrostruktur yang terbentuk pada logam las akibat variasi parameter pengelasan yang digunakan.

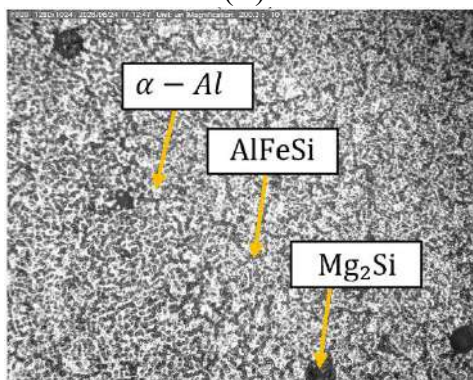




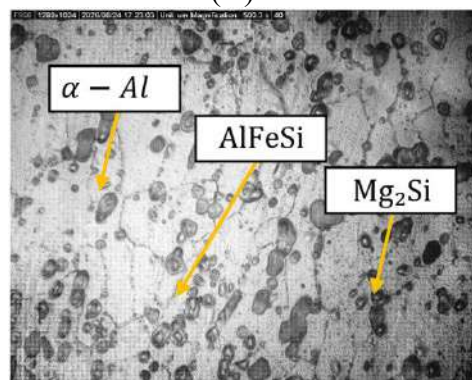
(C)



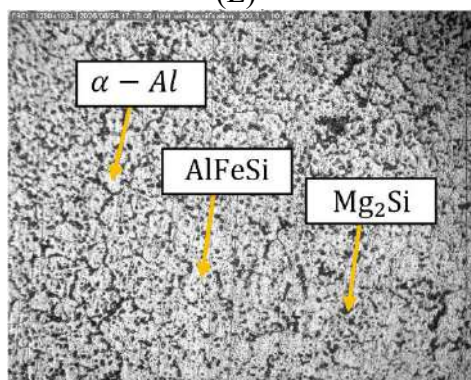
(D)



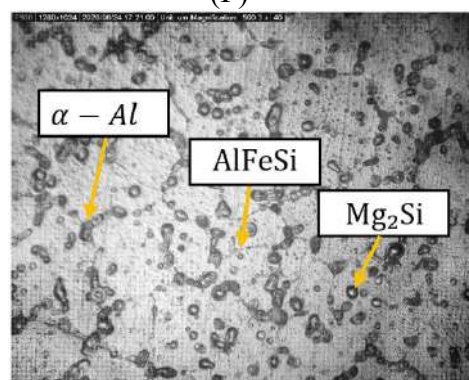
(E)



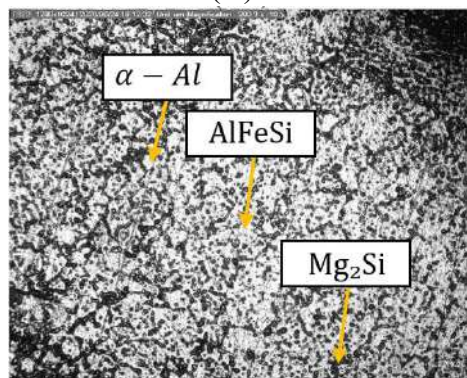
(F)



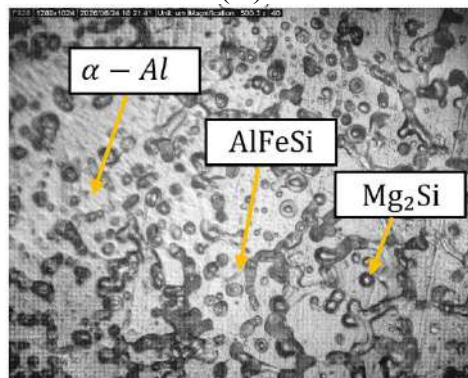
(G)



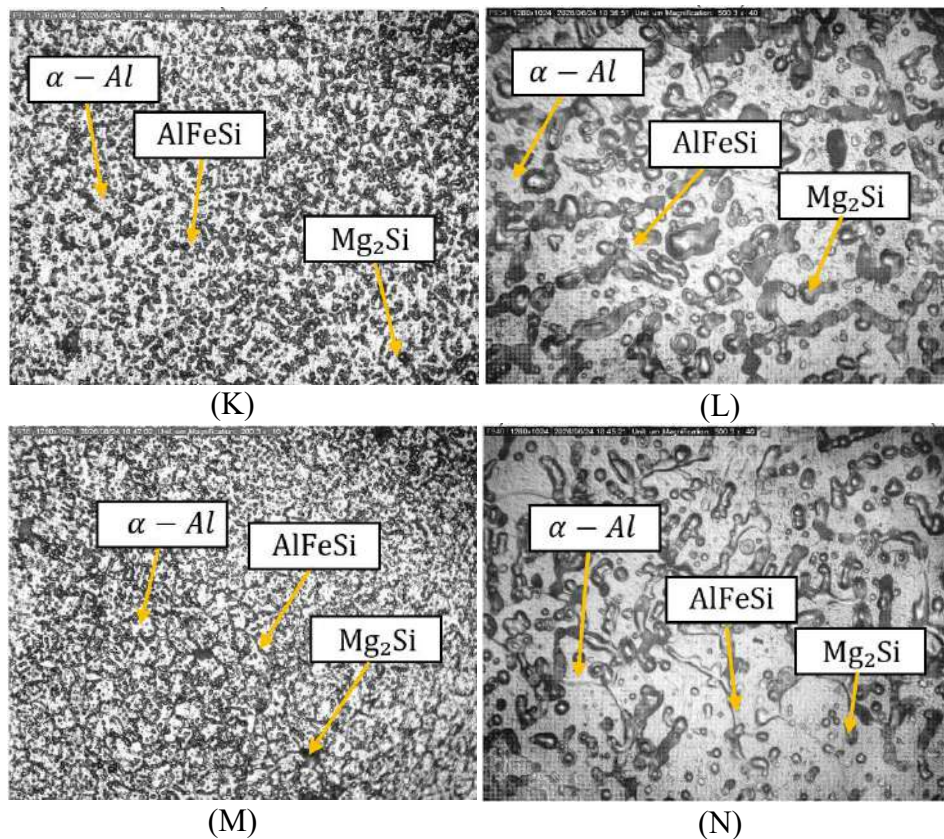
(H)



(I)



(J)



Gambar 4. 14 Hasil Pengujian Mikro Pada Weld Metal

Keterangan :

- (A) Spesimen AA Perbesaran 200X
- (C) Spesimen A1 Perbesaran 200X
- (E) Spesimen A2 Perbesaran 200X
- (G) Spesimen B1 Perbesaran 200X
- (I) Spesimen B2 Perbesaran 200X
- (K) Spesimen C1 Perbesaran 200X
- (M) Spesimen C2 Perbesaran 200X

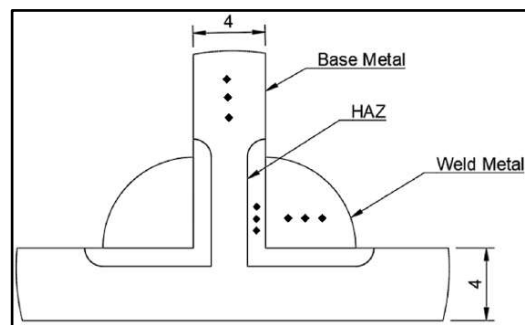
- (B) Spesimen AA Perbesaran 500X
- (D) Spesimen A1 Perbesaran 500X
- (F) Spesimen A2 Perbesaran 500X
- (H) Spesimen B1 Perbesaran 500X
- (J) Spesimen B2 Perbesaran 500X
- (L) Spesimen C1 Perbesaran 500X
- (N) Spesimen C2 Perbesaran 500X

Berdasarkan hasil pengamatan struktur mikro pada daerah *Weld Metal* (Logam Las) Aluminium 6061 pada pembesaran 200× dan 500×, terlihat bahwa mikrostruktur didominasi oleh struktur butir berbentuk *columnar dendritic* dan *equiaxed dendritic* akibat proses pembekuan cepat (solidifikasi) cairan lasan. Fasa yang terbentuk pada daerah ini berupa matriks (α) (Alpha-Aluminium) dengan pengendapan fasa intermetalik atau senyawa penguat Magnesium Silisida (Mg_2Si) yang tersebar secara halus dan rapat di sepanjang batas dendrit (*interdendritic*

boundaries). Hasil pengamatan menunjukkan bahwa ukuran dendrit dan kerapatan fasa penguat bervariasi secara signifikan pada setiap spesimen sebagai akibat dari perbedaan laju pendinginan (*cooling rate*). Dengan demikian, variasi *welding sequence* (urutan pengelasan) serta variasi *travel speed* memberikan pengaruh yang nyata terhadap struktur mikro daerah Weld Metal, di mana *travel speed* yang lebih tinggi menghasilkan struktur dendrit yang lebih halus dan pembekuan yang lebih rapat karena laju pendinginan yang berlangsung lebih cepat.

4.1.3 pengaruh variasi *welding sequence* dan *travel speed* terhadap nilai kekerasan (*hardness*)

Hardness test merupakan salah satu jenis pengujian DT (*destructive test*) yang bertujuan untuk mengetahui nilai kekerasan suatu material karena akibat suatu proses pengelasan dan perlakuan lainnya. Pengujian kekerasan ini menggunakan metode *vickers* dengan pembebanan sebesar 10 kgf dengan *dwel time* selama 12 detik, dimana pengujian kekerasan dilakukan pada daerah *base metal*, *weld metal*, dan HAZ. Penempatan spot atau titik *hardness* berada pada daerah *base metal*, HAZ, dan *weld metal* dengan rincian 3 titik pada *base metal*, 3 titik pada HAZ dan 3 titik pada *weld metal*, dapat dilihat pada Gambar 4.15 berikut.



Gambar 4. 15 Titik Pengujian *Hardness*

Pengujian *Hardness* telah dilakukan sesuai titik pada Gambar 4.15. Dapat diketahui hasil data pada daerah WM, HAZ dan BM. Berikut :

- Hasil pengujian *hardness* Tanpa *Treatment* (AA)

Hasil pengujian kekerasan pada spesimen tanpa *treatment* (AA) yang menggunakan *travel speed* 100 - 110 mm/min tanpa variasi *welding sequence* disajikan dalam bentuk tabel pada Tabel 4.14.

Tabel 4. 14 Hasil *Hardness* Test Tanpa *Treatment*

Tanpa Tritmen									
Line 1	BM			HAZ			WM		
Result (HVN)	88	85	82	67	64	68	70	72	71
Average (HVN)	85			66,3			71		

Keterangan :

WM : *Weld Metal*

HAZ : *Heat Affected Zone*

BM : *Base Metal*

Berdasarkan Tabel 4.14 di atas, pengujian kekerasan yang dilakukan pada ketiga daerah pengelasan Aluminium 6061 menunjukkan pola penurunan kekerasan yang signifikan akibat proses pengelasan. *Base Metal* mempertahankan nilai kekerasan tertinggi mencapai sekitar 85 HV, yang disebabkan oleh struktur butir yang seragam dan terdistribusi merata serta kehadiran presipitat Mg_2Si sebagai mekanisme penguatan presipitat yang efektif. Sebaliknya, *Heat Affected Zone* menunjukkan nilai kekerasan terendah sekitar 66 HV, mencerminkan perubahan signifikan akibat perlakuan termal dari proses pengelasan yang menyebabkan pertumbuhan butir tidak terkontrol dan dissolusi parsial presipitat penguat. *Weld Metal* berada di antara kedua daerah tersebut dengan nilai kekerasan sekitar 71 HV, menunjukkan dampak negatif pelelehan dan resolidifikasi terhadap struktur material, meskipun struktur dendriti yang halus memberikan sedikit penguatan dibandingkan HAZ. Secara keseluruhan, hasil pengujian ini mengkonfirmasi bahwa *Heat Affected Zone* merupakan daerah paling kritis dan terlemah dalam sambungan las, menjadikannya sebagai lokasi yang paling potensial untuk terjadinya kegagalan mekanik, diikuti oleh *Weld Metal* yang juga mengalami degradasi kekerasan signifikan dibandingkan dengan *Base Metal* akibat kehilangan presipitat penguat.

- *Alternating sides* dengan *Travel speed* (95 – 100 mm/menit)

Hasil pengujian *hardness Alternating sides* dengan variasi *travel speed* 95 – 100 mm/menit dapat dilihat pada tabel 4.15 berikut ini.

Tabel 4. 15 Hasil *Hardness Test Alternating sides Travel speed 95 – 100 mm/menit*

<i>Alternating sides Travel speed 95 – 100 mm/menit</i>									
<i>Line 1</i>	BM			HAZ			WM		
<i>Result (HVN)</i>	88	82	85	53	54	54	75	72	75
<i>Average (HVN)</i>	85			53,6			74		

Keterangan :

WM : *Weld Metal*

HAZ : *Heat Affected Zone*

BM : *Base Metal*

Berdasarkan Tabel 4.15 di atas, pengujian kekerasan dengan pola pengelasan *alternating sides* pada *travel speed 95-100 mm/menit* menunjukkan penurunan kekerasan yang jauh lebih signifikan, terutama pada *Heat Affected Zone*, dibandingkan dengan pola pengelasan *center-to-end*. *Base Metal* mempertahankan nilai kekerasan tertinggi mencapai sekitar 85 HV, menunjukkan performa yang relatif stabil meskipun menerima perlakuan dari pola pengelasan bergantian. *Weld Metal* menunjukkan nilai kekerasan sekitar 74 HV, yang masih jauh lebih rendah dari *Base Metal*. Namun, *Heat Affected Zone* menampilkan nilai kekerasan yang sangat rendah sekitar 54 HV, mengindikasikan degradasi struktur yang ekstrim akibat siklus termal yang kompleks dan berulang dari pola pengelasan *alternating sides*. Perbedaan signifikan ini menunjukkan bahwa pola pengelasan *alternating sides* menghasilkan pendinginan yang tidak seragam dan *multiple thermal cycling* yang lebih intens, menyebabkan HAZ menjadi zona yang sangat lemah dan kritis dalam struktur las tersebut.

- *Alternating sides* dengan *Travel speed (115 – 120 mm/menit)*

Hasil pengujian *hardness Alternating sides* dengan variasi *travel speed 115 – 120 mm/menit* dapat dilihat pada tabel 4.16 berikut ini.

Tabel 4. 16 Hasil *Hardness Test Alternating sides Travel speed 115 – 120 mm/menit*

<i>Alternating sides Travel speed 115 – 120 mm/menit</i>									
<i>Line 1</i>	BM			HAZ			WM		
<i>Result (HVN)</i>	99	91	89	64	58	57	71	73	70
<i>Average (HVN)</i>	93			59,6			71,3		

Keterangan :

WM : *Weld Metal*

HAZ : *Heat Affected Zone*

BM : *Base Metal*

Berdasarkan Tabel 4.16 di atas, pengujian kekerasan dengan pola pengelasan *alternating sides* pada *travel speed* yang lebih tinggi (115-120 mm/menit) menunjukkan peningkatan kekerasan dibandingkan dengan *travel speed* 95-100 mm/menit, namun masih tetap lebih rendah dibandingkan dengan pola *center-to-end* pada kecepatan yang sama. *Base Metal* mencapai nilai kekerasan tertinggi sekitar 95 HV, menunjukkan peningkatan yang signifikan akibat kecepatan pengelasan yang lebih tinggi menghasilkan *cooling rate* lebih cepat. *Weld Metal* meningkat menjadi sekitar 71 HV, menunjukkan efek positif dari peningkatan kecepatan pengelasan. *Heat Affected Zone* mengalami peningkatan menjadi sekitar 60 HV, namun masih tetap sebagai zona terlemah dalam sambungan las dan menunjukkan penurunan yang signifikan dibandingkan dengan pola *center-to-end* pada *travel speed* serupa. Hasil ini mengindikasikan bahwa meskipun peningkatan *travel speed* memberikan dampak positif terhadap kekerasan lokal, pola pengelasan *alternating sides* secara inherent menghasilkan kondisi termal yang lebih kompleks dan *multiple thermal cycling* yang merugikan sifat mekanik lokal, khususnya pada *Heat Affected Zone* yang tetap menjadi daerah paling kritis dan rentan terhadap kegagalan mekanik.

- *Center to end dengan Travel speed (95 – 100 mm/menit)*

Hasil pengujian *hardness Center to end* dengan variasi *travel speed* 95 – 100 mm/menit dapat dilihat pada Tabel 4.17 berikut ini.

Tabel 4. 17 Hasil *Hardness Test Center to end Travel speed* 95-100 mm/menit

Center to end Travel speed 95-100 mm/menit									
<i>Line 1</i>	BM			HAZ			WM		
<i>Result (HVN)</i>	91	90	91	65	64	66	73	72	74
<i>Average (HVN)</i>	90,6			65			73		

Keterangan :

WM : *Weld Metal*

HAZ : *Heat Affected Zone*

BM : *Base Metal*

Berdasarkan Tabel 4.17 di atas, pengujian kekerasan pada *travel speed* 95-100 mm/menit menunjukkan penurunan kekerasan yang signifikan dari *Base Metal* menuju *Weld Metal* dan *Heat Affected Zone*. *Base Metal* mempertahankan nilai kekerasan tertinggi mencapai sekitar 91 HV, yang mencerminkan struktur butir seragam dan kehadiran presipitat penguat yang optimal. Sementara itu, *Heat Affected Zone* menunjukkan nilai kekerasan terendah sekitar 65 HV, mengindikasikan degradasi struktur akibat pertumbuhan butir dan dissolusi presipitat yang signifikan selama proses pengelasan. *Weld Metal* berada di posisi menengah dengan nilai kekerasan sekitar 73 HV, menunjukkan dampak negatif pelelehan dan resolidifikasi cepat terhadap sifat kekerasan material. Hasil ini menegaskan bahwa pada kecepatan pengelasan 95-100 mm/menit, *Heat Affected Zona* merupakan zone terlemah yang paling rentan terhadap kegagalan mekanik.

- *Center to end* dengan *Travel speed* (115 – 120 mm/menit)

Hasil pengujian *hardness Center to end* dengan variasi *travel speed* 115 – 120 mm/menit dapat dilihat pada Tabel 4.18 berikut ini.

Tabel 4. 18 Hasil *Hardness Test Center to end Travel speed* 115-120 mm/menit

<i>Center to end Travel speed 115-120 mm/menit</i>									
<i>Line 1</i>	BM			HAZ			WM		
<i>Result (HVN)</i>	96	100	95	74	72	71	70	80	75
<i>Average (HVN)</i>	97			72,3			75		

Keterangan :

WM : *Weld Metal*

HAZ : *Heat Affected Zone*

BM : *Base Metal*

Berdasarkan Tabel 4.18 di atas, pengujian kekerasan pada *travel speed* yang lebih tinggi (115-120 mm/menit) menunjukkan peningkatan kekerasan secara keseluruhan dibandingkan dengan *travel speed* 95-100 mm/menit. *Base Metal* menunjukkan peningkatan nilai kekerasan menjadi sekitar 97 HV, sementara *Weld Metal* meningkat menjadi sekitar

75 HV dan *Heat Affected Zone* mengalami peningkatan menjadi sekitar 72 HV. Peningkatan ini disebabkan oleh *cooling rate* yang lebih cepat akibat *travel speed* yang lebih tinggi, menghasilkan struktur yang lebih halus dan memberikan efek pengerasan yang lebih baik. Meskipun demikian, *Heat Affected Zone* tetap menunjukkan nilai kekerasan terendah dalam ketiga daerah, mengindikasikan bahwa peningkatan *travel speed*, meskipun bermanfaat dalam meningkatkan kekerasan lokal, masih belum dapat sepenuhnya menghilangkan kelemahan *inherent* pada HAZ. Hasil ini menunjukkan bahwa parameter pengelasan dengan *travel speed* yang lebih tinggi dapat mengoptimalkan sifat mekanik sambungan las, namun HAZ tetap menjadi daerah kritis yang memerlukan perhatian khusus dalam desain dan analisis kegagalan struktur

- *Intermittent* dengan *Travel speed* (95 – 100 mm/menit)

Hasil pengujian *hardness Intermitten* dengan variasi *travel speed* 95 – 100 mm/menit dapat dilihat pada Tabel 4.19 berikut ini.

Tabel 4. 19 Hasil *Hardness Test Intermitten Travel speed* 95 – 100 mm/menit

<i>Intermittent Travel speed 95 – 100 mm/menit</i>									
<i>Line I</i>	BM			HAZ			WM		
<i>Result (HVN)</i>	88	85	82	67	64	68	70	72	71
<i>Average (HVN)</i>	85			66,3			71		

Keterangan :

WM : *Weld Metal*

HAZ : *Heat Affected Zone*

BM : *Base Metal*

Berdasarkan Tabel 4.19 di atas, pengujian kekerasan dengan pola pengelasan *intermittent* pada *travel speed* 95-100 mm/menit menunjukkan nilai kekerasan yang sangat rendah pada *Heat Affected Zone*, mencapai rerata sekitar 54 HV, mengindikasikan degradasi struktur yang ekstrim akibat siklus termal yang unik dari pola pengelasan terputus-putus. *Base Metal* mempertahankan nilai kekerasan tertinggi sekitar 91 HV, menunjukkan resistansi terhadap pengaruh termal lokal dari pengelasan *intermittent*. *Weld Metal* menunjukkan nilai kekerasan sekitar 74 HV, relatif stabil pada ketiga pengukuran. *Heat Affected Zone*

mencapai nilai terendah sekitar 54 HV, mengindikasikan bahwa pola pengelasan *intermittent* dengan jeda antar las menyebabkan siklus termal yang kompleks dengan pendinginan bertahap yang tidak terkontrol, menghasilkan pertumbuhan butir yang lebih signifikan dan dissolusi presipitat yang lebih parah. Pola pengelasan ini menghasilkan kondisi termal yang paling merugikan dibandingkan dengan pola *center-to-end*, menjadikan HAZ sebagai zona yang sangat kritis dan potensial terhadap kegagalan mekanik.

- *Intermittent dengan Travel speed (115 – 120 mm/menit)*

Hasil pengujian *hardness Intermitten* dengan variasi *travel speed* 115 – 120 mm/menit dapat dilihat pada Tabel 4.20 berikut ini.

Tabel 4. 20 Hasil *Hardness Test Intermitten Travel speed* 115 – 120 mm/menit

<i>Intermittent Travel speed 115 – 120 mm/menit</i>									
<i>Line 1</i>	BM			HAZ			WM		
<i>Result (HVN)</i>	97	94	99	58	60	58	72	73	71
<i>Average (HVN)</i>	96,6			58,6			72		

Keterangan :

WM : *Weld Metal*

HAZ : *Heat Affected Zone*

BM : *Base Metal*

Berdasarkan Tabel 4.20 di atas, pengujian kekerasan dengan pola pengelasan *intermittent* pada *travel speed* yang lebih tinggi (115-120 mm/menit) menunjukkan peningkatan kekerasan di semua zona dibandingkan dengan *travel speed* 95-100 mm/menit. *Base Metal* mencapai nilai kekerasan tertinggi rerata sekitar 96 HV, menunjukkan peningkatan signifikan akibat *cooling rate* yang lebih cepat. *Weld Metal* meningkat menjadi rerata sekitar 72 HV, menunjukkan dampak positif dari peningkatan kecepatan pengelasan terhadap struktur dendriti. *Heat Affected Zone* mengalami peningkatan menjadi rata-rata sekitar 58 HV, yang merupakan peningkatan signifikan dibandingkan dengan *travel speed* sebelumnya namun tetap menunjukkan nilai yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan pola pengelasan lainnya pada kecepatan yang sama. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan *travel speed* memberikan efek

positif dalam mengurangi dampak negatif pola pengelasan *intermittent* dengan meningkatkan *cooling rate*, namun pola *intermittent* secara *inherent* menghasilkan kondisi termal yang kurang optimal dibandingkan pola *center-to-end*, sehingga tetap menghasilkan kekerasan yang lebih rendah pada *Heat Affected Zone*, yang tetap menjadi daerah paling kritis dan berpotensi tinggi terhadap kegagalan mekanik dalam struktur tersebut.

Hasil pengujian kekerasan yang telah dilakukan pada seluruh spesimen kemudian diolah untuk memperoleh nilai rata-rata kekerasan pada masing-masing daerah pengujian. Nilai rata-rata kekerasan pada daerah BM, HAZ, dan WM untuk seluruh spesimen dapat dilihat pada Tabel 4.19 dan Gambar grafik 4.16.

Tabel 4. 19 Nilai Rata-Rata Kekerasan Pada Masing-Masing Daerah Pengujian

STAMP	AVERAGE (HVN)		
	BM	HAZ	WM
AA	85	66,3	71
A1	85	53,6	74
A2	93	59,6	71,3
B1	90,6	65	73
B2	97	72,3	75
C1	85	66,3	71
C2	96,6	58,6	72

Keterangan :

(AA) : Tanpa *Treatment*

(A1) : *Alternating sides* variasi *Travel speed* 95 – 100 mm/menit

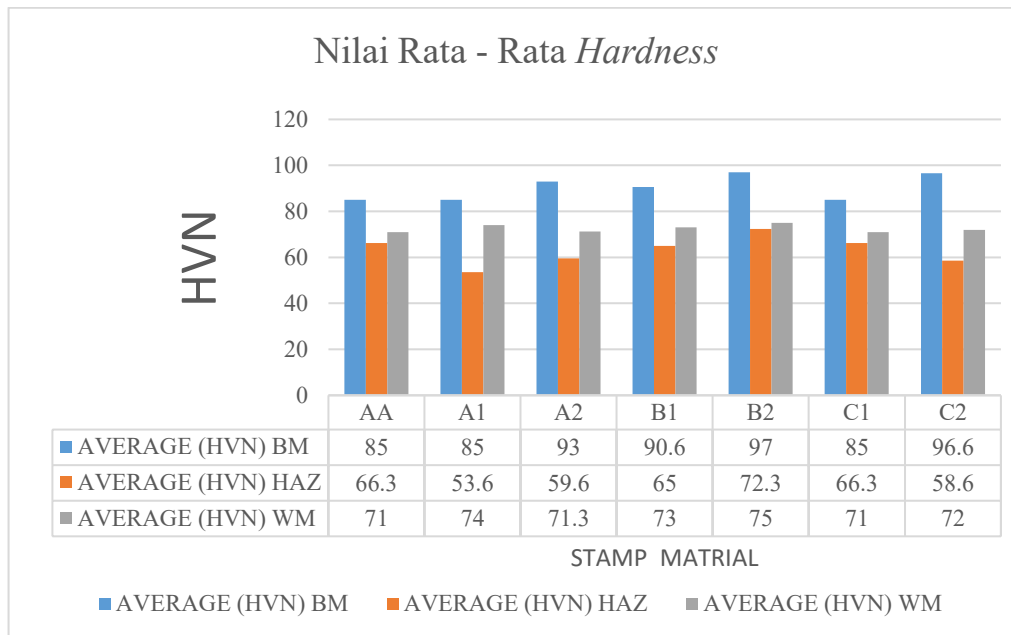
(A2) : *Alternating sides* variasi *Travel speed* 115 – 120 mm/menit

(B1) : *Center to end* variasi *Travel speed* 95 – 100 mm/menit

(B2) : *Center to end* variasi *Travel speed* 115 – 120 mm/menit

(C1) : *Intermittent* variasi *Travel speed* 95 – 100 mm/menit

(C2) : *Intermittent* variasi *Travel speed* 115 – 120 mm/menit



Gambar 4. 16 Nilai Rata-Rata Pengujian *Hardness*

Berdasarkan rata-rata hasil pengujian kekerasan yang ditunjukkan pada Tabel 4.19 nilai kekerasan pada daerah *Base metal* (BM), *Weld Metal* (WM) dan *Heat Affected Zone* (HAZ) berbeda pada setiap spesimen. Pada daerah *Base metal* (BM), nilai rata-rata kekerasan tertinggi diperoleh spesimen B2 sebesar 97 HV, sedangkan nilai rata-rata kekerasan terendah diperoleh spesimen AA, A1 dan C1 sebesar 85 HV. Sementara itu, spesimen A2, B1 dan C2 masing-masing menghasilkan nilai rata-rata kekerasan sebesar 93 HV, 90,6 HV dan 96.6 HV.

Pada daerah *Weld Metal* (WM) nilai rata-rata kekerasan tertinggi diperoleh spesimen B2 sebesar 75 HV, sedangkan nilai rata-rata kekerasan terendah diperoleh spesimen AA dan C1 sebesar 71 HV. Spesimen A1, A2, B1 dan C2 menghasilkan nilai kekerasan masing-masing sebesar 74 HV, 71,3 HV, 73 HV dan 72 HV. Pada daerah *Heat Affected Zone* (HAZ) nilai rata-rata kekerasan tertinggi diperoleh spesimen B2 sebesar 72,3 HV, sedangkan nilai rata-rata kekerasan terendah diperoleh spesimen A1 sebesar 53,6 HV. Spesimen AA, A2, B1, C1 dan C2 menghasilkan nilai kekerasan masing-masing sebesar 66,3 HV, 59,6 HV, 65 HV, 66,3 HV dan 58,6 HV. Secara keseluruhan, nilai rata-rata kekerasan *Base metal* (BM) pada seluruh spesimen lebih tinggi

dibandingkan nilai kekerasan pada daerah *Weld Metal* (WM) dan *Heat Affected Zone* (HAZ). Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai rata-rata kekerasan tertinggi terdapat pada *Base metal* (BM) spesimen B1, sedangkan nilai kekerasan terendah terdapat pada HAZ spesimen A1.

4.2 Pembahasan

4.2.1 Pembahasan uji distorsi

Dari hasil pengukuran nilai distorsi yang sudah dilaksanakan menunjukkan bahwa pengelasan GTAW dengan metode *welding sequence* dan variasi *travel speed* pada material aluminium 6061 menghasilkan distorsi *transversal* pada jalur lasan. Mengacu pada standart (ISO, 2023). Hasil pengujian distorsi pelat setelah proses pengelasan GTAW dengan berbagai variasi *welding sequence* menunjukkan adanya perbedaan signifikan pada nilai distorsi maksimum yang terbentuk. Hal ini mengindikasikan bahwa metode pengelasan dan kecepatan gerak elektroda (*travel speed*) berpengaruh langsung terhadap akumulasi panas (*heat input*) dan distribusi tegangan sisa pada pelat. pemeriksaan menunjukkan bahwa nilai distorsi aktual yang diperoleh pada masing-masing spesimen menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan. Spesimen tanpa *treatment* menghasilkan nilai distorsi aktual sebesar 1,95 mm pada kordinat A1 dan pada variasi *welding sequence* dengan metode *Alternating side* dengan *Travel speed* lambat (95–100 mm/menit) menghasilkan Distorsi maksimum sebesar 1,63 mm pada kordinat I1, sedangkan pada metode *Alternating side* dengan *Travel speed* cepat (115–120 mm/menit) menghasilkan Distorsi maksimum sebesar 1,20 mm pada kordinat B1. Metode *alternating side* terbukti mampu menurunkan distorsi dibandingkan tanpa *treatment*, terutama pada kecepatan lambat. Hal ini karena distribusi panas lebih seimbang di kedua sisi pelat. Namun, pada kecepatan tinggi, meskipun waktu paparan panas lebih singkat, gradien termal yang tajam justru meningkatkan distorsi di titik tertentu. Pada variasi *welding sequence* dengan metode *center to end* dengan *Travel speed* lambat (95–100 mm/menit) menghasilkan Distorsi maksimum sebesar 2,42 mm pada kordinat I3, sedangkan pada metode

Center to end dengan *Travel speed* cepat (115–120 mm/menit) menghasilkan Distorsi maksimum sebesar 1,88 mm pada kordinat A8 dan D8. Metode ini menghasilkan distorsi paling tinggi dibandingkan variasi lain. Penyebabnya adalah akumulasi panas yang terkonsentrasi di tengah pelat, kemudian menyebar ke ujung. Pada kecepatan cepat, gradien termal semakin besar sehingga menyebabkan deformasi lebih parah. Pada variasi *welding squence* dengan metode *intermiten* dengan *Travel speed* lambat (95–100 mm/menit) menghasilkan Distorsi maksimum sebesar 1,92 mm pada kordinat I8, sedangkan pada metode *intermiten* dengan *Travel speed* cepat (115–120 mm/menit) menghasilkan Distorsi maksimum sebesar 1,34 mm pada kordinat B1. Metode *intermittent* relatif efektif dalam mengurangi distorsi, terutama pada kecepatan cepat. Pola pengelasan terputus-putus memungkinkan pelat mengalami pendinginan lokal sebelum dilanjutkan, sehingga akumulasi panas berkurang. Namun, pada kecepatan lambat, akumulasi panas tetap tinggi sehingga distorsi masih signifikan. Secara keseluruhan, spesimen AA,A1,B1,B2, dan C1 masuk kedalam kategori G menurut standar (ISO, 2023) karena memiliki geometri atau perubahan bentuk kurang dari 3 mm, sedangkan spesimen A2 dan C2 masuk kedalam kategori F menurut standar (ISO, 2023) karena memiliki geometri atau perubahan bentuk kurang dari 1.5 mm.

Secara umum, hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan *travel speed* dari 95-100 mm/min menjadi 115-120 mm/min menyebabkan penurunan nilai distorsi pada sambungan las. Hal ini disebabkan oleh berkurangnya *heat input* yang diterima material sehingga penyusutan termal selama proses pendinginan menjadi lebih kecil. Selain itu, metode *welding sqence center to end* dengan *travel speed* 95-100 mm/min menghasilkan nilai distorsi yang lebih tinggi dibandingkan metode tanpa tretment dan *welding squence* lainnya karena akumulasi panas yang terkonsentrasi di tengah pelat, kemudian menyebar ke ujung. Pada kecepatan cepat, gradien termal semakin besar sehingga menyebabkan deformasi lebih parah. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Azis 97 Nugraha et al. (2025) yang menyatakan bahwa

peningkatan *travel speed* mampu mengurangi deformasi akibat berkurangnya masukan panas selama proses pengelasan. Selain itu, penelitian (Zhang & , Shengsun Hu, 2015) melaporkan bahwa pengaturan urutan pengelasan dapat mengurangi akumulasi panas lokal dan menurunkan distorsi pada aluminium paduan. Oleh karena itu, kombinasi *welding sqence Alternating side* dengan *travel speed* 115-120 mm/min terbukti paling optimal dalam mengurangi distorsi karena distribusi panas lebih merata. Pada spesimen B2 memberikan hasil terbaik dalam meminimalkan distorsi pada pengelasan plat aluminium seri 6061 t6 menggunakan proses GTAW.

4.2.2 Pembahasan uji makro

Berdasarkan hasil analisis pengujian makrostruktur yang dilakukan terhadap seluruh spesimen dengan variasi metode welding sequence (*Alternating side*, *Center to end*, dan *Intermitten*) serta variasi *travel speed* (kecepatan rendah 95–100 mm/menit dan kecepatan tinggi 115–120 mm/menit), dapat ditarik kesimpulan bahwa kualitas hasil sambungan las secara keseluruhan berada dalam kondisi yang baik. Hal ini dibuktikan melalui pengamatan penampang makro setelah proses etsa, di mana tidak ditemukan adanya cacat pengelasan (*welding imperfection*) pada semua sampel, serta batas antara logam las (*weld metal*), daerah terdampak panas (*Heat Affected Zone/HAZ*), dan logam induk (*base metal*) dapat teridentifikasi dengan jelas.

Ditinjau dari aspek geometri sambungan, spesimen tanpa perlakuan (AA) menghasilkan *leg length* dan *throat* terbesar di antara seluruh spesimen, dengan presentase delusi sebesar 14% pada sisi kiri dan 17% pada sisi kanan yang menunjukkan distribusi panas relatif merata pada kedua sisi meskipun proses pengelasan berlangsung kontinu tanpa pembagian segmen. Penerapan variasi welding sequence dan *travel speed* terbukti memberikan pengaruh yang signifikan terhadap dimensi sambungan: peningkatan *travel speed* dari kecepatan rendah ke kecepatan tinggi pada seluruh metode secara konsisten menurunkan nilai *leg length*, *throat*, dan presentase delusi pada kedua sisi sambungan, yang

menunjukkan bahwa kecepatan pengelasan yang lebih tinggi efektif dalam mengurangi masukan panas (heat input) serta membatasi pencairan base metal berlebih. Temuan ini sejalan dengan penelitian (Iii et al., 2023) yang menyatakan bahwa pengaturan arus dan kecepatan pengelasan pada pengelasan TIG (GTAW) aluminium 6061 memengaruhi masukan panas, penetrasi, dan tegangan busur yang terbentuk, serta penelitian (Budiarto, 2019) yang menyatakan bahwa *travel speed* merupakan parameter proses yang berpengaruh signifikan terhadap kualitas hasil sambungan las GTAW pada aluminium 6061.

Hasil pengujian makro pada penelitian ini memiliki keterkaitan yang konsisten dengan hasil pengujian distorsi, struktur mikro, dan kekerasan yang dilakukan pada spesimen yang sama. Pada pengujian distorsi, kombinasi metode *Alternating side* dengan *travel speed* tinggi (spesimen A2) menghasilkan distorsi terendah sebesar 1,20 mm, yang sejalan dengan hasil pengujian makro pada spesimen yang sama, yaitu leg length, throat, dan presentase delusi yang relatif rendah dan seimbang antarsisi. Kondisi ini menunjukkan bahwa masukan panas yang lebih terkendali pada *travel speed* tinggi tidak hanya membatasi pencairan base metal (delusi), tetapi juga menekan tegangan termal yang menyebabkan distorsi pada pelat. Sebaliknya, metode *Center to end* menghasilkan distorsi tertinggi sebesar 2,42 mm akibat akumulasi panas yang terkonsentrasi di tengah pelat, sejalan dengan nilai leg length dan throat pada spesimen B1 yang relatif tinggi dibandingkan spesimen dengan *travel speed* tinggi, mengindikasikan bahwa akumulasi panas lokal yang sama juga berkontribusi terhadap pembentukan dimensi sambungan yang lebih besar pada sisi tersebut.

Keterkaitan juga terlihat pada hasil pengamatan struktur mikro, di mana daerah HAZ pada seluruh spesimen mengalami pertumbuhan butir (grain coarsening) disertai pelarutan sebagian presipitat Mg_2Si , sedangkan *travel speed* tinggi terbukti memperhalus struktur butir dan menekan pengasaran mikrostruktur pada daerah HAZ. Temuan ini konsisten dengan hasil pengujian makro yang menunjukkan penurunan luas dan dimensi

HAZ pada spesimen dengan *travel speed* tinggi, sehingga secara metalurgi menguatkan kesimpulan bahwa *travel speed* tinggi menghasilkan siklus termal yang lebih singkat dan masukan panas yang lebih rendah pada daerah HAZ.

Pada pengujian kekerasan (*hardness*), nilai kekerasan tertinggi pada daerah HAZ diperoleh pada kombinasi metode *Center to end* dengan *travel speed* tinggi sebesar 72,3 HV. Hasil ini menunjukkan hubungan berkebalikan (*trade-off*) dengan hasil pengujian makro pada metode yang sama, yaitu meskipun metode *Center to end* tidak menghasilkan geometri sambungan (*leg length*, *throat*) maupun distorsi serendah metode *Alternating side*, kombinasi tersebut justru unggul dalam mempertahankan kekerasan pada daerah HAZ. Hal ini mengindikasikan bahwa siklus termal pada metode *Center to end* dengan *travel speed* tinggi menghasilkan laju pendinginan yang cukup cepat untuk mempertahankan kekerasan HAZ, meskipun distribusi panasnya tidak seoptimal metode *Alternating side* dalam meminimalkan distorsi dan delusi. Dengan demikian, hasil pengujian makro (*leg length*, *throat*, dan delusi) pada penelitian ini terbukti memiliki korelasi yang kuat dan saling melengkapi dengan hasil pengujian distorsi, struktur mikro, serta kekerasan, di mana keseluruhan hasil pengujian tersebut secara konsisten menunjukkan bahwa *travel speed* merupakan parameter dominan yang memengaruhi masukan panas, sedangkan *welding sequence* berperan dalam menentukan pola distribusi panas pada sambungan las Aluminium 6061.

4.2.3 Pembahasan uji mikro

- Pembahasan struktur mikro *Base Metal* (BM)

Berdasarkan hasil pengamatan struktur mikro pada daerah *Base Metal* (BM), seluruh spesimen (AA, A1, A2, B1, B2, C1, dan C2) menunjukkan karakteristik mikrostruktur yang relatif berseragam. Terlihat butiran yang stabil dengan orientasi memanjang akibat proses manufaktur (*rolling*). Matriks α -Aluminium mendominasi struktur, dengan partikel β (AlFeSi) dan presipitat Mg_2Si yang terdistribusi

merata di dalam matriks maupun pada batas butir. Hasil penelitian (Kusumawardana, et al (2021) menemukan bahwa base metal Aluminium 6061 tetap menunjukkan struktur homogen dengan distribusi presipitat yang merata, meskipun dilakukan variasi perlakuan tambahan. Perubahan signifikan hanya terjadi pada daerah yang terpapar panas. Keseragaman mikrostruktur tersebut menunjukkan bahwa daerah *Base Metal* tidak mengalami perubahan akibat proses pengelasan karena berada di luar daerah yang terpengaruh langsung oleh siklus termal.

Pada perbesaran 200x, morfologi butir tampak homogen dengan batas butir yang jelas. Sedangkan pada perbesaran 500x, detail *sub-grain boundaries* dapat diidentifikasi dengan lebih akurat, memperlihatkan tekstur internal yang terbentuk akibat proses pengerolan. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian (Dewi, C., & Sriandani, 2020) melaporkan bahwa mikrostruktur Aluminium 6061 pada kondisi *as-received* menunjukkan butiran memanjang akibat proses *rolling*, dengan presipitat Mg_2Si dan partikel $AlFeSi$ yang terdistribusi merata. Kondisi ini memberikan sifat mekanik yang tinggi sebelum material menerima perlakuan panas. Kondisi ini menunjukkan bahwa *base metal* memiliki sifat mekanik yang relatif tinggi karena adanya presipitat penguat (Mg_2Si) yang terdistribusi merata, serta partikel intermetalik β ($AlFeSi$) yang berperan dalam meningkatkan ketahanan material terhadap deformasi.

Hasil ini menunjukkan bahwa variasi *travel speed* dan *welding sequence* tidak memberikan pengaruh terhadap struktur mikro *Base Metal*, karena daerah ini tidak menerima panas langsung dari proses pengelasan. Dengan demikian, *Base Metal* Aluminium 6061 tetap berada dalam kondisi optimal dan menjadi acuan pembandingan terhadap perubahan mikrostruktur yang terjadi pada HAZ dan *weld metal*.

- Pembahasan struktur mikro HAZ

Berdasarkan hasil pengamatan struktur mikro pada daerah *Heat Affected Zone* (HAZ), seluruh spesimen (AA, A1, A2, B1, B2, C1, dan

C2) mengalami perubahan signifikan akibat siklus termal pengelasan. Daerah HAZ merupakan daerah yang tidak mengalami peleburan, tetapi menerima panas yang cukup tinggi sehingga terjadi perubahan morfologi dan ukuran butir tanpa mengubah komposisi kimia material.

Pada perbesaran 200x, terlihat adanya pertumbuhan butir (*grain coarsening*) dengan batas butir yang lebih tegas. Presipitat Mg_2Si mengalami pelarutan sebagian (*dissolution*) sehingga distribusinya menjadi tidak seragam. Partikel β (AlFeSi) cenderung menggumpal di batas butir, menunjukkan adanya redistribusi akibat paparan panas. Pada perbesaran 500x, detail perubahan lebih jelas presipitat Mg_2Si tampak lebih besar dan jarang, menunjukkan proses pengasaran, sedangkan partikel intermetalik β (AlFeSi) mengalami kelompok yang lebih inten. Kondisi ini menandakan bahwa siklus termal pengelasan menyebabkan ketidak seimbangan fase, dengan distribusi endapan yang tidak merata.

Perubahan mikrostruktur ini berdampak langsung pada sifat mekanik lokal. Pertumbuhan butir yang tidak terkendali serta pelarutan endapan penguat menyebabkan penurunan kekerasan dan ketangguhan dibandingkan *base metal*. Dengan demikian, HAZ menjadi daerah kritis yang menentukan kualitas sambungan las, karena meskipun tidak mengalami peleburan, sifat mekaniknya melemah akibat perubahan mikrostruktur. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian (Senthilkumar, et al (2023) menegaskan bahwa kecepatan pengelasan memengaruhi tingkat pengasaran di HAZ kecepatan rendah cenderung menghasilkan butir lebih kasar dan penurunan kekerasan lebih besar.

- Pembahasan struktur mikro Weld metal

Berdasarkan hasil pengamatan struktur mikro pada daerah *Weld Metal* (WM), seluruh spesimen (AA, A1, A2, B1, B2, C1, dan C2) penelitian ini menunjukkan adanya transformasi paling drastis dibandingkan dengan *Base Metal* maupun *Heat Affected Zone* (HAZ). Hal ini terjadi karena daerah *weld metal* mengalami pelelehan penuh

dan resolidifikasi selama proses pengelasan, sehingga siklus termal yang dialami jauh lebih ekstrem.

Pada perbesaran 200x, struktur mikro memperlihatkan butir yang sangat halus dengan pola dendrit yang jelas. Pendinginan cepat menyebabkan terbentuknya butiran halus dengan batas butir yang rapat dan padat. Partikel intermetalik β (AlFeSi) tampak lebih halus dan tersebar merata di dalam matriks, meskipun intensitasnya meningkat karena terperangkap dalam struktur dendrit. Endapan Mg_2Si hampir sepenuhnya larut akibat temperatur tinggi, hanya terlihat sedikit pada daerah dengan pendinginan lebih lambat. Kondisi ini menunjukkan bahwa meskipun struktur dendrit terbentuk dengan baik, sifat mekanik lokal menurun karena hilangnya penguatan endapan.

Pada perbesaran 500x, detail struktur mikro terlihat jauh lebih jelas. Pola dendrit dapat diamati dengan resolusi tinggi, termasuk primer dan sekunde *dendrite arms* yang menunjukkan arah pertumbuhan kristal secara teratur. Partikel β (AlFeSi) tampak lebih kecil dan tersebar merata, bahkan pada beberapa bagian membentuk jaringan di sepanjang batas dendrit. Presipitat Mg_2Si hampir tidak ditemukan, menegaskan bahwa elemen penguat utama telah larut sepenuhnya ke dalam matriks. Hal ini memperlihatkan bahwa proses solidifikasi cepat menghasilkan struktur dendrit yang halus dan kompleks, namun kehilangan presipitat menyebabkan penurunan signifikan pada sifat mekanik.

Temuan ini sejalan dengan penelitian Dekiz, et al (2024) yang melaporkan bahwa peningkatan *travel speed* menurunkan *heat input*, mempercepat laju pendinginan, dan menghasilkan morfologi dendrit yang lebih halus, meskipun diikuti dengan berkurangnya presipitat penguat. Selain itu, hasil penelitian ini juga konsisten dengan laporan Suryanto, (2019) yang menyatakan bahwa pengelasan Aluminium 6061 menyebabkan hilangnya presipitat Mg_2Si akibat temperatur tinggi, sehingga *weld metal* didominasi oleh matriks α -Aluminium dengan distribusi partikel intermetalik.

Pengaruh parameter pengelasan terhadap distribusi partikel intermetalik juga diperkuat oleh penelitian Chong et al (2024) yang menunjukkan bahwa perubahan *heat input* memengaruhi perkembangan mikrostruktur, termasuk distribusi partikel β (AlFeSi) dan presipitat Mg_2Si . Dalam penelitian ini, distribusi partikel β terlihat lebih merata pada *travel speed* tinggi, namun presipitat Mg_2Si hampir tidak ditemukan, menegaskan bahwa pendinginan cepat memperhalus butir tetapi mengurangi penguatan presipitat.

Jika dibandingkan antar variasi *welding sequence*, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa metode *Alternating sides* menghasilkan struktur lebih homogen, metode *Center to end* memperlihatkan arah dendriti yang lebih teratur, sedangkan metode *Intermittent* cenderung menghasilkan struktur tidak seragam akibat variasi pendinginan lokal. Hal ini memberikan kontribusi baru yang belum banyak dibahas dalam penelitian terdahulu, karena sebagian besar studi sebelumnya lebih menekankan pada pengaruh *travel speed* atau parameter tunggal, bukan kombinasi dengan variasi *welding sequence*.

4.2.4 Pembahasan Uji *Hardness*

Untuk memperkuat hasil analisis pengujian kekerasan (*Hardness*), pengujian statistik menggunakan *Two-way Analysis of Variance* (*Two-way ANOVA*) berbasis IBM SPSS *Statistics* dilakukan untuk memperdalam analisis data kekerasan sambungan las. Melalui metode ini, pengaruh dari variabel *travel speed* dan *welding squance* terhadap nilai kekerasan dapat diidentifikasi. Namun, sebelum masuk ke analisis *Two-way ANOVA*, data harus dipastikan berdistribusi normal melalui uji normalitas sebagai pemenuhan asumsi dasar statistik parametrik. Ketika data terbukti normal, analisis ANOVA dua jalur ini dapat diandalkan untuk mengukur signifikansi pengaruh utama (*main effect*) dari tiap variabel beserta interaksi di antara keduanya. Untuk dasar pengambilan keputusan dalam uji normalitas, acuan yang

digunakan adalah sebagai berikut, dan Tabel 4.21 menunjukkan tabel uji normalitas.

- Jika nilai $\text{Sig.} > 0,05$, maka data berdistribusi normal.
- Jika nilai $\text{Sig.} \leq 0,05$, maka data tidak berdistribusi normal.

Tabel 4. 21 Hasil Uji Normalitas WM, HAZ, dan BM

Uji Normalitas							
		<i>Kolmogorov-Smirnov^a</i>			<i>Shapiro-Wilk</i>		
	<i>Welding Sequence</i>	<i>Statistic</i>	<i>df</i>	<i>Sig.</i>	<i>Statistic</i>	<i>df</i>	<i>Sig.</i>
<i>WeldMetal</i>	A	6	.218	.200*	.934	6	.611
	B	6	.204	.200*	.918	6	.493
	C	6	.185	.200*	.974	6	.918
<i>Heat Affected Zone</i>	A	6	.238	.200*	.894	6	.340
	B	6	.243	.200*	.859	6	.185
	C	6	.175	.200*	.975	6	.926
<i>Base Metal</i>	A	6	.268	.200*	.896	6	.348
	B	6	.199	.200*	.949	6	.734
	C	6	.186	.200*	.932	6	.595

Berdasarkan hasil uji normalitas pada data uji kekerasan dilakukan pengujian menggunakan *Shapiro-Wilk Test*. Pemilihan *Shapiro-Wilk* didasarkan pada jumlah data yang digunakan sebanyak 18 sampel ($3 \text{ welding sequence} \times 3 \text{ pengulangan}$) menggunakan 2 *travel speed* cepat dan lambat, di mana untuk sampel berukuran kecil hingga sedang ($N < 50$), *Shapiro-Wilk Test* lebih sesuai dibandingkan *Kolmogorov-Smirnov*. Hasil uji normalitas pada Tabel 4.21 menunjukkan nilai signifikansi *Shapiro-Wilk* tersebut lebih besar dari 0,05 ($\alpha = 0,05$), sehingga dapat disimpulkan bahwa data uji kekerasan untuk semua *welding sequence* berdistribusi normal.

Dengan terpenuhinya asumsi normalitas, analisis dapat dilanjutkan ke uji homogenitas untuk mengetahui apakah varians data antar kelompok *welding sequence* bersifat homogen atau tidak. Dasar

pengambilan keputusan pada uji homogenitas adalah sebagai berikut (Levene, 1960):

- Jika nilai signifikansi Based on Mean $> 0,05$, maka varians data bersifat homogen.
- Jika nilai signifikansi Based on Mean $\leq 0,05$, maka varians data tidak homogen.

Hasil uji homogenitas dapat dilihat pada Tabel 4.22 sampai Tabel 4.24 berikut :

Tabel 4. 22 Hasil Uji Homogenitas WM

Levene's Test of Equality of Error Variances^{abc}					
		Levene Statistic	df1	df2	Sig.^d
<i>Weld Metal</i>	<i>Based on Mean</i>	1.856	5	12	.176
	<i>Based on Median</i>	1.377	5	12	.300
	<i>Based on Median and with adjusted df</i>	1.377	5	5.045	.366
	<i>Based on trimmed mean</i>	1.856	5	12	.176

Pada Tabel 4.22 diperoleh nilai signifikansi sebesar 0,176 untuk daerah *Weld Metal* (WM). Nilai tersebut lebih besar dari 0,05 sehingga menunjukkan bahwa varians data kekerasan pada daerah *Weld Metal* homogen. Dengan demikian, asumsi homogenitas varians untuk analisis parametrik pada daerah WM telah terpenuhi. Homogenitas varians ini menunjukkan bahwa penyebaran nilai kekerasan antar kombinasi perlakuan pada daerah las relatif seragam, yang mengindikasikan bahwa proses pembekuan logam las serta pengaruh *reduction swaging* dan *annealing* menghasilkan variasi kekerasan yang masih berada dalam rentang penyebaran yang sebanding antar kelompok. Oleh karena itu, data kekerasan pada daerah WM memenuhi salah satu asumsi dasar untuk dilanjutkan dengan analisis parametrik *Two-way ANOVA*.

Tabel 4. 23 Hasil Uji Homogenitas HAZ

Levene's Test of Equality of Error Variances^{abc}					
		Levene Statistic	df1	df2	Sig.^d
<i>Heat Affected Zone</i>	<i>Based on Mean</i>	4.171	5	12	.02
	<i>Based on Median</i>	.614	5	12	.692
	<i>Based on Median and with adjusted df</i>	.614	5	3.709	.701
	<i>Based on trimmed mean</i>	4.171	5	12	.020

Pada Tabel 4.23 diperoleh nilai signifikansi sebesar 0,020 untuk daerah *Heat Affected Zone* (HAZ). Nilai tersebut lebih kecil dari 0,05 sehingga menunjukkan bahwa varians data kekerasan pada daerah HAZ tidak homogen. Dengan demikian, asumsi homogenitas varians untuk analisis parametrik pada daerah HAZ tidak terpenuhi. Ketidakhomogenan varians ini mengindikasikan bahwa penyebaran nilai kekerasan antar kombinasi perlakuan pada daerah HAZ memiliki variasi yang berbeda. Kondisi tersebut kemungkinan disebabkan oleh perbedaan siklus termal pengelasan yang diterima tiap spesimen pada daerah HAZ, yang berdampak pada perubahan densitas dislokasi dan pertumbuhan butir secara tidak seragam akibat kombinasi perlakuan *reduction swaging* dan *travel speed* yang berbeda. Selain itu, jumlah spesimen yang relatif terbatas pada masing-masing kelompok (n=3 per kombinasi) juga dapat menyebabkan nilai varians antar kelompok menjadi tidak seragam. Karena asumsi homogenitas tidak terpenuhi, analisis statistik pada daerah HAZ selanjutnya menggunakan uji nonparametrik (*Mann-Whitney U* dan *Kruskal-Wallis*), sehingga hasil pengujian lebih sesuai dengan karakteristik data yang diperoleh.

Tabel 4. 24 Hasil Uji Homogenitas BM

Levene's Test of Equality of Error Variances^{abc}					
		Levene Statistic	df1	df2	Sig.^d
<i>Base Metal</i>	<i>Based on Mean</i>	2.219	5	12	.120
	<i>Based on Median</i>	.460	5	12	.798

Pada Tabel 4.24 diperoleh nilai signifikansi sebesar 0,120 untuk daerah *Base Metal* (BM). Nilai tersebut lebih besar dari 0,05 sehingga menunjukkan bahwa varians data kekerasan pada daerah *Base Metal* homogen. Dengan demikian, asumsi homogenitas varians untuk analisis parametrik pada daerah BM telah terpenuhi. Homogenitas varians pada daerah BM menunjukkan bahwa penyebaran nilai kekerasan antar kelompok perlakuan relatif seragam, mengingat daerah base metal tidak mengalami siklus termal langsung dari proses pengelasan sehingga perubahan mikrostruktur akibat perlakuan *reduction swaging* dan *travel speed* cenderung lebih konsisten antar spesimen.

Dalam analisis *Two-way ANOVA*, digunakan hipotesis nol (H_0) dan hipotesis alternatif (H_1) sebagai dasar pengambilan keputusan. Adapun hipotesis yang digunakan adalah sebagai berikut.

- H_0 : Tidak terdapat pengaruh yang signifikan dari variasi *welding squance* dan *travel speed* terhadap nilai kekerasan.
- H_1 : Terdapat pengaruh yang signifikan dari variasi *welding squance* dan *travel speed* terhadap nilai kekerasan.

Tabel 4. 25 Hasil ANOVA *Two Way BM*

<i>Tests of Between-Subjects Effects</i>					
<i>Dependent Variable: WeldMetal</i>					
<i>Source</i>	<i>Type III Sum of Squares</i>	<i>df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F</i>	<i>Sig.</i>
Corrected Model	32.667 ^a	5	6.533	1.164	.381
<i>Intercept</i>	96800.000	1	96800.000	17251.485	<.001
<i>sequence</i>	5.333	2	2.667	.475	.633
<i>TravelSpeed</i>	5.556	1	5.556	.990	.339
<i>sequence * TravelSpeed</i>	21.778	2	10.889	1.941	.186
<i>Error</i>	67.333	12	5.611		
<i>Total</i>	96900.000	18			
<i>Corrected Total</i>	100.000	17			

Berdasarkan Tabel 4.25, nilai *Corrected Model* memiliki Sig. 0,381 ($>0,05$), yang berarti model kombinasi faktor Perlakuan dan *Travel speed* tidak berpengaruh signifikan terhadap kekerasan *Weld Metal*. *R Squared* hanya 0,327, menunjukkan model ini lemah menjelaskan variasi data.

Faktor *sequence* (Perlakuan) memiliki Sig. 0,633 dan *Travel speed* Sig. 0,339, keduanya lebih besar dari 0,05, artinya tidak ada pengaruh signifikan dari kedua faktor tersebut terhadap kekerasan WM. Begitu pula interaksi *sequence * TravelSpeed* dengan Sig. 0,186, tidak signifikan. Hal ini kemungkinan disebabkan daerah las mengalami peleburan dan pembekuan penuh sehingga struktur mikronya relatif seragam, tidak terlalu terpengaruh variasi perlakuan *reduction swaging* maupun *travel speed* pada rentang yang diuji.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa baik Perlakuan, *Travel speed*, maupun interaksinya tidak berpengaruh signifikan terhadap nilai kekerasan Weld Metal, sehingga kekerasan pada daerah ini cenderung stabil di seluruh kombinasi perlakuan.

Tabel 4. 26 Hasil Uji ANOVA *Two-way BM*

<i>Tests of Between-Subjects Effects</i>					
<i>Dependent Variable: BaseMetal</i>					
<i>Source</i>	<i>Type III Sum of Squares</i>	<i>df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F</i>	<i>Sig.</i>
Corrected Model	294.000 ^a	5	58.800	5.428	.008
Intercept	153458.000	1	153458.000	14165.354	<.001
sequence	100.333	2	50.167	4.631	.032
TravelSpeed	186.889	1	186.889	17.251	.001
sequence * TravelSpeed	6.778	2	3.389	.313	.737
Error	130.000	12	10.833		
Total	153882.000	18			
Corrected Total	424.000	17			

Berdasarkan Tabel 4.26, nilai Corrected Model memiliki Sig. 0,008 ($<0,05$), menunjukkan model kombinasi faktor Perlakuan dan *Travel speed* berpengaruh signifikan terhadap kekerasan *Base Metal*. *R Squared* sebesar 0,693 menunjukkan model ini cukup baik menjelaskan variasi data.

Faktor *sequence* (Perlakuan) memiliki Sig. 0,032, menunjukkan pengaruh signifikan, kemungkinan akibat perbedaan tingkat deformasi plastis dari proses *reduction swaging* yang mengubah densitas dislokasi antar kelompok. Faktor *Travel speed* memiliki Sig. 0,001, juga signifikan, diduga karena perbedaan *heat input* yang merambat ke *base metal* memengaruhi tingkat pelunakan atau tegangan sisa material. Sementara itu, interaksi *sequence Travel speed* memiliki Sig. 0,737 ($>0,05$), sehingga tidak signifikan pengaruh Perlakuan konsisten di kedua *Travel speed*.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa Perlakuan dan *Travel speed* secara mandiri berpengaruh signifikan terhadap kekerasan *Base Metal*, namun tidak saling berinteraksi secara signifikan.

Karena pada HAZ tidak memenuhi uji homogenitas dilakukan analisis uji *non parametrik* dengan hasil pada Tabel 4.27 berikut :

Tabel 4. 27 Hasil Uji *Non Parametrik* HAZ

	<i>Null Hypothesis</i>	<i>Test</i>	<i>Sig.</i>	<i>Decision</i>
1	<i>The distribution of Hardness is the same across categories of Travel_Speed.</i>	<i>Independent-Samples Mann-Whitney U Test</i>	.051	<i>Retain the null hypothesis.</i>
2	<i>The distribution of Hardness is the same across categories of Perlakuan.</i>	<i>Independent-Samples Kruskal-Wallis Test</i>	.003	<i>Reject the null hypothesis.</i>

Berdasarkan Tabel 4.27, uji *Independent-Samples Mann-Whitney U Test* menghasilkan nilai signifikansi sebesar 0,051, yang sedikit lebih besar dari 0,05, sehingga keputusan yang diambil adalah menerima (*retain*) hipotesis nol. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi nilai kekerasan pada daerah HAZ tidak berbeda secara signifikan antar kategori *Travel speed* (95-100 dan 115-120mm/menit), meskipun nilai signifikansinya berada sangat dekat dengan ambang batas 0,05, sehingga kecenderungan adanya perbedaan tetap perlu diperhatikan.

Sementara itu, uji *Independent-Samples Kruskal-Wallis Test* menghasilkan nilai signifikansi sebesar 0,003, yang lebih kecil dari 0,05, sehingga keputusan yang diambil adalah menolak (*reject*) hipotesis nol. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi nilai kekerasan pada daerah HAZ berbeda secara signifikan antar kategori Perlakuan (A, B, dan C). Perbedaan ini kemungkinan disebabkan oleh variasi siklus termal dan tingkat deformasi plastis yang berbeda pada setiap kombinasi perlakuan *reduction swaging*, yang berdampak pada perubahan struktur mikro dan densitas dislokasi di daerah HAZ. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa faktor Perlakuan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap distribusi nilai kekerasan pada daerah HAZ, sedangkan faktor *Travel speed* tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan secara statistik pada uji nonparametrik ini.

Secara keseluruhan, hasil pengujian kekerasan pada seluruh spesimen menunjukkan pola yang konsisten, yaitu Base Metal selalu memiliki nilai kekerasan tertinggi (85–97 HV), Weld Metal berada pada posisi menengah (70–75 HV), sedangkan Heat Affected Zone (HAZ) selalu menjadi zona dengan kekerasan terendah (54–72 HV) pada seluruh variasi welding sequence dan *travel speed*. Hasil uji *Two-way* ANOVA menunjukkan bahwa *travel speed* dan welding sequence masing-masing berpengaruh signifikan terhadap kekerasan Base Metal, sedangkan pada daerah HAZ, uji non-parametrik menunjukkan bahwa welding sequence berpengaruh signifikan sementara *travel speed* tidak signifikan secara statistik meskipun nilai signifikansinya (0,051) berada sangat dekat dengan ambang batas 0,05. Interaksi antara kedua faktor tersebut secara umum tidak signifikan (Sig. = 0,072), yang menunjukkan bahwa pengaruh *travel speed* terhadap kekerasan relatif konsisten pada seluruh welding sequence yang diuji. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian (Dharma et al., 2026) yang menyatakan bahwa nilai kekerasan tertinggi pada sambungan las aluminium berbasis GTAW diperoleh pada base metal, kemudian menurun signifikan pada daerah HAZ dan weld metal akibat siklus termal pengelasan.

Fenomena penurunan kekerasan pada HAZ ini berkorelasi erat dengan hasil pengujian mikro pada subbab 4.2.3, di mana daerah HAZ mengalami pertumbuhan butir (grain coarsening) yang disertai pelarutan sebagian presipitat penguat Mg_2Si , sehingga kombinasi butir kasar dan berkurangnya presipitat penguat inilah yang menjelaskan mengapa HAZ konsisten menjadi zona terlemah pada seluruh spesimen. Menariknya, meskipun weld metal juga kehilangan hampir seluruh presipitat Mg_2Si akibat pelelehan penuh, nilai kekerasannya tetap lebih tinggi dibandingkan HAZ. Kondisi ini dapat dijelaskan melalui struktur dendrit halus yang terbentuk akibat laju pendinginan cepat pada weld metal, yang memberikan efek penghalusan butir (grain refinement) sehingga sebagian mampu mengompensasi hilangnya presipitat penguat. Hal ini sejalan dengan penelitian (Jula et al., 2023) yang menyatakan bahwa profil

kekerasan HAZ pada pengelasan GTAW paduan aluminium seri 6xxx terbentuk akibat siklus termal yang menyebabkan pelarutan fasa Mg_2Si secara bertahap, sehingga zona HAZ mengalami pelemahan (softening) yang lebih signifikan dibandingkan zona lain pada sambungan las.

Korelasi juga terlihat terhadap hasil pengujian makro dan distorsi. Kombinasi metode *Alternating sides* dengan *travel speed* tinggi (spesimen A2), yang pada pengujian makro menghasilkan luas HAZ tersempit ($12,40 \text{ mm}^2$) serta pada pengujian distorsi menghasilkan distorsi terendah ($1,20 \text{ mm}$), turut menunjukkan nilai kekerasan HAZ yang meningkat dibandingkan *travel speed* rendah pada metode yang sama (dari $53,6 \text{ HV}$ menjadi $59,6 \text{ HV}$). Hal ini menegaskan bahwa masukan panas yang lebih rendah pada *travel speed* tinggi tidak hanya mempersempit daerah HAZ dan menekan distorsi, tetapi juga membatasi tingkat pelunakan (softening) pada daerah tersebut. Sebaliknya, kombinasi metode *Center to end* dengan *travel speed* tinggi (spesimen B2), meskipun pada pengujian distorsi menghasilkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan *Alternating sides*, justru mencatatkan nilai kekerasan HAZ tertinggi di antara seluruh spesimen ($72,3 \text{ HV}$). Kondisi ini mengindikasikan adanya hubungan trade-off antara distribusi panas yang memengaruhi distorsi dan geometri makro di satu sisi, dengan laju pendinginan lokal yang memengaruhi kekerasan HAZ di sisi lain, sehingga metode *Center to end* dengan *travel speed* tinggi lebih unggul dalam mempertahankan kekerasan meskipun tidak seoptimal *Alternating sides* dalam meminimalkan distorsi dan luas HAZ.

Dengan demikian, hasil pengujian *hardness* pada penelitian ini terbukti memiliki keterkaitan yang kuat dan saling melengkapi dengan hasil pengujian distorsi, makro, dan mikro, di mana *travel speed* berperan dominan dalam mengendalikan masukan panas dan tingkat pelunakan HAZ, sedangkan welding sequence lebih berperan dalam menentukan pola distribusi panas yang memengaruhi distorsi dan geometri sambungan las Aluminium 6061.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan mengenai pengaruh variasi welding sequence dan *travel speed* terhadap distorsi, struktur makro-mikro, dan nilai kekerasan pada pengelasan GTAW Aluminium seri 6061, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil uji distorsi menunjukkan bahwa peningkatan *travel speed* dari 95–100 mm/menit menjadi 115–120 mm/menit secara konsisten menurunkan nilai distorsi pada seluruh metode welding sequence akibat berkurangnya heat input yang diterima material. Metode *Center to end* (spesimen B1) menghasilkan distorsi tertinggi (maksimum 2,42 mm pada *travel speed* rendah) akibat akumulasi panas yang terkonsentrasi di tengah pelat sebelum menyebar ke ujung, sedangkan metode *Alternating sides* dengan *travel speed* tinggi (spesimen A2) menghasilkan distorsi terendah, yaitu 1,20 mm, karena distribusi panas yang lebih merata di kedua sisi pelat. Dengan demikian, kombinasi *Alternating sides* dan *travel speed* tinggi merupakan parameter paling optimal untuk meminimalkan distorsi.
2. Hasil makro seluruh spesimen menunjukkan kualitas sambungan las yang baik tanpa cacat pengelasan, namun luas daerah Heat Affected Zone (HAZ) berbeda signifikan antarvariasi. *Travel speed* rendah menghasilkan luas HAZ terbesar (spesimen B1 = 20,29 mm²) karena heat input yang lebih tinggi, sedangkan *travel speed* tinggi pada metode *Alternating sides* (spesimen A2) menghasilkan luas HAZ tersempit, yaitu 12,40 mm².

Hasil mikro menunjukkan struktur Base Metal relatif seragam dan tidak terpengaruh oleh variasi parameter las, sedangkan daerah HAZ mengalami pertumbuhan butir (grain coarsening) dan pelarutan sebagian presipitat Mg₂Si, serta Weld Metal menunjukkan struktur dendrit halus akibat pendinginan cepat namun kehilangan presipitat penguat. *Travel*

speed tinggi terbukti memperhalus struktur butir dan menekan pengasaran mikrostruktur di HAZ.

3. Hasil uji *Two-way* ANOVA menunjukkan bahwa faktor *travel speed* (Sig. < 0,001) dan *welding sequence* (Sig. < 0,001) masing-masing berpengaruh signifikan terhadap nilai kekerasan, sedangkan interaksi antara kedua faktor tersebut tidak signifikan (Sig. = 0,072). Pada seluruh variasi, Base Metal selalu memiliki kekerasan tertinggi (85–97 HV), HAZ selalu menjadi zona dengan kekerasan terendah (54–72 HV) sehingga menjadi titik paling kritis pada sambungan las, sementara Weld Metal berada pada posisi menengah (71–75 HV). Peningkatan *travel speed* meningkatkan kekerasan pada seluruh zona akibat laju pendinginan yang lebih cepat. Di antara ketiga metode, *Center to end* menghasilkan kekerasan HAZ tertinggi (mendekati Base Metal), diikuti *Alternating sides*, sedangkan *Intermittent* menghasilkan kekerasan HAZ terendah akibat siklus termal yang lebih kompleks.

Secara keseluruhan, penelitian ini menyimpulkan bahwa kombinasi *welding sequence* dan *travel speed* memberikan pengaruh nyata terhadap distorsi, struktur mikro, dan kekerasan sambungan las Aluminium 6061. Tidak terdapat satu parameter tunggal yang optimal pada ketiga aspek sekaligus *Alternating sides* dengan *travel speed* tinggi paling unggul dalam meminimalkan distorsi dan luas HAZ, sedangkan *Center to end* dengan *travel speed* tinggi lebih unggul dalam mempertahankan kekerasan HAZ. Pemilihan parameter pengelasan optimal perlu disesuaikan dengan prioritas kebutuhan aplikasi, yaitu kestabilan dimensi atau kekuatan mekanik sambungan.

5.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan di atas, beberapa saran yang dapat diberikan untuk penelitian maupun penerapan selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Bagi peneliti selanjutnya, disarankan untuk menambah variasi *travel speed* di luar rentang 95–120 mm/menit serta menguji metode *welding*

sequence lain agar diperoleh peta pengaruh parameter yang lebih luas dan mendalam.

2. Perlu dilakukan penelitian lanjutan yang menggabungkan optimasi distorsi dan kekerasan secara simultan, misalnya menggunakan pendekatan multi-response optimization (seperti Taguchi-Grey Relational Analysis atau Response Surface Methodology), untuk menemukan parameter yang optimal pada kedua aspek sekaligus, bukan hanya salah satunya.
3. Mengingat HAZ konsisten menjadi zona terlemah pada seluruh variasi, disarankan dilakukan penelitian mengenai perlakuan pasca-las (post-weld heat *treatment*, misalnya aging T6) untuk memulihkan kekerasan pada daerah HAZ.
4. Bagi pihak industri, khususnya PT. X, kombinasi welding sequence *Alternating sides* dengan *travel speed* tinggi (115–120 mm/menit) dapat direkomendasikan pada aplikasi yang menuntut stabilitas dimensi/distorsi rendah, sedangkan kombinasi *Center to end* dengan *travel speed* tinggi lebih sesuai untuk aplikasi yang menuntut kekuatan sambungan (kekerasan) lebih tinggi.
5. Perlu dilakukan pengujian mekanik tambahan seperti uji tarik (tensile test) dan uji lelah (fatigue test) pada sambungan hasil variasi terbaik untuk memvalidasi apakah perbaikan pada distorsi dan kekerasan juga berdampak positif terhadap performa mekanik sambungan secara keseluruhan.
6. Disarankan pula dilakukan pengujian dengan jumlah spesimen dan pengulangan yang lebih banyak untuk meningkatkan keandalan statistik, khususnya pada uji interaksi *Two-way* ANOVA yang pada penelitian ini belum menunjukkan pengaruh interaksi signifikan.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Afonso, I. S., Martín, M. R., & Ribeiro, J. E. (2022). Effect of Welding Sequence in Angular Distortion on Butt Joint GMAW Process. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(20). <https://doi.org/10.3390/app122010402>
- Altenpohl, D. (1982). *Aluminum Viewed from Within: An Introduction into the Metallurgy of Aluminum Fabrication*. Dusseldorf: Aluminum-Verlag.
- Andritsos, F., & Prat, J. P. (2000). *he otomationand integration of production processes in shipbuilding*. Joint Reserch Center, European Commission.
- ASM, I. (1998). *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials. Metals Handbook Vol. 2. Materials Park. Ohio*.
- ASME. (2019). *Specifications for Welding Rods, Electrodes, and Filler Metals: Vol. Section II*. ASME Boiler & Pressure Vessel Code.
- ASTM-E340-15. (n.d.). *Standard Practice for Macroetching Metals and Alloys*. <https://doi.org/10.1520/E0340-15.2>
- ASTM-E407-23. (2023). *Standard Practice for Microetching Metals and Alloys 1. i*, 1–22. <https://doi.org/10.1520/E0407-23.2>
- ASTM. (2023). *Standard Practice for Microetching Metals and Alloys 1. i*, 1–22. <https://doi.org/10.1520/E0407-23.2>
- AWS. (2025). Structural Welding Code. In *Struct Weld Code*.
- Azis, A. P., & Nugraha, A. (2025). Pengelasan Fcaw Terhadap Kekuatan Tarik Dan Distorsi Baja A36 The Effect Of Electric Current And Welding Speed Variations In Fcaw Welding On Tensile Strength And Distortion Of A36 Steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.
- Budiarto, A. S. P. S. J. U. (2019). *Pengaruh Kuat Arus Listrik dan Travelling Speed terhadap Kekuatan Impact Alumunium 6061 Pengelasan Gas Tungsten ArchWelding (GTAW) dengan Gas Pelindung Argon*. 7(4).
- Callister Jr, W. D. (2007). *Material Science and Engineering A.n Introduction, 7th Edition*, New Jersey: Jhon Wiley & Sons, Inc, Hoboken.
- Chauhan, H. P. P. (2016). *A Review on Activated Gas Tungsten Arc Welding (A-GTAW)*.
- Chong, K., Mhd Noor, E. E., Amir, A., & Baig, M. F. (2024). *Study on Welding Characteristics and Parameters of Gas Metal Arc Welding for A516 Grade 70 Steel with ER70S-6 and ER308LSi Filler Materials. Materials*. 17(21), 53. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ma17215391>
- Conrardy, C., Huang, T. ., Harwig, D., Dong, P., Kvidahl, L., Evans, N., & Treaster, A. (2006). Practical Welding Techniques to Minimize Distortion in Lightweight Ship Structures. *J Ship Prod* 22, 239–247. <https://doi.org/10.5957/jsp.2006.22.4.239>

- Dekiz, F., Ismar, M., & Setiawan, A. (2024). Analisis pengaruh variasi kuat arus pengelasan GTAW terhadap distorsi dan kekuatan tarik pada sambungan aluminium 6061. *Jurnal Teknik Mesin Dan Manufaktur*, 16(1), 45–53.
- Dewi, C., & Sriandani, N. (2020). Analisis pengaruh parameter kuat arus dan kecepatan pengelasan terhadap cacat distorsi dan kekuatan tarik pada pengelasan GTAW Aluminium 6061. *Jurnal Rekayasa Mesin*.
- Dharma, S., Sebayang, R., Hasibuan, M., Tazkia, S. N., Medan, P. N., & Medan, U. H. (2026). *Jurnal Polimesin*. 24(3), 421–428.
- Firmansyah, M. J., Munir, A., & Syah, H. (2025). Pengaruh Proses Quenching Dengan Media Pendingin Minyak Dan Air Kepada Kekerasan, Struktur Mikro, Dan Sistem Kristal Bahan Titanium Komersia. 1–31.
- Iii, S., Kuch, A., & Jalmaf, Y. (2023). Analisis Pengaruh Variasi Besar Arus dan Kecepatan Pengelasan Terhadap Pengujian Tekuk / Bending dan Struktur Makro pada Material Aluminium 6061 dengan Proses Pengelasan TIG (GTAW). *Senastitan Iii*, 1–10.
- ISO, 13920. (2023). *INTERNATIONAL STANDARD Welding — General tolerances for welded constructions — Dimensions for lengths and angles , shape and iTeh STANDARD PREVIEW iTeh STANDARD PREVIEW* (Vol. 2023).
- Jula, M., Dehmlaei, R., & Ranjbar, K. (2023). Softening, Hardening, and Precipitation Evolution of the AA6082-T651 Heat-Affected Zone Caused by Thermal Cycles During and After Welding. *Metals and Materials International*, 29(12), 3664–3678. <https://doi.org/10.1007/s12540-023-01470-2>
- Ketaren, L. P., Budiarno, U., & Wibawa, A. (2019). Analisa Pengaruh Variasi Kampuh Las dan Arus Listrik Terhadap Kekuatan Tarik Dan Struktur Mikro Sambungan Las GMAW (Gas Metal ARC Welding) Pada Aluminium 6061. *Jurnal Teknik Perkapalan*. Vol. 7, No. 4, 7(4), 345–354.
- Kusumawardana, A., Subuki, I., & Ali, M. (2021). Analisis sifat mekanik dan struktur mikro sambungan las aluminium 6061-T6 dengan metode Gas Tungsten Arc Welding (GTAW). *Jurnal Teknologi Bahan dan Barang Teknik*.
- Levene, H. (1960). Contributions to Probability and Statistics: Essays in Honor of Harold Hotelling. *Stanford University Press*., 278–292.
- Lubis, R. W., Dharma, S., Sebayang, R., Bahri, N., & Aldi, M. (2024). Analisis Pengaruh Variasi Logam Pengisi (Filler) Pada Proses Pengelasan Gtaw Paduan Aluminium Terhadap Uji Kekerasan Dan Struktur Mikro. 05(02), 42–51.
- McPherson, N. A. (2007). Thin plate distortion the ongoing problem in shipbuilding. *Journal of Ship Production*, 23(02), 94–117.

- Mitru, A., Mitru, M., Cotesu, C., & Semenescu, A. (2021). Contributions To Robotic Gas Tungsten Arc Welding Of A Heat Exchanger Assembly Used As A Part Of An Electrically Driven Centrifugal Air Compressor Ccae. *Nonconventional Technologies Review*, 15–300.
- Munir, M. M., Mukhlis, M., R, I. K., B, H., A, M. S., A, E., & W, A. A. (2019). Effect of Welding Sequence on Multi Pass Temper Bead Welding Joint of Pt .Inka Bogie Lrt on Distorction, Micro Structure and Hardness. *Jurnal Integrasi*, 11(2), 103–111. <https://doi.org/10.30871/ji.v11i2.1662>
- Oliver, J. (2006). Kobelco Welding Today. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 9 No.31, 1689–1699.
- Perdana, M. Y., Yunitasari, B., & Jurusan. (2022). Analisis Laju Korosifitas Dan Struktur Mikro Paduan Al6061 Dan Alumunium Komersil Dengan Perlakuan Panas T6 Double Quenching Oli Sae 20W. *JTM. VOLUME 10 NOMER 01 Tahun 2022, 117-122 Kapal*, 117–122.
- Radaj, D. (1992). *Welding residual stress and distortion*.
- Ramakrishnan, P. (1972). Welding Metallurgy. *Indian Welding Journal*, 4(3), 89–96.
- Safi’I, I. (2019). Analisis Pengaruh Variasi Temperatur dan Waktu Aging pada Hasil Pengecoran AL-Cu Terhadap Kekerasan. *Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya*.
- Senthilkumar, S., Manivannan, S., Venkatesh, R., & Karthikeyan, M. (2023). *Influence of heat input on the mechanical characteristics, corrosion and microstructure of ASTM A36 steel welded by GTAW technique*.
- Setyawan, P. E., Irawan, Y. S., & Suprpto, W. (2014). Kekuatan Tarik dan Porositas Hasil Sambungan Las Gesek Aluminium 6061 dengan Berbagai Suhu Aging. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 5(2), 141–148.
- Sonawan, H., & Suratman, R. (2003). *Pengelasan Logam*. Alfabeta.
- Sriwidharto. (2006). *Petunjuk Kerja Las*. Pradnya Paramita.
- Subagyo, N. U. R. I. (2017). *Analisis Pengaruh Artificial Aging Terhadap Sifat Mekanis Pada Aluminium Seri 6061*. 6061.
- Sudirman. (2023). *Statistika Pendidikan*.
- Sulaeman, M., Budiman, H., & Koswara, E. (2018). *Proses Uji Dimensi, Uji Kekerasan Dengan Metode Rockwell Dan Uji Komposisi Kimia Pada Cangkul Di Balai Besar Logam Dan Mesin (BBLM) Bandung*. 539–543.
- Surdia, Tata, S. (1995). *Pengetahuan Bahan Teknik*. PT Pradnya Paramita.

- Suryanto, H., & Prasetyo, A. (2019). Pengaruh parameter pengelasan Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) terhadap struktur mikro dan nilai kekerasan micro vickers pada paduan aluminium. *Jurnal Keilmuan Dan Penerapan Teknik*, 10(2), 88–96.
- Syahrani, A., Mustafa, & Oktavianus. (2007). Pengaruh Variasi Arus Pengelasan GTAW Terhadap Sifat Mekanis Pada Pipa Baja Karbon ASTM A 106. *2007 6th International Conference on Information, Communications and Signal Processing, ICICS*, 8(1), 721–729.
- Widiyanto, S. (2017). *Pengaruh Metode Student Teams Achievement Division (STAD) dan Pemahaman Struktur Kalimat terhadap Keterampilan Menulis Narasi*. 8(1), 82–89.
- Wiryosumarto, H., & Okumura, T. (2000). *Teknologi Pengelasan Logam*.
- Zhang, H., & , Shengsun Hu, Z. W. (2015). *The effect of welding speed on microstructures of cold metal transfer deposited AZ31 magnesium alloy clad*.
- Zulhanif, & Hasymi, Z. (2023). Pengaruh Variasi Temperatur Artificial Aging Pada Aluminium 6061 Terhadap Sifat Kekerasan Dan Strukur Mikro. *Jurnal Mechanical 14 (2023) 184, 14*, 1–4.

LAMPIRAN

Lampiran A Mill Certificate

Lampiran A. 1 Mill Certificate Aluminium 6061-T6

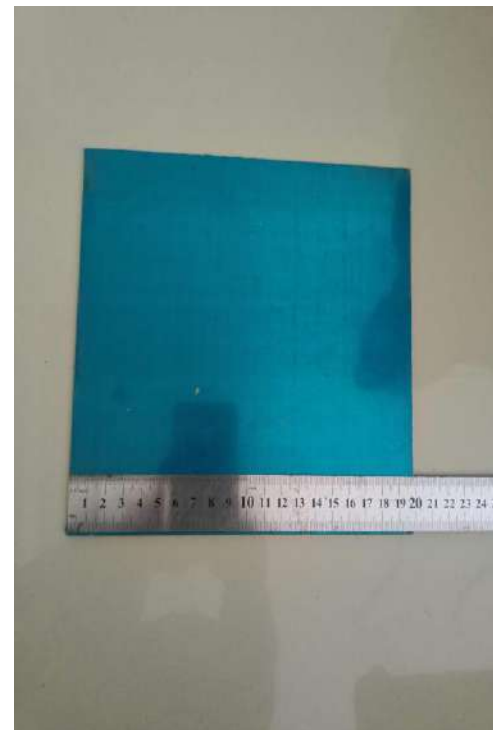
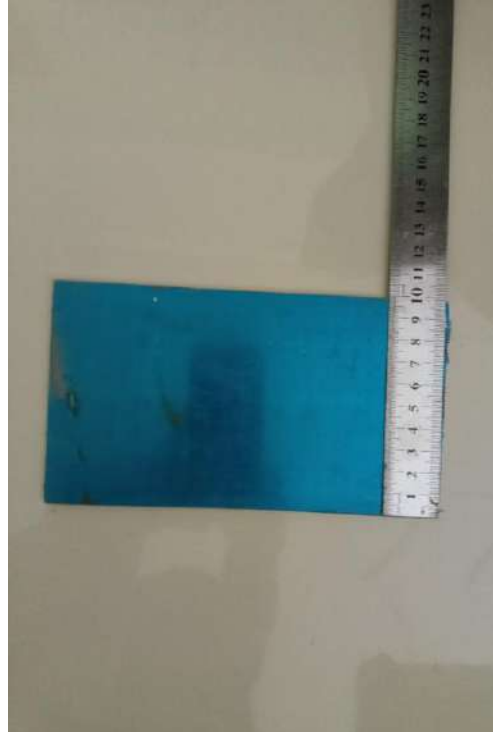
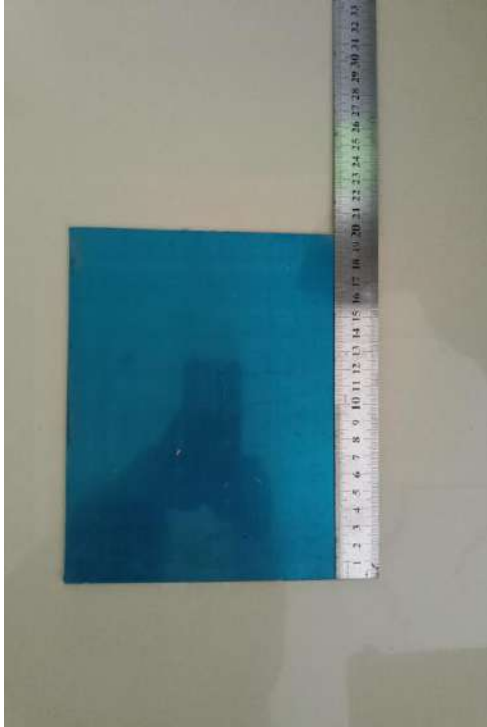
MILL CERTIFICATE										
Contract Number:						Date: 25th May 2019				
Products Name	Temper	Number		Specification						
Aluminium plate	6061-T6	1		4*1250*2500 75 PCS						
		2		6*1250*2500 50 PCS						
		3,4		35*1220*2440 18 PCS						
		5,6		30*1220*2440 12 PCS						
		7,8		70*1220*2440 9 PCS						
		9,10		100*1220*2440 6 PCS						
Grade	PCS	Pallet		Net weight Kg						
	170	10		25119						
Standard		GB/T3880-2012								
CHEMICAL COMPONENT										
Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Zr
Standard Value	0.4-0.8	0.7	0.15-0.4	0.15	0.8-1.2	0.04-0.35	-	0.25	0.15	-
Measured Values	0.48-0.55	0.27-0.3	0.18-0.23	0.05	0.92-0.99	0.09-0.13	-	0.03	0.06	-
Structure Property and others										
Sample Temper	Tensile strength Rm/Mpa		Yield strength Rp0.2/Mpa		Elongation after fracture A/%					
T6	315-328		266-285		>10%					
Hardness, HB	/		/							
HB>95	/		/							
SIZE SURFACE	Remark									
✓	✓									
1.If there is any alloy condition, specification and surface problem, it should be within 15 days. Explain the performance problem. it should be reported to the supplier within 3 months.Overdue self-treatment. 2.When objection come out, Date of manufacturer,Alloy temper,specification and quantity should be stated.										

Lampiran A. 2 Mill Certificate Filler Metal ER5356



Lampiran B Proses Persiapan Dan Pengelasan

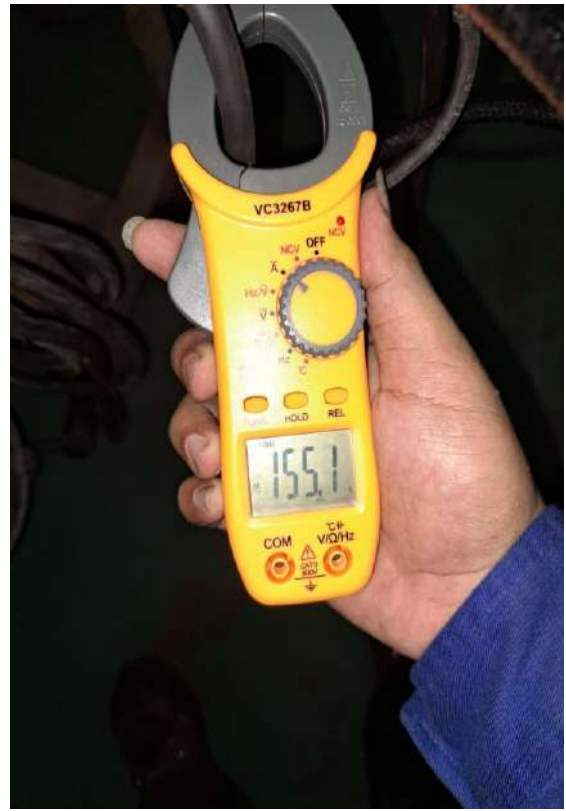
Lampiran B. 1 Persiapan Material Alumunium 6061-T6



Lampiran B. 2 *Flow Rate*



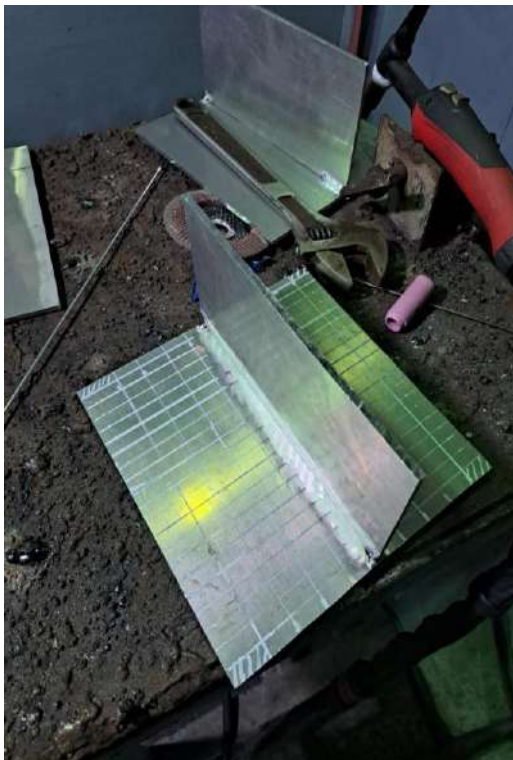
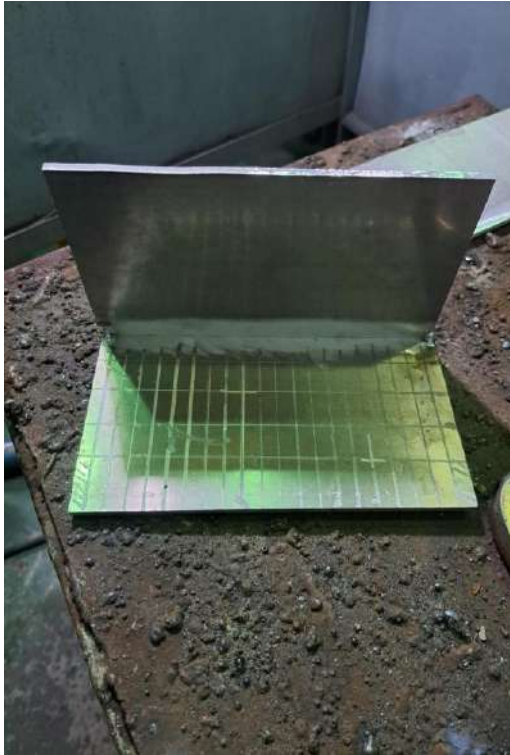
Lampiran B. 3 Ampere dan Voltase Pengelasan



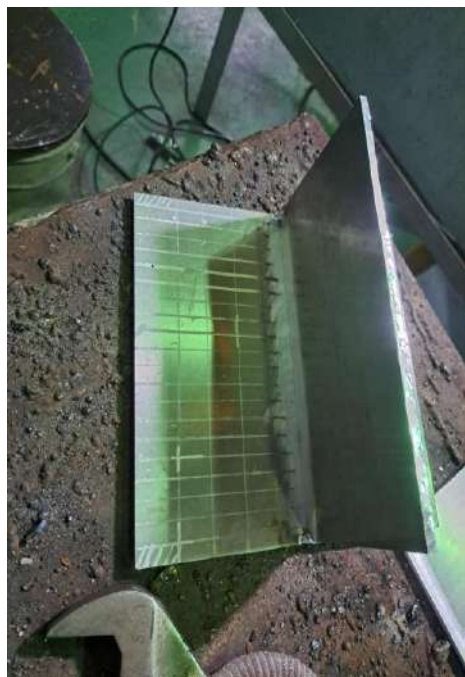
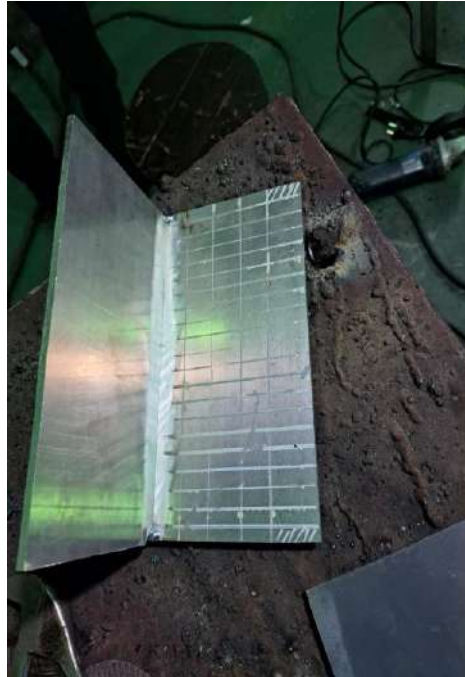
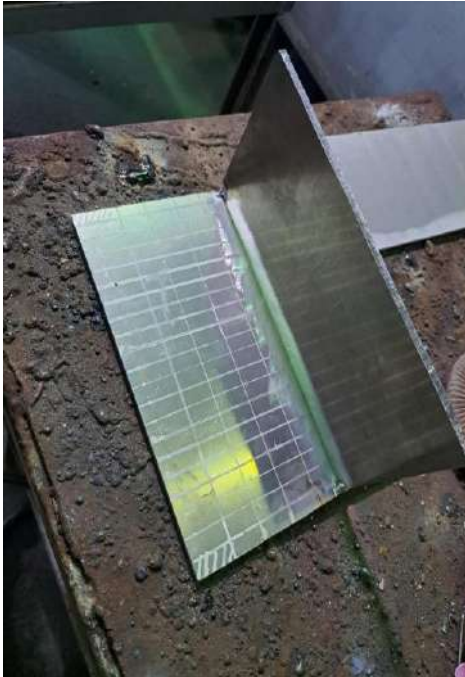
Lampiran B. 4 Proses Pengelasan



Lampiran B. 5 *Preparation Material*



Lampiran B. 6 Preparation Material



Lampiran C Dokumentasi Hasil Pengujian

Lampiran C. 1 Dokumentasi Pengujian Distorsi



Lampiran C. 2 Dokumentasi Spesimen Uji Metalografi Dan *Hardness*



Lampiran D *Stopwatch* pengelasan

Lampiran D. 1 *Stopwatch* pengelasan

01 : 59 , 35

01 : 50 , 05

(AA) Tanpa *treatment* Travel speed 100-110 mm/menit

02 : 03 , 19

02 : 07 , 73

01 : 39 , 93

01 : 45 , 22

(A1) *Alternating side* Travel speed 95-100 mm/menit

(A2) *Alternating side* Travel speed 115-120 mm/menit

02 : 00 , 67

02 : 09 , 94

01 : 45 , 76

01 : 41 , 54

(B1) *Center to end* Travel speed 95-100 mm/menit

(B2) *Center to end* Travel speed 115-120 mm/menit

02 : 10 , 36

01 : 42 , 88

(C1) *Intermitten* Travel speed 95-100 mm/menit

(C2) *Intermitten* Travel speed 115-120 mm/menit

Lampiran E *Report Pengujian Visual*

Lampiran E. 1 *Visual Report*

VISUAL INSPECTION PLATE REPORT

WELD FACE

Name: RAYNALDO FF Signature: _____ Test piece identification: AA KANAN
Code/Specification used: AWS D1.1 2025 Welding process: GTAW Joint type: -
Welding position: 1 F Length and Thickness of plate: 200 x 200 x 4 mm Date: 21-04-2026

M E A S U R E F R O M T H I S D A T U M E D G E	→	L	R
	→		
Notes: excess weld metal: <u>4.7 mm</u> Linear misalignment: <u>-</u> Toe blend: <u>Poor</u> Weld width: <u>9.2 mm</u>			

VISUAL INSPECTION PLATE REPORT

WELD FACE

Name: RAYNALDO FF Signature: _____ Test piece identification: AA KIRI
Code/Specification used: AWS D1.1 2025 Welding process: GTAW Joint type: -
Welding position: 1 F Length and Thickness of plate: 200 x 200 x 4 mm Date: 21-04-2026

M E A S U R E F R O M T H I S D A T U M E D G E	→	L	R
	→		
Notes: excess weld metal: <u>4.8 mm</u> Linear misalignment: <u>-</u> Toe blend: <u>Poor</u> Weld width: <u>9.7 mm</u>			

VISUAL INSPECTION PLATE REPORT

WELD FACE

Name: RAYNALDO FF Signature: _____ Test piece identification: A1 KANAN
Code/Specification used: AWS D1.1 2025 Welding process: GTAW Joint type: -
Welding position: 1 F Length and Thickness of plate: 200 x 200 x 4 mm Date: 21-04-2026

M E A S U R E F R O M T H I S D A T U M E D G E	→	L	R
	→		
Notes: excess weld metal: <u>4.5 mm</u> Linear misalignment: <u>-</u> Toe blend: <u>Poor</u> Weld width: <u>9.1 mm</u>			

VISUAL INSPECTION PLATE REPORT

WELD FACE

Name: RAYNALDO FF Signature: _____ Test piece identification: A1 KIRI
Code/Specification used: AWS D1.1 2025 Welding process: GTAW Joint type: -
Welding position: 1 F Length and Thickness of plate: 200 x 200 x 4 mm Date: 21-04-2026

M E A S U R E F R O M T H I S D A T U M E D G E	→	L	R
	→		
Notes: excess weld metal: <u>4.3 mm</u> Linear misalignment: <u>-</u> Toe blend: <u>Poor</u> Weld width: <u>8.6 mm</u>			

VISUAL INSPECTION PLATE REPORT

WELD FACE

Name: RAYNALDO FF Signature: _____ Test piece identification: B1 KANAN
Code/Specification used: AWS D1.1 2025 Welding process: GTAW Joint type: -
Welding position: 1 F Length and Thickness of plate: 200 x 200 x 4 mm Date: 21-04-2026

M E A S U R E F R O M T H I S D A T U M E D G E	→	L	R
	→		
Notes: excess weld metal: <u>4.2 mm</u> Linear misalignment: <u>-</u> Toe blend: <u>Poor</u> Weld width: <u>8.5 mm</u>			

VISUAL INSPECTION PLATE REPORT

WELD FACE

Name: RAYNALDO FF Signature: _____ Test piece identification: B1 KIRI
Code/Specification used: AWS D1.1 2025 Welding process: GTAW Joint type: -
Welding position: 1 F Length and Thickness of plate: 200 x 200 x 4 mm Date: 21-04-2026

M E A S U R E F R O M T H I S D A T U M E D G E	→	L	R
	→		
Notes: excess weld metal: <u>3.9 mm</u> Linear misalignment: <u>-</u> Toe blend: <u>Poor</u> Weld width: <u>7.9 mm</u>			

VISUAL INSPECTION PLATE REPORT

WELD FACE

Name: RAYNALDO FF Signature: _____ Test piece identification: B2 KANAN
 Code/Specification used: AWS D1.1 2025 Welding process: GTAW Joint type: -
 Welding position: 1 F Length and Thickness of plate: 200 x 200 x 4 mm Date: 21-04-2026

M E A S U R E F R O M T H I S D A T U M E D G E	→	L	R
Notes: excess weld metal: <u>4.3 mm</u> Linear misalignment: <u>-</u> Toe blend: <u>Poor</u> Weld width: <u>8.6 mm</u>			

VISUAL INSPECTION PLATE REPORT

WELD FACE

Name: RAYNALDO FF Signature: _____ Test piece identification: B2 KIRI
 Code/Specification used: AWS D1.1 2025 Welding process: GTAW Joint type: -
 Welding position: 1 F Length and Thickness of plate: 200 x 200 x 4 mm Date: 21-04-2026

M E A S U R E F R O M T H I S D A T U M E D G E	→	L	R
Notes: excess weld metal: <u>3.8 mm</u> Linear misalignment: <u>-</u> Toe blend: <u>Poor</u> Weld width: <u>7.7 mm</u>			

VISUAL INSPECTION PLATE REPORT

WELD FACE

Name: RAYNALDO FF Signature: _____ Test piece identification: C1 KIRI
Code/Specification used: AWS D1.1 2025 Welding process: GTAW Joint type: -
Welding position: 1 F Length and Thickness of plate: 200 x 200 x 4 mm Date: 21-04-2026

M E A S U R E F R O M T H I S D A T U M E D G E	→	L	R
	→		
	→		
Notes: excess weld metal: <u>3.6 mm</u> Linear misalignment: <u>-</u> Toe blend: <u>Poor</u> Weld width: <u>7.6 mm</u>			

VISUAL INSPECTION PLATE REPORT

WELD FACE

Name: RAYNALDO FF Signature: _____ Test piece identification: C2 KIRI
Code/Specification used: AWS D1.1 2025 Welding process: GTAW Joint type: -
Welding position: 1 F Length and Thickness of plate: 200 x 200 x 4 mm Date: 21-04-2026

M E A S U R E F R O M T H I S D A T U M E D G E	→	L	R
	→		
	→		
Notes: excess weld metal: <u>3.5 mm</u> Linear misalignment: <u>-</u> Toe blend: <u>Poor</u> Weld width: <u>7.2 mm</u>			

BIODATA**1. BASIC DATA**

Raynaldo Fajri Firmansyah

Place, Date of Birth : Pacitan, 17 Desember 2003	Nick Name : Aldo	Gender : Male
Address : JERUK, RT 02/03,Bandar,Pacitan	Nationality : Indonesia	
Religion : Moslem	Hobby : Fishing	
E-mail : Raynaldofirmansyah7@gmail.com	Mobile : 085971889992	

2. FORMAL EDUCATION

Education Level	Year	Institution Name	Field Of Study
Polytechnic	2022 – 2026	Shipbuilding State Polytechnic of Surabaya (SHIP – PPNS)	Welding Engineering
Senior High School	2019 – 2022	SMK PGRI 2 PONOOROGO	Welding Technique
Junior High School	2016 – 2019	SMPN 3 BANDAR	-
Elementary School	2010 - 2016	SDN 3 JERUK	-